

## РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЛАСТОВОЙ ДЕГАЗАЦИИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ И БЕЗОПАСНОЙ ОТРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Проанализирован представительный фактический материал по апробации и внедрению на шахте им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс» новой усовершенствованной технологии подземного гидроразрыва, осуществляемого через скважины, пробуренные из подготовительных выработок. Установлено, что в зонах подземного гидроразрыва в условиях очистного забоя 24-58 среднее значение относительной газообильности очистного забоя снижено на 30%, добыча в среднем повышена на 20 %, а технологические остановки, связанные с «газовым барьером», уменьшились на 40%.

При осуществлении предварительной дегазации угольного пласта из подземных скважин гидроразрыв (гидрорасчленение) последнего целесообразно проводить с применением шахтной маслостанции для закачки рабочей жидкости с максимально возможным темпом 10 л/с. При заблаговременной дегазации угольного пласта (ЗДП) с использованием его гидрорасчленения через скважины с поверхности целесообразно вести процесс закачки с максимально возможным для насосной техники темпом закачки. В условиях первого натурального эксперимента по применению ЗДП на выемочном участке 24-63 (24-64) поля шахты им. С.М. Кирова закачку целесообразно вести с темпом до 100 л/с. Необходимым условием достижения высокой эффективности способа является обеспечение плавного выхода на режим гидрорасчленения и специальными мероприятиями по повышению фазовой проницаемости угольного пласта для газа.

Ключевые слова: неразгруженные угольные пласты, предварительная пластовая дегазация, заблаговременная дегазация скважинами с поверхности, новая усовершенствованная технология гидроразрыва угольного пласта.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-13-22

Дегазационная подготовка газоносных угольных пластов к безопасной и эффективной отработке является весьма актуальной научно-практической задачей, несмотря на то, что вклад разрабатываемого угольного пласта в структуру газовыделения в очистной забой во многих горнотехнических условиях является достаточно скромным и может не превышать 10÷20%, однако несет в себе серьезные ограничения

на предельно допустимую нагрузку на очистной забой по газовому фактору.

В мировой горной практике применяется более нескольких десятков технологических схем дегазации. Наиболее широко и эффективно применяются способы текущей дегазации, обеспечивающие извлечение метана из разгруженного от горного давления массива. Их эффективность объективно составляет 70÷80 и более процентов. Высокая эффективность обусловлена тем, что из углегазонасного массива извлекается свободный газ. Имеющиеся в этой области проблемы не носят принципиального научного характера и эффективность этих способов в существенной степени обеспечивается грамотными инженерными решениями.

При значительном росте нагрузок на очистные забои и постоянном повышении природной газоносности разрабатываемых пластов весьма важным является разработка эффективной технологии подземной пластовой дегазации (ППД), так как ее эффективность на уровне 10÷15%, подтвержденная практикой применения на современных глубинах разработки, не может снять существенных ограничений на нагрузки на очистные забои по газовому фактору [1]. Низкая эффективность способов пластовой дегазации носит объективный характер, связанный с тем, что до 95–98% метана угольных пластов находится в связанном (сорбированном) состоянии и его десорбция требует существенных энергетических затрат, что подтверждается как зарубежными [2–5], так и отечественными исследованиями [6,7], а также крайне малой газопроницаемостью угольного пласта на уровне сотых и тысячных долей миллидарси [6].

Принципиально важный вопрос обеспечения эффективного извлечения метана из неразгруженного от горного давления пласта заключается в необходимости существенного увеличения его газопроницаемости. Это может достигаться созданием или раскрытием в угольных пластах систем трещин, ориентированных к дегазационным пластовым скважинам. В тех условиях, когда заблаговременная дегазация с различными активными воздействиями, осуществляемая скважинами с поверхности, не может применяться по объективным и известным причинам [6,8,9], возможным эффективным способом существенного повышения газопроницаемости угольного пласта может являться его гидроразрыв (гидрорасчленение), осуществляемый из подземных выработок на стадии проведения предварительной пластовой дегазации.

Имеется достаточно представительная информация о шахтных экспериментальных работах, проведенных ранее в Карагандинском и Донецком угольных бассейнах [10], по осуществлению гидроразрыва угольных пластов из подготовительных выработок. Работы показали возможность существенного повышения эффективности пластовой

дегазации с использованием гидроразрыва угольных пластов, но применяемая технология имела ряд ограничений и недостатков, отчего и не получила дальнейшего развития.

Усовершенствованная нами по ряду основных параметров технология подземного гидроразрыва [11] (здесь и далее — технология ПодзГРП) из подготовительных пластовых выработок была испытана и исследована на шахте им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс» в 2015—18 гг. в ходе поисковых экспериментальных работ, сущность которых заключалась в нагнетании рабочей жидкости в пласт под большим давлением (до 30 МПа) в установленном режиме для создания сети техногенных трещин с целью улучшения газопроницаемости дегазируемого угольного пласта.

Основное преимущество разработанного способа ПодзГРП перед аналогами является простота и надежность технической реализации. При его применении не требуется использование специального оборудования (пакеров, герметизаторов и других устройств). Закачка рабочей жидкости гидроразрыва велась с использованием маслостанции с темпом подачи рабочей жидкости до 10 л/с и сооружаемого надежного, разработанной нами конструкции, герметизатора установленной для конкретных горно-геологических и горнотехнических условий длины. Герметизация скважины проводилась специальным составом («Шахтиклея») по усовершенствованной технологии. После герметизации скважины разбуривались на определенное «Программой и методикой проведения работ» значение от 2 до 110 метров штангами диаметром 40 мм. Осуществлялся начальный замер дебита газовой смеси из скважин, после чего производился гидроразрыв (гидрорасчленение) пласта в соответствии с утвержденной технической документацией.

После завершения монтажа газопровода скважины были подключены к последнему и осуществлялась оценка эффективности проведенных работ по динамике дебитов метана и суммарному съему газа за весь период предварительной пластовой дегазации как непосредственно из скважины гидроразрыва, так и из стандартных пластовых скважин ППД, пробуренных на подготавливаемом выемочном участке после гидроразрыва угольного пласта.

В настоящее время экспериментальные работы по реализации технологии ПодзГРП проведены на выемочных участках 24—58, 24—59 и 24—60 шахты им. С.М. Кирова. На первом этапе поисковых работ был осуществлен подземный гидроразрыв пласта «Болдыревский» (пласт 24) из 18 скважин, пробуренных из вентиляционной печи 24—58 (скважины №№ 1—6), конвейерной печи 24—58 (скважины №№ 7—12) и вентиляционной печи 24—59 (скважины №№ 13—18). Основные научно-исследовательские работы по оценке эффективности разработанной технологии были проведены на выемочном поле 24—58, где имели место зоны комплексной дегазации (ППД и ПодзГРП) и зоны

сравнения, где реализовывалась предварительная пластовая дегазация без предварительного гидроразрыва пласта.

Характер выхода на режим, установленный по графикам изменения давления во время закачки рабочей жидкости в пласт в ходе проведения ПодзГРП на скважинах №№ 1–18, позволил сделать вывод об имевшем место характере режима закачки рабочей жидкости в угольный пласт «Болдыревский», который был идентифицирован нами в общем случае как гидрорасчленение с поэтапными циклическими гидроразрывами. Вывод был подтвержден после проведения второго этапа поисковых работ на скважинах ПодзГРП №№ 59–1 ÷ 59–10 на выемочном участке 24–59.

Средний дебит скважин ППД вне зон гидроразрыва на пласте 24 находится на уровне 5÷10 л/мин (при длине скважин около 150 метров). Диапазон дебитов из более коротких скважин ПодзГРП изменялся на первом этапе обследования по скважинам ПодзГРП №№1–18 от 5 до 640 л/мин. Это подтвердило достигнутый эффект по раскрытию новых трещин в угольном пласте и существенном образовании дополнительных поверхностей обнажения в нем.

Увеличение дебита непосредственно из скважин гидроразрыва и его существенные значения фиксировались в период в среднем до 50 ÷ 100 суток, затем происходило его падение, что связано, с нашей точки зрения, с истощением газового коллектора в достаточно ограниченной зоне гидроразрыва (по нашим оценкам радиус гидроразрыва был на уровне 25 ÷ 30 метров) и возвратом дебитов к значениям, характерным для неразгруженных зон угольного пласта.

По предварительным соображениям, основной эффект по извлечению метана на выемочном участке следует ожидать не непосредственно из скважин ПодзГРП, а из стандартных скважин ППД, пробуренных и функционирующих в зонах гидроразрыва в условиях существенно повышенной газопроницаемости пласта. Было установлено [12] (см. рис. 1, где по оси абсцисс отложены порядковые номера замеров, которые проводились 2 раза в неделю), что дебиты метана из 30 скважин ППД в зонах гидроразрыва (синяя кривая — зона оценки эффективности технологии ПодзГРП) за 6,5 месяцев эксплуатации в 2÷3 раза выше, чем на таком же участке вне их в зоне сравнения (красная кривая — 30 скважин ППД вне зон влияния скважин гидроразрыва).

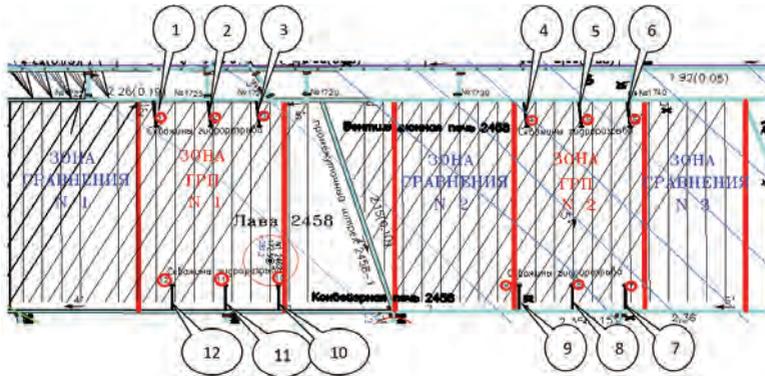
Суммарный съем метана в сравниваемой зоне составил за этот период 27 тысяч кубических метров метана, в то время как в зоне ПодзГРП – более 109 тысяч.

Были проведены исследования по снижению газообильности лавы и сокращения простоев добычного оборудования по газовому фактору. Основная оценка эффективности технологии ПодзГРП осуществлялась в процессе ведения очистных работ лавой 24–58. На рис. 2 представлено расположение скважин ПодзГРП №№ 1–12 на этом выемочном участке

и выделены зоны ответственности разработанной технологии ПодзГРП (выделено на рисунке красным цветом) и зоны сравнения, где гидро-разрыв перед ППД не применялся (выделено на рисунке синим цветом).



**Рис. 1. Дебиты метана в скважины ППД в зоне ПодзГРП и в зоне сравнения**



**Рис. 2. Расположение скважин ПодзГРП на выемочном участке 24—58**

Сравнение параметров работы очистного забоя в зоне ГРП и зоне сравнения приведено в таблице.

На рис. 3, 4 в графическом виде представлены фактические данные по оценке эффективности исследуемой технологии ПодзГРП, в частности, по снижению относительной газообильности лавы и технологических остановок, связанных с «газовым барьером».

В зоне ответственности технологии ПодзГРП каких-либо негативных моментов по устойчивости кровли в подготовительных и очистных выработках отмечено не было.

Установлено, что среднее значение относительной газообильности очистного забоя снижено на 30%, добыча в среднем повышена на 20 %, а продолжительность остановок добычной техники по фактору проветривания уменьшились более, чем на 40%.

### Сравнение параметров работы очистного забоя в зоне ГРП и зоне сравнения

Показатели	Ед. изм.	Значения	Зона сравнения (№1+№2+№3)	Зона ГРП (№1+№2)	Δ, %
Относительная газообильность	м <sup>3</sup> /т	Мах	1,37	0,84	39
		Среднее	1,14	0,80	30
Технологические остановки, связанные с «газовым барьером» за сутки	мин/сут	Мах	129,9	71,52	45
		Среднее	122,39	71,45	42
Абсолютная газообильность	м <sup>3</sup> /мин	Мах	8,88	7,81	12
		Среднее	8,29	7,29	12
Добыча суточная	т/сут	Мах	13007,14	13350	3
		Среднее	10747,16	13037,07	21



**Рис. 3. Эффективность технологии ПодзГРП по фактору технологических перерывов по газовому фактору**



**Рис. 4. Эффективность технологии ПодзГРП по фактору относительной газообильности очистного забоя**

С учетом затрат на реализацию технологии на выемочном участке 24–58 годовой экономической эффект оценивается более 74 млн. руб., что позволяет положительно оценивать перспективы дальнейшего практического применения разработанного и запатентованного способа.

Представительность выполненных исследований новой технологии ПодзГРП подтверждается перечнем объектов проведения шахтных экспериментальных работ на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» за последний период:

*Шахта им. Кирова, пл. Болдыревский*

- Участок 24–58 – 12 скв. ГРП
- Участок 24–59 – 16 скв. ГРП
- Участок 24–60 – 49 скв. ГРП
- Участок 24–62 – 17 скв. ГРП

*Шахта им. Кирова, пл. Подполневский – 22 скв. ГРП*

*Шахта «Полысаевская», пл. Бреевский – 29 скв. ГРП*

ВСЕГО 145 скв. (по состоянию на август 2018).

Полученные положительные результаты по повышению эффективности пластовой дегазации в зонах гидроразрыва (гидрорасчленения) послужили основанием для развертывания более масштабных дегазационных работ на выемочных участках 24–63 и 24–64, где планируется в 2018–19 гг. реализовать технологию заблаговременной дегазации скважинами, пробуренными с поверхности с гидрорасчленением угольного пласта «Болдыревский». Основные технологические операции планируются провести в следующей последовательности. Гидрорасчленение пласта «Болдыревский» насосными агрегатами с темпом не ниже 80÷100 л/с и объемом рабочей жидкости (воды) до 500 м<sup>3</sup>. Выдержка воды в пласте 2÷4 месяца для замещения метана водой в сорбционном объеме. Спуск воды в конвейерную печь 24–63 (24–64) для повышения фазовой проницаемости угольного пласта для газа. Эксплуатация трех скважин ГРП (экспериментальный участок работ) по извлечению метана на поверхность в режиме самоистечения. При необходимости, то же самое с применением вакуумных насосов.

Бурение подземных скважин пластовой дегазации (ППД) и их эксплуатация по извлечению метана из зон влияния скважин ГРП. За 2÷3 месяца до подхода лавы скважины ГРП переводятся на режим гидратации, при котором идет периодическая доливка воды в пласт с целью его увлажнения до величины 20 л/т для повышения остаточной газоносности пласта за счет блокировки метана в мельчайших порах и трещинах.

Оценка эффективности предложенной комплексной пластовой дегазации позволит определить область применения технологии и перспективы их дальнейшего внедрения.

Авторы статьи выражают особую признательность сотрудникам **АО «СУЭК-Кузбасс»**: Мешкову А.А., Понизову А.В., Гаврилову В.И., Сметанину В.С., Семькину Ю.А., Хаутиеву А. М-Б, Демину С. Л., Комиссарову И.А.,

Курманову И.А., Малафееву А.В., Леташкову А.Б., Квитко Е.А., Чалдину И.В., сотрудникам **Горного института НИТУ «МИСиС»** Коликову К.С., Пашенкову П.Н., Макарову В.А. и другим, принимавшим активное участие в подготовке и проведении шахтных испытаний.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сластунов С.В., Ермак Г.П. Обоснование выбора и эффективная реализация способов дегазации при интенсивной отработке газоносных угольных пластов – ключевой вопрос обеспечения метанобезопасности угольных шахт// Журнал «Уголь», 2013. – № 1. – С.21–24.

2. Lei Yang. A mixed element method for the desorption-diffusion-seepage model of gas flow in deformable coalbed methane reservoirs // Mathematical Problems in Engineering. 2014. Vol. 2014. P. 1–10. URL: <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2014/735931> (дата обращения: 27.04.2017).

3. Baisheng Nie, Xianfeng Liu, Shaofei Yuan, Boqing Ge, Wenjie Jia et al. Sorption characteristics of methane among various rank coals: impact of moisture // Adsorption, 2016. Vol. 22.No. 3. P. 315–325.

4. Haijun Guo, Yuanping Cheng, Liang Wang, Shouqing Lu, Kan Jin. Experimental study on the effect of moisture on low-rank coal adsorption characteristics // Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015. Vol. 24. P. 245–251.

5. Campbell Q.P., Barnardo M.D., Bunt J.R. Moisture adsorption and desorption characteristics of some South African coals // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2013. Vol. 113. P. 803–807.

6. Ножкин Н.В. Заблаговременная дегазация угольных месторождений/ М.: «Недра», 1979. – 271 с.

7. Пашенков П.Н., Хаутиев А.М.Б., Мазаник Е.В. Методика и результаты определения параметров сорбции угля в лабораторных условиях// Горный информационно-аналитический бюллетень, специальный выпуск 32 «Безопасность и экология горного производства», 2018. – №6. – С.54–60.

8. Садов А.П. Совершенствование заблаговременной пластовой дегазации на базе гидродинамического воздействия// Депонированная рукопись в издательстве «Горная книга» (справка № 1082/8 от 17 июня 2016 г., ГИАБ № 8, 2016).

9. Коршунов Г.И., Серегин А.С., Садов А.П., Комиссаров И.А. Дегазация угольных пластов на основе циклического гидродинамического воздействия// Горный информационно-аналитический бюллетень, отдельный выпуск №3 «Промышленная безопасность», 2014. – С.29–35.

10. Калиев С.Г. Преображенская Е.И. и др. Управление газовой выделением на угольных шахтах/ М.: «Недра», 1980. – 196 с.

11. Сластунов С.В., Мазаник Е.В., Садов А.П. Новые технологические решения в области предварительной дегазации на основе активных воздействий на угольный пласт из подземных выработок// Горный информационно-аналитический бюллетень, Труды международного научного симпозиума «Неделя-Горняка – 2016», Специальный выпуск 1. – 2016. – С. 107–117.

12. Сластунов С.В., Ютяев Е.П., Мазаник Е.В., Садов А.П., Понизов А.В. Шахтные испытания усовершенствованной технологии подземной пластовой дегазации с использованием гидроразрыва// «Уголь», 2016. – № 11. – С. 32–37. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Сластунов Сергей Викторович* — доктор технических наук, профессор, горный институт национального исследовательского технологического университета «МИСиС» Минобрнауки РФ, Москва, РФ, 119499, Ленинский проспект, 6, e-mail: [slastunovsv@mail.ru](mailto:slastunovsv@mail.ru).

*Ютяев Евгений Петрович*<sup>1</sup> — кандидат технических наук, генеральный директор,

*Мазаник Евгений Васильевич*<sup>1</sup> — кандидат технических наук, директор по аэрологической безопасности подземных горных работ,

*Садов Анатолий Петрович*<sup>1</sup> — кандидат технических наук, директор управления дегазации и утилизации метана,

<sup>1</sup> АО «СУЭК-Кузбасс», 652500, г. Ленинск-Кузнецкий, ул. Васильева 1, РФ.

---

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 13-22.

**Slastunov S.V., Yutyayev E.P., Mazanik E.V., Sadov A.P.**

### **Development and improvement of technology of reservoir degassing for effective and safe mining of coal seams**

The article analyzes the representative factual material on approbation and implementation at the Kirov's mine JSC «SUEK-Kuzbass» new improved technology of underground fracturing, carried out through wells drilled from the preparatory workings. It is established that in the zones of underground hydraulic fracturing in the conditions of the stope 24—58, the average value of the relative gas content of the extraction face was reduced by 30%, the average production was increased by 20%, and the technological stops associated with the “gas barrier” decreased by 40%. When preliminary degassing of a coal seam from underground wells is implementing, the hydraulic fracturing (hydraulic disintegration) of the latter is expediently carried out using a mine oil station for pumping working fluid with the maximum possible rate of 10 liters / s. In the case of early degassing of the coal seam using its hydraulic fracturing through the wells from the surface, it is advisable to conduct the injection process with the maximum possible pumping rate for the pump technology. In the conditions of the first full-scale experiment on the application of the early degassing of the coal seam at the excavation site 24—63 (24—64) Kirov's mine, injection is expedient to conduct at a rate of up to 100 l / s. A prerequisite for achieving high efficiency of the method is to ensure a smooth access to the hydrodynamic regime and special measures to increase the phase permeability of the coal seam for gas.

Key words: unloaded coal seams, preliminary formation degassing, advance degassing by wells from the surface, new improved technology of coal seam hydraulic fracturing.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-13-22

## AUTHORS

*Slastunov S.V., professor.,* doctor of Technical Sciences, Mining Institute of NUST «MISiS», Moscow, Russia, 119499, Leninsky Prospekt, 6, [slastunovsv@mail.ru](mailto:slastunovsv@mail.ru),  
*Yutyayev E.P., Ph.D.,* CEO of JSC «SUEK-Kuzbass», Russia,

Mazanik E.V., Ph.D., Director for Aerological Safety of Underground Mining JSC «SUEK-Kuzbass», Russia,  
Sadov A.P., Ph.D., director of degassing and methane utilization department JSC «SUEK-Kuzbass», Russia.

## REFERENCES

1. Slastunov S.V., Ermak G.P. *Obosnovanie vybora i effektivnaya realizaciya sposobov degazacii pri intensivnoj otrabotke gazonosnyh ugol'nyh plastov klyuchevoj vopros obespecheniya metanobezopasnosti ugol'nyh shaht* [Rationale for the choice and effective implementation of degassing methods in the intensive development of gas bearing coal seams—a key issue of ensuring the methane safety of coal mines]. *Zhurnal «Ugol'»*, 2013. no 1. pp. 21–24.
2. Lei Yang. *A mixed element method for the desorption-diffusion-seepage model of gas flow in deformable coalbed methane reservoirs*. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014. Vol. 2014. P. 1–10. URL: <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2014/735931> (data obrashcheniya: 27.04.2017).
3. Baisheng Nie, Xianfeng Liu, Shaofei Yuan, Boqing Ge, Wenjie Jia et al. *Sorption characteristics of methane among various rank coals: impact of moisture*. *Adsorption*, 2016. Vol. 22.No. 3. P. 315–325.
4. Haijun Guo, Yuanping Cheng, Liang Wang, Shouqing Lu, Kan Jin. *Experimental study on the effect of moisture on low-rank coal adsorption characteristics*. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015. Vol. 24. P. 245–251.
5. Campbell Q.P., Barnardo M.D., Bunt J.R. *Moisture adsorption and desorption characteristics of some South African coals*. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2013. Vol. 113. P. 803–807.
6. Nozhkin N.V. *Zablagovremennaya degazaciya ugol'nyh mestorozhdenij* [Advance degassing of coal deposits]. Moscow: «Nedra», 1979. 271 p.
7. Pashchenkov P.N., Hautiev A.M.B., Mazanik E.V. *Metodika i rezul'taty opredeleniya parametrov sorbcii uglja v laboratornyh usloviyah* [Methodology and results you determine the parameters of coal sorption in the laboratory]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*, special'nyj vypusk 32 «Bezopasnost' i ekologiya gornogo proizvodstva», 2018. no 6. pp.54–60.
8. Sadov A.P. *Sovershenstvovanie zablagovremennoj plastovoj degaza-cii na baze gidrodinamicheskogo vozdejstviya* [Improvement of the early formation of degasation on the basis of hydrodynamic influence]. *Deponirovannaya rukopis' v izdatel'stve «Gornaya kniga»* (spravka no 1082/8 ot 17 iyunya 2016, GIAB no 8, 2016).
9. Korshunov G.I., Seregin A.S., Sadov A.P., Komissarov I.A. *Degazaciya ugol'nyh plastov na osnove ciklicheskogo gidrodinamicheskogo vozdejstviya* [Degasification of the coal seams on the basis of cyclical hydrodynamic impact]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*, ot del'nyj vypusk no 3 «Promyshlennaya bezopasnost'», 2014. pp. 29–35.
10. Kaliev S.G. *Preobrazhenskaya E.I. i dr. Upravlenie gazovydeleniem na ugol'nyh shahtah* [Control of gas emission in coal mines]. Moscow: «Nedra», 1980. 196 p.
11. Slastunov S.V., Mazanik E.V., Sadov A.P. *Novye tekhnologicheskie resheniya v oblasti predvaritel'noj degazacii na osnove aktivnyh vozdejstvij na ugol'nyj plast iz podzemnyh vyrabotok* [New technological solutions in the field of preliminary degassing on the basis of the coal bed of underground workings]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*, *Trudy mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma «Nedelya-Gornyaka 2016»*, Special'nyj vypusk 1. 2016. pp. 107–117.
12. Slastunov S.V., Yutyaev E.P., Mazanik E.V., Sadov A.P., Ponizov A.V. *Shahtnye ispytaniya usovershenstvovannoj tekhnologii podzemnoj plastovoj degazacii s ispol'zovaniem gidrorazryva* [Mine tests of the advanced technology of underground reservoir degassing with the use of hydraulic fracturing]. «Ugol'», 2016. no 11. pp. 32–37.

Е.В. Мазаник, А. М-Б. Хаутиев,  
И.А. Комиссаров, С.В. Сластунов

## ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОДЗЕМНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ НА ОСНОВЕ ИХ ГИДРОРАЗРЫВА

Проанализирован представительный фактический материал по апробации и внедрению на шахте им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс» новой усовершенствованной технологии подземного гидроразрыва, осуществляемого через скважины, пробуренные из подготовительных выработок. Установлено, что в зонах подземного гидроразрыва в условиях очистного забоя 24–58 среднее значение относительной газообильности очистного забоя снижено на 30%, добыча в среднем повышена на 20 %, а технологические остановки, связанные с «газовым барьером», уменьшились на 40%. При осуществлении предварительной дегазации угольного пласта из подземных скважин гидроразрыв (гидрорасчленение) последнего целесообразно проводить через скважины с эффективной длиной в пределах 35–70 метров. Рациональный объем закачки рабочей жидкости составляет 50–200 м<sup>3</sup>. Выполнена предварительная оценка технико - экономической эффективности усовершенствованной технологии предварительной дегазации разрабатываемого угольного пласта путем его гидродинамической обработки.

Ключевые слова: неразгруженные угольные пласты, предварительная пластовая дегазация, новая технология гидроразрыва угольного пласта, рациональные и эффективные параметры комплексной технологии.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-23-32

Эффективность типовой технологии подземной пластовой дегазации, осуществляемой одиночными или пересекающимися скважинами, на практике ограничивается величиной, как правило, не более 15–20%, что подтверждает представительный многолетний опыт работ в Карагандинском бассейне и Кузбассе [1].

К настоящему времени специалистами АО «СУЭК-Кузбасс» и Горного института НИТУ «МИСиС» обоснована и разработана усовершенствованная комплексная технология предварительной дегазации угольного пласта через скважины, пробуренные из подготовительных выработок, с использованием гидродинамического воздействия [2–4],

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 23–32.

© Е.В. Мазаник, А.М-Б. Хаутиев, И.А. Комиссаров, С.В. Сластунов, 2018.

а также установлены режим и рациональные параметры его реализации, обеспечивающие повышение эффективности дегазации пласта на базе увеличения его газопроницаемости и газоотдачи в зонах подземного гидроразрыва.

Выявленный и обоснованный механизм снижения газообильности очистной выработки в процессе осуществления комплексной пластовой дегазации, проводимой из подготовительных выработок, предусматривает:

- снижение газоносности угольного пласта и газовыделения из него при его отработке вследствие предварительного интенсивного извлечения метана из искусственно созданного в процессе гидроразрыва газопроницаемого техногенного коллектора, а также замещения метана водой в сорбционном объеме разрабатываемого угольного пласта;

- повышение остаточной газоносности угольного пласта и, как следствие, снижение газовыделения из него при его разрушении вследствие блокирования метана в мельчайших порах и трещинах угольного пласта рабочей жидкостью, проникающей туда за счет капиллярных сил, особенно в условиях применения нисходящих дегазационных скважин;

- извлечение метана из угольного пласта в пределах выемочного участка подготовительной выработкой, из которой пробурены скважины гидроразрыва, вследствие интенсивного притока в нее метана по созданному гидродинамическим воздействием высоко проницаемому техногенному коллектору из разрабатываемого угольного пласта, в котором метан находится под существенным пластовым давлением.

Обоснованы эффективные технологические параметры подземного гидроразрыва, предусматривающие следующее:

- объем рабочей жидкости определяется по фактору заполнения ею фильтрующего объема угольного пласта в зоне гидроразрыва, а также учитывает дополнительный фактор блокирования части метана в мельчайших порах и трещинах разрабатываемого пласта;

- ожидаемое давление гидроразрыва угольного пласта рассчитывается исходя из прочностных характеристик и глубины залегания угольного пласта, а также коэффициента, учитывающего необходимое превышение забойного давления над давлением разрыва.

- прогнозный радиус зоны гидродинамической обработки при различных режимах нагнетания в пласт рабочей жидкости и эффективность пластовой дегазации определяются на основе разработанной аналитической модели двухфазной фильтрации текучих в дегазируемых угольных пластах [5].

Гидродинамическое воздействие на неразгруженный от горного давления угольный пласт при нагнетании в последний рабочей жидкости с темпом, превышающим естественную приемистость пласта, реализуется в общем случае в режиме гидравлического расчленения угольного пласта с циклическими микрогидроразрывами.

На объектах исследования (выемочные участки шахты им. С.М. Кирова 24–58, 24–59 и 24–60) проводилось экспериментальное определение основных свойств и характеристик углегазоносного массива (в первую очередь, пластового давления, газопроницаемости, сорбционных характеристик) с использованием и учетом известных методов [6–9] и специально разработанных методик [10, 11]. Установлено, что на выемочном участке 24–58 на глубине залегания пласта Болдыревский от 425 до 466 метров фактическая величина пластового (газового) давления в неразгруженном от горного давления пласте составляет  $32 \div 33$  бар.

Отмечено повышение в  $2 \div 4$  раза дебитов метана и суммарного съема последнего из скважин подземной пластовой дегазации (ППД) в зонах влияния скважин ПодзГРП. Подтверждено отсутствие негативной или критической информации по состоянию углегазоносного массива (в частности, по состоянию кровли) в зонах подземного гидроразрыва.

Установлено, что основной эффект по извлечению метана на выемочном участке следует ожидать не непосредственно из скважин ПодзГРП, а из типовых скважин ППД, функционирующих в зонах гидроразрыва в условиях существенно повышенной проницаемости пласта.

Установлено отсутствие корреляция между абсолютным и удельным (на единицу длины, на единицу площади обнажения) давлением нагнетания рабочего агента и эффективной длиной пластовой скважины подземного гидроразрыва. Предположительно, давление нагнетания зависит от локальных горно-геологических и горнотехнических условий области угольного пласта, подвергаемого гидроразрыву, в частности, наличия тектонических напряжений в массиве.

Разработан методический подход к аналитическому определению фактора дегазации выемочного участка подготовительной выработкой. Показано, что съем метана из угля выемочного участка подготовительной выработкой может составлять не менее весомую величину, чем съем метана пластовыми дегазационными скважинами.

Среднее значение относительной газообильности очистного забоя в зонах гидроразрыва на выемочном участке 24–58 в результате внедрения новой технологии пластовой дегазации снижено на 30 %, добыча в среднем повышена на 20 %, а продолжительность остановок добычной техники по фактору проветривания уменьшились более, чем на 40%, что позволяет положительно оценивать перспективы дальнейшего практического применения разработанного способа.

Выполнены работы по оптимизации основных параметров технологии ПодзГРП. Исследовано влияние объема закачки рабочей жидкости на эффективность пластовой дегазации. Рациональный объем рабочей жидкости по нашим предварительным оценкам составляет  $50\text{--}200$  м<sup>3</sup>. Позитивное влияние повышения объема закачки на эффективность извлечения метана проиллюстрировано на рис. 1,

где приведена динамика изменения дебит метана из скважин в конвейерной печи 24–60 в зависимости от объема закачки.



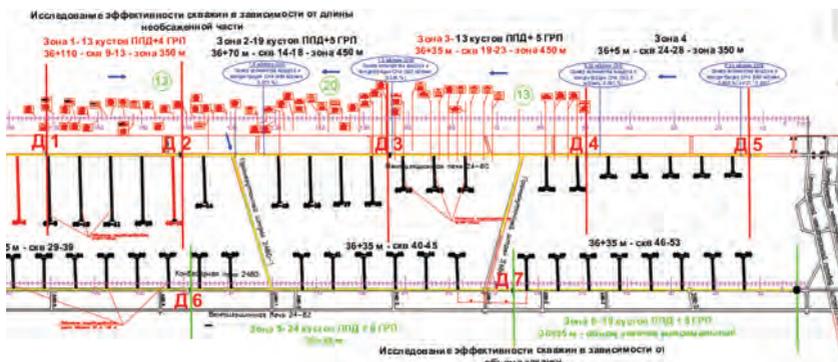
**Рис. 1. Динамика изменения дебита метана из скважин в конвейерной печи 24–60 в зависимости от объема закачки.**

Одним из важных и нерешенных вопросов являлся вопрос об установлении рациональной длине необсаженной части скважин подземного гидроразрыва – так называемой эффективной длине скважин. Для решения этого вопроса на выемочном участке 24–60 было заложено несколько зон, где пластовая дегазация осуществлялась с использованием подземного гидроразрыва с различными длинами необсаженной части скважин. На скважинах гидроразрыва №№ 60/9–60/13 величина эффективной длины скважин составила 110 метра, на второй группе скважин №№ 60/14–60/18 этот параметр составил 70 м, на следующих скважинах №№ 60/19–60/23 – 35 метров и на последних скважинах №№ 60/24–60/28 – соответственно 5 метров (рис. 2).

Увеличение длины необсаженной части происходит лишь при обеспечении выхода на режим гидроразрыва, т.е. при наличии стабилизации давления на некотором уровне при закачке рабочей жидкости в пласт.

Оценка эффективности разработанной технологии осуществляется на основе сравнения дебитов и суммарного съема метана из скважин пластовой дегазации в зоне подземного гидроразрыва и в сравниваемых зонах. Затем такое же сравнение осуществляется по газообильности лавы в этих зонах.

Динамика изменения дебит метана из скважин в вентиляционной печи 24–60 с различной эффективной длиной во времени приведена на рис. 3.



**Рис. 2. Расположение скважин ПодзГРП различной длины на выемочном участке 24—60**



**Рис. 3. Динамика изменения дебита метана из скважин в вентиляционной печи 24—60 с различной эффективной длиной во времени**

Анализ дебитов метана показал, что наиболее эффективно комплексная дегазация происходит при величине эффективной длины скважин в 35 метров. Также относительно других исследованных диапазонов (5 м и 110 м) вторые по эффективности скважины с эффективной длиной скважин в 70 метров.

Было проведено дополнительное исследование по эффективности обозначенных выше вариантов по фактору дегазации пласта подготовительной выработки. Исследование было проведено на выемочном участке 24—60 в зоне влияния скважин ПодзГРП №№ 15—28 (рис. 4).

Можно видеть следующее: Зона 2 (между точками замера №2 и №3) – приток чистого метана:

$$1,2 - 0,33 = 0,87 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

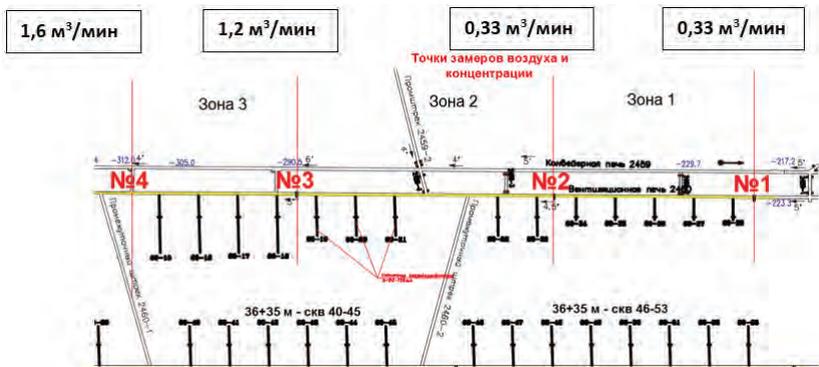
Зона 3 (между точками замера №3 и №4) — приток чистого метана:

$$1,6 - 1,2 = 0,4 \text{ м}^3/\text{мин.}$$



**Рис. 4. Расположения точек замера скоростей воздуха и концентраций метана на объекте исследований фактора дегазации угольного пласта подготовительной выработкой на выемочном участке 24—60**

В каждой точке производился набор проб в 3 лабораторные камеры (у кровли, в середине выработки и у почвы). Изменение газообильности подготовительной выработки в различных зонах подземного гидроразрыва на выемочном участке 24—60 приведено на рис. 5.



**Рис. 5. Изменение газообильности подготовительной выработки в различных зонах подземного гидроразрыва на выемочном участке 24—60**

По результатам этого шахтного эксперимента установлено, что наиболее эффективной зоной по съему газа за счет вентиляции является зона влияния скважин ПодзГРП с необсаженной частью в 35 м, следующая по эффективности зона скважин с необсаженной частью в 70 м. На данном этапе исследований эффективную длину скважин

по совокупности всех факторов рекомендуется выбирать в диапазоне 35÷70 метров.

Так как известно, что при пологом и наклонном залегании максимальное распространение зоны газового дренирования достигает 25÷30 м [12], то в связи с этим нами рекомендуется зона герметизации скважины 30÷36 метров. Правильность данной рекомендации была подтверждена положительным опытом применения разработанной технологии на стадии шахтных экспериментальных работ. Полученные результаты были использованы при проведении комплексной пластовой дегазации на следующем выемочном участке 24–62.

Выполнена предварительная оценка технико-экономической эффективности усовершенствованной технологии предварительной дегазации разрабатываемого угольного пласта путем его гидродинамической обработки. С учетом затрат на реализацию технологии годовой экономический эффект для выемочного участка 24–58 составил более 74 млн. руб.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сластинов С.В., Ютяев Е.П. Обоснованный выбор технологии пластовой дегазации для обеспечения безопасности подземных горных работ при интенсивной добыче угля // Записки горного института. – СПб, 2017. – т. 223. – С.125–130.

2. Сластинов С.В., Ютяев Е.П., Мазаник Е.В., Ермак Г.П. Исследование эффективности усовершенствованной технологии подземного гидроразрыва угольного пласта для его дегазации // Горный журнал. – 2018. №1. – С. 83–87.

3. Сластинов С.В., Мазаник Е.В., Садов А.П. Новые технологические решения в области предварительной дегазации на основе активных воздействий на угольный пласт из подземных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – СВ №1. – С. 107–117.

4. Каркашадзе Г.Г., Хаутиев, А. М-Б. Описание механизма повышения проницаемости угля при циклическом изменении напряженного состояния и пластового давления // В мире научных открытий: сб. научн. ст. – Красноярск, 2014. – № 4 (52). – С. 22–29.

5. Каркашадзе Г.Г., Мазаник Е.В., Понизов А.В. Моделирование процесса гидравлической обработки и дегазации выбросоопасных угольных пластов при столбовой системе разработки с высокими нагрузками на очистной забой // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – СВ №1. – С. 90–101.

6. Lei Yang. A mixed element method for the desorption-diffusion-seepage model of gas flow in deformable coalbed methane reservoirs // Mathematical Problems in Engineering. 2014. Vol. 2014. P. 1–10. URL: <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2014/735931> (дата обращения: 27.04.2017).

7. Baisheng Nie, Xianfeng Liu, Shaofei Yuan, Boqing Ge, Wenjie Jia et al. Sorption characteristics of methane among various rank coals: impact of moisture // Adsorption. 2016. Vol. 22.No. 3. P. 315–325.

8. *Haijun Guo, Yuanping Cheng, Liang Wang, Shouqing Lu, Kan Jin*. Experimental study on the effect of moisture on low-rank coal adsorption characteristics // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015. Vol. 24. P. 245–251.

9. *Campbell Q.P., Barnardo M.D., Bunt J.R.* Moisture adsorption and desorption characteristics of some South African coals // *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2013. Vol. 113. P. 803–807.

10. *Пашенков П.Н., Хаутиев А.М.-Б., Мазаник Е.В.* Методика и результаты определения параметров сорбции угля в лабораторных условиях // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. — 2018. — специальный выпуск 32 «Безопасность и экология горного производства» №6. — С. 54–60.

11. *Ютяев Е.П., Садов А.П., Мешков А.А., Хаутиев А.Б.-М. и др.* Оценка фильтрационных свойств углей в гидродинамических испытаниях дегазационных пластовых скважин // *Уголь*. — 2017. — № 11. — С. 24–29.

12. *Айруни А.Т.* Предварительная дегазация угольных пластов на больших глубинах. — М.: Наука, 1970. — 79 с. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Мазаник Евгений Васильевич* — кандидат технических наук, директор по аэрологической безопасности подземных горных работ АО «СУЭК-Кузбасс», Россия, 652500, Кемеровская область, г. Ленинск-Кузнецкий, ул. Васильева 1, *Хаутиев Адам Магомет-Баширович* — кандидат технических наук, инженер-технолог управления дегазации и утилизации метана АО «СУЭК-Кузбасс», Россия, 652518, Кемеровская область, г. Ленинск – Кузнецкий, ул. Кирсанова-3, АБК №2,

*Комиссаров Игорь Анатольевич* — заместитель главного инженера по технологии управления дегазации и утилизации метана АО «СУЭК-Кузбасс», Россия, 652518, Кемеровская область, г. Ленинск-Кузнецкий, ул. Кирсанова-3, АБК №2,

*Сластунов Сергей Викторович* — доктор технических наук, профессор, горный институт национального исследовательского технологического университета «МИСиС» Минобрнауки РФ, Москва, РФ, 119499, Ленинский проспект, 6, e-mail: slastunovsv@mail.ru.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 23–32.

**Mazanik E.V., Khautiev A.M.-B., Komissarov I.A., Slastunov S.V.**

### **Substantiation of effective parameters of underground complex degassing of coal seams on the basis of their hydraulic fracturing**

The article analyzes the representative factual material on testing and implementation at the mine. S.M. Kirova JSC “SUEK-Kuzbass” new advanced technology of underground hydraulic fracturing, carried out through wells drilled from the preparatory workings. It

was found that in the areas of underground hydraulic fracturing in the conditions of the breakage face 24–58 the average value of the relative gas permeability of the breakage face is reduced by 30 %, production on average is increased by 20 %, and technological stops associated with the “gas barrier” decreased by 40%. In the implementation of preliminary degassing of the coal seam from underground wells, hydraulic fracturing (hydropartition) of the latter is advisable to conduct through wells with an effective length within 35–70 meters. The rational volume of injection of the working fluid is 50–200 m<sup>3</sup>. The preliminary assessment of technical and economic efficiency of the improved technology of preliminary degassing of the developed coal seam by its hydrodynamic processing is carried out.

Key words: unloaded coal seams, preliminary formation degassing, new technology of coal seam hydraulic fracturing, rational and effective parameters of complex technology.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-###

## AUTHORS

*Mazanik E.V., candidate of technical Sciences, Director of the aerological safety at underground mines of JSC “SUEK-Kuzbass”, 652500, Vasilyeva st., 1 Leninsk-Kuznetsky, Russia,*

*Khautiev A.M.-B., candidate of technical Sciences, engineer-technologist of management of degassing and methane utilization of JSC SUEK-Kuzbass, 652518, Kirsanova st., 3 Leninsk-Kuznetsky, Russia,*

*Komissarov I.A., Deputy chief engineer on technology of management of degassing and methane utilization of JSC SUEK-Kuzbass, 652518, Kirsanova st., 3 Leninsk-Kuznetsky, Russia,*

*Slastunov S.V., Professor, doctor of technical Sciences, National university of science and technology “MISIS”, 119499, Leninsky Prospekt st., 6 Moscow, Russia, e-mail: slastunovsv@mail.ru.*

## REFERENCES

1. Slastunov S.V., Yutyayev E.P. *Obosnovannyj vybor tekhnologii plastovoj degazacii dlya obespecheniya bezopasnosti podzemnyh gornyh rabot pri intensivnoj dobyche uglja* [Reasonable choice of technology for reservoir degassing to ensure the safety of underground mining-intensive coal mining]. *Zapiski gornogo instituta. Saint-Petersburg*, 2017. T. 223. pp.125–130.

2. Slastunov S.V., Yutyayev E.P., Mazanik E.V., Ermak G.P. *Issledovanie effektivnosti usovershenstvovannoj tekhnologii podzemnogo gidrorazryva ugol'nogo plasta dlya ego degazacii* [Study of the effectiveness of enhanced technology of underground hydraulic fracturing of a coal seam for the decontamination]. *Gornyj zhurnal*. 2018. no 1. pp. 83–87.

3. Slastunov S.V., Mazanik E.V., Sadov A.P. *Novye tekhnologicheskie resheniya v oblasti predvaritel'noj degazacii na osnove aktivnyh vozdejstvij na ugol'nyj plast iz podzemnyh vyrabotok* [New technological solutions in the field of pre-drainage is based on active influences on coal from underground mines]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. 2016. SV no 1. pp. 107–117.

4. Karkashadze G.G., Hautiev, A. M-B. *Opisanie mekhanizma povysheniya pronicaemosti uglja pri ciklicheskom izmenenii napryazhennogo sostoyaniya i plastovogo davleniya* [Description of the mechanism of increasing the permeability of coal in the cyclic change of the stress state and reservoir pressure]. *V mire nauchnyh otkrytij: sb. nauchn. st. Krasnoyarsk*, 2014. no 4 (52). pp. 22–29.

5. Karkashadze G.G., Mazanik E.V., Ponzov A.V. *Modelirovanie processa gidravlicheskoj obrabotki i degazacii vybrosoopasnyh ugol'nyh plastov pri stolbovoj sisteme razrabotki s vysokimi nagruzkami na ochistnoj zaboj* [Modeling of hydraulic treatment and degassing of outburst-hazardous coal seams with pillar system development with high loads on the

stope]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). 2017. SV no 1. pp. 90–101.

6. Lei Yang. *A mixed element method for the desorption-diffusion-seepage model of gas flow in deformable coalbed methane reservoirs*. Mathematical Problems in Engineering. 2014. Vol. 2014. P. 1–10. URL: <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2014/735931> (data obrashcheniya: 27.04.2017).

7. Baisheng Nie, Xianfeng Liu, Shaofei Yuan, Boqing Ge, Wenjie Jia et al. *Sorption characteristics of methane among various rank coals: impact of moisture*. Adsorption. 2016. Vol. 22. No. 3. P. 315–325.

8. Haijun Guo, Yuanping Cheng, Liang Wang, Shouqing Lu, Kan Jin. *Experimental study on the effect of moisture on low-rank coal adsorption characteristics*. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2015. Vol. 24. P. 245–251.

9. Campbell Q.P., Barnardo M.D., Bunt J.R. *Moisture adsorption and desorption characteristics of some South African coals*. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2013. Vol. 113. P. 803–807.

10. Pashchenkov P.N., Hautiev A.M.-B., Mazanik E.V. *Metodika i rezul'taty opredeleniya parametrov sorbcii uglja v laboratornyh usloviyah* [Technique and results of determination of parameters of adsorption of coal in the laboratory]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). 2018. special'nyj vypusk 32 «Bezopasnost' i ekologiya gornogo proizvodstva» no 6. pp. 54–60.

11. Yutyayev E.P., Sadov A.P., Meshkov A.A., Hautiev A.B.-M. i dr. *Ocenka fil'tracionnyh svoystv uglej v gidrodinamicheskikh ispytaniyah degazacionnyh plastovyh skvazhin* [Evaluation of filtration properties of coal in hydrodynamic testing of reservoir degassing wells]. Ugol'. 2017. no 11. pp. 24–29.

12. Ajruni A.T. *Predvaritel'naya degazaciya ugol'nyh plastov na bol'shih glubinah* [Preliminary degassing of coal seams at large depths]. Moscow: Nauka, 1970. 79 p.



Т.А. Василенко, А.Х. Исламов,  
А.К. Кириллов, А.С. Дорошкевич

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОР ИСКОПАЕМЫХ УГЛЕЙ НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ

Исследование фрактальных структур в физике конденсированных сред является актуальной задачей. Примером геометрического фрактала является сложная иерархическая организация порового пространства ископаемых углей, представимая в виде фрактальных кластеров, содержащих элементы различных масштабов. Определение фрактальной размерности подобных объектов позволяет объяснить зависимости физико-механических характеристик углей при внешних воздействиях.

Целью исследования является определение фрактальных характеристик иерархической структуры ископаемых углей с помощью такого неразрушающего метода, как малоугловое рассеяние тепловых нейтронов, позволяющего изучать структуру в объеме образцов.

В работе определены фрактальные размерности и получены их корреляционные связи с удельной поверхностью порового пространства, степенью углефикации, глубиной залегающих и склонностью пластов к выбросам угля и газа для углей Донецкого угольного бассейна. Полученные фрактальные размерности и удельные поверхности дают представление о полной пористости в отличие от метода низкотемпературной адсорбции азота, характеризующего только открытую пористость. Микрофотографии, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, позволили сделать вывод о том, что структура углей выбросоопасных пластов характеризуется поверхностным фракталом  $D_s$  с размерностью, близкой к значениям 2,9 – 3,0 или массовым фракталом, который образован конгломератами различных минеральных включений, содержащих железо и серу. Ключевые слова: выбросоопасный пласт, закрытая пористость, малоугловое рассеяние, минеральные включения, нейтрон, уголь, удельная поверхность, фрактальная размерность

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-33-48

### Введение

Иерархическая структура гетерогенной среды предполагает соподчиненность различных уровней организации вещества, оказывающих взаимное влияние при внешнем воздействии на среду, а также суще-

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 33–48.

© Т.А. Василенко, А.Х. Исламов, А.К. Кириллов, А.С. Дорошкевич, 2018.

ственно изменяет теоретические представления о процессах переноса массы и зарядов, развитых для однородной среды [1]. Описание движения частицы в средах с фрактальной организацией требует привлечения уравнений переноса с дробными производными [2].

На каждом масштабном уровне гетерогенная среда характеризуется наличием структурных элементов нескольких основных типов. При этом каждый из этих элементов при более детальном рассмотрении также имеет сложный внутренний состав, включающий в себя элементы более низкого ранга [3]. Иерархическая организация структуры твердых тел приводит к тому, что их поведение под нагрузкой представляет собой сложный нелинейный процесс, при котором происходит последовательное вовлечение возможных деформационных механизмов с различной энергией. Результатом деформационного процесса является разрушение системы. [4] Потому не только физическое, но и математическое описание отклика гетерогенных материалов должно осуществляться в рамках концепции их многомасштабности. [5].

Сложная структура пористых сред может быть описана в представлении фрактальной геометрии. В соответствии с одним из свойств фрактального агрегата, средняя массовая плотность вещества в сфере радиуса  $R$  равна:

$$\rho(R) = \rho_0 (r_0/R)^{3-D_f}$$

где  $\rho_0$  — плотность материала частиц, составляющих агрегат,  $r_0$  — средний радиус частиц, образовавших агрегат,  $D_f$  — фрактальная размерность агрегата. Размерность может быть дробной величиной, если получившаяся структура окажется фракталом — самоподобным множеством с нецелой размерностью. Если для трехмерного пространства, определяемая экспериментально фрактальная размерность находится в пределах  $1 < D_f < 2$ , то формируется цепочечная разветвленная структура. Если ее значение попадает в диапазон  $2 < D_f < 3$ , то образуется пористый ажурный каркас. Величина фрактальной размерности  $D_f \cong 2$ , указывает на образование слоистых структур [6].

Исследование фрактальных структур в физике конденсированных сред является актуальной задачей. Основные представления о фрактальных кластерах, полученные при моделировании их образования методами Монте-Карло [7]. Одним из примеров такого фрактала является агломерат полидисперсных сфер, образованный несколькими уровнями линейных масштабов [8].

Представление о фрактальности пористого пространства ископаемых углей позволило объяснить зависимость электропроводности образцов при их газонасыщении [9].

**Постановка задачи исследования.** Для характеристики гетерогенной пористой среды таких объектов исследования, как

ископаемых углей, необходимо применение неразрушающих методов, позволяющих получать характеристики среды не только на основе поверхностных данных, но и из всего объема образца. Получение характеристик интерфейсов (границ) порового пространства и распределения пор по размерам возможно с помощью таких методов, как рентгенография и нейтронное рассеяние. Исследования такого рода выполнены для углей из угольных бассейнов США, Польши, Канады, Китая и Австралии [10–14].

Ранее мы исследовали фрактальные характеристики иерархической структуры ископаемых углей Донецкого бассейна методами импедансной спектроскопии, атомной силовой микроскопии, одноосного нагружения высоким давлением до 2 ГПа, и малоуглового рентгеновского рассеяния. Анализировались отдельные образцы, принадлежащие различным стадиям углефикации [15–18].

**Цель нашего исследования** – определить фрактальные характеристики иерархической структуры ископаемых углей с помощью малоуглового рассеяния тепловых нейтронов. Использовали образцы углей из ряда шахт Донбасса. Общее число образцов равно 27. Измерения рассеяния нейтронов проводилось на малоугловом спектрометре YuMO реактора IBR-2 Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) в г. Дубна.

Малоугловое рассеяние рентгеновских лучей (МУРР) и нейтронов (МУРН) позволяет оценить фрактальную размерность из наклона кривой рассеяния, если выполняется степенная зависимость:

$$I(q) = A \cdot q^{-\alpha},$$

где  $I(q)$  – интенсивность рассеяния при значении модуля вектора рассеяния  $q = 4\pi \sin \theta / \lambda$ ,  $2\theta$  – угол рассеяния. Постоянные  $A$  и  $\alpha$  определяют из графика, построенного в двойных логарифмических координатах для зависимости  $I(q)$ :

$$\lg(I) = -\alpha \cdot \lg(q) + \lg(A)$$

Тангенс угла наклона  $\alpha$  связан с фрактальной размерностью: 1) если  $\alpha < 3$ , то  $\alpha = D_m$ ; 2) если  $3 < \alpha < 4$ , то  $\alpha = 6 - D_s$ . Первый вариант соответствует структурной организации в виде массового фрактала, второй вариант – поверхностному фракталу [19,20] или степенной зависимости распределения объектов по размерам [12,19]  $dN(r)/dr \sim r^{-\tau}$ , где  $\tau = D_s + 1$ .

**Условия проведения эксперимента.** На импульсном реакторе ИБР-2 ОИЯИ создана высокоэффективная установка малоуглового рассеяния, которая позволяет проводить исследования по широкому кругу проблем, когда требуется изучать строение объектов с характерными размерами от единиц до нескольких десятков нанометров.

Особенностью спектрометра малоуглового рассеяния нейтронов на ИБР-2 является аксиально-симметричная геометрия коллиматоров и детекторов нейтронов с центральным отверстием, а также использование ванадиевых стандартов. Аксиально-симметричная геометрия существенно упрощает учет функции разрешения установки. Наличие центрального отверстия в детекторах обеспечивает возможность одновременных измерений с использованием сразу трех детекторов, что позволяет при одном измерении перекрыть широкий диапазон значений векторов рассеяния. Ванадиевые стандарты позволяют с высокой точностью извлекать значение дифференциального сечения рассеяния в абсолютных единицах.

В предположении изотропного распределения изучаемых неоднородностей выражение для дифференциального сечения рассеяния нейтронов описывается формулой Дебая:

$$\left\langle \frac{d\sigma}{d\Omega} \right\rangle = \iint_{V'} \rho(r)\rho(r') \frac{\sin q|r-r'|}{q|r-r'|} dr dr',$$

где  $q$  – волновой вектор рассеяния. Из этого выражения следуют следующие предельные случаи. Если неоднородности имеют характерный размер  $L$ , то для  $qL \ll 1$   $\sin(qL)/qL \approx 1$ , и сечение рассеяния оказывается пропорциональным  $\rho^2 V^2$ , т.е. не зависящим ни от формы, ни от внутреннего строения изучаемого объекта. При  $qL \gg 1$  осциллирующий характер функции  $\sin(x)/x$  приводит к быстрому затуханию сечения рассеяния с ростом  $q$ , которое в предельном случае пропорционально  $(qL)^{-4}$ . Наиболее информативной является область  $qL \sim 1$ , анализ которой позволяет получить данные о характерных размерах, форме и молекулярной массе изучаемых объектах. Малоугловому рассеянию соответствует предельный случай  $qL \gg 1$  [21]

Образцы измельчались до фракций размером 0,1 – 0,5 мм, которые помещались в линейной кассете инструмента малоуглового рассеяния с круговыми ячейками, имеющими диаметр 12 мм. Внутри ячеек образцы фиксировались лентой скотч. Регистрация интенсивности рассеянных нейтронов для каждого образца проводилась в течение 20 мин.

Получены кривые рассеяния нейтронов в интервале векторов рассеяния  $q = (0,051–1,36 \text{ нм}^{-1})$  для 27 образцов углей различных стадий метаморфизма в каждой из партий, доставленных из шахт Центрального Донбасса. Первая партия содержала угли ранних стадий метаморфизма Г, ДГ, Д и Ж. Вторая (ГП «Макеевуголь») и третья (ГП «Артемуголь») партии включала в основном угли К, ОС и Т, а четвертая – А (антрациты) ГП «Торезантрацит».

При построении кривых рассеяний данные от трех детекторов приводились в единую шкалу по оси ординат и строились кривые рассеяния в координатах  $\lg(I)$  от  $\lg(q)$  (рис. 1), где  $I = (d\sigma/d\Omega)/V$  – поток

рассеянных нейтронов ( $\text{см}^{-1}$ ),  $q$  – модуль вектора рассеяния ( $\text{нм}^{-1}$ ),  $V$  – объем образца.

### **Экспериментальные данные.**

Аппроксимация кривых рассеяния степенными зависимостями в виде  $I(s) = As^{-\alpha} + B$  позволила сделать заключение о наличии фрактальности поверхности пор или фрактального распределения пор по размерам для углей средних и поздних стадий метаморфизма. Получены статистические зависимости, позволяющие проследить изменение показателя степени  $\alpha$  в экспериментальных кривых рассеяния нейтронов от характеристик углей.

Рассматривались зависимости между рядом параметров (полная и закрытая пористость, глубина залегания пласта, удельной поверхности пор, стадии углефикации) и поверхностной фрактальной размерностью  $D_f = (6-\alpha)$  [18,19] для набора исследованных углей.

Оказалось, что для углей ранних стадий метаморфизма ( $D_f$  и  $\Gamma$ ) показатель степени  $\alpha$  не превышает значения три. Т.е., эти угли можно рассматривать как массовые фракталы. Для более детального исследования зависимости  $\alpha$  от выхода летучих  $V^{\text{daf}}$ , отражающего стадию метаморфизма, были уточнены значения  $\alpha$  для каждого образца, используя двойные логарифмические координаты  $\lg(I) - \lg(q)$ . По уточненным данным к массовым фракталам следует отнести также отдельные образцы углей марок Ж и К. Из двух антрацитов один из них также можно рассматривать как массовый фрактал.

Данные, полученные из изотерм низкотемпературной адсорбции азота не дают полного представления о распределении пор и удельной поверхности порового пространства, поскольку относятся только к открытым порам. Метод МУРН позволяет изучать полную пористость и определить удельную поверхность всех пор, поскольку кривая рассеяния  $I(q)$  получается, как результат взаимодействия нейтронов с веществом во всем объеме образца.

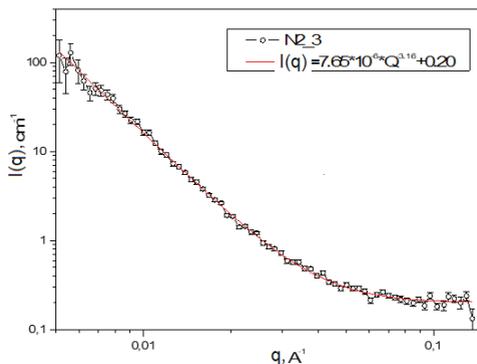
Для удельной поверхности пор, имеющих линейный масштаб  $r$  с учетом фрактальности их поверхности, выполняется равенство [10,12 ]

$$S(r) / V = I(0)r^{2-D_f} / (2\pi\Delta\rho^2F(D_f)),$$

где  $I(0)$  – коэффициент в выражении для интенсивности рассеяния  $I(q) = I(0)q^{-\alpha}$ ,  $F(D_f) = \Gamma(5-D_f)\sin[(3-D_f)\pi/2]$ ,  $\Gamma$  – гамма-функция,  $V$  – объем образца,  $\Delta\rho = \rho_{\text{solid}} - \rho_{\text{pore}}$  – разность между плотностями длины рассеяния нейтронов (SLD – scattering length density) для твердой фазы образца и пор [22]. Для пустых пор  $\Delta\rho = \rho_{\text{solid}}$ . Для углерода  $\rho = 5,7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , а для ископаемых углей  $\rho$  изменяется в пределах  $(2-3,5) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

После проведения необходимых вычислений получены значения удельной поверхности. Они соответствуют минимальным значениям  $r_{\text{min}}$ , связанным с максимальным значениям вектора рассеяния  $q_{\text{max}}$ ,

для которого выполняется степенная зависимость интенсивности рассеяния  $I(q_{\max})$ , равенством  $r_{\min} = 2\pi/q_{\max}$  (рис. 1).



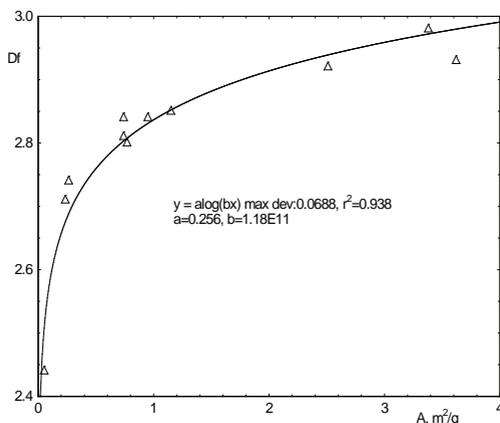
**Рис. 1. Экспериментальная кривая рассеяния нейтронов для образца угля марки Т (ГП «Макеевуголь» ш. им. С.М. Кирова, пласт Н<sup>В</sup><sub>10</sub>), построенная в двойных логарифмических координатах**

Представляет интерес получить зависимость фрактальной размерности от некоторых параметров углей. При дальнейшем анализе из всего набора исследованных углей рассматривались только угли с поверхностной фрактальной размерностью, для которых тангенс угла наклона кривой рассеяния заключен в пределах  $3 < \alpha < 4$ .

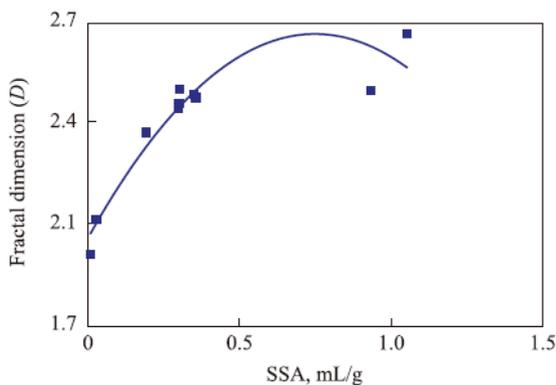
Зависимость между  $D_f$  и удельной поверхностью  $A$  ( $\text{м}^2/\text{г}$ ), вычисленной из измерений МУРН (рис. 2а), с высокой точностью ( $R^2 = 0,938$ ) аппроксимируется методом наименьших квадратов (МНК) логарифмической зависимостью вида  $D_f = a \cdot \lg(bA)$  с коэффициентами  $a = 0,256$  и  $b = 1,18 \cdot 10^{11}$ . Подобная зависимость между  $D_f$  и удельной поверхностью была получена из сорбционных экспериментов китайскими авторами для углей [23] (рис. 2, б).

Анализ принадлежности каждой точки на графике к типу углей показал, что три точки, лежащие в правом верхнем углу относятся к углям марки ОС из выбросоопасных пластов. Точка в нижнем левом углу соответствует антрациту. Выше расположены две точки для углей ОС (невыбросоопасные –ш. Ясиновская-Глубокая). Показательны данные для углей ОС из ш. им А.И.Гаевого. Первый из них – выбросоопасный пласт  $k_3$ , имеет наибольшее значение удельной поверхности  $A = 3,6 \text{ м}^2/\text{г}$ , в то время как, точка для угля из угрожаемого пласта  $k_3$  занимает среднее положение ( $D_f = 2,84$ ,  $A = 0,95 \text{ м}^2/\text{г}$ ).

Т.о., наблюдается зависимость удельной поверхности пор от фрактальной размерности. Угли из выбросоопасных пластов имеют более высокие значения  $D_f$ , чем угли из пластов, отнесенных к угрожаемому. Действительно, по данным МУРН без учета углей, в которых



**Рис. 2 а.** Связь поверхностной фрактальной размерности с удельной поверхностью углей по данным МУРН

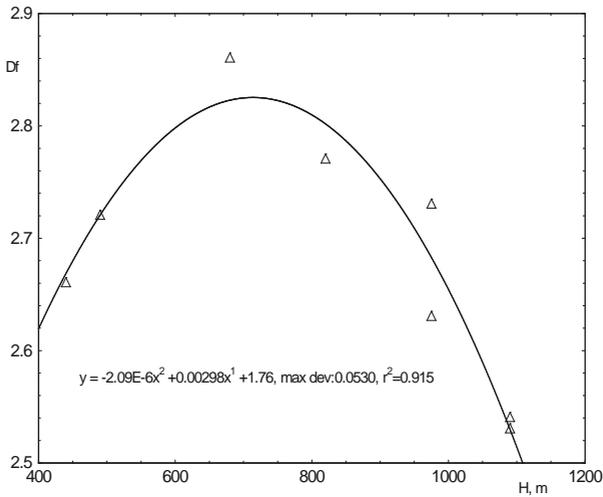


**Рис. 2, б.** Для сравнения приводится рис из статьи [23]

структура характеризуется массовым фракталом, получены средние значения  $D_f = 2,892$  и  $D_f = 2,74$ , где последнее значение относится к угрожаемым пластам.

Имеется различие и в удельных поверхностях углей для указанных категорий пластов. При вычислениях воспользуемся данными МУРН для отношения  $S/V$ : Выбросоопасные:  $N = 6 - S/V = 2,68 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{см}^3$ . Невыбросоопасные:  $N = 8 - S/V = 9,77 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{см}^3$ . Хотя статистика низкая ( $N = 6$  и  $8$ ), можно утверждать, что удельная поверхность пор в углях из выбросоопасных пластов более, чем в 2.5 раз больше поверхности в углях из угрожаемых пластов.

Достаточно большая статистическая выборка исследуемых углей позволила получить зависимость фрактальной размерности от глубины залегания угольного пласта. В следствие большой вариативности физико-механических свойств углей не удалось получить статистически значимую зависимость для всех образцов. Наиболее показательной является такая зависимость для углей марки ОС (рис. 3). Максимум распределения характеризует выбросоопасные пласты, содержащие угли с фрактальной размерностью  $D_f > 2,8$ . Еще более показательна зависимость  $D_f(H)$  для углей, прошедших метаморфизацию в одинаковых горно-геологических условиях (ш. им. А.И.Гаевого). Уменьшение  $D_f$  с глубиной указывает на хаотизацию структурной организации порового пространства угольного вещества.

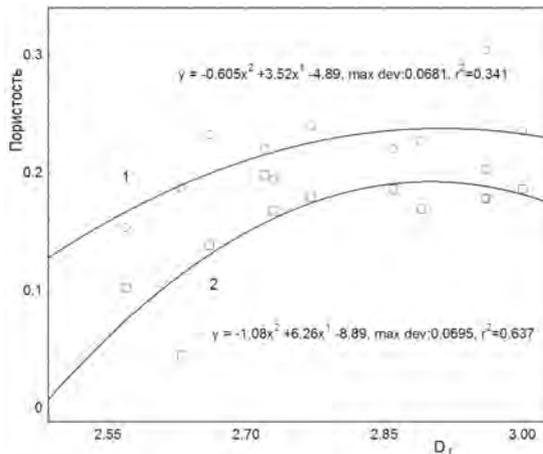


**Рис. 3. Зависимость  $D_f$  от глубины залегания угольного пласта для углей марки ОС**

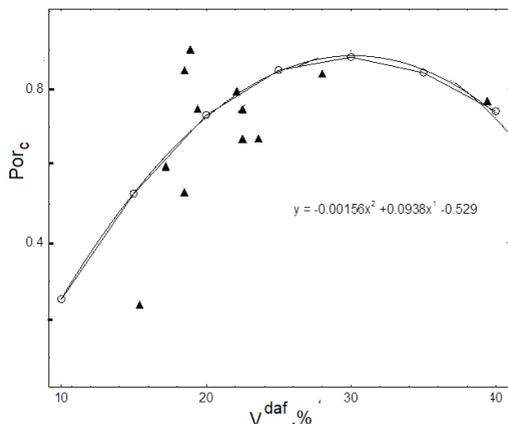
**Тектоническая нарушенность угольных пластов.** Для понимания механизмов развязывания внезапных выбросов необходимо обоснование структурных особенностей углей, расположенных в выбросоопасных пластах. Имеющиеся в нашем распоряжении образцы углей из шахт Донецкого угольного бассейна позволили сделать выводы, касающиеся этой проблемы. Оказалось, что она связана с деформируемостью углей в процессе метаморфизма на геологических масштабах времени, а также с особенностями структуры углей в зонах геологических нарушений. Согласно [14] в общем количестве пор и распределении пор по размерам преобладают закрытые поры. «Влияние тектонических деформаций способствует увеличению количества закрытых пор, что отражается в гораздо большем объеме

пор и удельной поверхности в сильно деформированных углях, чем это наблюдается в слабо деформированном угле.» [14].

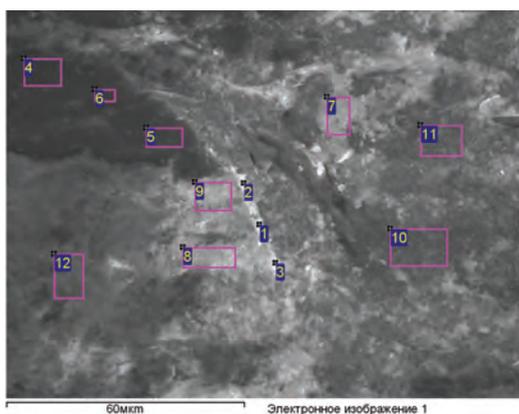
Воспользуемся данными МУРН для выбросоопасных и угрожаемых углей. При вычислении открытой и закрытой пористости были использованы результаты, полученные для образцов серии 2 и 3 (см. [17], табл. 1). Рис. 4 дает представление о зависимости полной и закрытой пористости от фрактальной размерности, полученной методом МУРН. Вклад закрытой пористости в ряду метаморфизма показан на рис. 5. Аппроксимация экспериментальных значений квадратичной зависимостью показала наличие максимума для углей средней стадии метаморфизма. Из имеющихся данных вычислены значения относительного содержания закрытой пористости для выбросоопасных и угрожаемых пластов. Получены средние значения содержания закрытых пор 0,577 для угрожаемых и 0,780 для выбросоопасных. Т.е., закрытых пор больше в образцах из выбросоопасных пластов. Такая же тенденция наблюдается для двух образцов углей ОС, которые мы анализировали ранее. Для выбросоопасного угля закрытая пористость составляет 0,167, в то время как для угля из угрожаемого пласта – 0,044. Т.о., в состав выбросоопасных пластов входит уголь, который по представлениям авторов [14] можно отнести к «деформированному». Для таких углей характерно повышенное содержание закрытой пористости и удельной поверхности пор. С позиций иерархической организации структуры в этих пластах уголь имеет более высокие значения поверхности фрактальной размерности. По этому параметру угольные пласты можно характеризовать, как склонные к выбросам угля, породы и газа.



**Рис. 4. Зависимость пористости углей от фрактальной размерности: полная (1), закрытая пористость (2)**



**Рис. 5. Зависимость относительного содержания закрытой пористости от выхода летучих**



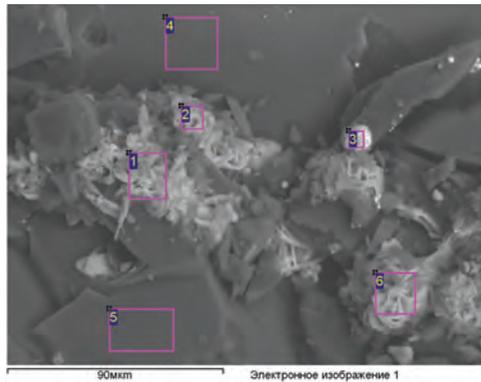
**Рис. 6. Минеральные включения в виде пиритов, содержащиеся в образце марки Ж из выбросоопасного пласта т<sub>3</sub>. Выделенные области (4) и (5) соответствуют витринитам с содержанием углерода (90—92)%. Согласно данным МУРН структурные элементы характеризуются как массовые фракталы с размерностью  $D_m=2,91$**

**Текстура и химический состав.** Согласно данным сканирующей электронной микроскопии, в состав выбросоопасных угольных пластов входит уголь, содержащий железо- и серосодержащие соединения (табл. 1). Обязательным условием выбросоопасности пласта является повышенное содержание железа, достигающее 26% и серы (до 20%). Минеральные включения в виде пирита  $FeS_2$  образуют агрегаты (рис. 6), которые при МУРН характеризуются в виде массовых фракталов.

**Данные о химическом составе, измеренные на сканирующем электронном микроскопе из микрофотограмм для образцов углей из второй партии**

№	марка	C, %	V <sup>daf</sup> , %	Fe <sub>max</sub>	S <sub>max</sub>	D <sub>f</sub>	Пласт
2.1	Ж	91,3	31,0	17,3	18,5	2,91(D <sub>m</sub> )	выбросоопасный
2.4	ОС	93,7	18,5	24,3	0,43	2,98	
2.5	К	87,0	25,2	26,0	17,9	2,98(D <sub>m</sub> )	выбросоопасный
2.8	ОС	94,5	18,9	0,3	0,60	2,71	
2.9	ОС	93,5	19,4	23,3	23,2	2,92	выбросоопасный
2.10	Г	84,5	39,4	1,1	0,96	2,03(D <sub>m</sub> )	
							угрожаемый
							выбросоопасный
							угрожаемый

Для угрожаемых пластов характерны другие виды минеральных включений (рис. 7). Выделенные области 1–3 содержат оксиды кремния SiO<sub>2</sub> и алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с содержанием кремния до 18% и алюминия до 14%. Области (4)–(6) относятся к витринитам с содержанием углерода (80–86)%. Согласно данным МУРН иерархическая структура угля рассматривается как поверхностный фрактал с размерностью D<sub>S</sub>=2,71.



**Рис. 7. Минеральные включения в образце угля ОС из пласта I<sub>дп</sub> отнесенного к угрожаемым.**

Можно сделать вывод: Структура угольного вещества выбросоопасных пластов характеризуется поверхностным фракталом с фрактальной размерностью D<sub>S</sub>, близкой к значению 2,9–3,0 или массовым фракталом, который образован конгломератами различных минеральных включений. В угрожаемых пластах структура угля характеризуется более «гладкими» поверхностями порового пространства при значениях D<sub>S</sub> < 2,9.

Наиболее надежно такие закономерности удается выявить при сравнении двух типов структуры углей одной стадии метаморфизма, которые образовались в одних и тех же горно-геологических условиях. Это означает, что возможно предсказать наличие зон опасных по выбросам угля и газа, анализируя иерархическую структуру образцов углей, полученных из опережающих и разгрузочных скважин при обработке пласта.

### Выводы

Показано, что (1) структура углей ранних стадий метаморфизма может быть рассмотрена в виде массового фрактала с массовой фрактальной размерностью  $D_f = \alpha$ , равной тангенсу угла наклона кривой рассеяния, построенной в двойных логарифмически координатах; (2) значения удельной поверхности  $A$  (или  $S/V$ ), полученные нами из данных МУРН, соответствуют полной пористости образцов и обеспечивают высокую надежность корреляции ( $R^2 > 0.9$ ) для зависимости  $A = f(D_f)$ ; (3) Высокие значения поверхностной фрактальной размерности и повышенное содержание минеральных включений, содержащих железо и серу, могут служить критерием тектонической нарушенности структуры углей и признаком выбросоопасности угольного пласта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sokolov I.M. Anomalous diffusion on fractal networks // Mathematics of complexity and dynamical systems, Vol. 1 / Ed. R.A. Meyers. – Springer, 2011. – pp. 13–25.
2. L.M. Zelenyi, A.V. Milovanov “Fractal topology and strange kinetics: from percolation theory to problems in cosmic electrodynamics” **47** 749–788 (2004)
3. M.A. Sadovsky, Natural rock lumpiness, DAN SSSR, 1979, 247, no. 4, pp. 829–831.
4. Approach to simulation of deformation and fracture of hierarchically organized heterogeneous media, including contrast media / S.G. Psakhie, E.V. Shilko, A.Yu. Smolin, A.V. Dimaki, A.I. Dmitriev, Ig.S. Konovalenko, S.V. Astafurov, S. Zavshek // Physical Mesomechanics, 2011, no. 5–6, pp. 224 – 248
5. V.E. Panin, V.E. Egorushkin, A.V. Panin, D.D. Moiseenko. On the nature of plastic strain localization in solids // Technical Physics, 2007, Vol. 52, Iss. 8, pp. 1024–1030.
6. Kudryavtsev P., Figovskii O. Zol'-gel' tekhnologiya poristyykh materialov (Sol-gel technology of porous materials)(in Russ.). – Lambert Academic Publishing, 2015. 468 p.
7. Smirnov B.M. Fizika fraktal'nykh klasterov (Physics of fractal clusters)(in Russ.) / Moskva: Nauka, 1991. – 136 p.
8. Eggersdorfer M.L., Pratsinis S.E. The structure of agglomerates consisting of polydisperse particles // Aerosol Science and Technology, 2012, Vol.46, no.3, pp. 347–353.
9. Astakhov A.V., Belyi A.A., Shirochin D.L., Ekonomova L.N. Osobennosti dielektricheskikh svoystv gazonasyshchennogo uglya i fraktal'nost' ego strukturnoi

organizatsii (Features of the dielectric properties of gas-saturated coal and the fractality of its structural organization) // *Khimiya tverdogo topliva*, 1998. – no. 5. – pp. 37- 42.

10. *Bale H.D., Schmidt P.W.* Small-angle X-ray-scattering investigation of sub-microscopic porosity with fractal properties // *Physical Review Letters*, 1984, Vol. 53, no. 6, pp. 597–599.

11. *Radlinski A. P., Mastalerz M., Hinde A. L., et al.* Application of SAXS and SANS in evaluation of porosity, pore size distribution and surface area of coal. *International Journal of Coal Geology*, 2004, Vol. 59, no. (3–4), pp. 245–271

12. *Snook I., Yarovsky I., Hanley H.J. M., et al.* Characterization of metallurgical chars by small angle neutron scattering // *Energy and Fuels*, 2002, Vol.6, no. 5, pp. 1009–1015.

13. *Melnichenko Yu. B., He L., Sakurovs R., et al.* Accessibility of pores in coal to methane and carbon dioxide / *Fuel*, 2012, Vol. 91, pp. 200–208.

14. *Niu Q., Pan J., Cao L., et al.* The evolution and formation mechanisms of closed pores in coal // *Fuel*, 2017, Vol. 200, pp. 555–563.

15. *Alekseev A.D., Konstantinova T.E., Kirillov A.K. i dr.* Dielektricheskie svoystva uglei v intervale chastot do 1 MGts (Dielectric properties of coal in the frequency range up to 1 MHz) // *Fiziko-tehnicheskie problemy gornogo proizvodstva. – Donetsk*, 2010. – Vyp. 13. – pp. 22–31.

16. *Alekseev A.D., Vasilenko T.A., Kirillov A.K.* Svyaz' fraktal'noi razmernosti strukturnoi organizatsii ugol'nogo veshchestva s parametrami diffuzii metana (Relation of the fractal dimension of coal substance structural organization with the parameters of methane diffusion) // *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'. Metan. – M., 2008. – Vyp. 4. – P. 76–84.*

17. *Vasilenko T.A., Kirillov A.K., Slyusarev V.V.* Issledovanie ierarkhicheskoi struktury iskopaemykh uglei metodom pressovaniya. Opredelenie polnoi poristosti (Study of the hierarchical structure of coals by pressing. Measuring of the total porosity) // *Fizika i tekhnika vysokikh davlenii. – 2015. – Vol. 25, no. (1–2). – pp. 133–142.*

18. *Kirillov A.K.* Issledovanie uglei Donetskogo ugol'nogo basseina metodom malouglovogo rentgenovskogo rasseyaniya (Small-angle X-ray scattering study of Donets basin coals) // *Fiziko-tehnicheskie problemy gornogo proizvodstva: Sb. nauch. tr. – Donetsk*, 2011. – Vol. 14, pp. 20–32.

19. *Cherny A.Yu., Anitas E.M., Osipov V.A., Kuklin A.I.* Scattering from surface fractals in terms of composing mass fractals // *Journal of Applied Crystallography*, 2017, Vol. 50, pp. 919–931.

20. *Hurd A.J., Schaefer D.W., Nartin J.E.* Surface and mass fractals in vapor-phase aggregates // *Physical Review A*, 1987, Vol. 35, no. 5, pp. 2361–2364.

21. *Sinha S.* Small-angle scattering from porous materials / *Methods in the physics of porous media*, ed. Wong P.Z., San Diego, London: Academic Press; 1999, pp. 223–262.

22. *Melnichenko Yu. B.* Small-angle scattering from confined and interfacial fluids. Applications to energy storage and environmental science. Switzerland: Springer Intern. Publ., 2016, 314 p.

23. *Deyong G., Li G., Xinhui M.* Experimental research on pore structure and gas adsorption characteristic of deformed coal // *China petroleum processing and petrochemical technology scientific research*, 2014, Vol.16, no. 4, pp. 55–64. **ГМАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Василенко Татьяна Анатольевна* — доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник Лаборатории горных ударов Научного центра Санкт-Петербургского горного университета. [tvasilenko@mail.ru](mailto:tvasilenko@mail.ru);

*Исламов Ахмед Хусаинович* — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна;

*Кириллов Андрей Кузьмич* — доктор технических наук, старший научный сотрудник, зав. Лабораторией прогноза газовых ресурсов, Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины, г. Днепрпетровск, [kirillov\\_ak@ukr.net](mailto:kirillov_ak@ukr.net),

*Дорошкевич Александр Сергеевич* — кандидат технических наук, научный сотрудник Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна.

---

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 33-48.

**Vasilenko T.A., Islamov A.K., Kirillov A.K., Doroshkevych O.S.**

### **Investigation of the hierarchical structure of pores of fossil coals by non-destructive methods**

The investigation of fractal structures in the physics of condensed matter is an urgent task. An example of a geometric fractal is the complex hierarchical organization of the pore space of fossil coals, represented as fractal clusters containing elements of different scales. The determination of the fractal dimension of such objects makes it possible to explain the dependence of the physical and mechanical characteristics of the coals under external influences.

The aim of the study is the determination of the fractal characteristics of hierarchical structure of fossil coals by means of a non-destructive method such as small-angle scattering of thermal neutrons, which makes it possible to study the structure in the volume of samples.

Fractal dimensions and their correlation links with the specific surface of the pore space, the degree of coalification, the depth of coal seam and with the propensity of the seam to coal and gas outbursts for coals of the Donetsk coal basin are determined. The resulting fractal dimensions and specific surfaces gives the total porosity, in contrast to the method of low-temperature adsorption of nitrogen, which characterizes open porosity only.

The photomicrographs obtained with the scanning electron microscope made it possible to conclude that the structure of the coal of the outburst hazardous layers is characterized by a surface fractal  $D_s$  with a dimension close to 2,9–3,0 or by the mass fractal that is formed by conglomerates of various mineral inclusions containing iron and sulfur. In threatened seams, the coal structure is characterized by more “smooth” pore space surfaces at  $D_s < 2.9$  and by the higher content of silicon and aluminum.

keywords: coal, closed porosity, fractal dimension, hazardous seam, mineral inclusions, neutron, small-angle scattering, specific surface.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-33-48

## AUTHORS

Vasilenko T.A. — Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Chief Researcher of the Laboratory of Mining Impacts of the Scientific Center of the Saunt-Petersburg Mining University, St.-Petersburg, Russia

Islamov A.K. — Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

Kirillov A.K. — Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of Laboratory of the forecast of gas resources, Institute for physics of mining processes of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Doroshkevych O.S. — Candidate of Physics and Mathematics, Researcher, Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

## REFERENCES

1. Sokolov I.M. *Anomalous diffusion on fractal networks*. Mathematics of complexity and dynamical systems, Vol. 1. Ed. Meyers R.A.. Springer, 2011. pp. 13–25.
2. Zelenyi L.M., Milovanov A.V. "Fractal topology and strange kinetics: from percolation theory to problems in cosmic electrodynamics" 47 749–788 (2004).
3. Sadovsky Natural M.A. *rock lumpiness*, DAN SSSR, 1979, 247, no. 4, pp. 829–831.
4. Psakhie S.G., Shilko E.V., A.Yu. Smolin, Dimaki A.V., Dmitriev A.I., Ig.S. Konovalenko, Astafurov S.V., Zavshek S. *Approach to simulation of deformation and fracture of hierarchically organized heterogeneous media, including contrast media*. Physical Mesomechanics, 2011, no. 5–6, pp. 224–248
5. Panin V.E., Egorushkin V.E., Panin A.V., Moiseenko D.D. *On the nature of plastic strain localization in solids*. Technical Physics, 2007, Vol. 52, Iss. 8, pp. 1024–1030.
6. Kudryavtsev P., Figovskii O. *Zol'-gel' tekhnologiya poristykh materialov* [Sol-gel technology of porous materials] (in Russ.). Lambert Academic Publishing, 2015. 468 p.
7. Smirnov Fizika B.M. *Fraktal'nykh klasterov* [Physics of fractal clusters] (in Russ.) / Moskva: Nauka, 1991. 136 p.
8. Eggersdorfer M.L., Pratsinis The S.E. *Structure of agglomerates consisting of polydisperse particles*. Aerosol Science and Technology, 2012, Vol.46, no.3, pp. 347–353.
9. Astakhov A.V., Belyi A.A., Shirochin D.L., Ekonomova Osobennosti L.N. *Dielektricheskih svoistv gazonasysychennogo uglya i fraktal'nost' ego strukturnoi organizatsii* [Features of the dielectric properties of gas-saturated coal and the fractality of its structural organization]. Khimiya tverdogo topliva, 1998. no. 5. pp. 37–42.
10. Bale H.D., Schmidt Small P.W. *angle X-ray-scattering investigation of submicroscopic porosity with fractal properties*. Physical Review Letters, 1984, Vol. 53, no. 6, pp. 597–599.
11. Radlinski A. P, Mastalerz M, Hinde A. L, et al. *Application of SAXS and SANS in evaluation of porosity, pore size distribution and surface area of coal*. International Journal of Coal Geology, 2004, Vol. 59, no. (3–4), pp. 245–271
12. Snook I., Yarovsky I., Hanley H.J. M., et al. *Characterization of metallurgical chars by small angle neutron scattering*. Energy and Fuels, 2002, Vol.6, no. 5, pp. 1009–1015.
13. Melnichenko Yu. B., He L., Sakurovs R., et al. *Accessibility of pores in coal to methane and carbon dioxide*. Fuel, 2012, Vol. 91, pp. 200–208.
14. Niu Q., Pan J., Cao L., et al. *The evolution and formation mechanisms of closed pores in coal*. Fuel, 2017, Vol. 200, pp. 555–563.
15. Alekseev A.D., Konstantinova T.E., Kirillov A.K. i dr. *Dielektricheskie svoistva uglei v intervale chastot do 1 MGTs* [Dielectric properties of coal in the frequency range up 1 MHz]. Fiziko-tekhnicheskie problemy gornogo proizvodstva. Donetsk, 2010. Vyp. 13. pp. 22–31.
16. Alekseev A.D., Vasilenko T.A., Kirillov A.K. *Svyaz' fraktal'noi razmernosti strukturnoi organizatsii ugol'nogo veshchestva s parametrami diffuzii metana* [Relation of the fractal dimension of coal substance structural organization with the parameters of methane

diffusion]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'. Metan. Moscow, 2008. Vyp. 4. P. 76–84.

17. Vasilenko T.A., Kirillov A.K., Slyusarev V.V. *Issledovanie ierarkhicheskoi struktury iskopaemykh uglei metodom pressovaniya. Opredelenie polnoi poristosti* [Study of the hierarchical structure of coals by pressing. Measuring of the total porosity]. Fizika i tekhnika vysokikh davlenii. 2015. Vol. 25, no. (1–2). pp. 133–142.

18. Kirillov A.K. *Issledovanie uglei Donetskogo ugol'nogo basseina metodom malouglovogo rentgenovskogo rasseyaniya* [Small-angle X-ray scattering study of Donets basin coals]. Fiziko-tekhnicheskie problemy gornogo proizvodstva: Sb. nauch. tr. Donetsk, 2011. Vol. 14, pp. 20–32.

19. Cherny A. Yu., Anitas E.M., Osipov V.A., Kuklin A.I. *Scattering from surface fractals in terms of composing mass fractals*. Journal of Applied Crystallography, 2017, Vol. 50, pp. 919–931.

20. Hurd A.J., Schaefer D.W., Nartin J.E. *Surface and mass fractals in vapor-phase aggregates*. Physical Review A., 1987, Vol. 35, no. 5, pp. 2361–2364.

21. Sinha S. *Small-angle scattering from porous materials*. Methods in the physics of porous media, ed. Wong P.Z., San Diego, London: Academic Press; 1999, pp. 223–262.

22. Melnichenko Yu. B. *Small-angle scattering from confined and interfacial fluids. Applications to energy storage and environmental science*. Switzerland: Springer Intern. Publ., 2016, 314 p.

23. Deyong G., Li G., Xinhui M. *Experimental research on pore structure and gas adsorption characteristic of deformed coal*. China petroleum processing and petrochemical technology scientific research, 2014, Vol.16, no. 4, pp. 55–64.



## ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ ПОИНТЕРВАЛЬНОМ ГИДРОРАЗРЫВЕ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

Рассмотрена задача об упругопластическом деформировании образца горной породы при проведении направленного гидроразрыва. Показано влияние давления рабочей жидкости в межпакерном пространстве, а также касательных усилий на границе между герметизирующими элементами и горной породой. Приведены зоны развития пластических деформаций в процессе нагружения. Рассчитаны поля смещений на конечном этапе деформирования.

Ключевые слова: направленный гидроразрыв, горная порода, скважина, пакер, метод конечных элементов, упругость, пластичность, модель Кулона-Мора.

---

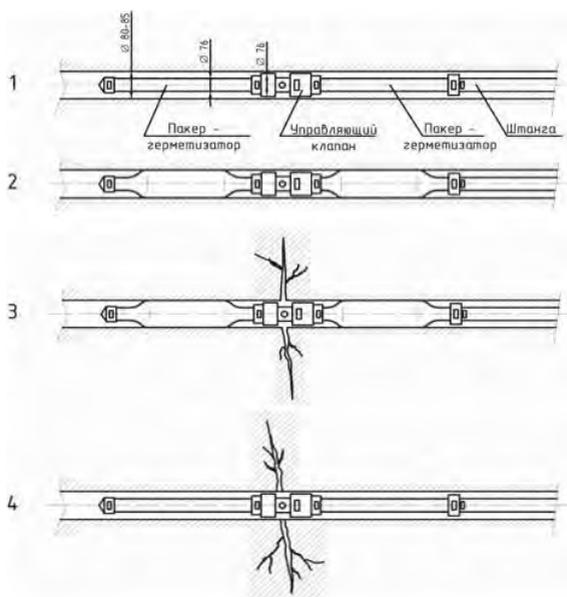
DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-49-57

### Введение

Одной из основных проблем подземной разработки угольных месторождений является присутствие в большинстве шахт труднообрушающихся кровель, которые создают повышенное горное давление, что значительно снижает эффективность и безопасность горных работ [1]. Метод гидравлического разрыва пласта, заключающийся в формировании трещин в массивах горных пород под действием подаваемой под давлением жидкости, известен с середины 1940-х годов [2]. В институтах горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН и Угля ФИЦ УУХ СО РАН была предложена уникальная технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями. Суть этой технологии состоит в предварительном нарезании в стенках скважины специальным инструментом дисковой иницирующей щели и после ее герметизации – в подаче рабочей жидкости под высоким давлением, необходимым для гидроразрыва пород основной кровли в плоскости нарезанной щели, с целью ее посадки [3, 4, 5].

Для повышения эффективности предварительной дегазации неразгруженных пластов угля до начала очистных работ разработан принципиально новый способ интенсификации дегазации для получения максимального дебита скважины — способ поинтервального

гидроразрыва дегазационной скважины (рис. 1). В настоящее время показано, что газоотдающую способность неразгруженных угольных пластов можно повысить путем улучшения их коллекторских свойств на основе метода поинтервального гидроразрыва пласта, один из вариантов этой идеи был изложен в [6, 7]. Его сущность состоит в формировании в угольном пласте системы трещин гидроразрыва заданной конфигурации, предназначенных для частичной разгрузки массива горных пород, создания в нем фильтрационных каналов для дренирования пород и их дегазации. Считается, что увеличение проницаемости призабойной зоны продуктивного угольного пласта при использовании гидроразрыва происходит за счет образования новых трещин или расширения и углубления в нем естественных трещин. Трещины, образовавшиеся в процессе ориентированного поинтервального гидроразрыва пласта, могут достигать в длину нескольких десятков метров и, соединяясь между собой, значительно увеличивают проницаемость дегазационной скважины [8].

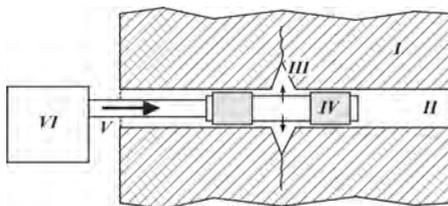


**Рис. 1. Технологическая схема реализации поинтервального гидроразрыва угольного массива: 1 – ввод пакера в скважину; 2 — герметизация скважины; 3 – гидрорасчленение угольного массива; 4 – разгерметизация скважины и перемещение пакера**

Принципиальная схема процесса разрушения в случае плоского напряженного состояния представлена на рис. 2, где I – образец горной породы. На стенках скважин (шпуров) II создаются инициирующие щели

III с заданной формой и размерами, которые являются концентраторами напряжений. Далее по обе стороны щели III скважина герметизируется пакерами IV. Затем через высоконапорную трубу V, присоединенную к насосу VI, под давлением нагнетается вязкая жидкость. По мере роста гидростатического давления в межпакерном пространстве в концевой части инициирующей щели порода испытывает растягивающие напряжения и, при достижении ими определенного уровня, происходит зарождение поперечной трещины и в дальнейшем распространение ее в заданном направлении. Задача о разрушении горных пород при проведении направленного гидроразрыва исследуется как экспериментально, так и теоретически в различных постановках [9–11].

В работе [11] продемонстрировано поведение растягивающего напряжения в критической точке (конце инициирующей трещины) в зависимости от расположения герметизирующих элементов. Здесь задача решалась численно методом конечных элементов в рамках абсолютно упругого тела, а инициирующая щель представлялась в виде двух сходящихся под заданным углом отрезков. Таким образом, в области, примыкающей к концу трещины, происходил скачок напряжений и деформаций.



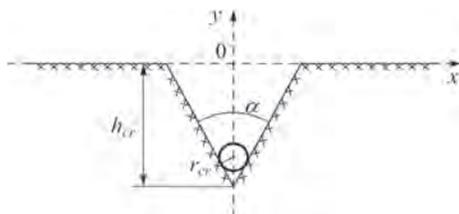
**Рис. 2. Схема направленного гидроразрыва с предварительно нарезанной щелью: I – образец горной породы; II – скважина; III – инициирующая щель; IV – герметизирующие элементы (пакеры); V – высоконапорная труба; VI – насос**

### **Численный расчет методом конечных элементов**

В настоящей работе предложено аппроксимировать инициирующую трещину (щель) длины  $h_{cr}$  в виде сходящихся под заданным углом  $\alpha$  отрезков и дуги окружности с радиусом  $r_{cr}$ , как показано на рис. 3. В качестве модели деформирования и потери устойчивости материала выбрана популярная упругопластическая модель Кулона-Мора, описывающая зависимость касательных напряжений материала от величины приложенных нормальных напряжений. В ее основе лежит гипотеза о зависимости предельных касательных напряжений от среднего нормального напряжения, а также предположение о том, что данная зависимость обусловлена внутренним трением в твердом теле. Данная теория широко используется в горном деле применительно к связным горным породам и требует определения четырех расчетных

параметров: модуля упругости, коэффициента Пуассона, сцепления и угла внутреннего трения.

Задача решалась численно методом конечных элементов в квазистатической постановке с решением по шагам параметра нагружения. В процессе численного счета рассчитывались зоны пластических деформаций, оказывающие влияние на дальнейшее состояние образца. В данном исследовании физические параметры модели приняты следующие: модуль упругости  $E = 5 \cdot 10^3$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0.16$ ; плотность  $\rho = 2\,400$  кг/м<sup>3</sup>; сцепление  $C = 1.0$  МПа; угол внутреннего трения  $\phi = 20^\circ$ . Ширина нагружаемого образца 1.6 м, высота – 1.0 м. Расстояние между пакерами составило 0.4 м. Глубина щели  $h_{cr} = 0.04$  м, радиус закругления  $r_{cr} = 0.001$  м. Параметром нагружения в численном счете является давление в межпакерном пространстве  $P$ , которое изменялось от 0 до 200 атм.



*Рис. 3. Сглаживание иницирующей трещины дугой окружности*

### **Результат численного счета – нагружение с иницирующей щелью**

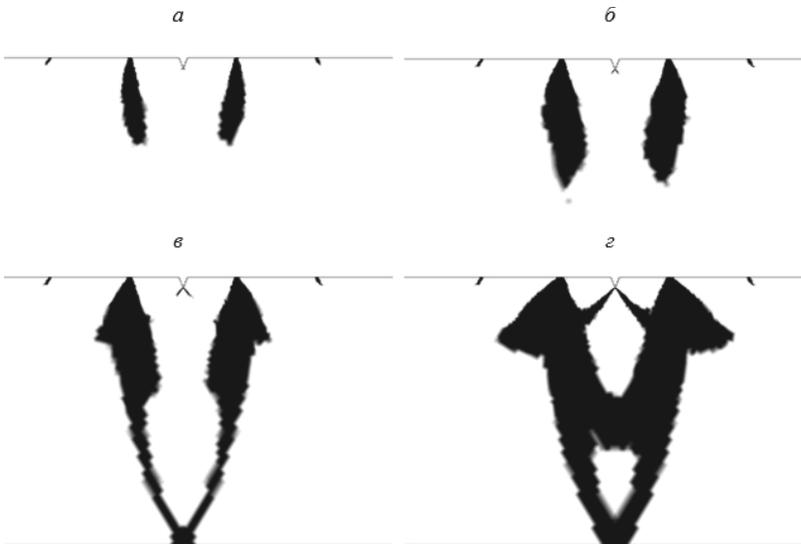
Результаты численного расчета напряженно-деформированного образца с трещиной представлены на рис. 4 и 5. На рис. 4, а–г темным цветом показан процесс последовательного развития зон пластических деформаций с увеличением параметра нагружения (области ненулевых значений пластических деформаций). Видно, что потеря несущей способности материала реализуется как в кончике трещины, так и в областях прилегания герметизирующих элементов.

Поля горизонтальных и вертикальных смещений на конечном этапе нагружения представлены на рис. 5, а и рис. 5, б соответственно. Здесь хорошо видно образование штампа, ограниченного по ширине межпакерным интервалом.

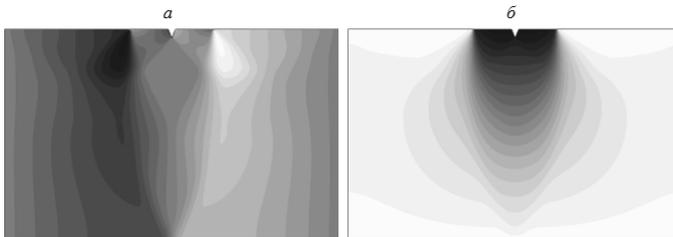
### **Результат численного счета – нагружение без иницирующей щели**

Распор пакеров сжимает горизонтальные трещины и исключает разрыв пласта по этим трещинам на более удаленное расстояние, где вертикальные трещины пересекают горизонтальные и в них под давлением проникает жидкость раскрывая существующие трещины в

режиме гидрорасчленения (микроразрывы). Они в дальнейшем могут пережиматься вновь, но новые образованные вертикальные трещины под действием горного давления не сглаживаются, а развиваются (сохраняются). Происходит наведенная технологической трещиноватостью в пласте в том числе за счет раскрытия под давлением существующих трещин. Наилучший результат когда трещина гидроразрыва перпендикулярно пересекает естественную трещиноватость.



**Рисунок 4. Развитие зон пластических деформаций при нагружении образца с инициирующей щелью**



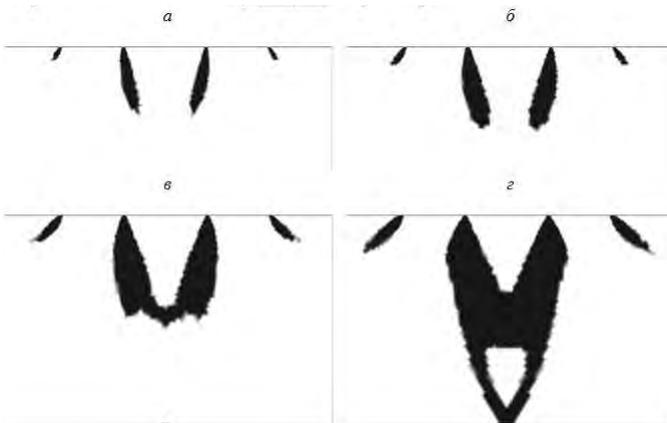
**Рисунок 5. Поле горизонтальных (а) и вертикальных (б) смещений на конечном этапе нагружения**

Эксперименты показывают, что для этого необходимы высокая скорость закачки и вязкие жидкости разрыва, что обеспечивает распространение трещины вкрест естественной системы трещиноватости.

В противном случае, возможен разворот и раскрытие уже существующих трещин.

Трещины развиваются в энергетически выгодном направлении, которое зависит от напряженного состояния массива и его трещиноватости. Учитывая, что под действием горного давления существующие наиболее развитые трещины по напластованию (вдоль простирания), остаются прижатыми, стоит задача создания трещин гидроразрыва, ориентированными поперек скважины (вкрест простирания угольного пласта). В такие трещины газ подпитывается из трещин напластования.

На рис. 6 представлен результат численного расчета процесса распространения зон пластических деформаций в материале при отсутствии иницирующей щели. В отличие от задачи, рассмотренной выше, здесь задавались дополнительные касательные напряжения на контактах между пакерами и горной породой.



**Рис. 6. Развитие зон пластических деформаций при нагружении образца без иницирующей щели с заданием касательных напряжений на контактах пакеров с горной породой**

В момент подачи рабочей жидкости в устройство, упругие элементы герметизаторов увеличиваются в диаметральном направлении вплоть до соприкосновения со стенками скважины. При этом, в силу неизменности объемов упругих элементов, происходит их укорачивание в осевом направлении. Поскольку два герметизатора, связанные между собой через корпус, выполненный в виде стакана, создают значительные растягивающие силы. Для повышения надежности работы устройства в настоящее время конструкция усовершенствуется — предложено устранить растягивающие силы в месте присоединения упругих элементов к втулкам герметизаторов, путем введения в конструкцию устройства компенсатора осевых перемещений.

## Выводы

В технологии поинтервального гидроразрыва угольного пласта для интенсификации процессов дегазации рассмотрены условия возникновения поперечных трещин гидроразрыва. Упругопластический критерий Кулона-Мора позволяет описать развитие областей неупругих деформаций в задачи о деформировании образца горной породы при проведении направленного гидроразрыва. Введение дополнительных касательных напряжений на контактах между герметизирующими элементами и горной породой приводит к картинам деформирования, схожим с картинами, полученными при наличии иницирующей щели гидроразрыва.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клишин В.И., Зворыгин Л.В., Лебедев А.В., Савченко А.В. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. Новосибирск: ИД «Новосибирский писатель», 2011.
2. Bažant Z.P., Salviato M., Chau V.T., Visnawathan H., Zubelewicz A. Why Fracking Works // Journal of Applied Mechanics. – 2014. – Volume 81. – Issue 10.
3. Чернов О.И. Гидродинамическая стратификация монолитных прочных пород в качестве способа управления труднообрушающейся кровлей // ФТПРПИ. – 1982. – № 2.
4. Клишин В.И. Адаптация механизированных крепей к условиям динамического нагружения. –Новосибирск: Наука, 2002.
5. Клишин В.И., Опрук Г.Ю., Сентюров А.В., Николаев А.В. Опыт применения направленного гидроразрыва основной кровли при выводе механизированного комплекса из монтажной камеры // Уголь. – 2015. – №11.
6. Клишин В.И., Опрук Г.Ю., Тациенко А.А. Применение поинтервального гидроразрыва угольного пласта для интенсификации пластовой дегазации / Сиб. гос. Индустр. Ун-т. – Новокузнецк, 2016. – №2. – С.33–39.
7. Klishin V.I. Technology and means of a coal seam interval hydraulic fracturing for the seam degassing intensification / V.I. Klishin, G.Y. Opruk, A.L. Tatsienko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Ser. “All-Russian Conference on Challenges for Development in Mining Science and Mining Industry Devoted to the 85th Anniversary of Academician Mikhail Kurlenya” 2017. С. 012019. DOI: 10.1088/1755–1315/53/1/012019
8. Черный С.Г., Лапин В.Н., Есипов Д.В., Куранаков Д.С. Методы моделирования зарождения и распространения трещин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. – 312 с.
9. Jun F., Linming D., Hua H., Taotao D., Shibin Z., Bing G., Xinglin S. Directional hydraulic fracturing to control hard-roof rockburst in coal mines // International Journal of Mining Science and Technology. – 2015. – Volume 22. – Issue 2. – PP. 177–181.
10. Deng J., Yang Q., Liu Y., Liu Yi, Zhang G. 3D finite element modeling of directional hydraulic fracturing based on deformation reinforcement theory // Computers and Geotechnics. – 2018. – Volume 94.

11. Клишин С.В. Задача о возникновении поперечной трещины при разрушении прочной горной породы методом направленного гидроразрыва / Научные технологии добычи и переработки полезных ископаемых. Труды IV международной конференции. Новосибирск: ИГД СО РАН, 2005. С. 221–225.

ГИАБ

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Тациенко А.Л. — ПЕ Шахтопроходческое управление, АО «СУЭК-Кузбасс»  
E-mail: atacienko@bk.ru, ул. Токарева, 1, 652518, г. Польшаево, Россия,  
Клишин С.В. — Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, E-mail:  
sv.klishin@gmail.com, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 49–57.

**Tacienko A.L., Klishin S.V.**

### **The occurrence of transverse cracks when per-interval hydraulic fracturing of the coal seam**

The problem of elastic-plastic deformation of a rock sample during directional hydraulic fracturing is considered. The influence of the working fluid pressure in the inter-package space, as well as the tangential forces at the boundary between the sealing elements and rock is shown. Zones of development of plastic deformations in the process of loading are given. Displacement fields at the final stage of deformation are calculated. Keywords: directional hydraulic fracturing, rock, well, packer, finite element method, elasticity, plasticity, Coulomb-Mohr model.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-49-57

## AUTHORS

Tacienko A.L., Mining Department, JSC «SUEK-Kuzbass», E-mail: atacienko@bk.ru, Tokareva str., 1, 652518, polysaev, Russia,  
Klishin S.V., Institute of mining them. N. Cincala SB RAS, E-mail: sv.klishin@gmail.com, Krasny Prospekt, 54, 630091, Novosibirsk, Russia.

## REFERENCES

1. Klishin V.I., Zvorygin L.V., Lebedev A.V., Savchenko A.V. *Problemy bezopasnosti i novye tekhnologii podzemnoj razrabotki ugol'nyh mestorozhdenij* [Problems of safety and new technologies of underground mining of coal deposits]. Novosibirsk: ID «Novosibirskij pisatel'», 2011.
2. Bažant Z.P., Salviato M., Chau V.T., Visnawathan H., Zubelewicz A. *Why Fracking Works*. Journal of Applied Mechanics. 2014. Volume 81. Issue 10.
3. Chernov O.I. *Gidrodinamicheskaya stratifikaciya monolitnyh prochnykh porod v kachestve sposoba upravleniya trudnoobrushayushchejsya krovlej* [Hydrodynamic

stratification of monolithic strong rocks as a method of control of hard-to-collapse roof]. FTPRPI. 1982. no 2.

4. Klishin V.I. *Adaptaciya mekhanizirovannyh krepej k usloviyam dinamicheskogo nagruzheniya* [Adaptation of powered roof supports to the dynamic loading conditions]. Novosibirsk: Nauka, 2002.

5. Klishin V.I., Opruk G.Yu., Sentyurev A.V., Nikolaev A.V. *Opyt primeneniya napravlenogo gidrorazryva osnovnoj krovli pri vyvode mekhanizirovannogo kompleksa iz montazhnoj kamery* [Experience of use of directional hydraulic fracturing of the main roof in the derivation of the mechanized complex mounting of the camera]. Ugol'. 2015. no 11.

6. Klishin V.I., Opruk G.Yu., Tacienco A.L. *Primenenie pointerval'nogo gidrorazryva ugol'nogo plasta dlya intensivkacii plastovoj degazacii* [Application of interval hydraulic fracturing of a coal seam for the intensification of reservoir degassing]. Sib. gos. Industr. Un-t. Novokuzneck, 2016. no 2. pp.33–39.

7. Klishin V.I., Opruk G.Y., Tatsienko A.L. *Technology and means of a coal seam interval hydraulic fracturing for the seam degassing intensification*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Ser. "All-Russian Conference on Challenges for Development in Mining Science and Mining Industry Devoted to the 85th Anniversary of Academician Mikhail Kurlenya" 2017. S. 012019. DOI: 10.1088/1755-1315/53/1/012019

8. Chernyj S.G., Lapin V.N., Esipov D.V., Kuranakov D.S. *Metody modelirovaniya zarozhdeniya i rasprostraneniya treshchin* [Methods for modeling of initiation and propagation of cracks]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2016. 312 p.

9. Jun F., Linming D., Hua H., Taotao D., Shibin Z., Bing G., Xinglin S. *Directional hydraulic fracturing to control hard-roof rockburst in coal mines*. International Journal of Mining Science and Technology. 2015. Volume 22. Issue 2. pp. 177–181.

10. Deng J., Yang Q., Liu Y., Liu Yi, Zhang G. *3D finite element modeling of directional hydraulic fracturing based on deformation reinforcement theory*. Computers and Geotechnics. 2018. Volume 94.

11. Klishin S.V. *Zadacha o voznikovenii poperechnoj treshchiny pri razrushenii prochnoj gornoj porody metodom napravlennogo gidrorazryva* [Problem of occurrence of a transverse crack in the destruction of solid rock by directional hydraulic fracturing]. Naukoemkie tekhnologii dobychi i pererabotki poleznyh iskopaemyh. Trudy IV mezhdunarodnoj konferencii. Novosibirsk: IGD SO RAN, 2005. pp. 221–225.



## ЧИСЛЕННО-ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ АЭРОЛОГИИ

Повышение экономической эффективности подземной добычи угля возможно за счет концентрации и интенсификации производства, что ведет к увеличению рисков возникновения опасных аэрологических состояний. Это делает необходимым количественное оценивание возникающих угроз и рисков и применение менеджмента риска в реальном времени. Важнейшими являются риски фугасного, токсического и теплового поражения, оценивание и управление которыми связаны с необходимостью решения аэрологических задач. Большинство из этих задач основано на уравнении газового баланса и их решение осложнено следующим: (а) используются средние значения переменных, которые определяются на длительных промежутках времени, что не позволяет реализовать управление аэрологическим риском в темпе технологических процессов; (б) для оперативного управления риском необходимо учитывать процессы перемещения и смешивания газовых смесей. Такие задачи относятся к математической физике и не могут быть решены в реальном времени в производственных условиях; (в) переменные в уравнении газового баланса являются случайными, что не в полной мере учитывается в расчетах; (г) конечной целью расчетов должны быть оценки вероятностей возникновения опасных аэрологических ситуаций.

Для решения уравнения газового баланса используются нормативный подход, который базируется на использовании средних значений контролируемых параметров за длительные промежутки времени, и оперативный подход, использующий мгновенные значения контролируемых параметров. В статье рассматривается применение численных вероятностных методов, которые базируются на использовании статистических характеристик контролируемых переменных, определяемых на коротких временных интервалах: запись уравнение газового баланса для гистограмм контролируемых переменных; определение метанообильности; возможность прогнозирования временных рядов гистограмм; вычисление вероятности возникновения взрывоопасной метановоздушной смеси.

Ключевые слова: аэрология, метан, риск, вероятность, гистограмма, уравнение газового баланса

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-58-70

Повышение экономической эффективности подземной добычи угля в усложняющихся горно-геологических условиях возможно за счет концентрации и интенсификации производства, что неизбежно приво-

ISSN 0236–1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 58–70.

© А.Г. Бабенко, О.В. Смирнов, 2018.

дит к приближению параметров производственных процессов к границам, отделяющим безопасные режимы работы от опасных. Работа на этих границах требует управления безопасностью работ в темпе технологических процессов и количественного оценивания возникающих угроз и рисков. Это осуществимо в рамках менеджмента риска в реальном времени, который базируется на непрерывном и в реальном времени количественном оценивании рисков и является необходимым условием для управления им [1]. Далее под риском понимается сочетание вероятности опасного события с ущербом от него.

Важнейшими являются риски фугасного, токсического и теплового поражения, реализуемые при взрывах и пожарах. Оценивание и управление перечисленными рисками связаны с необходимостью решения аэрологических задач, – это недопущение и прогноз образования взрывоопасных пылегазовых смесей, и шире – прогноз содержания опасных и вредных газов, в том числе для недопущения токсического поражения; обнаружение пожаров на ранних стадиях по индикаторным газам и т. п. Некоторые аэрологические задачи являются нормативными. Так перерасчет режимов проветривания выемочного участка должен производиться: ежемесячно на основе данных о фактической метанообильности за предшествующий месяц; при превышении фактической метанообильности над проектной более чем на 10 % в течение суток – на основе данных за предшествующие сутки; при трехкратном в течение смены превышении концентрации метана относительно установленных норм – на основе данных за предшествующую смену; после посадки основной кровли – на основе данных за предшествующие трое суток; и т. д.

Большинство инженерных аэрологических расчетов основано на уравнениях газового баланса, решение которых осложнено следующим:

а) в уравнения газового баланса, используемых для вентиляционных расчетов, используются скалярные переменные, их средние значения определяются на длительных промежутках времени (1...30 суток). Так, например, для очистного забоя

$$Q_{\Gamma}^r \times C_{\Gamma}^M + Q_3^M + Q_B^M = Q_{\Delta}^r \times C_{\Delta}^M + Q_{\Gamma}^r \times C_{\Gamma}^M, \quad (1)$$

где  $Q_{\Gamma}^r$  и  $C_{\Gamma}^M$ ,  $Q_{\Gamma}^r$  и  $C_{\Gamma}^M$ ,  $Q_{\Delta}^r$  и  $C_{\Delta}^M$  – средние за рассматриваемый промежуток времени расходы газовых смесей (м<sup>3</sup>/мин) и содержания метана (% об. доли) в поступающей, исходящей струях и на дегазацию соответственно;  $Q_3^M$  и  $C_B^M$  – количество метана, выделившегося в лаву из пласта и отбитого угля и выработанного пространства соответственно (м<sup>3</sup>/мин). Обеспечение аэрологической безопасности в условиях приближения параметров производственных процессов к границам безопасных режимов требует соответствующих вычислений в темпе технологических процессов – с периодом 10 мин и менее;

б) для решения задач газового баланса в темпе технологических процессов необходимо учитывать аэрогазодинамические процессы: перемещение газовых смесей, конвекцию и молекулярную и турбулентную диффузию газов в них. Такие задачи относятся к математической физике и требуют применения конечно-разностных вычислительных методов, однако в масштабе горного участка размерность задачи делает фактически невозможным ее решение в реальном масштабе времени в условиях угольной шахты. Это осложняется еще и параметрической нестационарностью и неконтролируемостью параметров уравнений и граничных условий (топология и свойства горных выработок и пр.) и неточностью исходных данных (погрешность измерения содержаний газов в рудничной атмосфере и скорости движения газовой смеси и пр.). Для учета этого при значительных упрощениях уравнение (1) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} & W_{\Pi}(t) \left( Q_{\Pi}^r(t - \tau_3 - \tau_{\Delta}) \times C_{\Pi}^M(t - \tau_3 - \tau_{\Delta}) \right) + \\ & + W_3(t) \left( Q_3^M(t - \tau_3) \right) + W_B(t) \left( Q_B^M(t - \tau_{\Delta}) \right) = \\ & = Q_{\Delta}^r(t) \times C_{\Delta}^M(t) + W_{И}(t) \left( Q_{И}^r(t - \tau_{\Delta}) \times C_{И}^M(t - \tau_{\Delta}) \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $W_{\Pi}(t)$ ,  $W_3(t)$ ,  $W_B(t)$  и  $W_{И}(t)$  – нестационарные нелинейные операторы преобразования (в простейшем случае апероидические звенья  $l$ -го порядка), учитывающий процессы смешивания газов в поступающей, выделяющейся в забой, выделяющейся из выработанного пространства и исходящей струях, соответственно [2];  $Q(t)$  и  $C(t)$  – текущие мгновенные значения соответствующих переменных;  $\tau_3 = \tau_3(t)$  и  $\tau_{\Delta} = \tau_{\Delta}(t)$  – нестационарные времена запаздывания, характеризующие перемещение газовых смесей. Решение (2) осуществимо в реальном времени, но точность получаемых решений низка из-за погрешностей измерительных систем и упрощения описания аэрогазодинамических процессов;

в) переменные в уравнении газового баланса являются случайными, при этом плотность распределения вероятности (ПРВ), при этом вид функции и ее параметры зависят от режимов работы технологического оборудования. Для случайных величин, рассматриваемых на длительных промежутках времени (сутки и более), учет этого возможен в рамках их описания стандартными распределениями. Так, инженерный расчет расхода воздуха  $Q$  на разбавление метана до концентрации  $C$  (% об. долей) при концентрации метана в поступающей струе  $C_0$  и среднем метановыделении на участке  $\bar{I}$  ( $\text{м}^3/\text{мин}$ ) выполняется по формуле  $Q = 100\bar{I}K_M / (C - C_0)$  с учетом коэффициента неравномерности  $K_M$ , который отражает статистику появления максимальных значений параметра. Однако при рассмотрении случайных переменных в темпе технологических процессов из-за недостаточности выборки дан-

ных невозможно определить функцию ПРВ и обойтись только коэффициентом неравномерности, который зависит от вида этой функции и ее параметров;

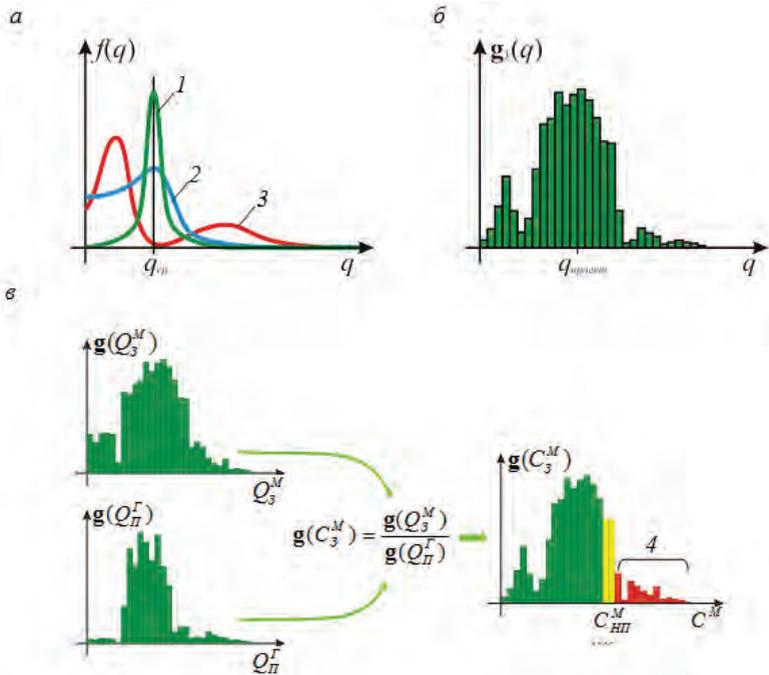
г) для решения задачи непрерывного и в реальном времени количественного оценивания и управления рисками, связанными с угрозами аэрологического характера, необходимо оценивать вероятности возникновения опасных аэрологических ситуаций, а не получать оценки средних значений.

Для решения уравнения газового баланса традиционно используются следующие подходы: нормативный, который базируется на использовании средних значений контролируемых параметров – уравнение (1), вычисляемых за длительные промежутки времени [3]; и оперативный, использующий мгновенные значения контролируемых параметров, – уравнение (2) [2]. Далее рассматривается численно-вероятностный (ЧВ) подход, предусматривающий применение методов ЧВ-анализа [3–12], которые базируются на использовании статистических характеристик контролируемых, определяемых на конечных (коротких) промежутки времени.

Поскольку на уровень аэрологической безопасности определяющее влияние оказывает содержание метана, то в качестве примера рассмотрим задачу определения относительно метанообильности (ОМ). Производственными и технологическими решениями в (1) обеспечиваются расчетные значения  $Q_{\Pi}^r$  и  $Q_{\Delta}^r$ . Для их расчета используется усредненная в пространстве (по пласту) и во времени оценка ОМ  $q_{\text{ср}}$  ( $\text{м}^3/\text{т}$ ) которая также применяется и при проектировании –  $q_{\text{проект}}$ . Однако фактическая ОМ ( $q$ ), которая определяет  $C_3^M$  и  $Q_{\Pi}^r$ , зависит от многих факторов (распределение НДС угольного пласта, наличия геологических нарушений, свойств угля и пр.) и может отличаться от  $q_{\text{ср}}$ . Маловероятные и высокие текущие значения  $q$  могут приводить к опасным аэрологическим ситуациям (загазированию), поэтому текущую ОМ необходимо рассматривать как случайную величину. Рассмотрим возможные ПРВ ОМ  $f(q)$  с одинаковой  $q_{\text{ср}}$  (рис. 1, а), по которой производится расчет  $Q_{\Pi}^r$ : а) линии 1 и 2 характеризуются тем, что наиболее вероятное значение  $q$  равно или близко к  $q_{\text{ср}}$ , в этом случае нормативные вентиляционные расчеты являются адекватными;

б) линия 3 соответствует ситуации, когда угольный пласт содержит два типа участков с низкой и высокой ОМ: при отработке участков с низкой ОМ количество воздуха на разбавление будет избыточным и концентрация метана будет значительно ниже нормативных порогов  $C_{\text{НП}}^M$ , при отработке участков в высокой ОМ неизбежно будут возникать загазирования. Это требует учета ПРВ параметров аэрологического состояния, однако это связано с необходимостью получения характеристик ПРВ соответствующих случайных величин, что невозможно осуществить на рассматриваемых в темпе технологических процессов, т. е.

на коротких временных интервалах. Возникающая проблема решается путем замены ПРВ ее приближением в виде гистограммы, например, на рисунке 1, б показана гистограмма ОМ  $g_k(q)$ , которая может быть построена на основе текущих данных, собираемых системой АГК на коротком  $k$ -ом интервале времени.



**Рис. 1.** Плотности распределения вероятности относительной метанообильности (а), расчетные для  $k$ -го временного интервала статистические оценки для нее (б) и расчет гистограммы для содержания метана в забое (в)

Для уравнения (1) ОМ может быть вычислена по формуле:

$$q = Q_3^M / Q_K = (Q_D^r C_D^M + Q_I^r C_I^M - Q_n^r C_n^M - Q_B^M) / Q_K, \quad (3)$$

где  $Q_K$  - производительность очистного комбайна, т/мин. Все переменные в (3) рассматриваются как случайные, при этом  $Q_n^r, C_n^M, Q_D^r, Q_3^M$  и  $Q_B^M$  являются независимыми. С использованием ЧВ методов (3) примет вид:

$$g_k(q) = (g_k(Q_D^r)g_k(C_D^M) + g_k(Q_I^r)g_k(C_I^M) - g_k(Q_n^r)g_k(C_n^M) - g_k(Q_B^M)) / q_k(Q_K), \quad (4)$$

где  $\tau$  – гистограмма параметра  $x$  на  $k$ -м временном интервале,  $g_k(x) = \{g_1(x \in [X_1, X_2]), \dots, g_i(x \in [X_i, X_{i+1}]), \dots, g_n(x \in [X_n, X_{n+1}])\}$ ;  $g_i(x \in [X_i, X_{i+1}])$  – количество отсчетов  $x$ , удовлетворяющих условию  $X_i \leq x < X_{i+1}$ ;  $X_i$  и  $X_{i+1}$  – границы  $i$ -го поддиапазона, где  $\forall i, X_i < X_{i+1}$ ;  $n$  – количество поддиапазонов в диапазоне изменения  $x$ . Так как в правой части (4) все переменные доступны прямому измерению системой АГК и системой управления комбайном, то их гистограммы  $g_k(x)$  могут быть получены и, следовательно, гистограмма  $g_k(q)$  может быть вычислена. Использование в вентиляционных расчетах гистограмм позволяет выявлять ошибки, связанные с отсутствием ее маловероятных и опасных значений в исходных данных. Построение и вычисление гистограмм проводится в скользящем временном окне на временных интервалах длительностью сотни секунд.

Анализ объектов, которые характеризуются переменными, представленными в виде гистограмм, имеет статистический характер и позволяет непосредственно не учитывать в расчетах аэрогазодинамические процессы или использовать упрощенные уравнения аэрогазодинамики, которые могут быть получены из (4) за счет использования в них гистограмм, вычисленных для временных интервалов, смещенных во времени на времена запаздывания  $\tau$ , которые характеризуют перемещение газовых смесей в (2).

Воспользуемся аналогичным подходом для оценки текущего значения метановыделения, которое является важной характеристикой, оказывающей решающее влияние на аэрологическую безопасность. Для количества метана, выделяющегося в забое, гистограмма может быть получена по формуле

$$g_k(Q_3^M) = g_k(Q_H^M) + g_k(Q_A^M) - g_r(Q_B^M) - g_k(Q_H^M), \quad (5)$$

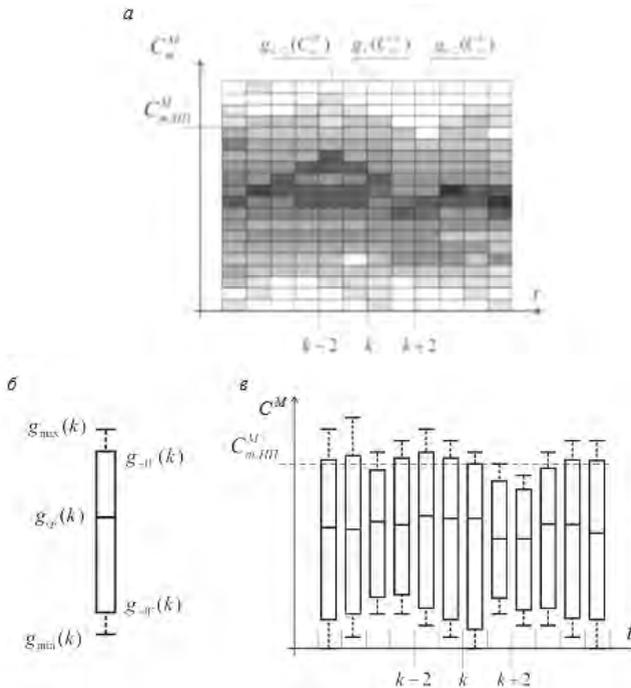
где  $g_k(Q_H^M)$ ,  $g_k(Q_A^M)$ ,  $g_k(Q_H^M)$  – гистограммы, вычисляемые на основе измерений;  $g_r(Q_B^M)$  – гистограмма, которая рассчитывается на основе данных о метановыделении в выработанном пространстве за длительные промежутки времени для определенного технологического режима очистного забоя. Тогда для  $g_k(Q_3^M)$ , вычисленной по (5), и  $g_k(Q_H^M)$  на основе измерений, может быть получена гистограмма содержания метана в забое по формуле  $g_k(C_3^M) = g_k(Q_3^M) / g_k(Q_H^M)$  (рис. 1, в). Наличие такого статистического описания позволяет оценить для  $k$ -го временного интервала вероятность опасного аэрологического состояния (столбцы 4 на рисунке 1, в):

$$p((C_m^M > C_{mHP}^M) = 1) = \left( \sum_{j=1}^n g_{m,j}^M(C_m^M > C_{mHP}^M) \right) / \left( \sum_{j=1}^n g_{m,j}^M(0 \leq C_m^M \leq 100) \right), \quad (6)$$

где  $g(C_m^M) = \{g_{m,1}^M, \dots, g_{m,j}^M, \dots, g_{m,n}^M\}$  – гистограммы содержания метана,  $g_{m,j}^M$  – значение  $j$ -го столбца (из  $n$ ) гистограммы для  $m$ -й точки кон-

троля. Также возможно спрогнозировать общую длительность превышения метаном нормативного порогового уровня  $C_3^M > C_{3,НП}^M$  или для периода оценивания  $T_{ОЦ}$  на основе информации о средних длительностях загазований  $T_{РАЗ}$  и разгазования  $T_{РАЗ}$  оценить их количество –  $n_{ЗАГ} = pT_{ОЦ} / (T_{ЗАГ} + T_{РАЗ})$ . Аналогично для других точек контроля, в которых невозможно, затруднительно или нецелесообразно прямое измерение метана (других параметров аэрологического состояния), вычисление гистограмм производится на основе соответствующих расчетов, проводимых с гистограммами переменных, которые могут быть измерены или оценены на предшествующих временных интервалах.

Возможность получения на  $k$ -ом временном интервале гистограмм содержания метана в  $m$ -ых точках контроля  $g_k(C_m^M)\sqrt{b^2 - 4ac}$  позволяет формализовать процесс количественного оценивания аэрологического риска на основе выражения (6) и рассмотреть возможности прогнозирования аэрологического риска на основе обработки временных рядов характеристик соответствующих гистограмм (рисунок 2, а). Это важно, например, при управлении очистным комплексом, при этом точный оперативный (десятки секунд) прогноз мгновенного значения содержания метана представляется нереализуемым, однако можно использовать оценку вероятности появления взрывоопасной метановоздушной смеси (МВС). Такая задача может быть решена путем анализа временных рядов гистограмм. В частности для гистограмм  $g_k(C_m^j)$  могут быть определены различные характеристики (рисунок 2, б): среднее значение  $g_{cp}(k)$  (или медиана); границы диапазона значений, включающие  $D\%$  всех значений  $g_{+D}(k)$ ,  $g_{-D}(k)$  (или верхняя или нижняя квартиль), при этом могут одновременно рассчитываться границы для нескольких значений  $D$ ; максимум и минимум  $g_{min}(k)$ ,  $g_{max}(k)$  и др. Изменение во времени этих характеристик показано на рис. 2, в в виде диаграммы размахов. При этом сравнительная оценка риска может быть проведена по отношению к допустимой вероятности образования взрывоопасной МВС  $p_{МП}^M$ , которая может определяться при проектировании или при текущем менеджменте аэрологического риска. Временные ряды  $g_{cp}(k)$ ,  $g_{+D}(k)$ ,  $g_{-D}(k)$ ,  $g_{min}(k)$ ,  $g_{max}(k)$ ,  $p_{C_{mj}}^M(k)$  могут быть подвергнуты анализу на  $(k + 1)$ ,  $(k + 2)$ , ... временных интервалах, что дает возможность прогнозировать вероятности возникновения взрывоопасной МВС и аэрологического риска. При решении такой задачи применим богатый арсенал существующих методов, которые описаны в [11–14] и других работах. Полученные оценки вероятности возникновения взрывоопасной МВС должны использоваться в качестве характеристик иницирующих условий при количественном оценивании риска [1].  $C^M$

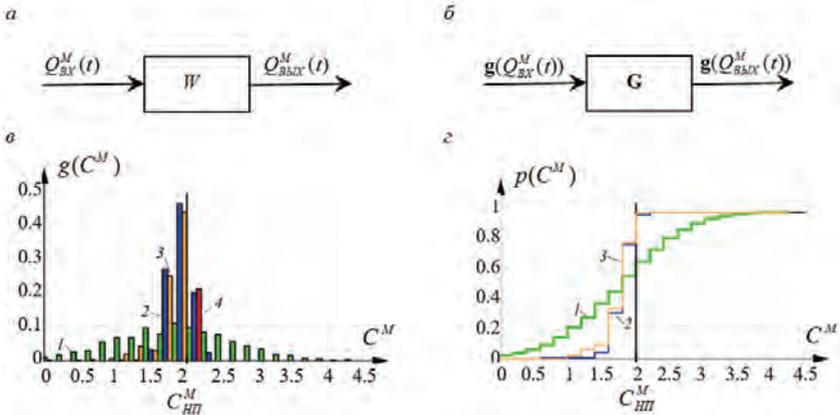


**Рис. 2. Изменение гистограмм выделения метана в забое во времени (а), структура диаграммы размахов (б) и изменение во времени диаграммы размахов выделения метана в забое (в)**

Одна из наиболее важных задач обеспечения аэрологической безопасности связана с оптимальным управлением очистным участком по критерию максимизации интегральной производительности при условии обеспечения аэрологической безопасности. Основными каналами оперативного управления вероятностью загазований являются изменение производительностью очистного комбайна и порогового уровня срабатывания автоматической газовой защиты (АГЗ) [15]. Отметим, что выражение (6) при замене  $C_{mHP}^M$  на задаваемый (управляемый) пороговый уровень  $C_{mП}^M \leq C_{mHP}^M$  позволяет оценивать вероятность превышения содержания метана оперативно задаваемых пороговых уровней АГЗ, что необходимо при наличии в задаче управления ограничений на количество загазований.

Рассмотренные выше примеры базируются на ЧВ методах, которые реализуют базовые арифметические операции, при этом обязательным требованием является независимость переменных, гистограммы которых являются операндами этих операций. В тоже время

существуют задачи прогнозирования вероятности возникновения опасных МВС, которые связаны с изменением гистограмм во времени и требуют учета перемешивания газовой смеси при ее движении в горной выработке (в (2) это передаточные операторы  $W(s) = Q_{\text{ВЫХ}}^M(s) / Q_{\text{ВХОД}}^M(s)$ , где  $s$  – оператор Лапласа,  $Q_{\text{ВХОД}}^M(s)$  и  $Q_{\text{ВЫХ}}^M(s)$  – расходы метана на входе и выходе участка горной выработки (рис. 3, а)). К таким задачам, например, относится задача прогнозирования гистограммы содержания метана на десятки секунд. Исследования, которые проводились на упрощенных компьютерных моделях аэрогазодинамических процессов в горных выработках [2], показали, что возможен переход от описания участка горной выработки с помощью оператора  $W(s)$ , связывающего мгновенные значения переменных на ее входе и выходе, к оператору  $G = g(Q_{\text{ВЫХ}}^M(t)) / g(Q_{\text{ВХОД}}^M(t))$ , который связывает гистограммы переменных (рис. 3, б).



**Рис. 3. Преобразование расходов метана на входе и выходе участка горной выработки при их описании мгновенными значениями (а) и гистограммами (б); гистограммы содержания метана (в) и соответствующие им распределения вероятности (з)**

Для построения статистической динамической модели аэрологических процессов в лаге дополнительно к известным ЧВ методам, обеспечивающим выполнение арифметических операций, разработаны операторы преобразования  $G$  и методика их получения. Операторы  $G$  обеспечивают моделирование процесса перемещения и перемешивания газовой смеси и позволяют с относительной погрешностью не более 5 % для гистограмм  $g(Q_{\text{ВХОД}}^M(t))$  (ряда распределений, технологических режимов работы очистного комплекса) получить гистограммы  $g(Q_{\text{ВЫХ}}^M(t))$  применительно к участку горной выработки, которая описывается динамическим звеном вида  $W(s) = \exp(-\tau s)(Ts + 1)^{-1}$ , где  $\tau$  и  $T$  – времена, характеризующее перемещение газовой смеси по горной

выработке и перемешивание газовой смеси,  $l$  – порядок аperiodического звена. В методике используется кластерный анализ для классификации типов гистограмм  $g(Q_{BX}^M(t))$  и технологических режимов и радиально-базисная нейронная сеть с 16 слоями, которая обучается для каждого типа гистограмм и реализуют соответствующие им операторы  $G$ . На рис. 3, в показаны: 1 и 2 – гистограммы содержания метана в газовой смеси на входе и на выходе участка горной выработки при его описании передаточной функцией  $W(s) = Q_{BX}^M / Q_{BbX}^M = \exp(-3s)(5s - 1)^{-1}$ , 3 – гистограмма содержания метана на выходе при использовании ЧВ расчетах; на рис. 3, г – соответствующие им распределения вероятностей. Анализ распределений вероятностей (рис. 3, г) показывает высокую сходимость результатов статистической обработки данных, получаемых при численном моделировании на основе дифференциальных уравнений, и результатов ЧВ преобразования оператором  $G$  (линии 2 и 3 соответственно на рисунке).

Представленные примеры подтверждают применимость ЧВ методов для: решения уравнения газового баланса на основе гистограмм переменных, характеризующих аэрогазовое состояние горного участка; оценивания плотности распределения вероятности метанообильности; оценивания и прогнозирования вероятности возникновения взрывоопасных метановоздушных смесей. Также показана возможность получения упрощенных аэрогазодинамических модели, позволяющего по параметрам участка горной выработки и гистограмме расхода газовой смеси на ее входе вычислить гистограмму расхода газовой смеси на выходе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабенко, А.Г.* Количественное оценивание текущего риска эксплуатации угольных шахт / А.Г. Бабенко // Изв. Вузов. Горный журнал. – 2016. – № 4. – С.24–35.

2. *Смирнов, О.В.* Активная параметрическая идентификация аэрогазодинамической модели горных выработок / О.В. Смирнов, С.Э. Лапин, А.Г. Бабенко // Безопасность труда и эффективность производства горнодобывающих предприятий с подземным способом разработки: сб. докл. I Междунар. Науч.-техн. конф. (Екатеринбург, 6–7 апр. 2016 г.) Екатеринбург: Изд-во УГУ, 2016. С. 1–8].

3. Инструкции по применению схем проветривания выемочных участков шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства с помощью газоотсасывающих установок. Серия 05. Вып. 21. – М. : ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2012. – 128 с.

4. *Герасимов, В.А.* Численные операции гистограммной математики и их применение / В.А. Герасимов, Б.С. Добронев, М.Ю. Шустров // Автоматика и телемеханика. – 1991. – Вып. 2. – С. 83–88.

5. *Добронец, Б.С.* Интервальная математика / Б.С. Добронец. – Красноярск: Изд-во КГУ, 2004. – 216 с.
6. *Добронец, Б.С.* Элементы численного вероятностного анализа / Б.С. Добронец, О.А. Попова // Вестн. Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. академика М.Ф. Решетнева. – 2012. – № 2. – С. 19–23.
7. *Liu B.* Theory and Practice of Uncertain Programming (2nd Edition). Springer-Verlag, Berlin, 2009.
8. *R. Williamson, T. Downs,* Probabilistic arithmetic. I. Numerical methods for calculating convolutions and dependency bounds, International Journal of Approximate Reasoning, 1990, no. 4., 89–158.
9. *W. Li, J. Hym,* Computer arithmetic for probability distribution variables, Reliability Engineering and System Safety, 85 (2004).
10. *Billard, L., & Diday, E.* (2006). Symbolic data analysis: conceptual statistics and data mining. Chichester: Wiley & Sons.
11. *Афанасьев, В.Н.* Анализ временных рядов и прогнозирование / В.Н. Афанасьев, М.М. Юзбашев. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 228 с.
12. *Орлов, Ю.* Нестационарные временные ряды. Методы прогнозирования с примерами анализа финансовых и сырьевых рынков / Ю. Орлов, К. Осминин. – М.: ЛИБРОКОМ, 2011. – 384 с.
13. *Hamilton, J.D.,* Time Series Analysis, 1994, Princeton University Press, Ch 1, 2, 3.
14. *Pollock, D.S.G.,* 1999. Time-Series Analysis, Signal Processing and Dynamics. The Academic Press, London.
15. *Бабенко, А.Г.* Структура системы оптимального управления добычным комплексом / А.Г. Бабенко // Изв. вузов. Горный журнал. – 2015. – № 8. – С. 50–59. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Бабенко Александр Григорьевич* — канд. техн. наук, доцент, технический директор, тел: +7(343)257–72–76, e-mail: Babenko.Alexander@gmail.com, ООО «Информационные горные технологии», Россия, 620144, Екатеринбург, а/я 64;

*Смирнов Олег Владимирович* — канд. техн. наук, начальник управления аэрологической безопасности предприятий АО «СУЭК», АО «СУЭК», Россия, 115054, Москва, ул. Дубининская 53, стр. 7.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 58–70.

**Babenko A.G., Smirnov O.V.**

## Numerical-probabilistic calculations in the problems of aerology

Increasing the economic efficiency of underground coal mining is possible due to the concentration and intensification of production, which leads to an increase in the aerological risk. This makes it necessary to quantify the emerging threats and risks and apply risk

management in real time. The most important risks of high explosive, toxic and thermal damage are related to the need to solve aerological problems. Most of these tasks are based on the gas balance equation and their solution is complicated by the following: (a) average values of variables are used, which are determined over long periods of time, which does not allow the management of aerological risk in the rate of technological processes; (b) for operational risk management the mathematical physics needs to consider processes of gas movement and mixing, such tasks can't be solved in the conditions of coal mines in real time; (c) the variables in the gas balance equation are random, which is not fully taken into account in the calculations; (d) the ultimate goal of calculations should be assessments of the probabilities of occurrence of dangerous upper-air situations.

For the solution of the gas balance equation normally approach is used, which is based on the use of the average values of the controlled parameters calculated over long time intervals; and an operational approach that uses instantaneous values of controlled parameters. The article deals with the application of numerical probability methods, which are based on the use of statistical characteristics of controlled variables in finite time intervals: solution the equation of gas balance for histograms of controlled aerological variables; estimating the density of probability distribution of methaneability; estimation and prediction of the probability of occurrence of explosive methane-air mixtures. It is also shown that it is possible to obtain a simplified air-gas dynamic model, which, in terms of the parameters of the section, allows mining output and a histogram of the gas mixture flow at its inlet to calculate the histogram of the gas mixture flow rate at the outlet.

Keywords: risk, aerology, methane, probability, histogram, gas balance equation.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-58-70

## AUTHORS

*Babenko Alexander Grigorevish*, PhD, Associate Professor, Technical Director, tel: +7 (343) 257-72-76, e-mail: Babenko.Alexander@gmail.com, Information Mining Technologies LLC, Russia, 620144, Yekaterinburg, PO Box 64

*Smirnov Oleg Vladimirovich*, PhD, Head of Aerological Safety Management at JSC SUEK, JSC SUEK, Russia, 115054, Moscow, ul. Dubininskaya 53, p. 7.

## REFERENCES

1. Babenko, A.G. *Kolichestvennoe ocenivanie tekushchego riska ekspluatatsii ugol'nyh shaht* [Quantitative assessment of the current risk of exploitation of coal mines]. *Izv. Vuzov. Gorniy zhurnal*. 2016. no 4. pp.24–35.

2. Smirnov O.V. , Lapin S.E., Babenko A.G. *Aktivnaya parametricheskaya identifikatsiya aerogazodinamicheskoy modeli gornyh vyrabotok* [Active parametric identification eurogasolineconomic models of mine workings]. *Bezopasnost' truda i effektivnost' proizvodstva gornodobyvayushchih predpriyatij s podzemnym sposobom razrabotki*: sb. dokl. I Mezhdunar. Nauch.-tekhn. konf. (Ekaterinburg, 6–7 apr. 2016 g.) Ekaterinburg: Izd-vo UGGU, 2016. pp. 1–8].

3. *Instrukcii po primeneniyu skhem provetrivaniya vymochnyh uchastkov shaht s izolirovannym otvodom metana iz vyrabotannogo prostranstva s pomoshch'yu gazoosasyvyayushchih ustanovok* [Instructions for use schemes of airing of excavation sites of mines with isolated removal of methane from out space with gazoosasyvyayushchih installations]. Seriya 05. Vyp. 21. Moscow: ZAO «Nauchno-tekhnicheskij centr issledovaniy problem promyshlennoj bezopasnosti», 2012. 128 p.

4. Gerasimov V.A., Dobronec B.S., Shustrov M.Yu. *Chislennyye operatsii gistogrammnoy matematiki i ih primenenie* [Numerical operations of histogram mathematics and their application]. *Avtomatika i telemekhanika*. 1991. Vyp. 2. pp. 83–88.

5. Dobronec, B.S. *Interval'naya matematika* [Interval mathematics]. Krasnoyarsk: Izd-vo KGU, 2004. 216 p.

6. Dobronec B.S., Popova O.A. *Elementy chislenogo veroyatnostnogo analiza* [Elements of numerical probability analysis]. Vestn. Sib. gos. aerokosm. un-ta im. akademika M.F. Reshetneva. 2012. no 2. pp. 19–23.
7. Liu B. *Theory and Practice of Uncertain Programming (2nd Edition)*. Springer-Verlag, Berlin, 2009.
8. Williamson R., Downs T. *Probabilistic arithmetic*. I. Numerical methods for calculating convolutions and dependency bounds, International Journal of Approximate Reasoning, 1990, no. 4., pp. 89–158.
9. W. Li, J. Hym. *Computer arithmetic for probability distribution variables*, Reliability Engineering and System Safety, 85 (2004).
10. Billard, L., & Diday, E. (2006). *Symbolic data analysis: conceptual statistics and data mining*. Chichester: Wiley & Sons.
11. Afanas'ev V.N., Yuzbashev M.M. *Analiz vremennykh ryadov i prognozirovaniye* / Moscow: Finansy i statistika, 2001. 228 p.
12. Orlov Yu., Osminin K. *Nestacionarnyye vremennyye ryady. Metody prognozirovaniya s primerami analiza finansovykh i syr'evykh rynkov*. Moscow: LIBROKOM, 2011. 384 p.
13. Hamilton, J.D., *Time Series Analysis*, 1994, Princeton University Press, Ch 1, 2, 3.
14. Pollock, D.S.G., 1999. *Time-Series Analysis*, Signal Processing and Dynamics. The Academic Press, London.
15. Babenko A.G. *Struktura sistemy optimal'nogo upravleniya dobychnym kompleksom* [The structure of the system of optimum control of the mining complex]. Izv. vuzov. Gornyy zhurnal. 2015. no 8. pp. 50–59.



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГРАНУЛИРОВАННОГО ГЕОМАТЕРИАЛА ОТ НАПРЯЖЕНИЙ\*

Создана лабораторная установка для исследования зависимости  $k$  проницаемости гранулированных геоматериалов от эффективных напряжений  $\sigma_e$ . Емкость в форме параллелепипеда заполнялась калиброванным песком, на различных участках верхней грани, покрытой эластичной непроницаемой мембраной, прикладывалось контролируемое датчиками вертикальное напряжение  $\sigma$ . На противоположных вертикальных гранях задавался перепад давления газа  $\Delta p$  и регистрировался расход  $Q(\Delta p, \sigma)$ . Разработана математическая модель эксперимента. Предполагая, что  $k\sigma_e$  – экспоненциальная функция с эмпирическим коэффициентом  $\alpha$  в показателе, найдено аналитическое решение и предложен метод количественной оценки  $\alpha$  на основе минимизации функционала относительной невязки между  $Q$  и теоретически рассчитанным расходом. Оказалось, что  $\alpha$  можно определить независимо от вязкости газа и начальной проницаемости упаковки геоматериала. Обработка данных экспериментов показала, что величина  $\alpha$  имеет тенденцию к незначительному уменьшению с ростом напряжений.

Ключевые слова: гранулированный геоматериал, физическая модель, лабораторный эксперимент, фильтрация, газ, зависимость проницаемость-напряжение, целевая функция

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-71-81

### Введение

Обоснование схем вскрытия и разработки углеводородов, оценка извлекаемых запасов, интерпретация данных геофизического исследования скважин – вот далеко не полный перечень проблем, для решения которых необходимо знать фильтрационно-емкостные свойства пород, а также закономерности их изменения в процессе добычи [1–3].

Коллекторы газогидратных месторождений являются, как правило, гранулированными [4] или слабokonсолидированными [5] средами, фильтрационно-емкостные свойства которых зависят от фракционного

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (проект № 18-05-00830).

состава, пористости, упаковки и ряда других характеристик [6–8]. При вскрытии продуктивного интервала и извлечении газогидратов в окрестности скважины существенно меняется напряженно-деформированное состояние, упаковка частиц коллектора и, следовательно, фильтрационно-емкостные характеристики. В [9] реализован типичный подход для оценки тензора проницаемости  $K$  в подобных условиях: для известного гранулометрического состава методом частиц определяется геометрия порового пространства при заданной системе нагрузок, затем  $K$  находится посредством численного моделирования процесса фильтрации флюида через образец.

Накоплен большой объем информации о зависимости проницаемости  $k$  и пористости горных пород (в основном, нефтеносных) от напряжений, полученной как в лабораторных [10–14], так и в натуральных [15–17] условиях. Экспериментальные данные обычно аппроксимируются линейной

$$k(\sigma_e) = k_0(1 + \alpha\sigma_e)$$

или экспоненциальной

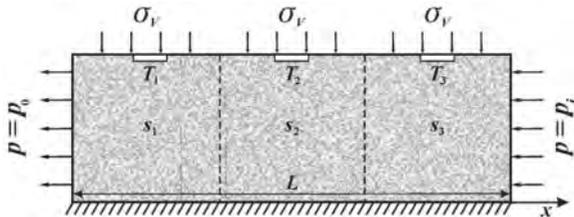
$$k(\sigma_e) = k_0 \exp(\alpha\sigma_e) \quad (1)$$

функцией [18,19], где  $\sigma_e = p - \sigma$ ,  $p$  – давление флюида,  $\sigma$  – среднее напряжение (положительные значения соответствуют сжатию),  $\alpha$  – эмпирический коэффициент. Для пород с пористостью 1520% величина  $\alpha \cong 0.0010.01$  атм<sup>-1</sup>, для углей  $\alpha \cong 0.00010.001$  атм<sup>-1</sup>. В то же самое время крайне мало публикаций [20,21], содержащих аналогичные экспериментальные данные для гранулированных сред. Между тем, учет зависимости проницаемости от напряжений типа (1) в мультифизических моделях, описывающих процессы деформирования и массообмена в прискважинной зоне [22], существенно влияет на распределение гидродинамических и электромагнитных полей, а также на результаты инверсии данных ГИС при количественной оценке фильтрационно-емкостных характеристики продуктивных пластов [23].

В настоящей работе теоретически обоснован и на физической модели апробирован экспериментальный способ определения зависимости проницаемости гранулированных геоматериалов от напряжений.

Схема эксперимента и процедура испытаний. Измерительная ячейка состоит из полиуретановой манжеты в форме параллелепипеда (длина  $L=105$  мм, ширина и высота  $h=30$  мм), с торцов закрытой металлическими фланцами со штуцерами для соединения с измерительной системой. Ячейка заполнялась калиброванным песком (размер частиц 160–250 мкм, насыпная плотность 1650 кг/м<sup>3</sup>) общим весом 165 г. Предварительно песок максимально уплотнялся во влажном состоянии, а затем просушивался в манжете. На каждом из трех участков  $s_1$ ,  $s_2$ , и  $s_3$  верхней грани, с помощью винтовых домкратов независимо

прикладывалось вертикальное напряжение  $\sigma_v$ , контролируемое датчиками  $T_1, T_2$ , и  $T_3$  (рис. 1). На вертикальной грани  $x=L$  обеспечивалось постоянное давление воздуха  $p = p_i$ , на противоположной грани  $p = p_0$  ( $p_0$  – атмосферное давление) и в стационарном режиме фильтрации измерялся расход.



**Рис. 1. Схема эксперимента и граничные условия расчетной модели**

Для исходной упаковки регистрировался расход  $Q_0$  при  $p_i = 2.0, 2.2, \dots, 3.0$  атм. На участке  $s_1$  прикладывалось напряжение  $\sigma_v = 9$  атм, измерялся расход  $Q_{11}, \dots, Q_{16}$  при таких же  $p_i$ , затем нагружался участок  $s_2$  и, наконец,  $s_3$ . Полученные значения расхода  $Q_{ni}$  (отнесенные к  $Q_0$ ) сведены в табл. 1.

Таблица 1

**Относительный расход газа при  $\sigma_v = 9$  атм**

i	$p_i$ , атм	$Q_0$ , л/с	участки нагружения		
			$s_1$	$s_1, s_2$	$s_1, s_2, s_3$
			$n=1$	$n=2$	$n=3$
1	2.0	0.102	1.031	0.894	0.715
2	2.2	0.119	1.089	0.913	0.717
3	2.4	0.138	1.074	0.907	0.736
4	2.6	0.161	1.149	0.925	0.758
5	2.8	0.179	1.123	0.934	0.823
6	3.0	0.201	1.174	0.982	0.835

Для проведения следующей серии измерений лоток встряхивался, проверка восстановления исходных фильтрационных характеристик упаковки осуществлялась измерением расхода  $Q_0(p_i)$ . Затем повторялась описанная последовательность нагружения участков верхней грани физической модели и измерение расхода: результаты для  $\sigma_v = 10.5$  и  $12$  атм приведены в табл. 2 и 3 соответственно.

Модель эксперимента. Процесс стационарной фильтрации в лотке можно описать одномерной моделью, включающей:

уравнение неразрывности

$$\text{div} \vec{V} = 0 \tag{2}$$

Таблица 2

**Относительный расход при  $\sigma_v = 10.5$  атм**

i	$p_i$ , атм	$Q_0$ , л/с	участки нагружения		
			$s_1$	$s_1, s_2$	$s_1, s_2, s_3$
			$n=1$	$n=2$	$n=3$
1	2.0	0.101	1.046	0.794	0.649
2	2.2	0.120	1.056	0.826	0.685
3	2.4	0.139	1.044	0.834	0.688
4	2.6	0.160	1.077	0.854	0.718
5	2.8	0.182	1.099	0.882	0.724
6	3.0	0.199	1.122	0.907	0.746

Таблица 3

**Относительный расход газа при  $\sigma_v = 12$  атм**

i	$p_i$ , атм	$Q_0$ , л/с	участки нагружения		
			$s_1$	$s_1, s_2$	$s_1, s_2, s_3$
			$n=1$	$n=2$	$n=3$
1	2.0	0.099	1.002	0.743	0.627
2	2.2	0.118	1.011	0.774	0.639
3	2.4	0.139	1.018	0.784	0.641
4	2.6	0.162	1.022	0.792	0.657
5	2.8	0.181	1.057	0.797	0.661
6	3.0	0.200	1.073	0.866	0.692

и закон Дарси

$$\vec{V} = -k\nabla p / \eta \quad (3)$$

где  $\vec{V} = (v, 0, 0)$ ,  $v$  – скорость в направлении  $x$  (рис. 1),  $\eta$  – вязкость газа,  $k$  – проницаемость, зависящая от эффективного напряжения по (1),  $p$  – давление. Система (1) – (3) сводится к уравнению

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k_0}{\eta} e^{(p-\sigma)} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 0 \quad (4)$$

с граничными условиями (рис. 1)

$$p(0) = p_0, \quad p(L) = p_i. \quad (5)$$

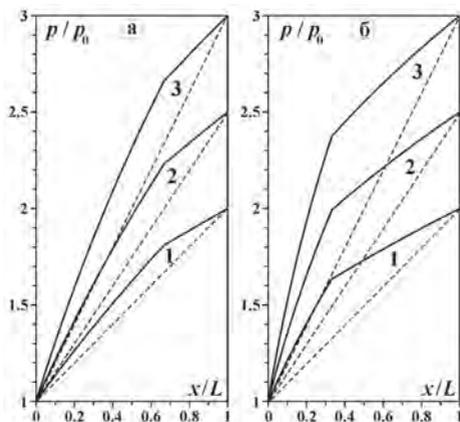
Решение (4), (5) имеет вид

$$p(x) = \frac{1}{\alpha} \ln \left[ e^{\alpha p_0} + (e^{\alpha p_i} - e^{\alpha p_0}) G(x, \alpha) / G(L, \alpha) \right], \quad (6)$$

$$G(x, \alpha) = \int_0^x e^{\alpha \sigma(\xi)} d\xi,$$

где  $\sigma(\xi)$  – распределение среднего напряжения на отрезке  $[0, L]$ . В рассматриваемом случае  $\sigma$  – кусочно-постоянная функция, в частности, если нагрузка приложена на участке  $s_1$ , то  $\sigma(\xi) = \sigma_v H(L/3 - \xi) / 3$  ( $H$  – функция Хевисайда). Заметим, что при  $\alpha \rightarrow 0$  из соотношения (6) следует  $p(x) = p_0 + (p_i - p_0)x / L$ .

На рис. 2 представлено распределение давления  $p$  в модели при различных схемах нагружения  $n$  и значениях параметра  $\alpha$ : сплошные линии 1, 2 и 3 соответствуют  $p_i = 2, 2.5$  и 3 атм; штрихом показано давление при  $\alpha=0$ . Отметим, что ростом параметра  $\alpha$  градиент  $p$  «на выходе» увеличивается.



**Рис. 2. Давление газа:  $n = 2, \alpha = 0,3$  (а);  $n = 1, \alpha = 0,5$  (б)**

По (6) можно найти расход при  $x=0$

$$Q(p_i, \alpha) = Q_0 F(p_i, \alpha),$$

$$Q_0 = \frac{k_0 h^2}{\eta} \frac{p_i - p_0}{L}, \quad F(p_i, \alpha) = \frac{\exp(\alpha p_i) - \exp(\alpha p_0)}{\alpha(p_i - p_0)} \frac{L}{G(L, \alpha)},$$

причем функция  $Q$  обладает очевидными свойствами

$$Q(p_i, \alpha) \rightarrow 0, \quad Q(p_i, \alpha) \rightarrow Q_0 \quad \begin{matrix} p_i \rightarrow p_0 \\ \alpha \rightarrow 0 \end{matrix}.$$

На рис. 3 в безразмерных координатах  $(p_i/p_0, \alpha p_0)$  показаны изолинии  $F(p_i, \alpha)$  при  $\sigma_v = 6$  атм и различных схемах нагружения  $n$ . Можно видеть, что для любых  $\alpha$  существует давление  $p_i$ , при котором  $F > 1$ , что

является следствием (1): если  $p_i > \sigma$ , то проницаемость превышает исходное значение  $k_0$ .

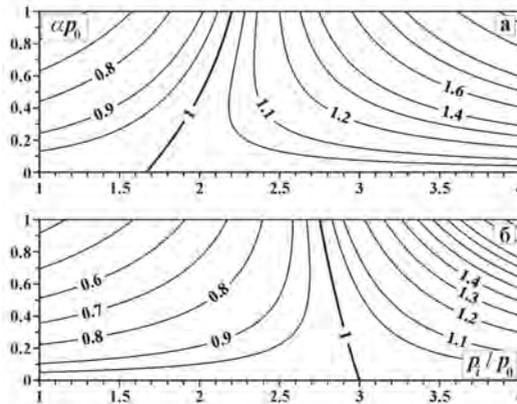


Рис. 3. Линии уровня  $F$ :  $n = 2$  (а);  $n = 3$  (б)

Интерпретация экспериментальных данных. Оценим эмпирический параметр  $\alpha$  по результатам испытаний (относительный расход  $Q_{ni}$  при различных схемах нагружения  $n$  и давлении  $p_i$  на входе, табл. 1, 2 и 3). Введем целевую функцию

$$\Psi(\alpha) = \frac{\sqrt{18 \sum_{n=1}^3 \sum_{i=1}^6 [F(p_i, \alpha) - Q_{ni}]^2}}{\sum_{n=1}^3 \sum_{i=1}^6 Q_{ni}},$$

представляющую собой относительную невязку между теоретическими значениями  $F$  и данными экспериментов. Минимум  $\Psi$ , определяющий модифицированным методом сопряженных градиентов [24], доставляет искомые  $\alpha = \alpha_{*}$ , представленные в табл. 4 для трех значений вертикального напряжения  $\sigma_v$ . Анализ показал, что в отличие от горных пород для гранулированной среды с ростом напряжений имеет место тенденция уменьшения (хотя и незначительного) параметра  $\alpha$  в (1).

Таблица 4

**Параметр  $\alpha$  в (1), определенный по данным экспериментов**

$\sigma_v$	$\alpha_{*}, \mathbf{1/атм}$	$\Delta, \%$
9.0	0.215	4.5
10.5	0.198	6.9
12.0	0.189	5.6

Примечание.  $\Delta\Phi(\alpha_{*})$  – относительная ошибка.

Рис. 4 демонстрирует полученные зависимости  $F(p, \alpha)$  при  $\alpha = \alpha_*$ , цифры у линий соответствуют схеме нагружения модели, кружки – экспериментальные данные.

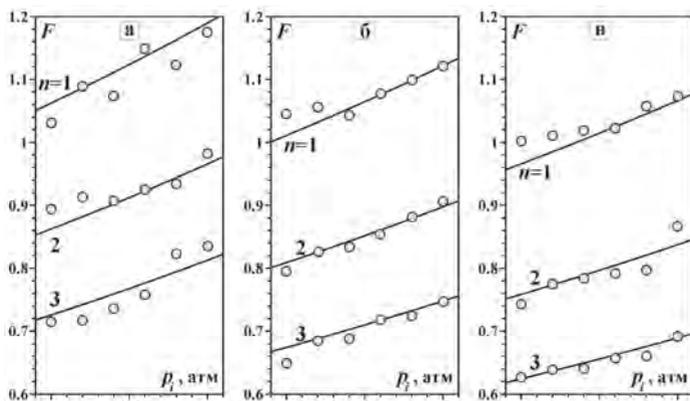


Рис. 4. Функции  $F(p, \alpha)$ :  $\sigma_v = 9$  атм (а);  $\sigma_v = 10.5$  атм (б);  $\sigma_v = 12$  атм (в)

### Заключение

Предложен и в лабораторных условиях апробирован метод количественной оценки эмпирических параметров в экспоненциальной зависимости проницаемости гранулированных материалов от напряжений. Показано, что параметр в показателе экспоненты незначительно уменьшается с ростом напряжений и может быть определен независимо от вязкости используемого в экспериментах флюида и начальной проницаемости упаковки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Speight J.G. An Introduction to Petroleum Technology, Economics, and Politics. John Wiley & Sons Limited, 2011. 336 p.
2. Dake L.P. The Practice of Reservoir Engineering. Elsevier, 2001. 572 p.
3. Van Golf-Racht T. Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering. Elsevier, 1982. 732 p.
4. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
5. Исаева О.А., Бружес Л.Н., Вавилин В.А. и др. Литолого-минералогическая характеристика и особенности порового пространства отложений пласта АВ1 (группы «рябчик») Урьевского месторождения / Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории. Материалы VII Всероссийского литологического совещания (Новосибирск, 28–31 октября 2013 г.), Т.1. – Новосибирск: ИНГ СО РАН, 2013. – С. 388–392.

6. *Urumovic K., Urumovic Sr. K.* The effective porosity and grain size relations in permeability functions // *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2014, Vol. 11, pp. 6675–6714.

7. *Knackstedt M.A., Duplessis J.P.* Simple permeability model for natural granular media // *Geophysical Research Letters*, 1996, Vol. 23(13), pp. 1609–1612.

8. *Практика С.В.* Специфика инженерно-геологического и гидрогеологического изучения пород золоотвалов ТЭЦ // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2014. – № 8. – С. 322–326.

9. *Kuhn M.R., Sun W., Wang Q.* Stress-induced anisotropy in granular materials: fabric, stiffness, and permeability // *Acta Geotechnica*, 2015, Vol. 10(4), pp. 399–419.

10. *Holt R.M.* Permeability reduction induced by a nonhydrostatic stress field // *SPE Formation Evaluation*, 1990, N. 5, pp. 444–448.

11. *Heller R., Vermuyen J., Zoback M.* Experimental investigation of matrix permeability of gas shales // *Bulletin of The American Association of Petroleum Geologists*, 2014, Vol. 98, no 5, pp. 975–995.

12. *Roi R., Paredes X., Holtzman R.* Reactive transport under stress: Permeability evolution in deformable porous media // *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, Vol. 493, pp. 198–207.

13. *Pan Z., Connell L.D.* Modelling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data // *International Journal of Coal Geology*, 2012, Vol. 92, pp. 1–44.

14. *Geng Y., Tang D., Xu H. et al.* Experimental study on permeability stress sensitivity of reconstituted granular coal with different lithotypes // *Fuel*, 2017, Vol. 202, pp. 12–22.

15. *Rhett D.W., Teufel L.W.* Effect of reservoir stress path on compressibility and permeability of sandstones. SPE Paper No. 24756, SPE Annual Technical Conference and Exhibition Washington DC, 4–7 October 1992.

16. *Randall M.S., Conway M., Salter G., Miller S.* Pressure-dependant permeability in shale reservoirs implications for estimated ultimate recovery. AAPG Search and Discovery Article N 9012.2011, AAPG Hedberg Conference, Austin, Texas, 5–10 December 2010.

17. *Daigle H., Rasromani E., Gray K.E.* Near-wellbore permeability alteration in depleted, anisotropic reservoirs // *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, Vol. 157, pp. 302–311.

18. *Zoback M.D., Nur A.* Permeability and effective stress // *Bulletin of American Association of Petroleum Geology*, 1975, Vol. 59, pp. 154–158.

19. *Ma J.* Review of permeability evolution model for fractured porous media // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2015, Vol. 7(3), pp. 351–357.

20. *Chapuis R.P., Gill D.E., Baass K.* Laboratory permeability tests on sand: influence of the compaction method on anisotropy // *Canadian Geotechnical Journal*, 1989, Vol. 26(4), pp. 614–622.

21. *Wong R.C. K.* Strain-induced anisotropy in fabric and hydraulic parameters of oil sand in triaxial compression // *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, Vol. 40(3), pp. 489–500.

22. *Назарова Л.А., Назаров Л.А., Элов М.И., Ельцов И.Н.* Эволюция геомеханических и электрогидродинамических полей в массиве горных пород

при бурении глубоких скважин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 5. – С. 37–49.

23. Ельцов И.Н., Назарова Л.А., Назаров Л.А., Нестерова Г.В., Соболев А.Ю., Элов М.И. Скважинная геоэлектрика нефтегазовых пластов, разбурывааемых на репрессии давления в неравнокомпонентном поле напряжений // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 5–6. – С. 978–990.

24. Назаров Л.А., Назарова Л.А., Карчевский А.Л., Панов А.В. Оценка напряжений и деформационных свойств породных массивов на основе решения обратной задачи по данным измерений смещений на свободных границах // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2012. – Т. 15, № 4. – С. 102–109. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Назаров Леонид Анатольевич<sup>1</sup> – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, mining1957@mail.ru, раб. тел. +7(383)2053030, доб. 337,

Назарова Лариса Алексеевна<sup>1</sup> – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник,

Хан Гил Нам<sup>1</sup> – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,

Голиков Никита Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, GolikovNA@ipgg.sbras.ru, раб. тел.+7(383) 363-80-31, Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН им. А.А.Трофимука (ИНГГ СО РАН), 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3,  
<sup>1</sup>Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН (ИГД СО РАН), 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр-т, 54.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 71–81.

**L.A. Nazarov, L.A. Nazarova, N.A. Golikov, G.N. Khan**

### **Experimental determination of stress–permeability relationship in granular geomaterials**

A laboratory-scale plant is designed for studying relationships between permeability  $k$  and effective stresses  $\sigma_e$  in granular geomaterials. A vessel in the form of a parallelepiped was filled with sized sand, the top face of it was covered with an elastic impermeable membrane, and the vertical effort  $\sigma$  was applied to different areas of the surface under control of stress sensors. At the opposite vertical faces, the gas pressure difference  $\Delta p$  was pre-set and the gas flow rate  $Q$  was recorded. A mathematical model of the experiment is developed. Assuming that  $k\sigma_e$  is an exponential function with an empirical coefficient  $\alpha$ , the analytical solution is obtained, as well as the method of quantitative estimation of  $\alpha$  is proposed based on minimization of functional of relative closure error between actual and calculated  $Q$ . It is proved that  $\alpha$  is evaluable regardless viscosity of gas and initial permeability of geomaterial

packing. Processing of the experimental data shows that the value of  $\alpha$  tends to decrease slightly with increasing stress.

Key words: granular geomaterial, physical model, laboratory experiment, filtration, gas, permeability–stress curve, objective function.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-71-81

## AUTHORS

Nazarov L.A.<sup>1</sup>, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Head of Laboratory, mining1957@mail.ru, office: +7(383)2053030, add. 337,

Nazarova L.A.<sup>1</sup>, Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Principal Researcher

Khan G.N.<sup>1</sup>, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Senior Researcher

Golikov N.A., Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, GolikovNA@ipgg.sbras.ru, office:+7(383) 363-80-31, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, prospekt Akademika Koptyuga 3,

<sup>1</sup> Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 630091, Russia, Novosibirsk, Krasnyi prospekt 54.

## REFERENCES

1. Speight J.G. *An Introduction to Petroleum Technology*, Economics, and Politics. John Wiley & Sons Limited, 2011. 336 p.

2. Dake L.P. *The Practice of Reservoir Engineering*. Elsevier, 2001. 572 p.

3. Van Golf-Racht T. *Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering*. Elsevier, 1982. 732 p.

4. Istomin V.A., Yakushev V.S. *Gazovye gidraty v prirodnyh usloviyah* [Gas hydrates in natural conditions]. Moscow: Nedra, 1992. 236 p.

5. Isaeva O.A., Bruzhes L.N., Vavilin V.A. i dr. *Litologo-mineralo-gicheskaya harakteristika i osobennosti porovogo prostranstva otlozhenij plasta AV1 (gruppy «ryabchik») Ur'evskogo mestorozhdeniya* [Lithology, mineralogy and pore space of the ryabchik-type AV1 horizon in the Urevskoe oilfield]. *Osadochnye bassejny, sedimentacionnye i postsedimentacionnye processy v geologicheskoy istorii. Materialy VII Vserossijskogo litologicheskogo soveshchaniya* (Novosibirsk, 28–31 oktyabrya 2013 g.), T.I. Novosibirsk: INGG SO RAN, 2013. pp. 388–392.

6. Urumovic K., Urumovic Sr. K. *The effective porosity and grain size relations in permeability functions*. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2014, Vol. 11, pp. 6675–6714.

7. Knackstedt M.A., Duplessis J.P. *Simple permeability model for natural granular media*. Geophysical Research Letters, 1996, Vol. 23(13), pp. 1609–1612.

8. Praktika S.V. *Specifika inzhenerno-geologicheskogo i gidrogeolo-gicheskogo izucheniya porod zolootvalov TEC* [Specificity of geotechnical and hydrogeological study of ash-disposal dumps at heating and power plants]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*. 2014. no 8. pp. 322–326.

9. Kuhn M.R., Sun W., Wang Q. *Stress-induced anisotropy in granular materials: fabric, stiffness, and permeability*. Acta Geotechnica, 2015, Vol. 10(4), pp. 399–419.

10. Holt R.M. *Permeability reduction induced by a nonhydrostatic stress field*. SPE Formation Evaluation, 1990, No 5, pp. 444–448.

11. Heller R., Vermeylen J., Zoback M. *Experimental investigation of matrix permeability of gas shales*. Bulletin of The American Association of Petroleum Geologists, 2014, Vol. 98, no 5, pp. 975–995.

12. Roi R., Paredes X., Holtzman R. *Reactive transport under stress: Permeability evolution in deformable porous media*. Earth and Planetary Science Letters, 2018, Vol. 493, pp. 198–207.

13. Pan Z., Connell L.D. *Modelling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data*. International Journal of Coal Geology, 2012, Vol. 92, pp. 1–44.
14. Geng Y., Tang D., Xu H. et al. *Experimental study on permeability stress sensitivity of reconstituted granular coal with different lithotypes*. Fuel, 2017, Vol. 202, pp. 12–22.
15. Rhett D.W., Teufel L.W. *Effect of reservoir stress path on compressibility and permeability of sandstones*. SPE Paper No. 24756, SPE Annual Technical Conference and Exhibition Washington DC, 4–7 October 1992.
16. Randall M.S., Conway M., Salter G., Miller S. *Pressure-dependant permeability in shale reservoirs implications for estimated ultimate recovery*. AAPG Search and Discovery Article N 9012.2011, AAPG Hedberg Conference, Austin, Texas, 5–10 December 2010.
17. Daigle H., Rasromani E., Gray K.E. *Near-wellbore permeability alteration in depleted, anisotropic reservoirs*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, Vol. 157, pp. 302–311.
18. Zoback M.D., Nur A. *Permeability and effective stress* [Permeability and effective stress]. Bulletin of American Association of Petroleum Geology, 1975, Vol. 59, pp. 154–158.
19. Ma J. *Review of permeability evolution model for fractured porous media*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015, Vol. 7(3), pp. 351–357.
20. Chapuis R.P., Gill D.E., Baass K. *Laboratory permeability tests on sand: influence of the compaction method on anisotropy*. Canadian Geotechnical Journal, 1989, Vol. 26(4), pp. 614–622.
21. Wong R.C. K. *Strain-induced anisotropy in fabric and hydraulic parameters of oil sand in triaxial compression*. Canadian Geotechnical Journal, 2003, Vol. 40(3), pp. 489–500.
22. Nazarova L.A., Nazarov L.A., Epov M.I., El'cov I.N. *Evolyuciya geomekhanicheskikh i elektrogidrodinamicheskikh polej v massive gornyh porod pri burenii glubokih skvazhin* [Evolution of geomechanical and electro-hydrodynamic fields in deep well drilling in rocks]. Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh. 2013. № 5. pp. 37–49.
23. El'cov I.N., Nazarova L.A., Nazarov L.A., Nesterova G.V., Sobolev A.Yu., Epov M.I. *Skvazhinnaya geoelektrika neftegazovyh plastov, razburivaemyh na repressii davleniya v neravnokomponentnom pole napryazhenij* [Geomechanics and fluid flow effects on electric well logs: multiphysics modeling]. Geologiya i geofizika. 2014. T. 55, no 5–6. pp. 978–990.
24. Nazarov L.A., Nazarova L.A., Karchevskij A.L., Panov A.V. *Ocenka napryazhenij i deformacionnyh svojstv porodnyh massivov na osnove resheniya obratnoj zadachi po dannym izmerenij smeshchenij na svobodnyh granicah* [Estimation of stresses and deformation properties in rock mass based on inverse problem solution using measurement data of free boundary displacement]. Sibirskij zhurnal industrial'noj matematiki. 2012. T. 15, no 4. pp. 102–109.



## ВЫДЕЛЕНИЯ МЕТАНА С ПОВЕРХНОСТИ ОБНАЖЕНИЯ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ ВЫСОКОЙ СКОРОСТИ ПОДВИГАНИЯ ОЧИСТНЫХ ЗАБОЕВ

Теоретические исследования показали, что для прогнозирования процесса формирования метановой опасности в подготовительных выработках необходимо учитывать конечную скорость распространения давления метана в угольном пласте. При этом закон сопротивления при фильтрационном движении метана в угольном пласте представляет собой функциональную связь газового потока с градиентом давления газа и локальной скоростью изменения газового потока. Газовая проницаемость угольного пласта представляет собой обобщенную характеристику свойств метана, коллекторских свойств угольного и релаксации процесса фильтрационного движения метана, при этом численное значение газовой проницаемости пропорционально третьей степени эффективной пористости горного массива.

Процессы фильтрации метана в угольном пласте описываются уравнением гиперболического типа, а применение уравнений параболического типа является физически обоснованным для длительных периодов времени.

Интенсивность метановыделения связана с планограммой работ в очистном забое и в зависимости от скорости подвигания забоя в цикле метановыделение нарастает за счет увеличения площади газоотдающей поверхности. Газоотдающая поверхность находится под перепадом давления, а площадь частично дегазированной поверхности обнажения уменьшается с той же скоростью, с которой увеличивается площадь не дегазированной газоотдающей поверхности, поэтому при работе выемочного комбайна формируется стационарное состояние.

Ключевые слова: выделение, метан, поверхность обнажения, угольный пласт, скорость подвигания, очистной, подготовительный, забой

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-82-88

Современные технологии и технические средства обработки угольных пластов обеспечивают увеличение производительности очистных участков на порядок. Сравнительный анализ аэрогазодинамического состояния шахт Кузбасса показывает, что, во-первых, шахты характеризуются исключительно высокой газообильностью, во-вторых, возможностью возникновения аварийных загазований горных выработок и появлением взрывоопасных концентраций метана. Теоретические исследования показали, что для прогнозирования процесса формиро-

вания метановой опасности в подготовительных выработках необходимо учитывать конечную скорость распространения давления метана в угольном пласте. При этом закон сопротивления при фильтрационном движении метана в угольном пласте представляет собой функциональную связь газового потока с градиентом давления газа и локальной скоростью изменения газового потока для произвольно выбранной точки в рассматриваемой области угольного пласта. А газовая проницаемость угольного пласта представляет собой обобщенную характеристику свойств метана, коллекторских свойств угольного и релаксации процесса фильтрационного движения метана, при этом численное значение газовой проницаемости пропорционально третьей степени эффективной пористости горного массива.

Таким образом, процессы фильтрации метана в угольном пласте описываются уравнением гиперболического типа, а применение уравнений параболического типа является физически обоснованным для длительных периодов времени. Современные технологии и технические средства отработки угольных пластов обеспечивают увеличение производительности очистных участков на порядок. Разумеется, что это приводит к тому, что в несколько раз возрастает скорость подвигания очистных и подготовительных забоев. Рассматривая угольные пласты, которые обрабатывают по технологии шахта – лава, процесс фильтрационного движения метана считать ламинарным и одномерным.

Физически обоснованно следующее математическое описание поля давлений метана в угольном пласте, имеющем поверхность обнажения

$$\frac{dp^2}{dt} + t_r \frac{d^2 p^2}{dt^2} = \chi \frac{d^2 p^2}{dx^2} \frac{\partial p^2}{\partial t} + t_r \frac{\partial^2 p^2}{\partial t^2} = \chi \frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2}, \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} p(z, 0) &= p_0 = \text{const}, & \frac{d}{dt} p(z, 0) &= 0, \\ p(0, t) &= p_1 = \text{const}, & \lim_{z \rightarrow \infty} p &\neq \infty, \end{aligned} \right\} \text{ при } z \rightarrow \infty, \quad (2)$$

где  $p$  – давление свободного метана в трещиновато-пористой структуре угля;  $z$  – пространственная координата;  $t$  – время;  $t_r$  – период релаксации процесса ламинарной фильтрации метана в угольном пласте;  $\chi$  – пьезопроводность угольного пласта, зависящая от фильтрационных и сорбционных свойств угля;  $p_0, p_1$  – давление свободного метана в угольном пласте в начальный момент времени и на поверхности обнажения пласта соответственно.

Решение уравнения (1) для условий (2) имеет следующий вид

$$\frac{p^2 - p_0^2}{p_1^2 - p_0^2} = \left\{ \exp \left[ -0,5z(t_r \chi)^{-0,5} \right] + \right.$$

$$+0,5z(t_r\chi)^{-0,5} \int (\theta^2 - z^2 t_r \chi^{-1})^{-0,5} \exp(-0,5\theta t_r^{-1}) \times \\ \times I_1 \left[ 0,5 t_r^{-1} (\theta^2 - z^2 t_r \chi^{-1})^{0,5} \right] d\theta \} \sigma_0 \left[ t - z(t_r \chi^{-1})^{0,5} \right],$$

где  $I_1 \left[ 0,5 t_r^{-1} (\theta^2 - z^2 t_r \chi^{-1})^{0,5} \right]$  – модифицированная функция Бесселя первого порядка;  $\sigma_0 [t - z(t_r/\chi)^{0,5}]$  – единичная функция Хэвисайда.

Из соотношения (3) следует аналитическая зависимость для расчета метановыделения с единичной площади поверхности обнажения угольного пласта [1]

$$J_1 = J_0 \exp(-0,5t/t_r) I_0(0,5t/t_r), \quad (4)$$

где  $J_1$  – метановыделение с единичной площади поверхности обнажения угольного пласта;  $J_0$  – начальная скорость газовыделения;  $I_0(0,5t/t_r)$  – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка для аргумента, записанного в круглых скобках.

В период проведения выработки дебит метана в подготовительную выработку  $J_2$  с элементарной поверхности обнажения пласта  $dS$  можно определить как  $dJ_2 = nm_n V_1 J_0 \exp(-0,5 t/t_r) \times I_0(0,5t/tr)$ , где  $n$  – количество поверхностей обнажения угольного пласта, контактирующих с атмосферой подготовительной выработки;  $m_n$  – мощность разрабатываемого угольного пласта;  $V_1$  – скорость подвигания подготовительного забоя. Интегрируя уравнение, получим

$$J_2(t) = nm_n V_1 J_0 \int_0^t \exp(-0,5\zeta/t_r) d\zeta \text{ при } t \leq T. \quad (5)$$

где  $T$  – срок проведения подготовительной выработки.

Следовательно, максимальное значение метановыделения  $J_m$  будет при  $t=T$ , т. е.  $J_m = J_0(T)$ . В период обособленного проветривания выработки дебит метана в подготовительную выработку  $J_3$  с элементарной поверхности обнажения угольного пласта  $dS$  можно определить как  $dJ_3 = n m_n L_1 V_1 J_0 \exp(-0,5t/t_r) I_0(0,5t/tr)$ , где  $L_1$  – проектная длина подготовительной выработки. Интегрируя уравнение, получим

$$J_3(t) = J_m \exp[-0,5(t-T)/t_r] I_0[0,5(t-T)/t_r], \text{ при } t \geq T. \quad (6)$$

Модифицированная функция Бесселя нулевого порядка может быть представлена в интегральном виде, тогда, вводя обозначение  $\tau = 0,5t/t_r$ , можно записать

$$J_2(\tau) = 0,318 nm_n t_r V_1 J_0 \theta_1(\tau) \text{ при } \tau \leq \tau_1; \quad (7)$$

$$J_m(\tau_1) = 0,318nm_n t_r V_1 \theta_1(\tau_1); \quad (8)$$

$$J_3(\tau) = J_m \theta_2(\tau - \tau_1) \text{ при } \tau \geq \tau_1 \quad (9)$$

где  $\tau_1 = 0,5T/t_r$ ;  $\tau_1$  – безразмерный срок проведения подготовительной выработки;

$$\theta_1(\tau) = \int_0^{\tau} \exp(-\zeta) \int_0^{\pi} [\exp(\cos \zeta) + \exp(-\zeta \cos \zeta)] d\zeta; \quad (10)$$

$$\theta_2(\tau) = 0,159 \exp[-(\tau - \tau_1)] \int_0^{\pi} \{\exp[(\tau - \tau_1) \cos \zeta] + \exp[-(\tau - \tau_1) \cos \zeta]\} d\zeta. \quad (11)$$

Функции  $\Theta_1(\tau)$  и  $\Theta_2(\tau)$  представляют собой безразмерные значения метановыделения с поверхности обнажения угольного пласта в соответствующие моменты времени, которые присваиваются переменной  $\tau$ .

Результаты вычислительных экспериментов, проведенных для возможных интервалов изменения исходных данных, отражающих условия проведения подготовительных выработок в шахтах Кузбасса, позволили получить инженерные формулы для расчета этих функций. Аппроксимации функций  $\Theta_1(\tau)$  и  $\Theta_2(\tau)$  приведены в табл. 1–2.

Таблица 1

**Аппроксимации зависимости  $\Theta_1 = \Theta_1(\tau)$**

Интервал безразмерного периода времени $\tau$	Теоретически обоснованная аппроксимирующая формула
$\tau \in [0, 10]$	$\theta_1(\tau) = 0,3787\tau^3 - 2,4678\tau^2 + 6,7909\tau - 0,367$
$\tau \in [10, 100]$	$\theta_1(\tau) = 0,0003\tau^3 - 0,0329\tau^2 + 1,5865\tau + 1,177$

Таблица 2

**Аппроксимации зависимости  $\Theta_2 = \Theta_2(\tau)$**

Интервал безразмерного периода времени $\tau$	Теоретически обоснованная аппроксимирующая формула
$\tau \in [0, 3]$	$\theta_2(\tau) = -0,0467\tau^3 + 0,3314\tau^2 - 0,8283\tau + 0,9957$
$\tau \in [3, 10]$	$\theta_2(\tau) = -0,0003\tau^3 + 0,0074\tau^2 - 0,0738\tau + 0,4012$
$\tau \in [10, 50]$	$\theta_2(\tau) = 5 \cdot 10^{-3} \tau^2 - 0,047\tau + 0,0908$
$\tau \in [50, 100]$	$\theta_2(\tau) = 2 \cdot 10^{-6} \tau^2 - 0,0008\tau + 0,0908$

Аппроксимации, заданные соотношениями табл. 1, характеризуются значениями корреляционного отношения от 0,995 до 0,999, а заданные соотношениями табл. 2 – корреляционными отношениями от 0,967 до 0,996. Погрешность аппроксимации не превышает 1 %. Из формул (7–8) следует, что интенсивность метановыделения непосредственно связана со скоростью подвигания подготовительного забоя и проектной длиной подготовительной выработки.

Анализ зависимостей показывает, что в процессе проведения выработки метановыделение нарастает за счет увеличения площади обнаженной поверхности угольного пласта. Поверхность обнажения пласта вначале находится под перепадом давления приблизительно равным значению  $p_0^2 - p_1^2$ . Затем происходит дегазация краевой части угольного пласта, контактирующей с атмосферой подготовительной выработки, в соответствии с закономерностью (6). Аппроксимация кривой газового истощения приведена в табл. 2. Метановыделение с поверхности обнажения разрабатываемого угольного пласта в очистной забой также описывается уравнением (3) и условиями (4). Следовательно, соотношение (5) и закономерность (6) отражают динамику метанообильности очистного забоя, обусловленную газовыделением с поверхности обнажения пласта. Поэтому с учетом принятых обозначений можно записать, что

$$J_s = 0,318 m_n t_r V_2 J_0 \int_0^{L_2/(2t_r V_2)} \exp(-\tau) \times \\ \times \int_0^\pi [\exp(\tau \cos \zeta) + \exp(-\tau \cos \zeta)] d\zeta d\tau, \quad (12)$$

где  $J_s$  – метановыделение с поверхности обнажения угольного пласта в очистном забое;  $V_2$  – скорость подачи очистного комбайна;  $L_2$  – длина очистного забоя.

$$J_s = 0,318 n m_n t_r V_2 J_0 \Theta_1(\tau_2), \quad (13)$$

где  $\tau_2 = L_2/2t_r V_2$ ;  $\tau_2$  – безразмерное значение длительности прохождения очистным комбайном всей лавы.

Из формул (12–13) следует, что интенсивность метановыделения непосредственно связана с планограммой работ в очистном забое. Анализ зависимости свидетельствует о том, что при выемочном цикле метановыделение нарастает за счет увеличения площади газоотдающей поверхности. Газоотдающая поверхность также находится под перепадом давления, приблизительно равным значению  $p_0^2 - p_1^2$ , а площадь частично дегазированной поверхности обнажения уменьшается с той же скоростью, с которой увеличивается площадь не дегазированной поверхности.

зированной газоотдающей поверхности, поэтому при работе выемочного комбайна формируется стационарное состояние, определяемое формулой (12).

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Качурин Н.М., Борщевич А.М., Качурина О.Н., Бухтияров А.А. Безопасность геотехнологий добычи угля по газовому фактору // Безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 5. – С. 24–28.

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Сенкус Витаутас Валентинович* – кандидат технических наук, заместитель управляющего по науке филиалом ООО «Сибниииуглеобогащение», г. Прокопьевск, Россия, E-mail: SenkusVV@suek.ru,

*Ермаков Анатолий Юрьевич* – кандидат технических наук, заместитель управляющего филиалом, Россия, E-mail: ErmakovAY@suek.ru, Филиал ООО «Сибниииуглеобогащение», г. Прокопьевск.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 82–88.

**Senkus V.V., Ermakov A.Yu.**

### **Methane release from the surface of the coal seam outbreak at high rate of advance**

Theoretical studies have shown that to predict the process of methane hazard in development workings, it is necessary to consider the final rate of methane pressure propagation in a coal seam. In this case, the law of resistance in the filtration movement of methane in a coal seam is a functional relationship between the gas flow and the gas pressure gradient and the local rate of change in the gas flow.

The gas permeability of a coal seam is a generalized characteristic of the properties of methane, the collection properties of coal and the relaxation of the methane filtration process, while the numerical value of the gas permeability is proportional to the third power of the effective porosity of the rock mass.

The processes of methane filtration in the coal seam are described by an equation of the hyperbolic type, and the application of equations of parabolic type is physically justified for long periods of time.

The intensity of methane release is associated with the planogram of work in the stoke face and, depending on the speed of the advance in the cycle the methane issue rises due to the increase of the gas-yielding surface. The gas-yielding surface is under the pressure drop, and the area of the partially degassed surface decreases at the same rate at which the area of the non-degassed surface increases, so when the cutter is in operation, a stationary condition is formed.

Key words: selection, methane, surface of outbreak, coal seam, rate of advance, stoke, development, face.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-82-88

## **AUTHORS**

*Senkus V.V.*, Deputy Manager on Research, Dr. Sc., prof.,  
*Ermakov A. Yu.*, Manager of the Branch, PhD Tech. E-mail: ErmakovA.Y@suek.ru,  
Branch of LLC “Sibniugleobogaschenie”, Prokopyevsk.

## **REFERENCES**

1. Kachurin N.M., Borshchevich A.M., Kachurina O.N., Buhtiyarov A.A. *Bezopasnost' geotekhnologij dobychi uglja po gazovomu faktoru* [Safety of geotechnologies for coal mining by gas factor]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2010. no 5. pp. 24–28.



## ДЕГАЗАЦИЯ МОЩНОГО КРУТОПАДАЮЩЕГО УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

Рассмотрены вопросы дегазации мощных крутопадающих угольных пластов в условиях сложной вентиляционной сети при реконструкции и дальнейшей эксплуатации шахты на основе научных исследований проблемы внезапных выбросов угля и газа, взрывов метана и методов борьбы с этим явлением на основе дегазации угольных пластов. Предусмотрена транспортировка отбитого угля скребковым контейнером к углеспускной трубе, что обеспечивает дополнительный сбор метана из отбитого угля при его транспортировке.

Ключевые слова: угольная шахта, схема проветривания, дегазационная скважина, пластовая дегазация, внезапный выброс угля и газа, взрыв газа метана и угольной пыли.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-89-97

В работе [1] рассмотрены вопросы дегазации мощных крутопадающих угольных пластов при устаревшей конструкции главных вентиляторов на шахте «Красногорская» ПО «Прокопьевскуголь» в условиях сложной вентиляционной сети при дальнейшей эксплуатации шахты. Был рассмотрен начальный этап дегазации на этапах времени 22.11.07–23.11.07 гг. и 11.12.07–20.12.07 гг. [1]. На этом этапе шахтой были выполнены следующие объемы необходимых работ по дегазации для запуска работ на шахте по добыче угля. Схема горных работ на шахте «Красногорская» по состоянию на ноябрь 2007 г. приведена на рис. 1 (блок № 1, блок № 2, блок № 3) [1, 2]. Были пробурены: 8 скважин ограждающей дегазации VII подэтажа, 13 скважин XII подэтажа блока № 1 и 7 скважин с гидроквершлага № 4 блока № 2. Однако эти объемы работ по дегазации на шахте реально позволили добывать только 480 т угля в сутки за период 11.12.07–20.12.07 (табл. [1]).

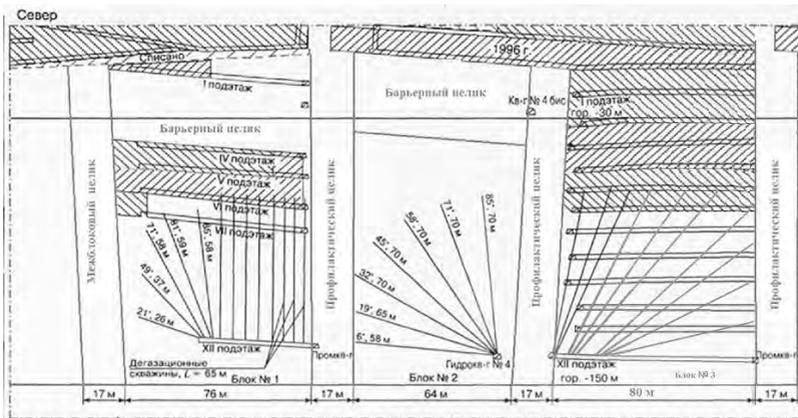
Руководство холдинга [1] приняло решение приостановить очистные работы до завершения дегазации выемочного участка по пластам III Внутреннему и IV Внутреннему с квершлага № 4. По вопросу дегазации на первом этапе на упомянутом выемочном участке были задействованы 8 скважин ограждающей дегазации VII подэтажа и 13 скважин XII подэтажа. Это позволило шахте частично

вести очистные работы на рассмотренном участке, но объёмы добычи угля в сутки не решали в целом проблему работы шахты (таблица). На рассматриваемом для дегазации участке пласты III Внутренний и IV Внутренний западного крыла шахты залегают под углом 55–60°. Средняя мощность пласта IV Внутреннего 7.7 м, пласта III Внутреннего 5 м, их природная метаноносность соответственно 18.2 м<sup>3</sup>/т и 19 м<sup>3</sup>/т.

Блоки № 1, 2 и 3 рассматриваемого выемочного участка вскрывались (рис. 1) [1, 2] подэтажными промквершлагами, проводимыми с пласта II Внутреннего (рис. 2). Каждый блок делится по восстанию пласта на 12 подэтажей. В каждом блоке в первую очередь проводился XII выемочный штрек по пласту IV Внутренний для бурения с него скважин и проведения предварительной дегазации.

Отработка выемочного участка.

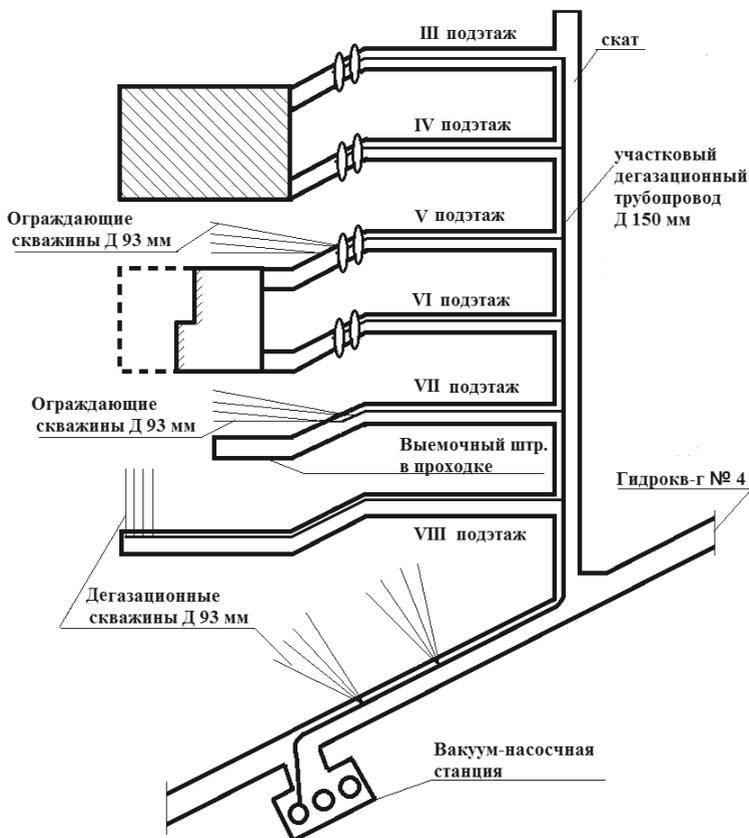
При проходке подэтажных штреков одновременно по схеме дегазации бурились опережающие скважины длиной 65–70 м с подэтажных квершлагов [2] рис. 2 по четыре на пласт. При этом две верхние бурились под углом 8–10°, а нижние под углом 3–4°.



**Рис. 1. Схема выемочного участка, разделенного по простиранию на три блока с оставлением между ними профилактических целиков**

Схема бурения ограждающих скважин при подготовке каждого подэтажа четвертого штрека приведена на рис. 2 [1, 2] и на рис. 3 настоящей статьи. В блоке 1 всего по 13 скважин на каждый пласт. В блоке № 2 общее число скважин 14, по 7 на каждый пласт, в блоке 3 – 20, по 10 на каждый пласт.

К началу очистных работ на VI подэтаже по технологии дегазации рекомендуется подключать до 20 скважин первого блока, пробуренных со штрека XII подэтажа и 7 скважин второго блока, пробуренных с гидроквершлага № 4.



**Рис. 2. Схема дегазации пластов III Внутреннего и IV Внутреннего выемочного участка**

Одновременно к началу очистных работ на шахте подготовлена вакуум-насосная станция из трех насосов типа ВН-50. В работе находился один насос, остальные в резерве. Магистральные трубопроводы проложены от вакуум-насосной станции до горизонта  $-150$  м (см. рис. 1 в [2]). На горизонте  $-150$  м трубопроводы проложены по полевым штрекам южного и северного крыльев шахты [1–2], далее по промежуточным квершлагам до обрабатываемых пластов. Участковые трубопроводы диаметром 150 мм проложены от дегазационных скважин (по 1 и 2 блокам) до магистрального трубопровода диаметром 300 мм [4, 5].

В блоке № 2 дегазационные скважины диаметром 93 мм бурились с гидроквершлага № 4 по пластам III Внутренний и IV Внутренний (рис. 2). Чтобы исключить вынос метана в действующие

горные выработки на IV и VI подэтажах по трубопроводу, проложенному через изолирующие переемычки, газ отводился из выработанного пространства в участковый трубопровод (рис. 2 [2]).

Блок № 1. Схема дегазации блока № 1в [2] приведена в соответствии с [1]. Кратко отметим ее особенности. На рис. 1 – схема блока № 1, включает подэтажные штреки IV, V, VI, VII, XII. Остальные поэтажные штреки в пределах блока № 1 не проводились. Запасы угля в пределах IV, V, VI подэтажей отработаны ранее (что показано наклонной штриховой). Через изолирующие переемычки б, газ отводился из выработанного пространства в участковый трубопровод (рис. 2 [1]).

**Примечание.** Рассматриваемая схема [1] предусматривает три группы ограждающих скважин для дегазации угольного массива в блоках для очистной выемки. Но проходка подготовленных штреков, проходимых с подэтажей промквершлагов, практически не обеспечена их предварительной дегазацией. Предусмотренные на рис. 3 [1] схемы бурения ограждающих скважин реально обеспечивают дегазацию отработки очистных блоков. Обеспечение дегазации массива впереди проходимых выемочных подэтажных штреков в период их проходки требует дополнительной дегазации. Для этого рекомендуется бурить дегазационные скважины непосредственно из забоев проходимых выемочных штреков в период их проходки. Длина их 15–20 м, диаметр 93 мм. Наличие таких скважин позволит исключить внезапные выбросы угля и газа в период проходки подэтажных выемочных штреков и усилить дегазацию в период очистной выемки обрабатываемых блоков.

На рис. 3 приведена рекомендуемая схема транспортирования отбиваемого угля из очистных забоев, с одновременным отводом воздуха, содержащего газ метан.

Блок № 3. Этот блок в статье [1] только обозначен. Запасы угля в зоне I–II–III–IV–V и VI подэтажей отработаны (штриховка на рис. 1). Поясним этот момент. Шахта из-за перехода на дегазацию все же где-то должна была добывать какое-то количество угля.

Далее в тексте настоящей статьи полагаем, что запасы угля в блоке 3 частично отработаны. Схема отработки блока № 3 построена по аналогии с блоком № 1, но ориентация дегазационных скважин принята согласно блока № 3 [1].

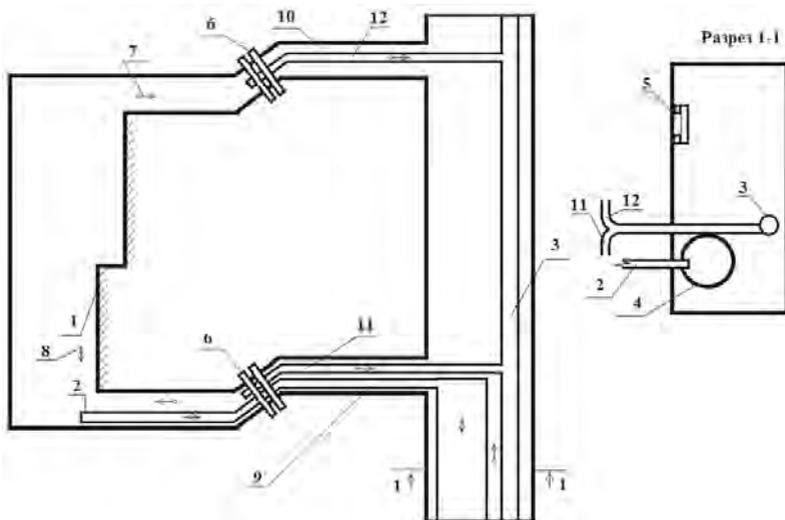
Вопросы дегазации блока № 1, рассмотренные выше, позволили руководству шахты «Красногорская» приступить к частичной отработке запасов в этом блоке. Результаты приведены в табл. за период 11.12.07–20.01.08.

Итог подключенной дегазации – возможность начать добычу угля в значительных объемах ( $788 + 596 = 1\,384$  т/сут.).

Дополнительно отметим, что на рис. 2 использован XII подэтаж по пласту IV Внутреннему: здесь 13 скважин диаметром 93 мм. Это позволило обеспечить добычу 565 т/сут. угля.

Таблица

Период	Число скважин, находящихся в работе, и мест их расположения	Средняя концентрация $\text{CH}_4$ в смеси, %	Средний				Средняя добыча угля, т/сут.
			расход метано-воздушной смеси		извлекаемый объём чистого $\text{CH}_4$		
			$\text{м}^3/\text{мин}$	$\text{м}^3/\text{сут.}$	$\text{м}^3/\text{мин}$	$\text{м}^3/\text{сут.}$	
11.12.07 – 20.12.07	13 скважин XII подэтажа блока № 1 и 7 скважин с гидроквершлага № 4 блока № 2	28.83	25.35	36 504	7.54	10 857	480
21.12.07 – 24.12.07	13 скважин XII подэтажа блока № 1 и 14 скважин с гидроквершлага № 4 блока № 2	34.87	24.77	35 669	8.62	12 413	788
25.12.07 – 04.01.08	13 скважин XII подэтажа блока № 1 и 14 скважин с гидроквершлага № 4 блока № 2. Подключен трубопровод для дегазации выработанного пространства на IV подэтаже	29.34	23.55	3 391	7	10 080	596



**Рис. 3. Схема транспортирования угля и газа метана:** 1 – очистной забой; 2 – скребковый конвейер; 3 – участковый дегазационный трубопровод Д 150 мм; 4 – углеспускная труба (600—700 мм); 5 – лестница; 6 – перегородка из плах (2 стенки с дверями для прохода людей); 7 – поток воздуха с метаном ( $\circ \rightarrow$ ); 8 – движение транспортируемого угля ( $\rightarrow$ ); 9 – конвейерный штрек; 10 – вентиляционный штрек; 11 – дегазационный трубопровод Д 60 мм; 12 – дегазационный трубопровод Д 150 мм

### Выводы

1. Применительно к условиям группы угольных пластов крутого падения предложена методика пластовой дегазации. Про проект дегазации группы угольных пластов (в рассматриваемом варианте – крутопадающих пластов) направленный на выполнение правительственных рекомендаций по разработке угольных пластов, залегающих на значительной глубине, где содержание метана существенно увеличивается. В этих условиях учитываются рекомендации по обеспечению безопасной отработки угольных пластов с предварительной их дегазацией до начала строительства новых предприятий по добыче угля [4].

2. Методика предусматривает обеспечение на исходящей струе вентиляционной системы строящейся шахты наличие метана 1% в отличие от ранее принимаемого 2%. Приведены рекомендуемые схемы горных работ по дегазации.

**Дополнение: приборное обеспечение геомеханических исследований процессов дегазации.**

Лаборатория механики горных пород ИГД СО РАН десятилетия специализируется на вопросах разработки приборов и методик для геомеханических измерений при добыче угля и руд подземным способом.

Однако применительно к вопросам технологии дегазации при отработке угольных пластов специальных методов и приборов не разрабатывалось.

В ИГД СО РАН вопросами разработки методов и приборов для геомеханических измерений при отработке подземным способом рудных месторождений уделялось значительное внимание. Разработка методов и приборов применительно к угольным месторождениям велась в малом объеме.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баскаков В.П., Сальвассер И.А., Коржов В.М., Курмашов В.П. Дегазация пластов выемочного участка ООО «Шахты «Красногорская» // Безопасность труда в промышленности. – 2008. – № 12. – С. 36–38.

2. Кулаков Г.И., Шарапова М.Д. Обобщение опыта дегазации угольных пластов // Фундам. и прикл. Вопросы горных наук. – 2017. – № 1, Т. 4. – С. 187–192.

3. Бурчаков А.С., Гринько Н.К., Черняк И.Л. Процессы подземных горных работ. – М.: Недра, 1976. – 408 с.

4. Инструкция по безопасному ведению горных работ и пластов, опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа. – М.: Изд-во ИГД им. А.А. Скочинского, 1989. – 191 с.

5. Рубан А.Д., Забурдяев В.С. Оценка эффективности дегазации разрабатываемых угольных пластов. // Уголь. – 2010. – № 11. – С. 8–10.

6. Рубан А.Д., Забурдяев В.С., Забурдяев Г.С., Матвиенко Н.Г. Метан в шахтах и рудниках России: прогноз, извлечение и использование. – М.: ИПКОН РАН, 2006. – 312 с.

7. Методические рекомендации о порядке дегазации угольных шахт (РД –15–09–2006). Серия 05. Выпуск 14. – М.: ОАО «НТЦ по безопасности в промышленности», 2007. – 256 с.

8. Пучков Л.А., Сластунов С.В., Логинов А.К., Ютяев Е.П., Мазаник Е.В. Предпосылки промышленной апробации технологии заблаговременной дегазационной подготовки высокогазоносных угольных пластов в Кузбассе. – М.: ГИАБ, тематическое приложение Безопасность. – 2008. – Отдельный выпуск № 6. – С. 255–260.

9. Малашкина В.А. Особенности проектирования систем дегазации угольных шахт. // Уголь. – 2009 – № 1. – С. 31–34.

10. Малашкина В.А. Дегазационные установки. Учебное пособие, 2-е изд. – М: Изд-во МГГУ, 2007. – 190 с. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Кулаков Геннадий Иванович* — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории механики горных пород, тел. (383)205–30–30 доб. 188, e-mail: kulakova.38@yandex.ru,

*Яковичкая Галина Евгеньевна* — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории механики горных пород, тел. (383)256–20–69, e-mail: YGE@ngs.ru,

*Шарапова Марина Дмитриевна* — младший научный сотрудник лаборатории механики горных пород, тел. (383)205—30—30 доб. 190, e-mail: zinval@rambler.ru,

*Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54.*

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 89–97.

**Kulakov G.I., Yakovitskaya G.E., Sharapova M.D.**

### **Degassing of powerful steeply dipping coal seam**

The questions of degassing of powerful steep-falling coal seams in the conditions of complex ventilation network during reconstruction and further operation of the mine on the basis of scientific research of the problem of sudden emissions of coal and gas, methane explosions and methods of combating this phenomenon on the basis of degassing of coal seams are considered. Provided transportation of broken coal scraper container to uglespusknoj pipe that provides additional collection of methane from the broken coal during its transportation.

Key words: coal mine, ventilation scheme, degassing borehole, in-seam drainage, coal and gas outburst, methane and coal dust explosion.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-89-97

### **AUTHORS**

*Kulakov G.I., D. Sc.*, Professor, Principal Researcher, Rock Mechanics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 188, e-mail: kulakova.38@yandex.ru

*Yakovitskaya G.E.*, Doctor of Engineering sciences, Leading Researcher, Rock Mechanics Laboratory, office: (383)256—20—69, e-mail: YGE@ngs.ru

*Sharapova M.D.*, Junior Re-searcher, Rock Mechanics Laboratory, tel. (383)205-30-30, extension 190, e-mail: zinval@rambler.ru, Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect.

### **REFERENCES**

1. Baskakov V.P., Sal'vasser I.A., Korzhov V.M., Kurmashov V.P. *Degazaciya plastov vyemochного uchastka OOO «Shahty «Krasnogorskaya»* [Decontamination of layers of an excavation site of LLC «Mine «Krasnogorsk»]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2008. no 12. pp. 36–38.

2. Kulakov G.I., Sharapova M.D. *Obobshchenie opyta degazacii ugol'nyh plastov* [Generalization of the experience of degassing of coal seams]. *Fundam. i prikl. Voprosy gornyh nauk*. 2017. no 1, T. 4. pp. 187–192.

3. Burchakov A.S., Grin'ko N.K., Chernyak I.L. *Processy podzemnyh gornyh работ* [Processes of underground mining operations]. Moscow: Nedra, 1976. 408 p.

4. *Instrukciya po bezopasnomu vedeniyu gornyh работ i plastov, opasnyh po vnezapnym vybrosam uglja, porody i gaza* [Instructions for the safe conduct of mining operations and

formations dangerous for sudden emissions of coal, rock and gas]. Moscow: Izd-vo IGD im. A.A. Skochinskogo, 1989. 191 p.

5. Ruban A.D., Ziburdyayev V.S. *Ocenka effektivnosti degazacii razrabatyvaemyh ugol'nyh plastov* [Assessment of the effectiveness of the degassing of developed coal seams]. Ugol'. 2010. no 11. pp. 8–10.

6. Ruban A.D., Ziburdyayev V.S., Ziburdyayev G.S., Matvienko N.G. *Metan v shahtah i rudnikah Rossii: prognoz, izvlechenie i ispol'zovanie* [Methane in mines of Russia: forecast, recovery and use]. Moscow: IPKON RAN, 2006. 312 p.

7. *Metodicheskie rekomendacii o poryadke degazacii ugol'nyh shaht (RD –15–09–2006)* [Methodical recommendations about the order of degassing of coal mines (RD–15–09–2006)]. Seriya 05. Vypusk 14. M.: OAO «NTC po bezopasnosti v promyshlennosti», 2007. 256 s.

8. Puchkov L.A., Slastunov S.V., Loginov A.K., Yutyayev E.P., Mazanik E.V. *Predposylki promyshlennoj aprobacii tekhnologii zablagovremennoj degazacionnoj podgotovki vysokogazonosnyh ugol'nyh plastov v Kuzbasse* [Background of the industrial application of this technology advance training vysokorazvityh degassing of coal seams in the Kuzbass]. Moscow: GIAB, tematicheskoe prilozhenie Bezopasnost'. 2008. Otdel'nyj vypusk no 6. pp. 255–260.

9. Malashkina V.A. *Osobennosti proektirovaniya sistem degazacii ugol'nyh shaht* [Features of design of degassing systems of coal mines]. Ugol'. 2009 no 1. pp. 31–34.

10. Malashkina V.A. *Degazacionnye ustanovki* [Degassing unit]. Uchebnoe posobie, 2-e izd. Moscow: Izd-vo MGGU, 2007. 190 p.



М.С. Плаксин, Р.И. Родин, В.И. Альков

## ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОИНТЕРВАЛЬНОГО ГИДРОРАЗРЫВА УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ЧЕРЕЗ ДЕГАЗАЦИОННЫЕ СКВАЖИНЫ

Рассмотрена проблема низкой эффективности дегазационных мероприятий в предварительный период подготовки выемочного участка к последующей отработке угольного пласта. Отмечено, что большое влияние на уровень продуктивности дегазационных скважин оказывает проницаемость угольных пластов и соотношение различных форм существования метана в единой структуре угля. Указано, что с возрастанием глубины залегания угольного пласта возрастает доля содержания метана в виде твердого углегазового раствора (ТУГР). Для извлечения метана, содержащегося в виде ТУГР, необходимо снижение напряжений в пласте. Снижение проницаемости угольного пласта с увеличением глубины залегания также способствует его низкой газоотдаче.

Отмечены работы по изучению процессов адсорбции и десорбции, которые установили влияние давления газа на матричную структуру угля и как следствие на изменение адсорбционных свойств в сторону понижения сорбционной способности.

В качестве решения проблемы извлечения метана предлагается метод ориентированного поинтервального гидроразрыва угольного пласта, как наиболее перспективный метод интенсификации продуктивности дегазационных скважин. Представлена схема изменения метановыделения по формам существования метана из скважины с проведенным в ней поинтервальным гидроразрывом. В качестве технического решения для проведения метода поинтервального ориентированного гидроразрыва угольного пласта предлагается применение разработанного устройства – пакера манжетного гидравлического.

Ключевые слова: угольный пласт, выемочный столб, дегазация, скважина, дебит метана, начальное метановыделение, гидроразрыв.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-98-105

Статья посвящена проблеме извлечения метана угольных пластов в подземных условиях из скважин в виде предварительной пластовой дегазации. В последнее время, принято считать, что пластовая дегазация является инструментом для снижения газовой опасности при проведении подготовительных выработок и ведении очистных работ, но при этом она не может обеспечить дебит метана на уровне необходимом

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 98–105.

© М.С. Плаксин, Р.И. Родин, В.И. Альков, 2018.

для его добычи [1,2]. В нормативных документах отмечается, что максимально достижимая эффективность предварительной дегазации разрабатываемых пластов на выемочных участках в зоне предварительного гидроразрыва перекрещивающимися скважинами достигает коэффициента дегазации 0,5 [3]. Однако, технологических решений, обеспечивающих проведение предварительного гидроразрыва угольного пласта через дегазационные скважины в подземных условиях в промышленном масштабе в данный момент, просто не существует.

Проблема низкого дебита дегазационных скважин в условиях пластовой дегазации заключается как в фильтрационных свойствах угля — низкая проницаемость пластов, так и формах содержания метана в угольных пластах, а соответственно и видах его реализации.

Мировой опыт [4] также, как и российский [5] говорит о том, что проницаемость пласта уменьшается с увеличением глубины залегания пласта и самым эффективным способом повышения проницаемости является отработка защитных пластов, который приводит к снижению геостатических напряжений в пласте. Однако, применение такого способа не всегда возможно ввиду геологических особенностей обрабатываемого участка.

В работе [6] отмечается, что продолжительная десорбция позволяет повысить проницаемость пласта не только существенным развитием зоны влияния скважины, но и снижением механической прочности угля вплоть до частичного разрушения. Таким образом для повышения проницаемости угольного пласта необходима его системная дезинтеграция.

В зарубежных исследованиях [7,8] процессов адсорбции и десорбции в угле и их влиянии на механические свойства при бурении скважины отмечают, что при повышении давления свободного газа в кливаже, вследствие перераспределения напряжений в окрестности скважины, происходит сжатие угольной матрицы и снижение адсорбции. Это свидетельствует о том, что на микроуровне давление газа имеет большое влияние на изменение проницаемости, а, следовательно, и на характер метановыделения.

Согласно современным представлениям [9], метан содержится в угольном пласте в трех состояниях: свободном, адсорбированном и по типу твердого углегазового раствора (ТУГР). С увеличением глубин доля метана в составе ТУГР увеличивается и условием его извлечения является разгрузка пласта от механических напряжений. Если угольный пласт не разгружен, процесс метановыделения происходит в основном в результате диффузии свободного и адсорбированного метана, а объемы выделившегося из блоков угля газа можно увязать с площадью обнажения их поверхности фильтрующими трещинами. Следовательно,

давление газа в трещинах определяется не только их пропускной способностью, но и интенсивностью диффузии газа из блоков. Эта совокупность свойств и обуславливает невысокую скорость выделения метана в скважины. Но распад ТУГР при снижении напряжений интенсифицирует процесс диффузии, повышая градиент давления, необходимый для роста скорости фильтрации.

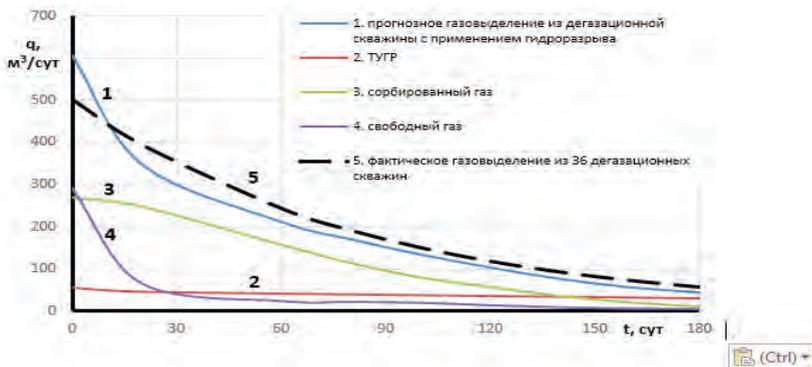
Учитывая особенности реализации метана, решение проблемы низкого дебита дегазационных скважин представляется в применении метода ориентированного поинтервального гидроразрыва угольного пласта, который способствует повышению эффективности дегазации угольного пласта за счет увеличения дебита метана в скважину.

Эффект повышения дебита метана от применения гидроразрыва заключается в создании серии щелей по длине одной скважины, нормальных ее оси [10,11]. Расстояние между скважинами и количество щелей гидроразрывов в каждой скважине зависят от свойств пласта и технологически приемлемого периода дегазации. В работах [12,13] говорится о том, что увеличить эффект от применения гидроразрыва возможно при проведении его в импульсном режиме и с применением проппанта.

Расчеты показывают, что метановыделение из одной дегазационной скважины с проведением в ней 60 ориентированных гидроразрывов соответствует метановыделению 36 обычных дегазационных скважин [14].

На рис.1 показано, что фактическое суммарное метановыделение из 36 дегазационных скважин (кривая 5) снижается по экспоненциальному закону. Приток метана дегазационной скважины, в которой была произведена серия поинтервальных гидроразрывов (кривая 1), несколько отличается, особенно на начальной стадии. Отличие обусловлено особенностями разгрузки при бурении скважин и развитии щелей гидроразрыва. При бурении скважины образуется большой потенциал для разгрузки за счет объема выбуриваемого штыба. Несколько иная картина наблюдается при образовании щелей. Жидкость, подаваемая под высоким давлением, нарушает целостность угольного массива, создавая магистральную трещину, и образует значительную поверхность для газовыделения. В таких условиях метановыделение в начальной стадии реализует огромный потенциал сорбированной (кривая 3) и свободной (кривая 4) составляющей структуры газоносности пласта. При этом распад ТУГР (кривая 2) незначителен.

Для решения проблемы технического обеспечения проведения ориентированного поинтервального гидроразрыва угольного пласта приобретен и испытан опытный комплект оборудования включающий в себя: пакер манжетный гидравлический (ПМГ) (рис. 2) и штанги высокого давления.



**Рис. 1. Схематичное представление структуры метановыделения из дегазационных скважин с применением гидроразрыва**



**Рис.2. Пакер манжетный гидравлический (разработка ООО «Гидроразрыв Кузнецк» г. Кемерово)**

Пакер манжетный гидравлический диаметром 76 мм представляет собой устройство, которое состоит из гидроцилиндров с полым штоком. Устройство также включает в себя: герметизирующие элементы, упорную втулку, граненную втулку с поворотными клиньями и пружиной, помещенной между упорной и граненной втулками.

Для проверки устройства на работоспособность и соответствие заявленным характеристикам были проведены стендовые испытания пакера манжетного гидравлического. Для испытания был изготовлен бетонный блок с размерами 1,5х1,5х2,5 м. В центре блока изготовлено отверстие, имитирующее псевдоскважину. В псевдоскважину поместили пакер манжетный гидравлический и соединив его с насосной установкой при помощи гидросистемы произвели 2 успешных испытания на предмет создания трещин гидроразрыва. Результаты испытаний представлены на рис.3.

В результате двух попыток созданы две трещины гидроразрыва. Угол залегания созданных трещин к оси псевдоскважины составляет 5—15°. Ширина раскрытия трещин (замеры проводились после снятия давления в гидросети) от 3 до 12 мм.



**Рис. 3. Развитие трещин гидроразрыва в бетонном блоке**

При проведении эксперимента на стенде на создание трещин ушло более 40 литров воды, площадь магистральных трещин составила около 4 м<sup>2</sup>. Максимально нагнетаемого давление для создания трещины гидроразрыва составило 25 МПа при прочности бетонного блока на сжатие 15 МПа.

Ожидаемые результаты от внедрения технологии ориентированного поинтервального гидроразрыва в промышленность:

1. Возможность повышения скорости отработки выемочного столба по газовому фактору;
2. Снижение газовой и газодинамической опасности;
3. Повышение объемов утилизации попутного метана.

Результаты стендовых испытаний подтверждают возможность выполнения мероприятий по интенсификации дебита дегазационных скважин методом ориентированного поинтервального гидроразрыва. Для промышленного внедрения устройства необходимо проведение шахтных испытаний с целью проверки работоспособности пакера манжетного гидравлического применительно к угольному пласту и определение оптимальных параметров метода ориентированного поинтервального гидроразрыва в зависимости от горно-технологических условий.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Руководство по наилучшей практике эффективной дегазации источников метановыделения и утилизации метана на угольных шахтах // Серия публикаций ЕЭК по энергетике, № 47, Второе издание, Нью-Йорк; Женева: ООН, 2016 года
2. Сластиунов С.В., Стефлюк Ю.М., Полчин А.И. Решение проблемы пластовой дегазации выбросоопасных угольных пластов для обеспечения их эффективной и безопасной отработки в Карагандинском угольном бассейне // в сборнике: Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности сборник трудов XV международной научно-практической конференции. – 2013. – С.324–326
3. Инструкция по дегазации угольных шахт. Серия 05. Выпуск 22. – Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2012. – 250 с.
4. Pinkun G., Yuanping C. Permeability prediction in deep coal seam: a case study on the No. 3 coal seam of the Southern Qinshui Basin in China // The Scientific World Journal. 2013. P.10. doi: 10.1155/2013/161457

5. Мазаник Е.В., Понизов А.В., Садов А.П., Сластунов С.В. Усовершенствованная технология предварительной дегазации угольных пластов на основе их гидроразрыва // Знание. – 2016. – №5–1(34). – С.111–116

6. Moore R.L., Loftin D, Palmer I. History matching and permeability increases of mature coalbed methane wells in San Juan Basin // SPE Asia pacific oil and gas conference and exhibition, 20–22 September 2011, Jakarta, Indonesia.

7. Espinoza D.N., Pereira J.-M., Vandamme M., Dangla P., Vidal-Gilbert S. Desorption-induced shear failure of coal bed seams during gas depletion // International Journal of Coal Geology 137. 2015. pp.142–151.

8. Espinoza D.N., Vandamme M., Dangla P., Pereira J.-M., Vidal-Gilbert S. A transverse isotropic model for microporous solids – Application to coal matrix adsorption and swelling // Journal of Geophysical Research Solid Earth 118. 2013. pp.6113–6123.

9. Диплом на открытие №9. Свойство органического вещества образовывать с газами метастабильные однофазные системы по типу твердых растворов / А.Д. Алексеев, А.Т. Айруни, Ю.Ф. Васючков, И.В. Зверев, В.В. Синолицкий, М.О. Долгова, И.А. Эттингер – Акад. ест. наук, Ассоц. авт. науч. отк. от 10.11.1994, рег. №16, Москва. – 3 с.

10. Klishin V.I., Opruk G.Y., Tatsienko A.L. Technology and means of coal seam interval hydraulic fracturing for the seam degassing intensification // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 53(1). 2017. doi: 10.1088/1755–1315/53/1/012019

11. Klishin V.I., Opruk G.Y., Tatsienko A.L. Stimulation of Gas Emission Processes in Boreholes Using Interval Hydraulic Fracturing in Borehole Local Parts // E3S Web of Conferences 41, 03005. III<sup>rd</sup> International Innovative Mining Symposium. 2018. doi.org/10.1051/e3sconf/20184103005

12. Марьянчик В.И., Минеев А.В. Анализ гидродинамического воздействия на призабойную зону пласта // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies – Красноярск – 2012. – № 5. – С.258–261.

13. Курленя М.В., Сердюков С.В., Патутин А.В., Шилова Т.В. Интенсификация подземной дегазации угольных пластов методом гидроразрыва // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – №6. – С.3–9.

14. Плаксин М.С., Родин Р.И. Особенности повышения газопроницаемости угольных пластов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – №1. – С.42–48. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

Плаксин Максим Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории газодинамики угольных месторождений, e-mail: gas\_coal@icc.kemsc.ru

Родин Роман Иванович – младший научный сотрудник лаборатории газодинамики угольных месторождений,

Альков Виталий Исхакович – ведущий инженер лаборатории газодинамики угольных месторождений,

Институт угля Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» (ИУ ФИЦ УУХ СО РАН), проспект Советский, 18, г. Кемерово, Россия, 650991.

**Plaksin M.S., Rodin R.I., Alkov V.I.**

## **The rationale for technology of orienting interval hydraulic fracturing of the coal seam degasification wells using**

The paper deals with the problem of low efficiency of degassing measures in the preliminary period of preparation of the excavation area for the subsequent mining of the coal seam. It is noted that the permeability of coal seams and the ratio of different forms of existence of methane in a single coal structure have a great influence on the level of productivity of degassing wells. It is indicated that the proportion of methane content as a solid carbon solution (TUGR) increases with increasing depth of the coal seam. To extract the methane contained in the form of TUGR, it is necessary to reduce the stresses in the reservoir. Reduced permeability of the coal seam with increasing depth also contributes to its low gas yield.

There are works on the study of adsorption and desorption processes, which have established the effect of gas pressure on the matrix structure of coal and as a consequence on the change in adsorption properties in the direction of decreasing sorption capacity.

As a solution to the problem of methane extraction, we propose a method of orienting interval hydraulic fracturing of the coal seam as the most promising method of intensification of the productivity of degassing wells. The scheme of change of methane release in the forms of existence of methane from the wells held in her interval fracturing.

As a technical solution for the method of interval oriented hydraulic fracturing of the coal seam, the application of the developed device – hydraulic cuff packer is proposed. A distinctive feature of this device from similar devices used ever on coal seams is the presence in a single design of the elements of sealing the well site with the possibility of supplying hydraulic fracturing fluid and a slit-forming unit that initiates the formation of a hydraulic fracturing crack. Given the qualitative and quantitative results of bench testing of the hydraulic cuff packer.

Key words: coal seam, the extraction column, degassing, well, the flow rate of methane, the initial methane release, a hydraulic fracturing.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-98-105

## **AUTHORS**

*Plaksin M.S.*, candidate of technical Sciences, senior researcher at the laboratory of gas dynamics of coal deposits, e-mail: gas\_coal@icc.kemsc.ru

*Rodin R.I.*, Junior researcher at the laboratory of gas dynamics of coal deposits, *Alkov V.I.* leading engineer of the laboratory of gas dynamics of coal deposits, Institute of coal of the Federal state budgetary scientific institution «Federal research center of coal and coal chemistry of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences» (IU FITZ UUH SB RAS), Sovetsky Avenue, 18, Kemerovo, Russia, 650991.

## **REFERENCES**

1. *Rukovodstvo po nailuchshej praktike effektivnoj degazacii istochnikov metanovydeleniya i utilizacii metana na ugol'nyh shahtah* [Guidelines on best practices for effective degassing of methane sources and methane recovery in coal mines]. Seriya publikacij EEK po energetike, no 47, Vtoroe izdanie, N'yu-Jork; Zheneva: OON, 2016 goda.

2. Slastunov S.V., Steflyuk Yu.M., Polchin A.I. *Reshenie problemy plastovoj degazacii vybrosopasnyh ugol'nyh plastov dlya obespecheniya ih effektivnoj i bezopasnoj otrabotki v Karagandinskom ugol'nom bassejne* [The solution to the problem of reservoir degassing of outburst-hazardous coal seams to ensure their safe and efficient mining in the Karaganda coal basin]. v sbornike: Energeticheskaya bezopasnost' Rossii. Novye podhody k razvitiyu ugol'noj promyshlennosti sbornik trudov XV mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. 2013. pp.324–326

3. *Instrukciya po degazacii ugol'nyh shaht* [Manual for the degassing of coal mines]. Seriya 05. Vypusk 22. Zakrytoe akcionernoje obshchestvo «Nauchno-tehnicheskij centr issledovaniy problem promyshlennoj bezopasnosti», 2012. 250 p.

4. Pinkun G., Yuanping C. *Permeability prediction in deep coal seam: a case study on the No. 3 coal seam of the Southern Qinshui Basin in China*. The Scientific World Journal. 2013. R.10. doi: 10.1155/2013/161457

5. Mazanik E.V., Ponzivov A.V., Sadov A.P., Slastunov S.V. *Uovershenstvo-vannaya tekhnologiya predvaritel'noj degazacii ugol'nyh plastov na osnove ih gidrorazryva* [Improvement of the technology of preliminary degassing of coal seams on the basis of their hydraulic fracturing]. Znanie. 2016. no 5–1(34). pp.111–116

6. Moore R.L., Loftin D., Palmer I. *History matching and permeability increases of mature coalbed methane wells in San Juan Basin*. SPE Asia pacific oil and gas conference and exhibition, 20–22 September 2011, Jakarta, Indonesia.

7. Espinoza D.N., Pereira J.-M., Vandamme M., Dangla P., Vidal-Gilbert S. *Desorption-induced shear failure of coal bed seams during gas depletion*. International Journal of Coal Geology 137. 2015. pp.142–151.

8. Espinoza D.N., Vandamme M., Dangla P., Pereira J.-M., Vidal-Gilbert S. *A transverse isotropic model for microporous solids Application to coal matrix adsorption and swelling*. Journal of Geophysical Research Solid Earth 118. 2013. pp.6113–6123.

9. Alekseev A.D., Ajruni A.T., Vasyuchkov Yu.F., Zverev I.V., Sinolickij V.V., Dolgova M.O., Ettinger I.L. *Diplom na otkrytie no 9. Svoystvo organicheskogo veshchestva obrazovyvat' s gazami metastabil'nye odnofaznye sistemy po tipu tverdyh rastvorov*. Akad. est. nauk, Assoc. avt. nauch. otkr. ot 10.11.1994, reg. no 16, Moscow. 3 p.

10. Klishin V.I., Opruk G.Y., Tatsienko A.L. *Technology and means of coal seam interval hydraulic fracturing for the seam degassing intensification*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 53(1). 2017. doi: 10.1088/1755–1315/53/1/012019

11. Klishin V.I., Opruk G.Y., Tatsienko A.L. *Stimulation of Gas Emission Processes in Boreholes Using Interval Hydraulic Fracturing in Borehole Local Parts*. E3S Web of Conferences 41, 03005. IIIrd International Innovative Mining Symposium. 2018. doi. org/10.1051/e3sconf/20184103005

12. Mar'yanchik V.I., Mineev A.V. *Analiz gidrodinamicheskogo vozdeystviya na prizabojnuyu zonu plasta* [Analysis of hydrodynamic effects on bottom-hole formation zone]. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies Krasnoyarsk 2012. no 5. pp.258–261.

13. Kurlenya M.V., Serdyukov S.V., Patutin A.V., Shilova T.V. *Intensifikaciya podzemnoj degazacii ugol'nyh plastov metodom gidrorazryva* [The intensification of the underground degassing of coal seams by hydraulic fracturing]. Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh. 2017. no 6. pp.3–9.

14. Plaksin M.S., Rodin R.I. *Osobennosti povysheniya gazopronicaemosti ugol'nyh plastov* [Features of increase of gas permeability of coal seams]. Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti. 2016. no 1. pp.42–48.



## ЛЕГКИЙ ПРОППАНТ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА В УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ\*

Приведены результаты лабораторных исследований влияния гидроразрыва на газопроницаемость углей без и с расклиниванием создаваемых трещин проппантом. В экспериментах использованы оригинальный легкий проппант на основе алюмосиликатных микросфер АСПМ-500 с дополнительной полимерной терморезистивной оболочкой, разработанный в ИГД СО РАН [1], образцы плотного угля марки «Д» проницаемостью менее 0.3 мкм<sup>2</sup> и трещиноватого коксующегося угля марки «Ж» проницаемостью от 60 мкм<sup>2</sup> и выше.

Показано, что в отличие от плотного угля проницаемость трещиноватого угля существенно зависит от всестороннего сжатия и при его увеличении с 1 до 8 МПа снижается в 6–7 раз. Горное давление значительно влияет и на эффективность гидроразрыва угля без закрепления создаваемых трещин расклинивающим материалом (проппантом). Получено, что увеличение с 1 до 5 МПа всестороннего сжатия цилиндрического образца плотного угля, содержащего не закрепленный проппантом разрыв, снижает его проницаемость в 13–24 раз.

Экспериментально установлено, что заполнение трещины легким проппантом при малой толщине пачки 0.5 мм и всестороннем сжатии 1–5 МПа увеличивает проницаемость плотного угля в 7–19.5 раз. В трещиноватом угле применение легкого проппанта при сопоставимых условиях увеличивает проницаемость образцов менее значительно – в 1.2–2.6 раза.

Полученные результаты показывают перспективность использования легкого проппанта для создания дренажных каналов в низкопроницаемых угольных пластах методом гидроразрыва.

Ключевые слова: уголь, проницаемость, легкий проппант, трещина, дегазация, угольный пласт, гидроразрыв, алюмосиликатные микросферы.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-106-116

### Введение

Известно, что извлечение метана из пластов, неразгруженных от горного давления, осложняется низкой проницаемостью угля, которая

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект RFMEFI60417X0172).

обычно меньше  $1 \text{ мкм}^2$  (мД) [2]. Для повышения эффективности и снижения себестоимости дегазационных работ необходимо искусственное повышение проницаемости угольного массива. Одним из перспективных способов интенсификации дегазации угля является гидроразрыв пласта (ГРП) [3, 4]. Опыт применения ГРП на угледобывающих шахтах показывает, что значительное долговременное увеличение притока газа удается достичь только при заполнении создаваемых трещин расклинивающим материалом (проппантом). Гидроразрыв водой без закрепления трещин проппантом даёт лишь кратковременное увеличение дебита дегазационной скважины до 3 раз, но не оказывает практически значимого влияния на извлечение метана скважиной за весь период её эксплуатации [5]. В работе [5] получено, что заполнение трещин гидроразрыва кварцевым песком (фракция 30/60 меш) с раскрытием 3–4 мм при радиусе трещин несколько метров увеличивает дебит дегазационных скважин на протяжении нескольких месяцев в 5 – 180 раз (в зависимости от проницаемости угля). Согласно [6] использование песчаного проппанта (фракция 70–140 меш) увеличивает проницаемость трещины в антрацитовом и битуминозном углях в 5 – 10 раз.

Применение традиционных проппантов для гидроразрыва угольного пласта, таких как кварцевый песок, керамические сферы, осложняется их преждевременным осаждением в дегазационной скважине и трещине. Использование для борьбы с этим явлением высоковязких жидкостей разрыва и/или высоких темпов ее закачки значительно повышает стоимость работ, что ведет к отказу от применения гидроразрыва в пользу бурения плотной сетки протяженных дегазационных скважин [7–9]. Приемлемым современным решением указанной проблемы, направленным на снижение объемов бурения скважин, является использование легких проппантов с плотностью близкой к рабочим жидкостям разрыва на водной основе. Применение таких проппантов обеспечивает их длительный перенос и удовлетворительное распределение по трещине гидроразрыва [10, 11], но они обладают меньшей прочностью и могут разрушаться при сжатии берегов трещины горным давлением.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования влияния легкого проппанта на основе полых алюмосиликатных микросфер АСПМ-500 с дополнительной полимерной терморезистивной оболочкой на проницаемость угля в условиях всестороннего сжатия до 5–8 МПа.

### **Экспериментальная установка**

Эксперименты выполнены на лабораторной установке, обеспечивающей измерение газопроницаемости горных пород при стационарном характере фильтрации линейного потока газа в условиях осевого и бокового сжатия цилиндрического образца. Основные характеристики установки приведены в табл. 1, подробное описание дано в работе [12].

**Характеристики экспериментальной установки**

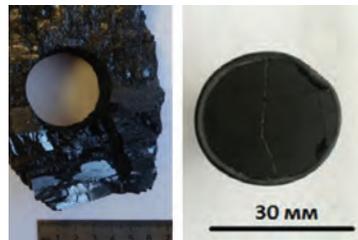
Параметр	Диапазон значений	Шаг измерения (регулирования)
Время фильтрации, с	0,001–432000	0,001
Давление газа, входное, МПа	0–5	0,02
Дифференциальное давление P, МПа	0–0.3	0,001
Газ	N <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub>	–
Температура, °С	От –10 до +150	0,01
Боковое сжатие, МПа	0–20	0,05
Осевое сжатие, МПа	0–20	0,05
Фильтрационный объем одного измерения, дм <sup>3</sup>	0,2–0,5	–
Масса камеры, кг	0.7	–

**Подготовка образцов**

В экспериментах использовали угли марок «Д» и коксующийся «Ж», отобранные, соответственно, на Караканском каменноугольном месторождении (Пермяковский разрез, Кузнецкий бассейн) и шахте им. Тихова (гор. 200 м, Кузнецкий бассейн). Эксперименты проводились на цилиндрических образцах диаметром 30 мм и высотой 30 мм. Вдоль оси цилиндра нескольких образцов были сформированы сквозные трещины, которые впоследствии заполняли проппантом (рис. 1). Среднее раскрытие расклиненных трещин составило 0.5мм.

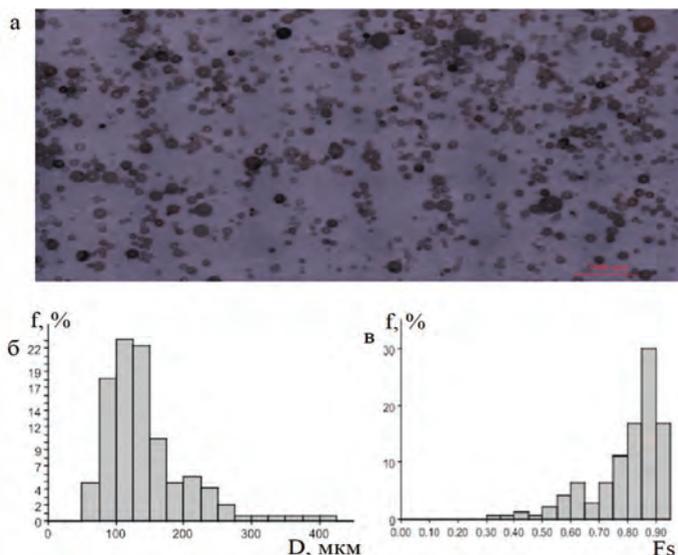
До начала экспериментов методом рентгеновской томографии была определена пористость углей, которая для высушенных образцов коксующегося угля составила 0.33%, из которой 86.4% приходится на открытую и 13.6% на закрытую пористости. Пористость длиннопламенного угля составила 4.77%, в том числе открытая – 5.2% от общего значения, закрытая – 94.8%.

В качестве проппанта использовали полые алюмосиликатные микросферы АСПМ-500 с дополнительным терморезистивным покрытием [1] с эффективно плотностью 0.4–0.6 г/см<sup>3</sup>. С помощью анализатора микроструктуры твердых веществ «SIAMS Минерал С7» были определены размер и форма частиц основной фракции проп-



**Рис. 1. Коксующийся уголь марки «Ж» с отверстием после выреза цилиндрического образца (слева) и образец длиннопламенного угля с трещиной, заполненной легким проппантом (справа)**

панта (рис. 2, а). Установлено, что размер более 80% частиц составляет 90–200 мкм (рис. 2, б), а округлость (фактор формы) около 70 % частиц выше 0,8 (рис. 2, в).



**Рис. 2. а – Легкий проппант на основе полых алюмосиликатных микросфер АСПМ-500; б – гистограмма распределения среднего диаметра частиц проппанта (D); в — анализ формы частиц проппанта: круглый фактор формы (Fs)**

### **Методика проведения экспериментов**

На первом этапе исследовали проницаемость цилиндрических образцов углей без имитации в них трещины гидроразрыва. Эксперименты проведены с использованием азота, фильтрующегося в осевом направлении при постоянных перепадах давления  $\Delta P$ . Давление всестороннего сжатия  $P$  образцов для длиннопламенного угля меняли от 1 до 5 МПа с шагом 1 МПа, а в случае коксующегося угля – от 1 до 8 МПа с шагом 2 МПа. Для каждого значения  $P$  выполнялась серия тестов при различных перепадах  $\Delta P$  от 0.01 до 0.1 МПа, которые меняли с шагом 0.01–0.02 МПа.

На втором этапе была исследована проницаемость длиннопламенного угля со сквозной трещиной без проппанта.

На третьем этапе были выполнены эксперименты по определению проницаемости углей с трещиной, расклиненной легким проппантом на основе алюмосиликатных микросфер АСПМ-500. Проппант равномерно наносили на поверхность трещины, далее составной образец помещали в резиновую манжету и в испытательную камеру, после

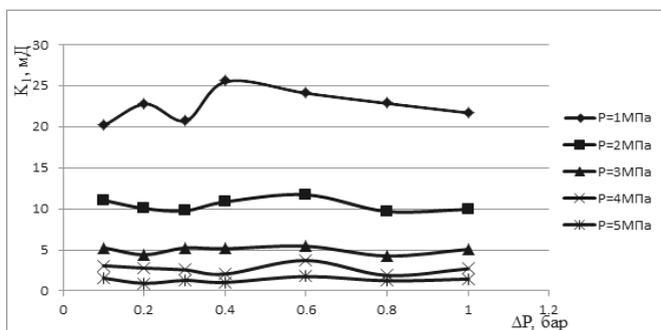
чего выполняли серию экспериментов для длиннопламенного угля при  $P=1\text{--}5$  МПа с шагом 1 МПа и перепадах  $\Delta P = 0.01; 0.02; 0.03; 0.04; 0.06; 0.08; 0.1$  МПа и для коксующегося угля при  $P=3, 5, 7, 8$  МПа и перепадах  $\Delta P = 0.02; 0.04; 0.06; 0.08; 0.1$  МПа.

Значения коэффициентов газопроницаемости образца до и после добавления проппанта рассчитывали по формуле для линейного потока газа и стационарного характера фильтрации [13].

### Обсуждение результатов

В первой серии экспериментов была установлена зависимость проницаемости плотного и трещиноватого углей, не содержащих трещину разрыва, от всестороннего сжатия образцов  $P$ . Получено, что проницаемость длиннопламенного угля при повышении давления всестороннего сжатия образца в 5 раз снижается в среднем в 2.6 раза (с  $0.24 \text{ мкм}^2$  при  $P = 1$  МПа до  $0.09 \text{ мкм}^2$  при  $P = 5$  МПа). Проницаемость коксующегося угля при повышении давления всестороннего сжатия образца в 8 раз уменьшилась в среднем в 6.7 раза (с  $60 \text{ мкм}^2$  при  $P = 1$  МПа до  $9 \text{ мкм}^2$  при  $P = 8$  МПа).

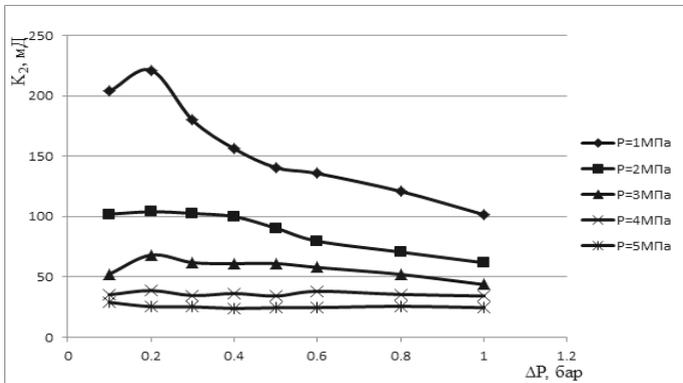
Во второй серии экспериментов была исследована зависимость проницаемости длиннопламенного угля с трещиной без проппанта от всестороннего сжатия образца  $P$ . Полученные результаты приведены на рисунке 3. Установлено, что проницаемость падает с ростом давления всестороннего сжатия ( $P$ ), уменьшаясь в 13–24 раза при увеличении  $P$  в 5 раз с 1 до 5 МПа. Это свидетельствует о малой эффективности дренирования угля трещинами гидроразрыва без их заполнения расклинивающим материалом.



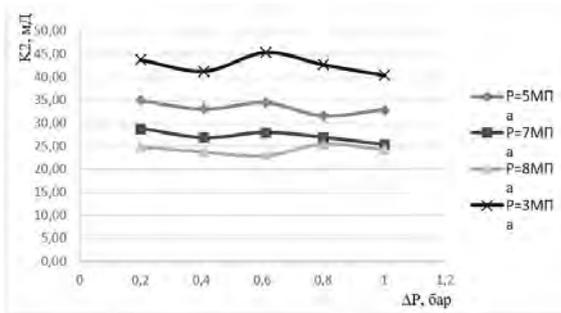
**Рис. 3. Зависимость коэффициента газопроницаемости ( $K_1$ ) плотного длиннопламенного угля со сквозной трещиной без проппанта от перепада давления  $\Delta P$  и всестороннего сжатия  $P$**

В третьей серии экспериментов оценивалось влияние давления всестороннего сжатия  $P$  на проницаемость длиннопламенного и коксующегося углей со сквозной трещиной, заполненной легким проппантом

на основе алюмосиликатных микросфер АСПМ-500 при начальном (без сжатия образца) раскрытии 0.5мм. Полученные результаты приведены на рисунках 4 и 5. Выявлено, что проницаемость длиннопламенного угля снижается в 4–9 раз при повышении всестороннего сжатия  $P$  в 5 раз с 1 до 5 МПа, а проницаемость коксового угля в 1.6–2 раза при повышении  $P$  с 3 до 8 МПа. Причиной уменьшения проницаемости является, вероятно, уплотнение упаковки проппанта в трещине.



**Рис. 4. Зависимость коэффициента газопроницаемости ( $K_2$ ) плотного длиннопламенного угля с трещиной, заполненной проппантом, от перепада давления  $\Delta P$  и всестороннего сжатия  $P$**

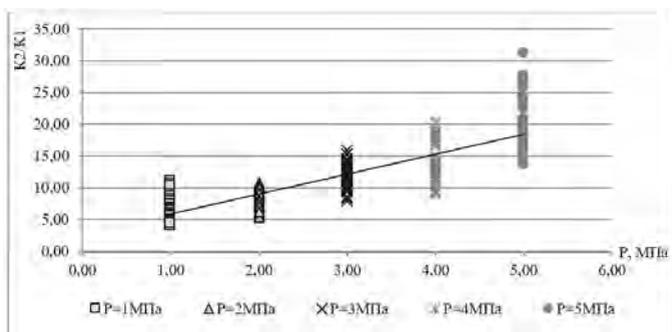


**Рис.5. Зависимость коэффициента газопроницаемости ( $K_2$ ) трещиноватого коксующегося угля марки «Ж» с трещиной, заполненной проппантом от перепада давления  $\Delta P$  и всестороннего сжатия  $P$**

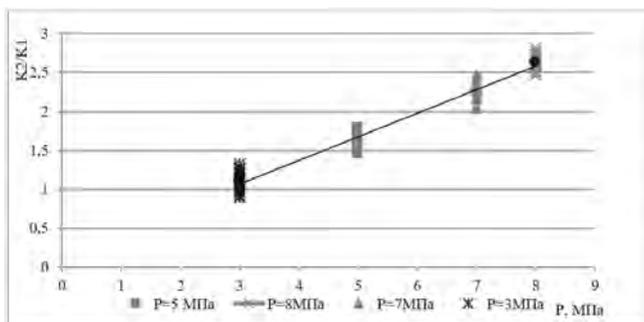
Проведенные исследования показали, что использование легкого проппанта для расклинивания искусственной трещины приводит к увеличению проницаемости углей, которое более значительно для углей с низкой начальной проницаемостью. Зависимости отношения

коэффициентов проницаемости от давления сжатия до и после использования легкого проппанта показаны на рисунках 6, 7. В обоих случаях эффект от использования проппантов повышается с ростом сжимающих нагрузок.

Так, в случае плотного длиннопламенного угля расклинивание трещины легким проппантом с раскрытием 0.5 мм при давлениях сжатия  $P = 1-2$  МПа повышает проницаемость в среднем в 7–8.5 раз, при  $P = 3, 4$  МПа – в 11–14 раз, а при  $P = 5$  МПа в 19.5 раз (рис. 6). Для трещиноватого коксующегося угля проницаемость в аналогичных условиях повышается от 1.2 раз при  $P = 3$  МПа до 2.6 раз при  $P = 8$  МПа. Более низкая эффективность гидроразрыва трещиноватого угля обусловлена его высокой начальной проницаемостью (более 60 мкм<sup>2</sup>), определяемой развитой системой квиважных трещин.



**Рис. 6. Зависимость отношения коэффициентов проницаемости  $K_2/K_1$  плотного длиннопламенного угля от всестороннего сжатия образца  $P$ , сплошная линия – линейная аппроксимация средних значений:  $K_2/K_1 = 3.1407 \cdot P + 2.7903$ , ( $R^2 = 0.9437$ )**



**Рис. 7. Зависимость отношения коэффициентов проницаемости  $K_2/K_1$  трещиноватого коксующегося угля от всестороннего сжатия образца  $P$ , сплошная линия – линейная аппроксимация средних значений:  $K_2/K_1 = 0.3034 \cdot P + 0.1605$ , ( $R^2 = 0.9947$ )**

Полученные результаты показывают, что применение легких проппантов является перспективным направлением развития технологии гидроразрыва для интенсификации дегазации угольных пластов. Установлено, что создание и расклинивание трещины гидроразрыва значительно повышает газопроницаемость низкопроницаемых углей ( $< 0.3\text{мД}$ ) со слабо развитой сетью естественных трещин (открытая пористость составляет 5.2% от общей пористости). Влияние же искусственной трещины на фильтрационные свойства сильнотрещиноватого высокопроницаемого угля ( $>60\text{мД}$ ) с множественными естественными трещинами (открытая пористость составляет 86.4% от общей пористости) менее значительно, чем для плотных углей.

Перспективным направлением дальнейших исследований, на наш взгляд, являются разработка легких проппантов с улучшенными прочностными характеристиками и разработка способа укрупнения гранул легкого проппанта в трещине гидроразрыва. Решение указанной задачи обеспечит повышение проводимости трещин малообъемного гидроразрыва угольных пластов, закачку рабочей жидкости и раскрепляющего материала насосным оборудованием малой производительности, что немаловажно в шахтных условиях.

### **Заключение**

Заполнение трещины легким проппантом на основе алюмосиликатных микросфер АСПМ-500 с толщиной слоя в 0.5 мм увеличивает проницаемость плотного низкопроницаемого угля в 7–19.5 раз, а трещиноватого высокопроницаемого угля в 1.1–2.6 раза.

Применение легкого проппанта на основе алюмосиликатных микросфер является перспективным направлением развития технологии гидравлического разрыва для создания дренажных каналов и интенсификации дегазации угольных пластов.

Основные направления дальнейших исследований связаны с разработкой способов улучшения прочностных свойств легких проппантов и укрупнения гранул в трещине гидроразрыва.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Патентная заявка РФ №2017143340. Проппант для гидравлического разрыва низкотемпературных горных пород / Сердюков С.В., Шилова Т.В., Патуин А.В. – База данных ФИПС, 2017.
2. *Sander R., Pan Z., Connell L.D.* Laboratory measurement of low permeability unconventional gas reservoir rocks: A review of experimental methods // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2017. – Т. 37. – P. 248–279.
3. *Flores R.M.* Coal and coalbed gas: Fueling the future. – Newnes, 2013.
4. *Плаксин М.С., Родин Р.И., Рябцев А.А. и др.* Гидроразрыв угольного пласта в шахтных условиях как панацея решения газовых проблем шахт (основы разработки и внедрения) // *Уголь*. – 2015. – №. 2. – С. 48–50.

5. Jeffrey R., Boucher C. Sand Propped hydraulic fracture stimulation of horizontal in-seam gas drainage holes at Dartbrook Coal Mine. – 2004. – P. 168–179.

6. Kumar H. et al. Permeability evolution of propped artificial fractures in coal on injection of CO<sub>2</sub> // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2015. – T. 133. – P. 695–704.

7. Bokane A. et al. Computational fluid dynamics (CFD) study and investigation of proppant transport and distribution in multistage fractured horizontal wells // SPE Reservoir Characterization and Simulation Conference and Exhibition. – Society of Petroleum Engineers, 2013.

8. Bokane A.B. et al. Transport and distribution of proppant in multistage fractured horizontal wells: a CFD simulation approach // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Society of Petroleum Engineers, 2013.

9. Mack M.G. et al. Development and field testing of advanced ceramic proppants // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Society of Petroleum Engineers, 2013.

10. Liang F. et al. A comprehensive review on proppant technologies // Petroleum. – 2016. – Т. 2. – №. 1. – С. 26–39.

11. Шилова Т.В., Курленя М.В., Сердюков С.В. Экспериментальная оценка проводимости трещин с проппантом из алюмосиликатных микросфер в условиях малоглубинного гидроразрыва нефтяного пласта. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – №6. – С. 127–132.

12. Сердюков С.В., Шилова Т.В., Дробчик А.Н. Лабораторная установка и методика определения газопроницаемости горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – №. 5. – С. 172–180.

13. ГОСТ 26450.2–85. Методы определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 17 с. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Шилова Татьяна Викторовна* — кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (923)708-97-29, e-mail: [shilovatanya@yandex.ru](mailto:shilovatanya@yandex.ru),

*Рыбалкин Леонид Алексеевич* — научный сотрудник, tel. (383) 335-96-42, e-mail: [Leonid.Rybalkin@gmail.com](mailto:Leonid.Rybalkin@gmail.com)

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 106–116.

**Shilova T.V., Rybalkin L.A.**

### **Lightweight proppant for fracture permeability increasing in coal seams**

The paper presents the laboratory study results of the hydraulic fracturing influence on the coal gas permeability with and without proppant use. The original lightweight proppant,

which is based on the aluminosilicate microspheres ASPM-500 with an additional polymeric thermoset shell, was developed at Institute of Mining [1]. This proppant, dense coal grade "D" with a permeability  $<0.3 \mu\text{m}^2$  and fractured coking coal grade "G" with a permeability  $>60 \mu\text{m}^2$  were used in the experiments.

It is shown, that the fractured coal permeability essentially depends on triaxial compression and at its increase from 1 to 8 MPa permeability decreases by 6–7 times. Mining pressure significantly affects the efficiency of coal hydraulic fracturing without proppant use. It was obtained that the dense coal permeability with non-propped fracture is reduced by 13–24 times at triaxial compression increasing from 1 to 5 MPa.

It has been experimentally established that lightweight proppant with a small pack thickness about 0.5 mm increases the dense coal permeability by 7–19.5 times at triaxial compression 1–5 MPa. The use of lightweight proppant for fractured coal increases the sample permeability less significantly – by 1.2–2.6 times under comparable stress conditions

The obtained results show, that the lightweight proppant using to create drainage channels in low-permeability coal seams by hydraulic fracturing is perspective direction.

Key words: coal, permeability, lightweight proppant, fracture, degassing, coal seam, hydraulic fracturing, aluminosilicate microspheres.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-106-116

## AUTHORS

Shilova T.V., PhD., researcher, tel. (923)708-97-29, e-mail: shilovatanya@yandex.ru, Rybalkin L.A., junior researcher, tel. (383) 335-96-42, e-mail: Leonid.Rybalkin@gmail.com, Chinalak Institute of Mining SB RAS, Russia, Novosibirsk, 630091, Krasnyi ave., 54.

## REFERENCES

1. Serdyukov S.V., Shilova T.V., Patutin A.V. *Patentnaya zayavka RF №2017143340*. Proppant dlya gidravlicheskogo razryva nizkotemperaturnykh gornyyh porod. Baza dannykh FIPS, 2017.
2. Sander R., Pan Z., Connell L.D. *Laboratory measurement of low permeability unconventional gas reservoir rocks: A review of experimental methods*. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2017. T. 37. pp. 248–279.
3. Flores R.M. *Coal and coalbed gas: Fueling the future*. Newnes, 2013.
4. Plaksin M.S., Rodin R.I., Ryabcev A.A. i dr. *Gidrorazryv ugol'nogo plasta v shahtnyykh usloviyakh kak panaceya resheniya gazovykh problem shaht (osnovy razrabotki i vnedreniya)* [Fracturing of the coal seam in the mine conditions as the panacea to solve gas problems in mines (fundamentals of development and implementation) ]. Ugol'. 2015. no 2. pp. 48–50.
5. Jeffrey R., Boucher C. *Sand Propped hydraulic fracture stimulation of horizontal in-seam gas drainage holes at Dartbrook Coal Mine*. 2004. pp. 168–179.
6. Kumar H. et al. *Permeability evolution of propped artificial fractures in coal on injection of CO<sub>2</sub>*. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2015. T. 133. pp. 695–704.
7. Bokane A. et al. *Computational fluid dynamics (CFD) study and investigation of proppant transport and distribution in multistage fractured horizontal wells*. SPE Reservoir Characterization and Simulation Conference and Exhibition. – Society of Petroleum Engineers, 2013.
8. Bokane A.B. et al. *Transport and distribution of proppant in multistage fractured horizontal wells: a CFD simulation approach*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2013.
9. Mack M.G. et al. *Development and field testing of advanced ceramic proppants*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2013.

10. Liang F. et al. *A comprehensive review on proppant technologies*. Petroleum. 2016. T. 2. no 1. pp. 26–39.
11. Shilova T.V., Kurlenya M.V., Serdyukov S.V. *Eksperimental'naya ocenka provodimosti treshchin s proppantom iz alyumosilikatnyh mikrosfer v usloviyah maloglubinnogo gidrorazryva neftyanogo plasta* [Experimental evaluation of the conductivity of fractures with proppant of aluminosilicate microspheres in the conditions of shallow hydraulic fracturing of oil formation]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh*. 2017. no 6. pp. 127–132.
12. Serdyukov S.V., Shilova T.V., Drobchik A.N. *Laboratornaya ustanovka i metodika opredeleniya gazopronicaemosti gornyh porod* [Laboratory apparatus and technique determination of gas permeability of rocks]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh*. 2017. no 5. pp. 172–180.
13. GOST 26450.2–85. *Metody opredeleniya koefficienta absolyutnoj gazopronicaemosti pri stacionarnoj i nestacionarnoj fil'tracii* [GOST 26450.2-85. Methods for determining the absolute gas permeability coefficient in stationary and non-stationary filtration]. Moscow: Izd-vo standartov, 1985. 17 p.



**В.Г.Венгер, Е.А. Разумов,  
Е.А.Зеляева, Т.О. Григорьева**

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОРАЗРЫВА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ДЕГАЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ ЛАВЫ 555 Ш. «ЧЕРТИНСКАЯ-КОКСОВАЯ»**

Представлен опыт применения технологии гидроразрыва, для образования системы трещин и усовершенствования эффективности дегазации. А также дан анализ шахтных экспериментальных работ по усовершенствованию технологии подземной пластовой дегазации с использованием гидроразрыва. В ходе эксперимента на опытном участке подтверждена высокая эффективность технологии гидроразрыва.

Ключевые слова: подземная разработка, дегазация, скважина, угольный пласт, гидроразрыв, мониторинг, пластовая дегазация, опытно-промышленные испытания.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-117-125

Одна из проблем подземной разработки угольных месторождений в Кузбассе является присутствие труднообрушающихся кровель, которые создают повышенное горное давление. Это снижает эффективность и безопасность горных работ, что увеличивает роль предварительной дегазации угля. Основным методом дегазации углепородного массива, не затронутого процессом разработки, является его гидроразрыв.

Разработка усовершенствованных технологий предварительной пластовой дегазации, обеспечивающих существенное повышение эффективности в диапазоне 20–50%, является первоочередной целью работ по обоснованию и испытанию технологии подземной дегазации угольного пласта 5 с использованием его гидроразрыва, направленного на создание и объединение систем трещин в дегазуемом пласте, ориентированных к скважине и способствующих эффективному извлечению метана.

Значительные научные и практические исследования гидравлических разрывов породного и угольного массива проводимых через скважины в большинстве случаев показывает эффективность данного способа воздействия жидкости на трещины, образований деформаций и разрушений в горном массиве.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 117–125.

© В.Г.Венгер, Е.А. Разумов, Е.А.Зеляева, Т.О. Григорьева, 2018.

**Основной концепцией проведения эксперимента являются следующие факторы:**

1. Дегазация с предварительным гидроразрывом пластов применяется с целью повышения ее эффективности и сокращения сроков дегазации.

2. Подземные скважины гидроразрыва бурятся по разрабатываемому пласту — горизонтальными.

3. Длина скважин, пробуренных по пласту, принимается на 30—40 м меньше длины лавы между пром. штреком 555 и вентиляционным штреком 555 для проведения дегазации очистной выработки, либо по результатам проведения исследований.

4. Гидроразрыв пласта осуществляется водой из шахтного водопровода, нагнетаемой под давлением не менее 15—20 МПа. Темп закачки не менее 20—30 м<sup>3</sup>/ч.

5. Пластовые дегазационные скважины бурятся после проведения гидроразрыва.

**Подготовка к гидроразрыву**

Бурение скважин для гидроразрыва и последующей дегазацией угольного массива:

— на опытном участке осуществлялось посредством бурения 2-х скважин

Для проведения работ по подаче жидкости для гидроразрыва применялась насосная станция высокого давления типа BRW400/37X. Диаметр трубопровода  $D$  — 32 мм и длиной 75—90 метров. Рабочее место оборудуется телефонной связью.

**Параметры проведения гидроразрыва**

Минимальное давление жидкости  $P_r$  (МПа), при котором происходит гидроразрыв угольного пласта через подземные скважины, определяется согласно п. 4 прил. № 5[3]:

$$P_r = 14,1 \text{ МПа.}$$

Необходимый объем рабочей жидкости  $Q_{ж}$ , м<sup>3</sup>, (воды или воды с добавками) для гидроразрыва пласта через скважины, пробуренные по разрабатываемому пласту:

$$Q_{ж} = 20 \text{ м}^3.$$

Расчетное время  $t_r$ , ч, работы насоса рассчитывается как отношение требуемого количества жидкости к темпу ее закачки, принимается равным производительности насоса:

$$t_r = 0,83 \text{ ч.}$$

Темп нагнетания жидкости в пласт угля, согласно технических характеристик станция высокого давления типа BRW400/37X, принимается  $q_n = 24 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Скважины гидроразрыва бурились буровым станком типа PD-300 по восстанию пласта угля под углом 90 град. к оси пром. штрека 555 висячий бок, угол заложения скважин в вертикальной плоскости равен углу падения пласта.

Параметры скважин для второго опытного участка гидроразрыва, будут скорректированы на основании проведённых исследований на первом опытном участке.

Для ведения работ по подаче жидкости для гидроразрыва с пром. штрека 555 приняты насосные станции типа BRW400/37X производительностью 400 л/мин и давлением до 370 Bar= 37 МПа.

### **Проведение гидроразрыва**

Подземный гидроразрыв, на опытном участке №1 выемочного столба №555, выполнен в соответствии с «Рекомендациями по дегазации...»[9], разработанными специалистами научно-исследовательского центра «НИЦ ГТБ» филиала КузГТУ в, а также «Программой и методикой проведения исследований дегазации пласта с применением подземного гидроразрыва»[10] в соответствии с требованиями приложения №5 «Инструкции по дегазации угольных шахт» (с изменениями на 20 мая 2015 года), приказ Ростехнадзора от 1 декабря 2011 года № 679, в которых были рассчитаны основные параметры и технология проведения подземного гидроразрыва пласта.

До проведения подземного гидроразрыва было измерено процентное содержание метана в скважинах для гидроразрыва, содержание метана составило 58–65%. После проведения подземного гидроразрыва процентное содержание метана увеличилось на 13–20% и составило 71–85%.

А так же были применены метод сейсмического просвечивания и оценка фильтрационных свойств массива. Метод сейсмического просвечивания заключается в регистрации по линии выработки №1 проходящих упругих волн, искусственно генерируемых от борта параллельной или смещенной относительно нее выработки № 2.

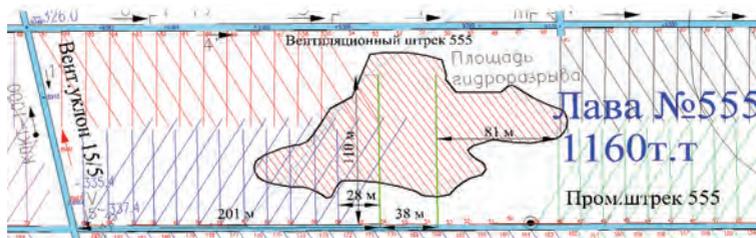
### **Результаты проведения гидроразрыва в выемочном столбе №555**

Зона совокупного влияния гидроразрыва по скважинам №1 и №2 на исследованный угленосный массив представлена на рис. 1. Объем закачанной рабочей жидкости составил 70,8 м<sup>3</sup>.

Площадь зоны гидродинамического воздействия составила 11802 м<sup>2</sup>, расстояние от скважины ПГР № 1 влево 83 м, от скважины ПГР № 2 вправо – 87 м. Общая ширина зоны влияния 208 м. С учётом площади зоны гидродинамического воздействия определим радиус действия скважины гидроразрыва:

$$R_r = S / 4I'_r = 11\,802 / (4 \cdot 75) = 39,34 \text{ м.}$$

$$Q'_ж = (R_r^2 + 2R_r I'_r) m k_3$$



**Рис. 1. Площадь гидроразрыва**

Преобразовав формулу для определения объема рабочей жидкости закачанной в скважины (1) получим коэффициент, учитывающий заполнение угольного массива жидкостью:

$$k_3 = Q_{ж} / (S + \pi R_r^2) m = 70,8 / (11\,802 + 3,14 \cdot 39,34^2) 2 = 0,00212;$$

где  $Q_{ж}$  – объем рабочей жидкости закачанной в скважины ПГР, м<sup>3</sup>,  $Q_{ж} = 70,8$  м<sup>3</sup>;  $S$  – площадь гидроразрыва, м<sup>2</sup>,  $S = 11802$  м<sup>2</sup>;  $R_r$  – радиус действия скважины гидроразрыва, м,  $R_r = 39,34$  м;  $l'_r$  – полезная длина скважины гидроразрыва, м,  $l'_r = 75$  м;  $m$  – полная мощность угольных пачек пласта, м,  $m = 2$  м.

До проведения подземного гидроразрыва пласта со скважины №1 21.06.18 г. были измерено процентное содержание метана, содержание метана составило 65%. Последующее снятие показания проводилось перед гидроразрывом скважины №2 26.06.18г., что показало незначительный прирост концентрации CH<sub>4</sub> в скважине №1, в скважине № 2 концентрация метана составила 58%. Последующие наблюдения и снятия показаний проводились раз в неделю. Наблюдения показывают повышение концентрации метана в скважинах гидроразрыва. По итогам на 13.08.18г. показатели концентрации метана в скважинах №№1 и 2 составили 85% и 71%, что соответственно показало увеличение на 13% и 20% в сравнении с первичными предгидроразрывными измерениями (рис. 2,3).

После выпуска воды из скважины ПГР №1, 05.07.18 зафиксирован рост концентрации метана с дегазационной скважины №58 до 25%, находящейся в 28 метрах от скважины ПГР №1, в последующем возросшим до 90%.

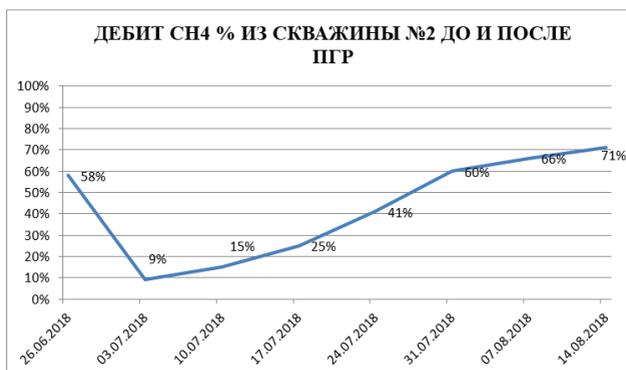
После выпуска воды из скважины ПГР №2, 10.07.18 зафиксирован рост концентрации метана с дегазационной скважины №48 до 14%, находящейся в 81 метрах от скважины ПГР №2, в последующем возросшим до 85%.

### **Выводы**

Мониторинг гидродинамического воздействия на пласт был выполнен в скважинах №№ 1, 2. В скважине № 1 при воздействии на угольный



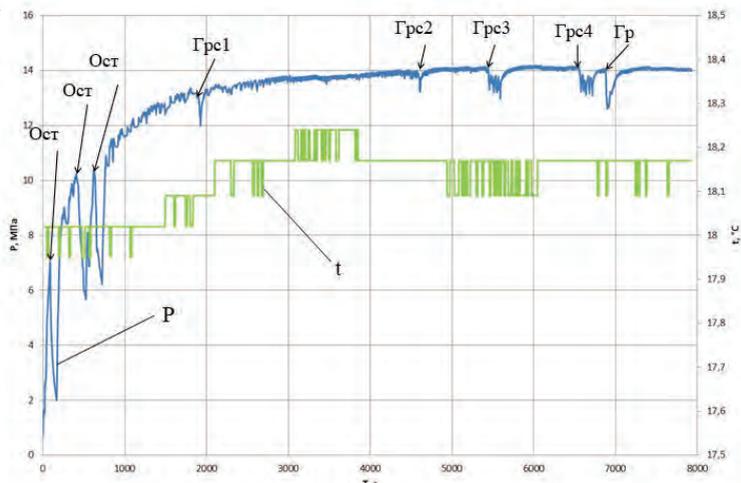
**Рис. 2. Концентрация метана в скважине № 1**



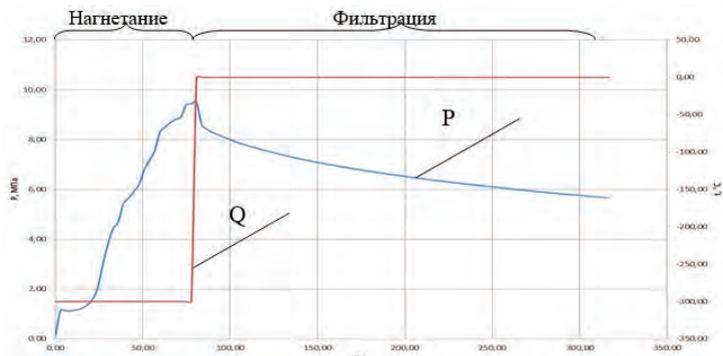
**Рис. 3. Концентрация метана в скважине №2**

пласт 5 в течение 132 мин. произошло несколько гидрорасчленений (Грс1-Грс4, рисунок 4), при максимальном давлении 14,18 МПа, и гидроразрыв пласта, при давлении 14,07 МПа, что подтверждается результатам сейсмотомографических измерений в исследованной области выемочного столба. Для угольного пласта разгрузка характеризуется изменениями характеристики  $\beta_V$  в пределах 0–7%, для активной кровли пласта –  $\beta_V$  в пределах 0–2,3%.

В скважине № 2 при воздействии на угольный пласт 5 в течение 134 мин. произошло только два гидрорасчленения (Грс1, Грс2, рисунок 5), при максимальном давлении 13,81 МПа, и гидроразрыв пласта, при давлении 14,39 МПа что подтверждается результатам сейсмотомографических измерений в исследованной области. Для угольного пласта разгрузка характеризуется изменениями характеристики  $\beta_V$  в пределах 0 – 5%, для активной кровли пласта –  $\beta_V$  в пределах 0 – 1,8%.



**Рис. 4. Изменение давления  $P$  и температуры  $t$  при проведении гидродинамического воздействия на угольный пласт в скважине №1**



**Рис. 5. Изменение давления  $P$  и расхода рабочей жидкости  $Q$  при проведении инъекционного теста в скважине №2, пробуренной из горной выработки**

По итогам проведения подземного гидроразрыва в выемочном столбе №555 можно сделать следующие выводы:

- в процессе подземного гидроразрыва скважин ПГР №№ 1 и 2 протечек воды в штреках не было как со стороны боков, так со стороны кровли и почвы;
- площадь гидродинамического воздействия составила 11802 м<sup>2</sup>;
- судя по характеру зависимостей давления в гидросистеме, гидродинамическое воздействие на пласт происходило в режиме гидрорасчленения;

- давление жидкости в гидросистеме при гидрорасчленении составило 11,99 – 14,39 МПа, что соответствует расчетному значению;
- общий объем закачанной рабочей жидкости в две скважины составил 70,8 м<sup>3</sup>, в первую – 37,2 м<sup>3</sup>, во вторую – 33,6 м<sup>3</sup>;
- в скважине № 2 выполнена оценка фильтрационных свойств в призабойной зоне скважины, которая показала, что проницаемость данной зоны составила ( $k_x = 6,46$  мД;  $k_y = 1,03$  мД;  $k_z = 0,40$  мД), а скин-фактор ( $S = -3,08$ );
- темп закачки рабочей жидкости составил 18 м<sup>3</sup>/ч, при этом наблюдалось гидрорасчленение пласта;
- при активной длине скважин 75 м для обеспечения режима гидроразрыва необходимо увеличить темп закачки до 30 – 40 м<sup>3</sup>/ч путём подключения параллельно дополнительной насосной станции; объём закачки рабочей жидкости в скважину должен составлять 20–24 м<sup>3</sup>;
- по результатам опытных работ на первых двух скважинах коэффициент, учитывающий заполнение угольного массива жидкостью составил  $K_3 = 0,00212$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 21.07.1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (с изменениями на 13.07.2015 г.).
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах». Серия 05. Выпуск 40. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. – 200 с.
3. Инструкция по дегазации угольных шахт. Серия 05. Выпуск 22. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2012. – 250 с.
4. Пучков Л.А, Сластунов С.В., Каледина Н.О. и др. Концепция обеспечения метанобезопасности угольных шахт России на 2006–2010 гг. -М.: Издательство МГГУ, 2006. 18 с.
5. Методические рекомендации о порядке дегазации угольных шахт. М.: ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность», сер. 05, вып. 14. РД-15–09–2006.
6. Калиев С.Г., Преображенская Е.И., Садчиков В.А. и др. Управление газовойделением на угольных шахтах . -М.: Недра, 1980. 221 с.
7. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля (породы) и газа. РД 05–350–00.
8. Инструкция по безопасному ведению горных работ на шахтах, разрабатывающих угольные пласты, склонные к горным ударам. РД 05–328–99.
9. Рекомендации по дегазации пласта скважинами с применением подземного гидроразрыва в лаве №555 ш. «Чертинская-Коксовая», Прокопьевск, 2018.

10. Программа и методика проведения исследований дегазации пласта с применением подземного гидроразрыва в условиях выемочного участка №555 ш. «Чертинская-Коксовая», Прокопьевск, 2018.

11. Заключение «Проведение геофизических исследований с целью выявления зон изменения геомеханических характеристик угольного пласта 5 в области проведения гидроразрыва на участке выемочного столба №555 000 «Шахта Чертинская-Коксовая», Кемерово, 2018.

12. Техническое перевооружение опасного производственного объекта ООО «ММК-УГОЛЬ» Шахта «Чертинская-Коксовая». «Проект дегазации выемочного участка 555», Кемерово, 2017. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Венгер В.Г.* — заведующий лабораторией геомеханики,

*Разумов Е.А.* — руководитель НИЦ ГТБ,

*Зеяева Е.А.* — научный сотрудник НИЦ ГТБ,

*Григорьева Т.О.* — лаборант-исследователь НИЦ ГТБ,

Филиала Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 653039, Кемеровская обл., г. Прокопьевск, ул. Ноградская, 19а, E-mail:nipgtb@yandex.ru.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 117–125.

**Zelyaeva E.A. , Razumov E.A., Wenger E.V. , Grigoryeva T.O.**

### **Use of technology of hydraulic fracturing for effective decontamination in the conditions of a lava of 555 highways of “Chertinskaya-Koksovaya”**

Experience of use of technology of hydraulic fracturing, for formation of system of cracks and improvement of efficiency of decontamination is presented in article. And also the analysis of mine experimental works on improvement of technology of underground bedded decontamination with hydraulic fracturing use is given. In experiment water on the skilled site the high efficiency of technology of hydraulic fracturing is confirmed.

Keywords: underground mining, decontamination, well, coal layer, hydraulic fracturing, monitoring, bedded decontamination, trial tests.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-117-125

## **AUTHORS**

*Zelyaeva E.A. , Razumov E.A., Wenger E.V. , Grigoryeva T.O.* —Prokopievsk branch of Kuzbass State Technical University.

## **REFERENCES**

1. Federal'nyj zakon ot 21.07.1997 g. № 116-FZ «O promyshlennoj bezopasnosti opasnyh proizvodstvennyh ob'ektov» (s izmeneniyami na 13.07.2015 g.) [Federal law No.

116-FZ of 21.07.1997 «on industrial safety of hazardous production facilities» (as amended on 13.07.2015)].

2. *Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoj bezopasnosti «Pravila bezopasnosti v ugol'nyh shahtah»* [Federal regulations and rules in the field of industrial safety «safety Rules in coal mines»]. Seriya 05. Vypusk 40. Moscow: Zakrytoe akcionerное obshchestvo «Nauchno-tehnicheskij centr issledovanij problem promyshlennoj bezopasnosti», 2014. 200 p.

3. *Instrukciya po degazacii ugol'nyh shaht* [Manual for the degassing of coal mines]. Seriya 05. Vypusk 22. Moscow: Zakrytoe akcionerное obshchestvo «Nauchno-tehnicheskij centr issledovanij problem promyshlennoj bezopasnosti», 2012. 250 p.

4. Puchkov L.A., Slastunov S.V., Kaledina N.O. i dr. *Koncepciya obespecheniya metanobezopasnosti ugol'nyh shaht Rossii na 2006–2010 gg* [Concept of providing metrobasement coal mines of Russia for 2006-2010-M]. Moscow: Izdatel'stvo MGGU, 2006. 18 p.

5. *Metodicheskie rekomendacii o poryadke degazacii ugol'nyh shaht* [Methodical recommendations about the order of degassing of coal mines]. Moscow: OAO «NTC «Promyshlennaya bezopasnost'», ser. 05, vyp. 14. RD-15-09-2006.

6. Kaliev S.G., Preobrazhenskaya E.I., Sadchikov V.A. i dr. *Upravlenie gazovydeleniem na ugol'nyh shahtah* [Control gas emission at coal mines]. Moscow: Nedra, 1980. 221 p.

7. *Instrukciya po bezopasnomu vedeniyu gornyh rabot na plastah, opasnyh po vnezapnym vybrosam uglja (porody) i gaza* [Instructions for the safe conduct of mining operations on layers dangerous for sudden emissions of coal (rock) and gas]. RD 05-350-00.

8. *Instrukciya po bezopasnomu vedeniyu gornyh rabot na shahtah, razrabatyvayushchih ugol'nye plasty, sklonye k gornym udaram* [Instruction on safe conducting mountain works on mines developing coal seams prone to bumps mining]. RD 05-328-99.

9. *Rekomendacii po degazacii plasta skvazhinami s primeneniem podzemnogo gidrorazryva v lave no 555 sh. «Chertinskaya-Koksovaya»* [Recommendations for degassing of the reservoir wells with the use of the prohibition of hydraulic fracturing in lava No 555 sh. «Chertinskaya-Koksovaya»], Prokop'evsk, 2018.

10. *Programma i metodika provedeniya issledovanij degazacii plasta s primeneniem podzemnogo gidrorazryva v usloviyah vyemochnogo uchastka no 555 sh. «Chertinskaya-Koksovaya»* [The program and the methodology of the studies of degassing of the reservoir with the application of underground hydraulic fracturing in the conditions of the excavation site No. 555 sh. «Chertinskaya-Koksovaya»], Prokop'evsk, 2018.

11. *Zaklyuchenie «Provedenie geofizicheskikh issledovanij s cel'yu vyyavleniya zon izmeneniya geomekhanicheskikh harakteristik ugol'nogo plasta 5 v oblasti provedeniya gidrorazryva na uchastke vyemochnogo stolba no 555 OOO «Shahta Chertinskaya-Koksovaya»* [Conclusion «carrying out geophysical studies to identify areas of change in the geomechanical characteristics of the coal seam 5 in the field of hydraulic fracturing on the site of the excavation column no 555 LLC «mine Chertinskaya-Koksovaya»], Kemerovo, 2018.

12. *Tekhnicheskoe perevoorzhenie opasnogo proizvodstvennogo ob'ekta OOO «MMK-UGOL'» Shahta «Chertinskaya-Koksovaya». «Proekt degazacii vyemochnogo uchastka 555»* [Technical re-equipment of hazardous production facilities of OOO «MMK-COAL» mine «Chertinskaya-Koksovaya». «The project degassing extraction area 555»], Kemerovo, 2017.



## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ СОРБИРУЮЩИХ ГЕОМАТЕРИАЛОВ

Изложенный в статье подход позволяет определить проницаемость материала без измерения расхода газа, используя закономерности нестационарного потока в начальный период фильтрационного массопереноса. Эти расходы для слабопроницаемых сорбирующих пород могут быть очень малы, с чем связана трудность их экспериментального определения.

Этот подход применим и в случае, когда проницаемость связана с количеством сорбированного образцом метана, т.е. с локальным давлением в различных точках образца. В этом случае проницаемость изменяется по длине образца и описанный алгоритм неприменим. В связи с этим в эксперименте нужно создать условия, когда давление газа будет практически одинаково по всей длине. Этого можно достичь, проводя эксперименты при малой разности давлений на входе в образец  $p_{вх}$  и на выходе  $p_{в}$ . Полученное значение проницаемости в этом случае можно соотнести с величиной давления  $(p_{вх} + p_{в})/2$  или соответствующей величиной количества сорбированного газа по изотерме сорбции. При этом необходимо первоначально насытить образец метаном при давлении  $p_{в}$ .

Кроме того, отметим, что для реализации приведенного алгоритма необходимо располагать значениями параметров сорбции  $a$  и  $b$ , которые должны быть определены в независимом эксперименте.

Обобщая все сказанное, можно констатировать, что имеет место некоторая обобщенная связь между величинами  $f = f(k, a, b, \Delta t)$ , из которой может быть определена любая из перечисленных величин, если остальные известны.

Ключевые слова: численное моделирование, проницаемость, фильтрация, уголь, метан, сорбция.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-126-137

### Введение

Проницаемость угля — один из важнейших параметров, определяющих газоотдачу угольного пласта в горные выработки и скважины. Определению этого параметра посвящены многочисленные исследования, как в лабораторных экспериментах [1–4], так и в натуральных условиях [5–9]. В сравнении с несорбирующим материалом уголь обладает весьма большой сорбционной способностью, в связи с чем его проницаемость не является постоянной величиной, а зависит от количества сорбированного им газа. В связи с чем традиционные методы опре-

деления проницаемости в прямом виде неприменимы. Были выполнены многочисленные теоретические работы, посвященные изучению подобных зависимостей и обоснованию методического подхода к определению проницаемости сорбирующих материалов [10–14].

Для определения в лабораторных условиях проницаемости несорбирующих горных пород обычно используются изготовленные из них керны, через которые под давлением фильтруется газ. При этом для вычисления проницаемости основным параметром, определяемым в эксперименте, является количество газа, прошедшего через образец. Оценим этот расход газа при проницаемостях порядка  $10^{-1}$  –  $10^{-3}$  мД. Для этого выпишем основное соотношение, связывающее проницаемость  $k$  и количество газа  $q$ , которое проходит через керн в единицу времени при стационарном фильтрационном потоке.

Уравнение неразрывности фильтрационного потока имеет вид

$$-\rho u = \frac{q}{S}, \quad (1)$$

где  $u$  – скорость фильтрации,  $\rho$  – плотность газа при давлении  $p$  и абсолютной температуре  $T$ ,  $S$  – площадь поперечного сечения керна высотой  $l$ . У него на торцах поддерживаются постоянными давления газа, на входе –  $p_{\text{вх}}$  и на выходе –  $p_{\text{в}}$ , соответственно.

При сравнительно небольших перепадах между  $p_{\text{вх}}$  и  $p_{\text{в}}$  можно воспользоваться уравнением движения газа в виде (линейный закон Дарси)

$$u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad 0 < x < l, \quad (2)$$

где  $\mu$  – вязкость газа.

Будем считать, что уравнение состояния газа имеет вид (идеальный газ)

$$p = \rho RT,$$

где  $R$  – газовая постоянная,

При этом уравнение (1) приводится к виду

$$\frac{k}{2\mu RT} \frac{dp^2}{dx} = \frac{q}{S}, \quad 0 < x < l. \quad (3)$$

Для простоты будем считать, что  $k$  в пределах керна постоянна. Интегрируя (3) при  $k=\text{const}$  по  $x$  от 0 до  $l$ , а по  $p$  от  $p_{\text{в}}$  до  $p_{\text{вх}}$  будем иметь

$$q = \frac{k}{2\mu RT} \frac{S}{l} (p_{\text{вх}}^2 - p_{\text{в}}^2). \quad (4)$$

Если перейти от количества газа  $q$  к объему при нормальных условиях  $V = q/\rho_{\text{ам}}$  с плотностью  $\rho_{\text{ам}}$  при  $p_{\text{ам}}$ , то (4) примет вид

$$V = \frac{k S p_{\text{вх}}^2 - p_{\text{в}}^2}{\mu l 2p_{\text{ам}}}. \quad (5)$$

или приближенно при малых перепадах давления  $p_{\text{вх}} - p_{\text{в}}$  по сравнению с  $p_{\text{в}}$ , т.е. когда  $p_{\text{вх}} \approx p_{\text{в}}$

$$V = \frac{k S p_{\text{вх}}}{\mu l p_{\text{ам}}} (p_{\text{вх}} - p_{\text{в}}). \quad (5')$$

Например, при  $p_{\text{вх}} = 10$  ат и  $p_{\text{в}} = 9$  ат и при  $k = 10^{-2}$  мД,  $\mu = 1.09 \cdot 10^{-2}$  сПз, при диаметре зерна 4 см и высоте 6 см, т.е. при  $S/l = 2.1$  см расход равен  $1.81 \cdot 10^{-4}$  см<sup>3</sup>/с или  $1.09 \cdot 10^{-2}$  см<sup>3</sup>/мин.

Из (5') для проницаемости имеем

$$k = \frac{V \mu l p_{\text{ам}}}{S p_{\text{вх}}} \frac{1}{(p_{\text{вх}} - p_{\text{в}})}. \quad (6)$$

Чтобы определять по формуле (6) проницаемость  $k$  порядка  $10^{-2}$  –  $10^{-1}$  мД, которая, в общем, характерна для ископаемых углей в стесненных условиях и насыщенных метаном, необходимо измерять с достаточно высокой точностью весьма малые расходы газа  $V$ , проходящего через зерн, что представляет собой значительную техническую трудность.

### Основные соотношения и постановка задачи

В связи с этим рассмотрим подход к определению проницаемости без измерения количества прошедшего через образец газа. Он основан на том факте, что в начальный период фильтрации, т.е. сразу же после подачи давления  $p_{\text{вх}}$  на вход в образец, фильтрация носит нестационарный характер. Именно закономерности этой нестационарности позволяют определить величину  $k$ .

При начале фильтрации в образце формируется волна распространения газа, продвижение которой определяется помимо заданных давлений  $p_{\text{в}}$ ,  $p_{\text{вх}}$ , сорбционных параметров образца (уголь), также и величиной проницаемости. Очевидно, что для того, чтобы газ прошел от входного сечения до выходного необходимо какое-то время  $\Delta t$ . Именно этот параметр может быть использован для определения величины  $k$ .

Рассмотрим численное решение задачи фильтрации в следующей постановке [15–20]. Имеется образец с некоторым сечением  $S$  и длиной  $l$ . Поскольку задача решается в одномерной постановке, то параметр  $S$  (площадь сечения образца) не играет существенной роли. В сечении  $x=l$  в начальный момент времени  $t=0$  мгновенно, скачком прикладывается давление  $p=p_{\text{вх}}$ , которое сохраняется постоянным на протяжении всего эксперимента (или расчета). Выполнение этого граничного условия может быть реализовано присоединением достаточно большой емкости с газом под давлением  $p_{\text{вх}}$ . Малый расход в течение всего эксперимента практически не изменяет давление в емкости, что обеспечивает выполнение условия  $p_{\text{вх}} = \text{const}$ .

На другом конце при  $x=0$  ставится условие непротекания, т.е. выход газа из образца отсутствует в течении всего времени расчета. На этом конце образца должен быть присоединен электронный манометр, автоматически фиксирующий давление с частотой опроса не хуже  $10 \text{ с}^{-1}$ . Свободное пространство, связанное с соединяющими трубками и емкостью самого манометра, должно быть как можно меньше, чтобы при расчетах его не учитывать, т.е. считать его нулевым. Это позволит улучшить точность определения времени прихода волны давления в точку  $x=0$ . В противном случае его объем должен быть предварительно оценен.

В начальный момент времени на всей протяженности образца, при  $0 < x < l$  давление газа составляет  $p_{\text{иск}}=1 \text{ ат}$ , как и на входном сечении.

При этом материал образца (уголь) обладает сорбционными свойствами в соответствии с изотермой сорбции Ленгмюра

$$Q = \frac{abr}{1 + br}, \quad (7)$$

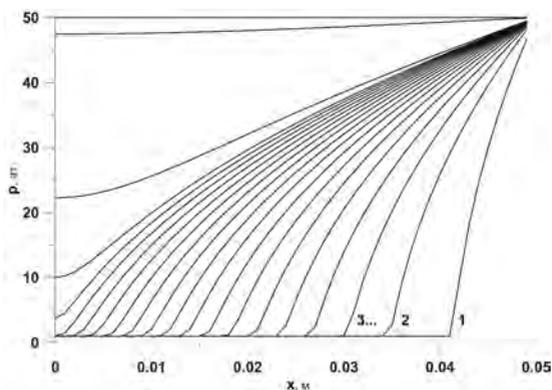
$a$ ,  $b$  – константы Ленгмюра,  $Q$  – максимальная поглотительная способность угля при давлении  $p$ .

Очевидно, что при продвижении волны фильтрации по образцу происходит сорбционное поглощение газа, что в значительной степени уменьшает ее скорость в сравнении с не сорбирующим материалом. Через определённый промежуток времени, который и следует определить в результате решения поставленной задачи, она доходит до выходного сечения.

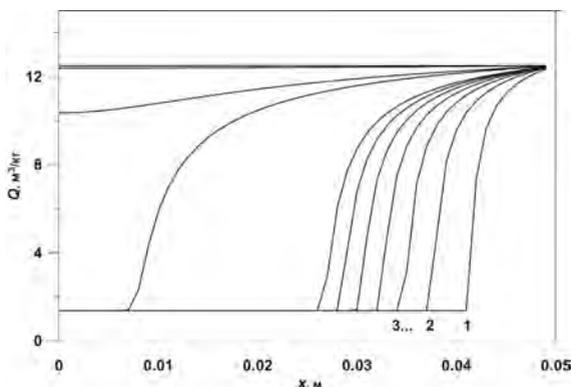
При расчетах определяющие параметры задачи были приняты равными:  $p_{\text{вх}}=50 \text{ ат}$ ,  $p_{\text{в}}=p_{\text{ат}}=1 \text{ ат}$ ,  $a=15 \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1}$ ,  $b=0.1$ ,  $l=0.05 \text{ м}$ .

На рис. 1 показаны положения волны давления на различные моменты времени с интервалом в  $0.2 \text{ с}$  с начала и до момента времени  $\Delta t$ , когда волна достигнет конечной точки  $x=0$ . Затем со временем устанавливается постоянное по всей длине образца давление –  $50 \text{ ат}$ . Эта величина не зависит от проницаемости и сорбционных свойств образца, которые определяют лишь время перехода в стационарное состояние.

На рис. 2 показан процесс заполнения образца сорбированным метаном во времени в виде ряда кривых распределения величины  $Q$  по его длине. Фактически это та же волна, что и показана на рис. 1. Первые несколько шагов разделены во времени величиной  $0.1 \text{ с}$ . По прошествии достаточно большого времени образец равномерно заполняется газом. В соответствии с изотермой сорбции (7) количество сорбированного газа во всех точках образца при  $p=50 \text{ ат}$  составляет  $12.5 \text{ м}^3/\text{кг}$ .



**Рис. 1. Волна давления в образце на различные моменты времени**

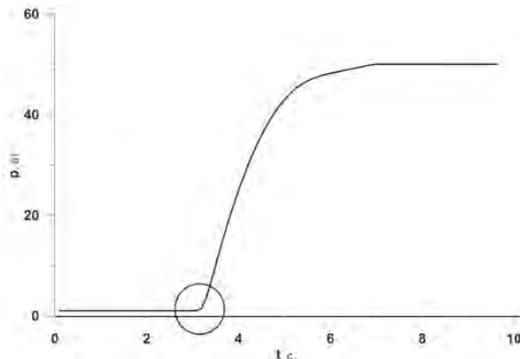


**Рис. 2. Распределение количества сорбированного газа по длине образца на различные моменты времени**

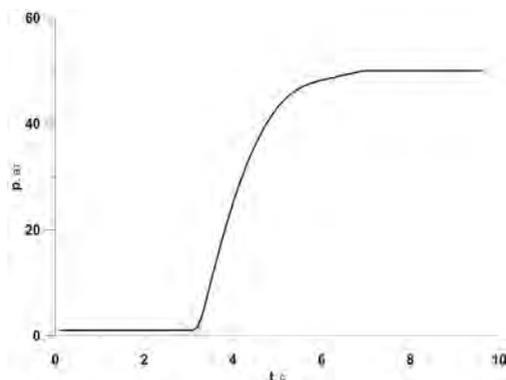
На рис. 4 показано изменение давления при  $x = 0$ , полученное в результате численного решения поставленной ранее задачи. В течении интервала времени  $\Delta t$  давление остается постоянным и равным  $1 \text{ ат}$ , а потом оно постепенно возрастает до величины, приложенной при  $x = l$ .

Рассмотрим более детально кривую на рис. 3. При этом обратим внимание на части кривой вблизи фронта продвижения волны, в частности заключенной в круг. На рис. 4 эта часть показана в увеличенном масштабе.

Такой вид кривой может быть интерпретирован таким образом — малые возмущения в среде продвигаются с большей скоростью, чем большие. Однако к этому нет фактических оснований при линейной постановке задачи.



**Рис. 3. Изменение давления газа на выходном сечении образца со временем**



**Рис. 4. Эффект сеточной скорости на фронте движения газа**

Поскольку метод решения поставленной задачи — метод конечных разностей, то в связи с этим следует рассмотреть сеточную скорость продвижения возмущения. На каждом временном шаге  $dt$  возмущение продвигается на шаг  $dx$  по пространству в соответствии с разностной схемой, т.е. сеточная скорость равна

$$V_c = \frac{dx}{dt}. \quad (8)$$

Если длина всей расчетной области равна  $l$ , то от начала воздействия на один из ее краев, вся область будет вовлечена в расчет через  $\frac{l dt}{dx}$  секунд. В наших условиях это 0.05с независимо от всех определяющих параметров ( $a$ ,  $b$ ,  $k$ , ...).

Таким образом, выполаживание кривой, показанной на рис. 4 — это сеточный эффект, не имеющий отношения к сути явления.

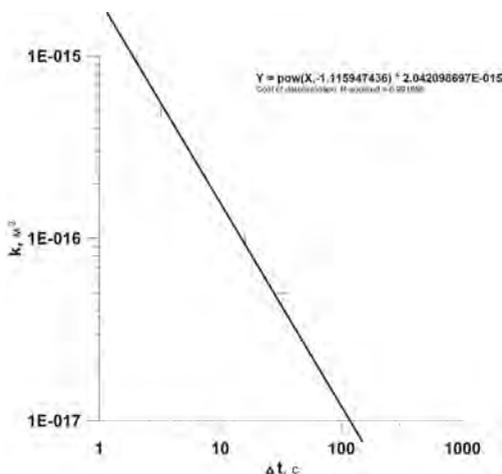
Такой же эффект имеет место и на рисунке 1. Иными словами, величина  $p$  отлична от нуля при любых  $t > \frac{ldt}{dx}$ , хотя на некотором участке практически равна единице. В связи с этим критерием выбора  $\Delta t$  не может служить условие  $|p| > 1$ . В связи с этим возникает вопрос о подходе к выбору  $\Delta t$ .

Один из возможных путей разрешения этой неопределенности показан также на рис. 4. Необходимо срезать «хвост» этой кривой, проведя касательную прямую к ней в точке ее перегиба. Пересечение ее с осью  $t$  определит величину  $\Delta t$ .

Начало выхода газа может быть зарегистрировано манометром достаточной чувствительности, установленным на выходе из образца и работающим в автоматическом режиме с достаточной частотой опроса.

### Результаты решения

Серия расчетов с различными величинами  $k$  при сохранении других определяющих параметров позволяет построить зависимость  $\Delta t(k)$ . Она показана на рис. 5 для  $p_{\text{вх}}=50\text{ ат}$ . В двойных логарифмических координатах можно считать — это прямая линия.

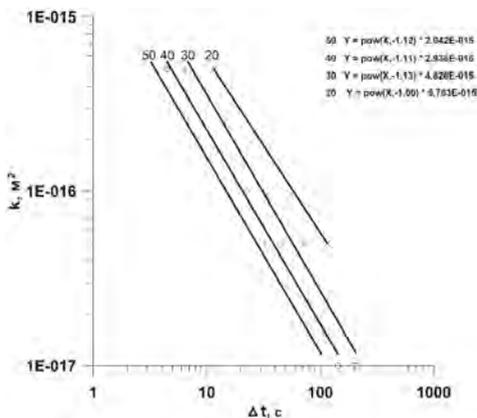


**Рис. 5. Зависимость проницаемости от задержки появления газа на выходном сечении образца**

В координатах  $\Delta t, k$  она имеет уравнение

$$k = \frac{2}{\Delta t^{1.12}} 10^{-15}. \quad (9)$$

Аналогичные зависимости можно построить и для других значений  $p_{\text{вх}}$  – 40, 30, 20 ат, сохраняя остальные параметры прежними. Наряду с прямой для  $p_{\text{вх}} = 50$  ат все они отображены соответствующими прямыми 20, 30, 40 на рисунке 6. Отметим, что все они имеют приблизительно одинаковый наклон.



**Рис. 6. Зависимость проницаемости от задержки появления газа на выходном сечении образца в зависимости от давления на входном сечении**

Общее соотношение, описывающее совокупность этих прямых в координатах  $\Delta t$ ,  $k$ , имеет вид

$$k = \frac{A(p_{\text{вх}})}{\Delta t^{1.1}} 10^{-15}, \quad (10)$$

$$A(p_{\text{вх}}) = -4.23 \ln p_{\text{вх}} + 18.71,$$

где  $p$  измеряется в атмосферах,  $k$  в  $\text{м}^2$  и  $\Delta t$  в секундах.

Это соотношение дает основание для проведения экспериментов при произвольном давлении  $p_{\text{вх}}$ .

### **Заключение**

В заключение отметим, что изложенный подход позволяет определить проницаемость материала без измерения расхода газа, используя закономерности нестационарного потока в начальный период фильтрационного массопереноса. Эти расходы для слабопроницаемых сорбирующих пород могут быть очень малы, с чем связана трудность их экспериментального определения.

Этот подход применим и в случае, когда проницаемость связана с количеством сорбированного образцом метана, т.е. с локальным давлением в различных точках образца. В этом случае проницаемость

изменяется по длине образца и описанный алгоритм неприменим. В связи с этим в эксперименте нужно создать условия, когда давление газа будет практически одинаково по всей длине. Этого можно достичь, проводя эксперименты при малой разности давлений  $p_{вх}$ ,  $p_{в}$ . Полученное значение проницаемости в этом случае можно соотносить с величиной давления  $(p_{вх}+p_{в})/2$  или соответствующей величиной количества сорбированного газа по изотерме сорбции. При этом необходимо первоначально насытить образец метаном при давлении  $p_{в}$ .

Кроме того, отметим, что для реализации приведенного алгоритма необходимо располагать значениями параметров сорбции  $a$  и  $b$ , которые должны быть определены в независимом эксперименте.

Обобщая все сказанное, можно констатировать, что имеет место некоторая обобщённая связь между величинами  $f=f(k, a, b, \Delta t)$ , из которой может быть определена любая из перечисленных величин, если остальные известны.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физико-химия газодинамических явлений в шахтах. — М.: Наука, 1972. — 140 с.
2. Кузнецов С.В., Трофимов В.А. Методы определения проницаемости углей// ФТПРПИ. — 2007. — №6
3. Кузнецов С.В., Трофимов В.А. О проницаемости угольных пластов// Научная школа им. Академика С.А.Христиановича. 2012. — С. 178—186
4. Кузнецов С.В., Трофимов В.А. Методы определения проницаемости углей// ФТПРПИ. — 2007. — №6.
5. Кузнецов С.В., Кригман Р.Н. Природная проницаемость угольных пластов и методы ее определения. — М.: Наука, 1978. — 122 с.
6. Фейт Г.Н., Малинникова О.Н., Гурьянов В.В., Матвиенко Н.Г. Разработка метода оценки метаноотдающей способности угольных пластов по комплексу геолого-физических показателей //ГИАБ. — 2002. — Вып. 6. — С. 46–49.
7. Васючкова Г.К., Фейт Г.Н. Исследование газопроницаемости выбросоопасных углей высокой степени тектонической нарушенности. “Прогноз и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах” // Науч. сообщ. ИГД им. А.А. Сковинского. — 1982. — Вып. 209. — С. 23–27.
8. Басниев К.С., Дмитриев Н.М., Каневская Р.Д., Максимов В.М. Подземная гидромеханика. —М.; Ижевск: Ин-т компьютер. исслед., 2005. — 496 с.
9. Щербань А.Н., Цырульников А.С. Газопроницаемость угольных пластов. — Киев: АН УССР, 1958. — 108 с.
10. Назаров Л.А., Назарова Л.А. Некоторые геомеханические аспекты проблемы извлечения газа из угольных пластов // ФТПРПИ. — 1999. — № 2. — С. 35–44.
11. Назарова Л.А., Назаров Л.А., Карчевский А.Л., Вандамм М. Определение газокинетических параметров блочного угольного пласта на основе решения обратной задачи по данным измерения давления газа в скважине // ФТПРПИ. — 2015. — № 4. — С. 34–41.

12. Pan Z., Connell L.D. Modelling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data, *Int. J. Coal Geol.*, 2012, 92, P. 1 – 44.

13. Pinkun Guo, Yuanping Cheng. Permeability prediction in deep coal seam: A case study on the № 3 coal seam of the Southern Qinshui Basin in China, *The Scientific World Journal*, 2013, Vol. 2013, 10 p.

14. Захаров В.Н., Малинникова О.Н., Трофимов В.А., Филиппов Ю.А. Зависимость проницаемости угля от газосодержания и действующих напряжений// ФТПРПИ. – 2016. – №2. – С. 16–25

15. Кузнецов С.В., Трофимов В.А. Основная задача теории фильтрации газа в угольных пластах // ФТПРПИ. – 1999. – №5.

16. Кузнецов С.В., Трофимов В.А. Природа и механизм формирования газопроницаемых зон в угольных пластах//ФТПРПИ. – 1999. – №1, с. 21–27.

17. Kuznetsov S.V., Trofimov V.A. Gas-permeable zones in coal seams and the nature and mechanism by which they form// *Journal of Mining Science*. 1999. T. 35. № 1. С. 19–25.

18. Kuznetsov S.V., Trofimov V.A. Basic problem of the theory of gas filtration in coal seams//*Journal of Mining Science*. 1999. T. 35. № 5. С. 455–460.

19. Kuznetsov S.V., Trofimov V.A. Gasdynamics in a coal seam. part I: Mathematical description of the desorption kinetics // *Journal of Mining Science*. 2009. T. 45. № 1. С. 1–8.

20. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. — М.: Недра, 1972. — 288 с. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

Трофимов В.А., Харченко А.В. — Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук, Россия, 111020, Москва, Крюковский туп. д.4, E-mail:asas\_2001@mail.ru.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

№ 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 126–137.

**V.A. Trofimov, A.V. Kharchenko**

### **The method of determining the permeability of the sorbent geomaterials**

The approach described in the article makes it possible to determine the permeability of a material without measuring the gas flow rate, using the laws of unsteady flow in the initial period of filtration mass transfer. These rate for poorly permeable sorbing rocks can be very small, with which the difficulty of their experimental determination is associated.

This approach is applicable in the case when the permeability is associated with the amount of methane sorbed by the sample, that is, with the local pressure at different points of the sample. In this case, the permeability varies along the length of the sample and the algorithm described is not applicable. In this regard, in the experiment it is necessary to create conditions when the gas pressure will be almost the same along the entire length. This can be achieved by conducting experiments with a small pressure difference at the input (рвх) in the sample and at the output (рв). The obtained permeability value in this

case can be correlated with the pres-sure value  $(p_{\text{вх}} + p_{\text{в}}) / 2$  or the corresponding value of the amount of sorbed gas according to the sorption isotherm. In this case, it is necessary to initially fill the sample with methane at the output pressure. In addition, we note that to implement the above algorithm, it is necessary to have the values of the sorption parameters  $a$  and  $b$ , which must be determined in an independent experiment.

Summarizing all the above, we can state that there is some generalized connection between the quantities  $f = f(k, a, b, \Delta t)$  from which any of the listed quantities can be determined, if the others are known.

Keywords: numerical simulation, permeability, filtration, coal, methane, sorption

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-126-137

## AUTHORS

*Trofimov V.A., Kharchenko O.V.*, Institute of problems of comprehensive exploitation of mineral resources Russian Academy of Sciences, Russia, 111020, Moscow, Kryukovsky tup., 4, E-mail: asas\_2001@mail.ru

## REFERENCES

1. *Fiziko-himiya gazodinamicheskikh yavlenij v shahtah* [Physico-chemistry of gas-dynamic phenomena in mines]. Moscow: Nauka, 1972. 140 p.
2. Kuznecov S.V., Trofimov V.A. *Metody opredeleniya pronicaemosti uglej* [Methods of determination of permeability of coals]. FTPRPI. 2007. no 6
3. Kuznecov S.V., Trofimov V.A. *O pronicaemosti ugol'nyh plastov* [On the permeability of coal seams]. Nauchnaya shkola im. Akademika S.A.Hristianovicha. 2012. pp. 178–186
4. Kuznecov S.V., Trofimov V.A. *Metody opredeleniya pronicaemosti uglej* [Methods of determination of permeability of coals]. FTPRPI. 2007. no 6.
5. Kuznecov S.V., Krigman R.N. *Prirodnaya pronicaemost' ugol'nyh plastov i metody ee opredeleniya* [Natural permeability of coal seams and methods of its determination]. Moscow: Nauka, 1978. 122 p.
6. Fejt G.N., Malinnikova O.N., Gur'yanov V.V., Matvienko N.G. *Razrabotka metoda ocenki metanootdayushchej sposobnosti ugol'nyh plastov po kompleksu geologo-fizicheskikh pokazatelej* [Development method for assessing the methane-yielding ability of coal seams on a complex of geological and physical indicators]. GIAB. 2002. Vyp. 6. pp. 46–49.
7. Vasyuchkova G.K., Fejt G.N. *Issledovanie gazopronicaemosti vybrosopasnyh uglej vysokoj stepeni tektonicheskoy narushennosti. "Prognoz i predotvrashchenie gazodinamicheskikh yavlenij v ugol'nyh shahtah"* [Study of gas permeability vybrosopasnyh dangerous coal a high degree of tectonic disturbance. «Prediction and prevention of gas-dynamic phenomena in coal mines»]. Nauch. soobshch. IGD im. A.A. Skochinskogo. 1982. Vyp. 209. pp. 23–27.
8. Basniev K.S., Dmitriev N.M., Kanevskaya R.D., Maksimov V.M. *Podzemnaya gidromekhanika* [Underground hydrodynamics]. Moscow: Izhevsk: In-t komp'yuter. issled., 2005. 496 p.
9. Shcherban' A.N., Cyrul'nikov A.S. *Gazopronicaemost' ugol'nyh plastov* [Permeability gas of coal seams]. Kiev: AN USSR, 1958. 108 p.
10. Nazarov L.A., Nazarova L.A. *Nekotorye geomekhanicheskie aspekty problemy izvlecheniya gaza iz ugol'nyh plastov* [Some geomechanical aspects of gas extraction from coal strata]. FTPRPI. 1999. no 2. pp. 35–44.
11. Nazarova L.A., Nazarov L.A., Karchevskij A.L., Vandamm M. *Opredelenie gazokineticheskikh parametrov blochnogo ugol'nogo plasta na osnove resheniya obratnoj zadachi po dannym izmereniyu davleniya gaza v skvazhine* [Determination of gas-kinetic parameters block of the coal seam on the basis of solving the inverse problem according to the measurement of gas pressure in the well]. FTPRPI. 2015. no 4. pp. 34–41.

12. Pan Z., Connell L.D. *Modelling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data*, Int. J. Coal Geol., 2012, 92, pp. 1–44.
13. Pinkun Guo, Yuanping Cheng. *Permeability prediction in deep coal seam: A case study on the no 3 coal seam of the Southern Qinshui Basin in China*, The Scientific World Journal, 2013, Vol. 2013, 10 p.
14. Zaharov V.N., Malinnikova O.N., Trofimov V.A., Filippov Yu.A. *Zavisimost' pronicaemosti uglya ot gazosoderzhaniya i dejstvuyushchih napryazhenij* [Dependence of coal permeability on gas content and acting stresses]. FTPRPI. 2016. no 2. pp. 16–25
15. Kuznecov S.V., Trofimov V.A. *Osnovnaya zadacha teorii fil'tracii gaza v ugol'nyh plastah* [Main problem of the theory of gas filtration in coal seams]. FTPRPI. 1999. no 5.
16. Kuznecov S.V., Trofimov V.A. *Priroda i mekhanizm formirovaniya gazopronicaemyh zon v ugol'nyh plastah* [Nature and mechanism of formation of gas-permeable zones in coal seams]. FTPRPI. 1999. no 1, pp. 21–27.
17. Kuznetsov S.V., Trofimov V.A. *Gas-permeable zones in coal seams and the nature and mechanism by which they form* Journal of Mining Science. 1999. T. 35. no 1. pp. 19–25.
18. Kuznetsov S.V., Trofimov V.A. *Basic problem of the theory of gas filtration in coal seams*. Journal of Mining Science. 1999. T. 35. no 5. pp. 455–460.
19. Kuznetsov S.V., Trofimov V.A. *Gasdynamics in a coal seam. part i: mathematical description of the desorption kinetics*. Journal of Mining Science. 2009. T. 45. no 1. pp. 1–8.
20. Barenblatt G.I., Entov V.M., Ryzhik V.M. *Teoriya nestacionarnoj fil'tracii zhidkosti i gaza* [Theory of unsteady filtration of liquid and gas]. Moscow: Nedra, 1972. 288 p.



Л.А. Рыбалкин, Т.В. Шилова

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ УГЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СЖИМАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ: РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МОДЕЛЬНЫХ ОЦЕНОК\*

Представлены результаты исследования проницаемости трещиноватого коксующегося угля марки «Ж» (шахта им. С.Д. Тихова). Показано значительное влияние горного давления на его проницаемость при различных градиентах давления газа. В частности, установлено, что увеличение всестороннего сжатия угля с 1 до 8 МПа при градиенте давления газа 0.67–1.34 МПа/м снижает проницаемость образцов в 8–11 раз, а при более высоких значениях градиента 2–3.3 МПа/м — в 6.1–7 раз.

Проведены также исследования параметров трещин и размеров отдельностей (блоков) угольной матрицы до и после нагружения образцов. Получено, что размеры блоков угольной матрицы в ненагруженном состоянии составляют около 530 мкм при ширине (раскрытии) трещин 12.7 мкм, которая под действием всестороннего сжатия образцов величиной до 8 МПа снижается, в среднем, в 1.8 раз.

Измеренные параметры трещин и блоков матрицы угля применены для оценки проницаемости по теоретическим моделям, связывающим значение проницаемости с пористостью либо с эффективным напряжением (сжатием) угля. Сравнение полученных оценок и результатов экспериментальных исследований трещиноватого угля показало, что измеренным значениям проницаемости при сжатии угля от 1 до 5 МПа наиболее близки оценки на основе модельной зависимости проницаемости от пористости. При сжатии более 5 МПа оценки по разным моделям практически совпадают.

Ключевые слова: уголь, проницаемость, естественная трещиноватость, угольная матрица, экспериментальное исследование, эффективное напряжение.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-138-147

### Введение

Проницаемость угля является важной характеристикой, которую необходимо учитывать при проектировании и контроле подземной

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект RFMEFI60417X0172).

разработки месторождений угля, в частности, мероприятий по дегазации пластов. Согласно распространенным представлениям фильтрация метана в угольных пластах происходит, в основном, по естественным трещинам [1–3]. При этом пропускная способность по газу зависит от свойств трещин, а именно их количества, ширины (раскрытия), связности, протяженности в направлении фильтрации и др. [4, 5]. Известные теоретические модели, используемые для оценки проницаемости угля, основаны на зависимости этого параметра от пористости либо эффективного сжатия пород [6, 7].

В настоящей работе приведены результаты лабораторных исследований проницаемости и параметров трещин угля марки «Ж» с шахты им. С.Д. Тихова, сравнительного анализа измеренных и расчетных значений проницаемости, полученных на основе известных теоретических моделей [8 – 10].

### **Оборудование**

Определение газопроницаемости угля проводилось на установке, разработанной в лаборатории физических методов воздействия на массив горных пород ИГД СО РАН [11]. Установка предназначена для изучения фильтрации газа в цилиндрических образцах низкопроницаемых пород при отдельно регулируемых осевым и боковым нагружениями давлением до 30 МПа. В состав установки входит измерительная система, обеспечивающая автоматическое проведение долговременных исследований по заданной программе.

Исследование трещиноватости угля был выполнено на инструментально-программном комплексе «Минерал С7», включающем оптический микроскоп OLYMPUS BX51, видеокамеру SIMAGIS 2P-3С, персональный компьютер и специализированное программное обеспечение. Дополнительно была использовано оборудование для ультрафиолетового облучения образцов под объективом микроскопа, состоящее из платформы на стойке и закрепленных на ней светодиодными излучателями ультрафиолета [12].

### **Подготовка образцов**

В экспериментах использовали коксующийся уголь марки «Ж», отобранный с горизонта «200м» шахты им. С.Д. Тихова (Кузбасс). Эксперименты по определению проницаемости проводились на цилиндрических образцах диаметром  $D=30$  мм и высотой  $L=30–60$  мм.

Для анализа трещиноватости угля были изготовлены аншлифы с поверхностью, отражающей микроструктуру угля в поперечном сечении образцов. Доводка аншлифов производилась с использованием тонкой алмазной пасты с размерами абразивных частиц менее 0.05мкм [13]. Перед началом исследований подготовленные образцы насыщали люминофором при низком вакууме. Нанесение такого сорбирующего вещества на образцы способствует выявлению дефектов, имеющих

внутренний объем. В качестве люминофора применяли порошок ЕроDue, растворенный в спирте в объемном отношении 1:40. Далее образцы высушивали при комнатной температуре в затемненном месте в течение 24 часов и приступали к исследованиям. Для анализа трещиноватости использовали 5 образцов. Подробное описание методики подготовки образцов приведено в работе [12].

### **Методика проведения эксперимента**

Эксперименты по изучению проницаемости угля проведены с использованием азота, фильтрующегося в осевом направлении цилиндрического образца угля при постоянном перепаде давления газа ( $\Delta P$ ) на его торцах, значение которого в опытах менялось в диапазоне 0.01 до 0.1 МПа с шагом 0.01–0.02 МПа. Давление всестороннего сжатия ( $P$ ) образцов варьировали от 1 до 8 МПа с шагом 2 МПа. Для каждого значения  $P$  была выполнена серия опытов с различными перепадами  $\Delta P$ . Расчет проницаемости осуществлялся по методике работы [14].

Особенности трещиноватости угля изучались в отраженном свете. После каждого нагружения образца давлением  $P$  проводился анализ микроструктуры угля, включающий определение количества и ширины (раскрытия) трещин, размера блоков угольной матрицы, угла между системами трещин. Исследования проводились с использованием 5X и 10X -кратных объективов. Для каждой трещины и блока угольной матрицы проводили не менее 100 измерений ширины трещины вдоль ее простирания. Выполнялось не менее 5 замеров углов между трещинами. Полученные данные подвергались статистической обработке с определением средних значений, которые использовали в модельных расчетах.

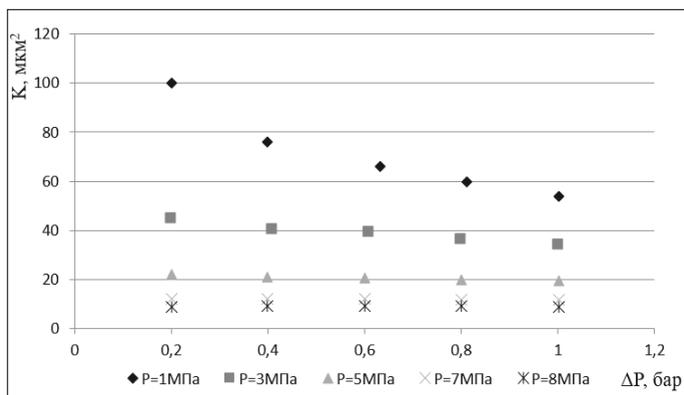
### **Обсуждение результатов**

Экспериментально установленная зависимость коэффициента газопроницаемости от перепада давления  $\Delta P$  при различных давлениях сжатия образца  $P$  представлена на рис. 1. Анализ литературных источников показывает, что полученные значения типичны для сильно трещиноватых углей [15].

Согласно работам [16–18] структура каменного угля характеризуется системой естественных трещин (cleats), включающей трещины двух типов: «face» и «butt», которые могут быть перпендикулярны друг другу и плоскости напластования (рис. 2). Похожая структура была выявлена нами и в образцах трещиноватого угля марки «Ж» (рис. 3).

С помощью инструментально-программного комплекса «Минерал С7» были проведены микроскопические исследования параметров трещин и блоков угольной матрицы при атмосферном давлении (без нагрузки) до и после нагружения образца в испытательной камере. Средний размер блоков угольной матрицы составил примерно 530 мкм, ширина (раскрытие) трещин — 12.7 мкм. Среднее раскрытие

трещин снижается в 1.8 раз (с 12 мкм до 6.5 мкм) при повышении давления обжима  $P$  в 8 раз (с 1 до 8 МПа). Средняя значение угла между трещинами обоих типов составляет  $101^\circ$ .



**Рис. 1. Зависимость коэффициента газопроницаемости угля ( $K_g$ ) от перепада давления  $\Delta P$  азота при всестороннем сжатии образца  $P = 1; 3; 5; 7; 8$  МПа**



**Рис. 2. Схематическое изображение типичной структуры трещиноватого угля [19]**



**Рис. 3. Трещиноватость угля марки Ж (шахта им. С.Д. Тихова, горизонт 200 м) (трещины выделены белым цветом)**

Полученные характеристики трещин использованы нами для расчета проницаемости угля по модели Левина (Levin) [8]. Модель оценивает изменение раскрытия трещин под действием сжатия пород и усадки углеродной матрицы при десорбции метана по формуле (1).

$$\frac{b_2}{a} = \frac{b_1}{a} + \frac{1-2\nu}{E}(P - P_0), \quad (1)$$

где  $a$  – размер блоков угольной матрицы;  $b_1$  – начальная ширина трещин (при сжатии образца  $P_0$ );  $b_2$  – конечная ширина трещины (при сжатии образца  $P$ );  $\nu$  – коэффициент Пуассона (для угля приблизительно 0.3);  $E=2500$ МПа – измеренный модуль упругости угля.

Коэффициент проницаемости угля ( $k$ ) определяется через полученное значение раскрытия трещины и средний размер блоков угольной матрицы по формуле (2):

$$k = \frac{1.013 \cdot 10^9 \cdot b_2^3}{12 \cdot a}. \quad (2)$$

Согласно работе [8] изменением размера блоков вследствие сжимаемости угольной матрицы можно пренебречь (т.е.  $a = \text{const}$ ). В расчетах мы также не учитывали влияние десорбции газа на раскрытие трещин, которое для азота незначительно.

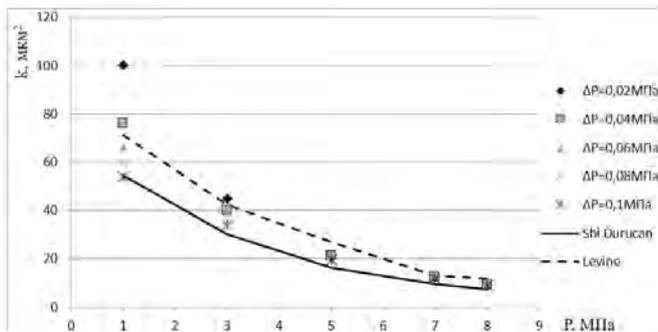
В другой известной модели [9, 10] влияние сжатия пород на проницаемость угля оценивается по формуле (3)

$$k = k_0 \cdot e^{-3C_f(P-P_0)}, \quad (3)$$

где  $k_0$  – коэффициент проницаемости при начальном сжатии угля  $P_0$ , мкм<sup>2</sup>;  $C_f$  – сжимаемость трещин, МПа<sup>-1</sup>;  $P$  – давление сжатия угля, МПа. Сжимаемость трещин оценивалась по методике, приведенной в работе [20]. Измеренное нами значение начальной проницаемости угля  $k_0$  при атмосферном давлении составило 69.9 мкм<sup>2</sup> (мД).

Зависимости измеренных значений коэффициента проницаемости угля марки «Ж» от его всестороннего сжатия  $P=1-8$  МПа приведены на рис. 4. Выявлено снижение газопроницаемости по мере увеличения  $P$ , причем величина этого снижения больше для меньших градиентов давления газа  $\Delta P/L$ . Так, для перепада давления газа  $\Delta P = 0.02$ МПа – 0.04МПа ( $\Delta P/L=0.67-1.34$  МПа/м) при повышении  $P$  с 1 до 8МПа проницаемость угля снижается в 8–11раз, а при перепаде  $\Delta P=0.06-0.1$ МПа (градиент давления газа 2–3.3 МПа/м) – в 6.1–7 раз. Кроме экспериментальных данных на рисунке 4 показаны значения коэффициента проницаемости, рассчитанные по формулам (1), (2) модели [8] (прерывистая линия) и (3) модели [10] (сплошная линия). Статистическая обработка замеров и сравнение с расчетными оценками показывает, что при сжатии  $P=1-5$  МПа наиболее близкую к замерам оценку дает модель Левина [8]. При нагрузках  $P$  более 5 МПа значения, рассчитанные по обоим упомянутым моделям, практически идентичны. Отметим также, что наиболее существенные отклонения

экспериментальных данных от расчетных оценок наблюдаются при малых градиентах давления газа (при  $\Delta P=0.02$  МПа). Полагаем, что это связано с известным эффектом проскальзывания молекул газа (эффект Клинкенберга), который ведет к увеличению газопроницаемости горных пород при малых пластовых давлениях газа [21].



**Рис. 4.** Зависимость коэффициента газопроницаемости угля ( $K_g$ ) от сжатия угля  $P$ : точками показаны экспериментальные данные, сплошная линия — оценка по модели [9, 10], прерывистая линия — оценка по модели [8].

### Выводы

Проницаемость трещиноватого коксующегося угля марки «Ж» при увеличении всестороннего сжатия до 8 МПа падает с 69,9  $\mu\text{км}^2$  в 6.1 – 11 раз. Это снижение зависит от градиента давления фильтрующегося газа и выше для малых его значений. Так, для градиентов давления газа 0.67–1.34 МПа/м проницаемость уменьшается в 8–11 раз, а для 2–3.3 МПа/м — в 6.1–7 раз.

Среднее раскрытие трещин в исследованных ненагруженных образцах угля марки «Ж» составляет 12.7  $\mu\text{км}$ , размер блоков угольной матрицы – 530  $\mu\text{км}$ . Эти параметры могут быть использованы для оценки проницаемости соответствующего угольного пласта по модели Левина [8] при горном давлении 2–3 МПа и выше. При меньшем сжатии угля и малых градиентах (0.67 МПа/м и ниже) и средних значений пластового давления газа теоретические оценки дают заниженные (на 30% и более) значения газопроницаемости трещиноватого угля.

Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования газопроницаемости трещиноватых углей при сжимающих напряжениях, соответствующих пластовым условиям.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Puri R. et al. Measurement of coal cleat porosity and relative permeability characteristics //SPE Gas Technology Symposium. – Society of Petroleum Engineers, 1991.

2. Pan Z. et al. Effects of matrix moisture on gas diffusion and flow in coal //Fuel. – 2010b. – Т. 89. – №. 11. – С. 3207–3217.
3. Lu M., Connell L.D. A dual-porosity model for gas reservoir flow incorporating adsorption behaviour—part I. Theoretical development and asymptotic analyses // Transport in porous media. – 2007. – Т. 68. – №. 2. – С. 153–173.
4. Somerton W.H., Söylemezoglu lu I.M., Dudley R.C. Effect of stress on permeability of coal //International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts. – Pergamon, 1975. – Т. 12. – №. 5–6. – С. 129–145.
5. Laubach S.E. et al. Characteristics and origins of coal cleat: a review // International Journal of Coal Geology. – 1998. – Т. 35. – №. 1–4. – С. 175–207.
6. Pan Z., Connell L.D. Modelling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data //International Journal of Coal Geology. – 2012. – Т. 92. – С. 1–44.
7. Карманский А.Т., Ильинов М.Д., Гизатулина И.Н. Лабораторные исследования фильтрационно-емкостных параметров углей с учетом фазово-физического и напряженно-деформированного состояния //Записки Горного института. – 2013. – Т. 205.
8. Levine J.R. Model study of the influence of matrix shrinkage on absolute permeability of coal bed reservoirs //Geological Society, London, Special Publications. – 1996. – Т. 109. – №. 1. – С. 197–212.
9. Seidle J.P. et al. Application of matchstick geometry to stress dependent permeability in coals //SPE rocky mountain regional meeting. – Society of Petroleum Engineers, 1992.
10. Shi J.Q., Durucan S. Drawdown induced changes in permeability of coalbeds: a new interpretation of the reservoir response to primary recovery //Transport in porous media. – 2004. – Т. 56. – №. 1. – С. 1–16.
11. Сердюков С.В., Шилова Т.В., Дробчик А.Н. Лабораторная установка и методика определения газопроницаемости горных пород //Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – №. 5. – С. 172–180.
12. Танайно А.С., Сиволап Б.Б., Максимовский Е.А. и др. Метод и устройство для оценки распределения показателей пористости по поверхности аншлафа угля // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – №. 6. – С. 187–195.
13. ГОСТ Р 55663–2013 (ИСО 7404–2:2009) Методы петрографического анализа углей. Часть 2. Методы подготовки проб углей. – М.: Стандартинформ, 2014 – 19с.
14. ГОСТ 26450.2–85. Методы определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 17 с.
15. Sander R., Pan Z., Connell L.D. Laboratory measurement of low permeability unconventional gas reservoir rocks: A review of experimental methods // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2017. – Т. 37. – С. 248–279.
16. Close J.C. Natural Fractures in Coal: Chapter 5. – 1993.
17. Nelson C.R. et al. Effects of geologic variables on cleat porosity trends in coalbed gas reservoirs //SPE/CERI Gas Technology Symposium. – Society of Petroleum Engineers, 2000.
18. Pattison C.I. et al. Nature and origin of fractures in Permian coals from the Bowen Basin, Queensland, Australia //Geological Society, London, Special Publications. – 1996. – Т. 109. – №. 1. – С. 133–150.

19. *Harpalani S.* Compressibility of coal and its impact on gas production from coalbed reservoirs // *Rock Mechanics for Industry*, Amadei, Dranz, Scott, Smeallie (eds.). American Rock Mechanics Association: Vail, Colorado. – 1999. – С. 301–308.

20. *Pan Z., Connell L.D., Camilleri M.* Laboratory characterisation of coal reservoir permeability for primary and enhanced coalbed methane recovery // *International Journal of Coal Geology*. – 2010. – Т. 82. – №. 3–4. – С. 252–261.

21. *Klinkenberg L.J. et al.* The permeability of porous media to liquids and gases // *Drilling and production practice*. – American Petroleum Institute, 1941.

**ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Рыбалкин Леонид Алексеевич* – научный сотрудник, тел. 8-983-323-33-62, e-mail: leonid.rybalkin@gmail.com,

*Шилова Татьяна Викторовна* – кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (923)708–97–29, e-mail: shilovatanya@yandex.ru, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54.

---

ISSN 0236–1493. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018.

No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 138–147.

**Rybalkin L.A., Shilova T.V.**

### **Dependence of coal permeability on compressive stresses: experimental study and model estimation results**

The results of a permeability study of the fractured coking coal grade “G” (Tikhov mine, Kuzbass) are presented. A significant effect of rock pressure on permeability at various gas pressure gradients is shown. In particular, it has been established that an increase in the triaxial coal compression from 1 to 8 MPa reduces the sample permeability by 8–11 times with a gas pressure gradient of 0.67–1.34 MPa / m, and by 6.1–7 times with a gas pressure gradient of 2–3.3 MPa.

Investigations of the cleat and coal matrix (blocks) parameters were also carried out at atmospheric pressure, before and after the triaxial compression of the samples. It was obtained that the coal matrix block dimensions under the unloaded conditions are about 530 μm with the width (opening) of cleats of 12.7 μm, which decreases by 1.8 times for the sample triaxial compression increasing to 8 MPa.

The measured cleat and coal matrix parameters are used to estimate permeability using theoretical models, linking coal permeability with porosity and with effective stress (compression). The comparison of the obtained estimates and the experimental results showed that the measured permeability values under triaxial coal compression from 1 to 5 MPa are closest estimates, which are based on the model linking permeability with porosity. When compression more than 5 MPa, estimates for different models practically coincide. It was found that the greatest deviation of measured and calculated coal permeability values occurs at low gas pressure gradients, which is probably related to the effect of slippage (the Klinkenberg effect).

Key words: coal, permeability, natural fractures (cleats), coal matrix, experimental research, effective stress.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-138-147

## AUTHORS

Rybalkin L.A., junior researcher, tel. (383) 335-96-42, e-mail: Leonid.Rybalkin@gmail.com,

Shilova T.V., PhD., researcher, tel. (923)708-97-29, e-mail: shilovatanya@yandex.ru, Chinakal Institute of Mining SB RAS, Russia, Novosibirsk, 630091, Krasnyi ave., 54.

## REFERENCES

1. Puri R. et al. *Measurement of coal cleat porosity and relative permeability characteristics*. SPE Gas Technology Symposium. Society of Petroleum Engineers, 1991.

2. Pan Z. et al. Effects of matrix moisture on gas diffusion and flow in coal // *Fuel*. 2010b. T. 89. no. 11. S. 3207–3217.

3. Lu M., Connell L.D. *A dual-porosity model for gas reservoir flow incorporating adsorption behaviour—part I. Theoretical development and asymptotic analyses*. *Transport in porous media*. 2007. T. 68. no 2. pp. 153–173.

4. Somerton W.H., Söylemezoglu I.M., Dudley R.C. *Effect of stress on permeability of coal*. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*. Pergamon, 1975. T. 12. no 5–6. pp. 129–145.

5. Laubach S.E. et al. *Characteristics and origins of coal cleat: a review*. *International Journal of Coal Geology*. 1998. T. 35. no 1–4. pp. 175–207.

6. Pan Z., Connell L.D. *Modelling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data*. *International Journal of Coal Geology*. 2012. T. 92. pp. 1–44.

7. Karmanskij A.T., Il'inov M.D., Gizatulina I.N. *Laboratornye issledovaniya fil'tracionno-emkostnyh parametrov uglej s uchetom fazovo-fizicheskogo i napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya* [Laboratory studies of reservoir properties of coals with phase-physical and stress-strain state]. *Zapiski Gornogo instituta*. 2013. T. 205.

8. Levine J.R. *Model study of the influence of matrix shrinkage on absolute permeability of coal bed reservoirs*. Geological Society, London, Special Publications. 1996. T. 109. no 1. pp. 197–212.

9. Seidle J.P. et al. *Application of matchstick geometry to stress dependent permeability in coals*. SPE rocky mountain regional meeting. Society of Petroleum Engineers, 1992.

10. Shi J.Q., Durucan S. *Drawdown induced changes in permeability of coalbeds: a new interpretation of the reservoir response to primary recovery*. *Transport in porous media*. 2004. T. 56. no 1. pp. 1–16.

11. Serdyukov S.V., Shilova T.V., Drobchik A.N. *Laboratornaya ustanovka i metodika opredeleniya gazopronicaemosti gornyh porod* [Laboratory apparatus and technique determination of gas permeability of rocks]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh*. 2017. no 5. pp. 172–180.

12. Tanajno A.S., Sivolap B.B., Maksimovskij E.A. i dr. *Metod i ustrojstvo dlya ocenki raspredeleniya pokazatelej poristosti po poverhnosti anshlifa uglya* [Method and apparatus to estimate the distribution of indicators of porosity on the surface of the polished section of the coal]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh*. 2016. no 6. pp. 187–195.

13. GOST R 55663–2013 (ISO 7404–2:2009) *Metody petrograficheskogo analiza uglej* [GOST R 55663-2013 (ISO 7404-2:2009) methods of coal petrographic analysis]. Chast' 2. *Metody podgotovki prob uglej*. Moscow: Standartinform, 2014 19 p.

14. GOST 26450.2–85. *Metody opredeleniya koeficienta absolyutnoj gazopronicaemosti pri stacionarnoj i nestacionarnoj fil'tracii* [GOST 26450.2-85. Methods

for determining the absolute gas permeability coefficient in stationary and non-stationary filtration]. Moscow: Izd-vo standartov, 1985. 17 p.

15. Sander R., Pan Z., Connell L.D. *Laboratory measurement of low permeability unconventional gas reservoir rocks: A review of experimental methods*. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2017. T. 37. pp. 248–279.

16. Close J.C. *Natural Fractures in Coal*: Chapter 5. 1993.

17. Nelson C.R. et al. *Effects of geologic variables on cleat porosity trends in coalbed gas reservoirs*. SPE/CERI Gas Technology Symposium. Society of Petroleum Engineers, 2000.

18. Pattison C.I. et al. *Nature and origin of fractures in Permian coals from the Bowen Basin, Queensland, Australia*. Geological Society, London, Special Publications. 1996. T. 109. no 1. pp. 133–150.

19. Harpalani S. *Compressibility of coal and its impact on gas production from coalbed reservoirs*. Rock Mechanics for Industry, Amadei, Dranz, Scott, Smeallie (eds.). American Rock Mechanics Association: Vail, Colorado. 1999. pp. 301–308.

20. Pan Z., Connell L.D., Camilleri M. *Laboratory characterisation of coal reservoir permeability for primary and enhanced coalbed methane recovery*. International Journal of Coal Geology. 2010. T. 82. no 3–4. pp. 252–261.

21. Klinkenberg L.J. et al. *The permeability of porous media to liquids and gases*. Drilling and production practice. American Petroleum Institute, 1941.



## ОЦЕНКА ГАЗОНОСНОСТИ И ПРОНИЦАЕМОСТИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ В ШАХТНЫХ УСЛОВИЯХ

Рассмотрены закономерности количественного распределения метана в углепородном массиве. Дана сравнительная оценка технических средств и методов определения газоносности и проницаемости угля. Рассмотрено влияние основных геологических факторов на газоносность, показаны закономерность изменения метаноносности угля по площади простирания пластов. Изложены условия регламентирующие порядок проведения шахтных исследований по оценки коллекторских свойств разрабатываемого угольного пласта. Представлены результаты уточненных значений газоносности угля, на основе которых проведена оценка эффективности дегазации угольных пластов. Рассмотрены результаты измерения проницаемости призабойной зоны дегазационных скважины для оценки эффективности методов стимуляции угольного пласта и увеличения его газоотдачи.

Ключевые слова: газоносность и проницаемость угольных пластов, гидроразрыв, кернонаборник, горная выработка, скин-фактор, десорбция, выемочный столб, фильтрационные характеристики скважины.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-148-157

### Введение

Увеличение спроса и потребления угля вызывает необходимость использования высокопроизводительной добычной техники. Разработка новых угольных пластов на действующих шахтах, как правило, ведется в зонах с повышенной газоносностью. Это приводит к загазованию горных выработок. Проводимые мероприятия по дегазации угольных пластов являются важным аспектом в обеспечении безопасности в процессе добычи угля. Определение газоносности угля и фильтрационных свойств угольных пластов является основным показателем при проектировании систем дегазации и вентиляции. По мере увеличения темпов разработки угольных месторождений возникает необходимость снижения газоносности угля до нормативных показателей и повышение эффективности предварительной дегазации углепородного массива. При этом основной проблемой в процессе сооружения и эксплуатации дегазационных скважин является снижение их газоотдачи.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 148–157.

© О.В. Тайлаков, А.Н. Кормин, Е.А. Уткаев, 2018.

Для интенсификации дренирующего эффекта угля применяется воздействие на угольные пласты водой через скважины в режиме гидроразрыва с последующей дегазацией пластов. Наиболее существенные изменения проницаемости, оказывающие влияние на гидродинамику пласта в результате возникновения дополнительного гидравлического сопротивления (скин-эффекта), происходят в непосредственной близости от скважины – в ее призабойной зоне.

При определении эффективности предварительной дегазации с применением гидроразрыва пласта, необходимо формирования массива данных, который дополнял бы или уточнял информацию о метаносности и проницаемости угля. Для этого предлагается использование методов оценки газоносности и проницаемости угля в шахтных условиях, основанных на применении фундаментальных закономерностях фильтрации и диффузии метана с помощью скважин, пробуренных из горных выработок в угольный пласт. Наиболее полная и достоверная информация получается при проведении шахтных исследований, которые включают в себя гидродинамическую оценку воздействия на дегазационную скважину и отбор кернов для определения снижения содержания газа в пласте. На основе этих методов и при использовании бурового и геофизического оборудования проводят исследования по определению характеристик угольных пластов в скважинах, начальных пластовых условий, газоносности пластов, проницаемости пластов до и после гидроразрыва и оценку изменений пластового и забойного давления в процессе эксплуатации скважины. Среди этих методов распространенными и надежными являются гидродинамические исследования скважин, которые основаны на прослеживании скорости фильтрации жидкости в угольный пласт после ее нагнетания (инжекционный тест).

Методика проведения измерений. Для определения газоносности угля до и после проведения гидроразрыва угольного пласта предложен метод оценки десорбции метана с учетом динамики процессов фильтрации и диффузии метана. Так как газоносность угля изменяется в результате воздействия на углепородный массив [1–7], то применение прямых инструментальных измерений на основе отбора угольных кернов из горных выработок в процессе ведения горных работ уточняет полученные ранее значения газоносности угля [8]. Для отбора угольных проб разработана оригинальная конструкция шахтного кернонаборника, позволяющая отбирать угольные пробы из горных выработок с сохранением термодинамических характеристик, близких к природным условиям. Угольные керны из скважин отобраны по пласту от бортов горной выработки за пределы зоны опорного давления.

В процессе отбора образцов угля из горных выработок регистрируется время извлечения образцов из скважин, атмосферное давление и температура окружающей среды. В лабораторных

исследованиях упущенный объем газа, характеризующий процесс отбора угольных проб, в течение которого выделяется не отбираемый в герметичный сосуд газ, определен методом обратной экстраполяции в момент времени  $x=0$  (здесь и далее,  $t$  – время десорбции метана из угля, мин).

Процесс десорбции метана (рисунок 1) заключается в его фильтрации (линейный участок), переходящей в диффузию (нелинейный участок) из угольного образца через систему пор и трещин вследствие увеличения пути внутренней диффузии, и проявляющегося в том, что на длительном интервале объем выделившегося газа убывает обратно пропорционально квадратному корню из времени. По результатам определения остаточной газоносности в последующем может быть выполнена оценка эффективности дегазации угольных пластов.

В общем случае процесс десорбции метана из угольных образцов может быть представлен как:

$$f(x) = \begin{cases} a_1 + b_1 x; & x \in [x_0; x_{diff}] \\ a_2 + b_2 \ln x; & x \in [x_{diff}; x_n] \end{cases} \quad (1)$$

где  $a_1; b_1; a_2; b_2$  – параметры модели;  $x_0 = 0$ ;  $n$  – количество измерений;  $x_{diff}$  – начало диффузии;  $[x_0; x_{star}]$  – интервал экстраполяции;  $[x_{star}; x_{diff}]$  – процесс фильтрации (закон Дарси);  $[x_{diff}; x_n]$  – процесс диффузии (II закон Фика). При этом объем упущенного газа в процессе отбора проб определяется на линейной участке, соответствующем фильтрации метана (рис. 1).

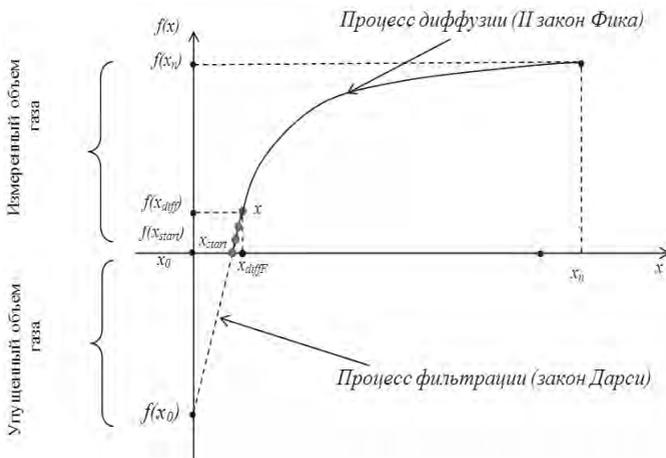


Рис. 1. Зависимость десорбции  $f$  метана из угольного образца от времени  $x$

При этом объем выделившегося метана на интервале от  $x_{diff}$  до  $x$  снижается линейно, что характеризуется как процесс фильтрации. Таким образом, при обработке экспериментальных данных по формуле  $y=kx+b$  можно определить положение соответствующей прямой. Газоносность угольных пластов определялась при прямых измерениях десорбции метана в лабораторных условиях на участке десорбционной кривой, соответствующей диффузии метана, с восстановлением упущенного объема газа на линейном участке, описываемом законом Дарси.

В лабораторных условиях выполняется дегазация угольных кернов и определяются технические характеристики угля. По результатам проведенных измерений стандартное отклонение значений газоносности  $\chi$  пласта изменяются в пределах 1–5% между пробуренными скважинами  $\leq 300$  м, с доверительной вероятностью 95 % по критерию Стьюдента.

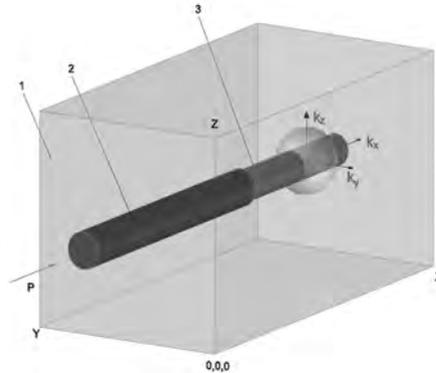
Кривая десорбции характеризует суммарный объем метана, выделившейся к моменту времени  $t$  газоистощения (900–1800 часов) исследуемой угольной пробы. В общем случае скорость изменения давления газа зависит от температуры пробы, размера гранул угля, его проницаемости и объема сосуда. Таким образом, устанавливаются особенности газокинетического процесса, определяют возможность применения разработанной конструкции шахтного кернонаборника для оценивания объема упущенного газа и последующего определения газоносности угольных пластов.

Оценка эффективности гидровоздействия на угольный пласт и определения фильтрационных свойств в призабойной зоне скважин, пробуренных в угольный пласт из горной выработки, выполняется на основе инъекционного теста, который заключается в нагнетании флюида и ожидании падения давления.

Скважины для гидравлического воздействия бурят непосредственно из горных выработок в угольный пласт (рисунок 2), затем производят обсадку металлическими трубами и надежно герметизируют для защиты в зоне дезинтеграции горного массива после проведении подготовительной выработки. Основными технологическими параметрами процесса гидроразрыва угольного массива являются: темп закачки, объем закачиваемой рабочей жидкости и радиус его влияния на изменение фильтрационных свойств угольного пласта.

Определяющим фактором высокоэффективного гидравлического воздействия на пласт является обеспечение высокой герметичности устья скважины. Для оценки степени изменения проницаемости в призабойной зоне скважины принято использовать скин-фактор, который характеризует наличие скин-эффекта, возникающего в результате проникновения фильтрата бурового раствора или твердых частиц в призабойную зону скважины с радиусом. Это, вызывает изменение проницаемости прискважинной зоны угольного пласта по сравнению

с проницаемостью в ненарушенной зоне пласта, в результате чего в призабойной зоне создается дополнительный перепад давления.



**Рисунок 2 – Трехмерное представление проницаемости угольного пласта: 1 – угольный пласт; 2 – обсадная колонна; 3 – необсаженный участок скважины**

Физический смысл скин-эффекта соответствует величине дополнительного фильтрационного сопротивления, вызванного изменением проницаемости угольного пласта, в призабойной зоне скважины и зависит от проницаемости удаленной и призабойной зоны:

$$S = \left( \frac{k}{k_s} - 1 \right) \ln \frac{r_s}{r_c}, \quad (2)$$

где  $r_s$  – радиус призабойной зоны скважины с измененной проницаемостью;  $r_c$  – радиус ствола скважины в продуктивном интервале;  $k$ ,  $k_s$  – коэффициент проницаемости удаленной и призабойной зоны соответственно.

На основе полученных значений скин-фактора можно оценить состояние призабойной зоны скважины. Так при положительном значении скин-фактора проницаемость призабойной зоны скважины ухудшена по сравнению с удаленной зоной в результате ее кольтматации, а при отрицательном значении проницаемость призабойной зоны выше вследствие проведения стимуляции пласта, например, гидроразрыва. Соответственно при нулевом значении скин-фактора проницаемости одинаковы. Значения скин-фактора могут изменяться от  $\approx (-12)$  до  $+\infty$  в зависимости от степени нарушения призабойной зоны скважины [9–10]. Таким образом, любые процессы, способствующие снижению проницаемости и пористости прискважинной части пласта и увеличению потери давления при фильтрации флюида, характеризуются значениями скин-фактора.

Инжекционный тест заключается в нагнетании жидкости в пласт и ожидания падения давления. Для исследования скважины методом нагнетания устанавливается минимальный расход жидкости, чтобы предотвратить гидроразрыв поглощающего пласта. При этом перепады давления создадут в зависимости от конкретных условий: приемистости пласта, запаса жидкости, средств закачки, точности измерения расхода и давления. После чего устье скважины перекрывалось и регистрировалось падение давления. Для нагнетания жидкости на поверхности обычно используются насосы цементировочного агрегата или буровые насосы. В условиях шахты применены насосные станции, предназначенной для нагнетания рабочей жидкости в гидросистему очистных агрегатов и механизированных крепей.

В качестве примера представлены результаты определения газоносности угля и мониторинга гидродинамического воздействия на участок угольного пласта Болдыревский шахты «им. С.М. Кирова» АО «СУЭК-Кузбасс», на котором были проведены мероприятия по предварительной дегазации углеродного массива. В таблице приведены результаты газоносности угольных кернов, отобранных из горных выработок шахты. Результаты остаточной газоносности угля на отдельных участках выемочного столба представлены на рис. 3. Газоносность на исследуемом участке изменяется от 6,7 до 18,1 м<sup>3</sup>/т с.б.м. с учетом сохранения температурных условий в интервале 22–60 °С.

Таблица

**Сводная таблица результатов оценки газоносности угля в пределах выемочного**

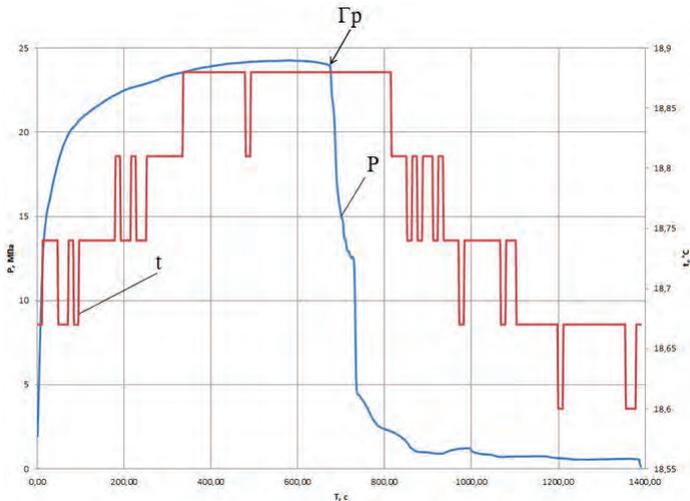
Точка отбора угольных кернов	Газоносность угля до проведения гидро-разрыва пласта, м <sup>3</sup> /т с.б.м.	Газоносность угля после проведения гидроразрыва пласта (8 месяцев), м <sup>3</sup> /т с.б.м.	Газоносность угля по геологоразведочным значениям, м <sup>3</sup> /т
1	6,7	5,2	15
2	15,5	10	20
3	18,1	11	20



**Рис. 3. Схема проведения исследований по оценке газоносности и проницаемости угольного пласта**

Фильтрационные свойства околоскважинной зоны пласта определялись на основе инъекционного теста. После анализа и интерпретации зарегистрированных изменений давления в горизонтальных скважинах определена проницаемость по трем направлениям  $k_x = 75,44$  мД;  $k_y = 3,07$  мД;  $k_z = 1,41$  мД. Скин-фактор составил  $S = -1,80$ .

После падения давления в скважине проведены работы по гидродинамическому воздействию на угольный пласт путем нагнетания рабочей жидкости. В процессе нагнетания при давлении в скважине 24,27 МПа (рисунок 4) произошел гидравлический разрыв пласта с резким падением давления, который сопровождалось ударами и треском в борт горной выработки.



**Рис. 4. Изменение давления  $P$  и температуры  $t$  при проведении гидродинамического воздействия в скважине № 13 на участке выемочного столба 24—60 пласта Болдыревский**

Таким образом, полученные результаты показывают уровень снижения газоносности угля дегазационными скважинами на 3—7 м<sup>3</sup>/т (30—40 %) после применения гидровоздействия на углепородный массив, что является достаточным для обеспечения высоких нагрузок на очистной забой по газовому фактору при отработке высокометаносных угольных пластов. Перспективность применения гидровоздействия на угольные пласты необходимо сопровождать оценкой параметров скважин, пробуренных из горных выработок и определением газоносности и проницаемости угля.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приори-

тетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по теме «Разработка технологии эффективного освоения угольных месторождений комплексом с роботизированным управляемым выпуском подкровельной толщи» (Соглашение № 14.604.21.0173).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Polevshchikov G.Y.* Basics for Effective Development of Coal-Methane Deposits of Kuzbass / *G.J. Polevshchikov, E.N. Kozyreva, M.V. Shinkevich, O.V. Bryuzgina* // *Vestnik KuzGTU.* – 2011. – № 3. – p. 8–11.

2. *Tailakov O.V.* Physical modeling of fluid flow in the near-wellbore formation zone on the basis of equivalent materials / *O.V. Tailakov, E.A. Utkaev, D.N. Zastrelov, S.V. Sokolov* // *Applied Mechanics and Materials.* 2015. Vol 770. pp 349–353.

3. *Tailakov O.V.* Justification of a Method for Determination of Gas Content in Coal Seams to Assess Degasification Efficiency / *O.V. Tailakov, A.N. Kormin, D.N. Zastrelov, E.A. Utkaev, S.V. Sokolov* // *The 8th Russian-Chinese Symposium. Coal in 21st Century: Mining, Processing and Safety.* 2016. pp. 324–329.

4. *Seidle J.* Fundamentals of Coalbed Methane Reservoir Engineering / *PenWell Corporation.* – 2011.- 401 p.in (*Scientific and Technical Journal*). – 2013.- № S6.- p. 165–169.

5. *Tailakov O.V.* Development of Method of Rapid Analysis of Particle Size Distribution of the Coal Charge Based on Digital Image Processing / *Tailakov O.V., Makeev M.P., Kormin A.N., Smyslov A.I.* // *Applied mechanics and materials.* – 2015. – Vol. 770. – p. 512–517.

6. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах». Серия 05. Выпуск 40. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. – 200 с.

7. *Каркашадзе Г.Г., Мазаник Е.В., Ермак Г.П.* Снижение газодинамической энергии выбросоопасного угольного пласта в процессе его дегазации. Горный журнал №9, 2015 г. Стр. 37–40.

8. *Алексеев А.Д., Василенко Т.А., Гуменник К.В., Калугина Н.А., Фельдман Э.П.* Диффузионно-фильтрационная модель выхода метана из угольного пласта. Журнал технической физики. 2007. Т. 77. Вып. 4. С. 65–74.

9. *Клишин В.И., Тацпенко А.Л., Опрук Г.Ю.* Инновационные методы интенсификации процесса дегазации угольных пластов из подготовительных выработок. Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 6 (124). С. 89–97.

10. *Мазаник Е.В., Могилева Е.М., Коликов К.С.* Перспективные направления извлечения кондиционных метановоздушных смесей при дегазации угольных месторождений. Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. № 5 (123). С. 101–106.

11. *Полевщиков Г.Я., Козырева Е.Н., Рябцев А.А., Родин Р.И., Нелепина Е.С., Цуран Е.М.* Оценка влияния напряжений на газоносность приконтурной части пласта. Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. № 1. С. 16–24.

12. Курленя М.В., Сердюков С.В., Патутин А.В., Шилова Т.В. Интенсификация подземной дегазации угольных пластов методом гидроразрыва. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 6. С. 3–9.

ГИАБ

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Тайлаков О.В.* — д.т.н., профессор, заместитель директора по науке,  
*Кормин А.Н.* — к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории ресурсов и технологий извлечения угольного метана, e-mail: kormin@uglemetan.ru,  
*Уткаев Е.А.* — к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории ресурсов и технологий извлечения угольного метана,  
Институт угля ФГБНУ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, 650065, г. Кемерово, пр. Ленинградский, 10.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 148–157.

**Tailakov O.V., Kormin A.N., Utkaev E.A.**

### **Estimation of gas content and permeability of in coal seams in mine conditions**

The regularities of the quantitative distribution of methane in a coal-bearing massif are considered. A comparative evaluation of technical means and methods for determining gas content and permeability of coal is given. The influence of the main geological factors on the gas content is considered, the regularity of the change in the methane content of coal over the area of the strike of strata is shown. The conditions regulating the order of carrying out of mine researches on an estimation of collector properties of a developed coal layer are stated. The results of refined values of gas content of coal are presented, on the basis of which the efficiency of degassing of coal seams has been estimated. The results of the permeability measurement of the bottomhole zone of the degassing wells are considered to assess the effectiveness of methods for stimulating the coal seam and increasing its gas recovery.

Key words: gas content and permeability of coal seams, hydraulic fracturing, core collection, mining, skin factor, desorption, excavating column, well filtration characteristics.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-148-157

## AUTHORS

*Tailakov O.V.*, doctor of technical science, professor, deputy director for science  
*Kormin A.N.*, senior researcher, PhD the lab of resources and technologies of coal-bed methane extraction,  
*Utkaev E.A.*, senior researcher, PhD the lab of resources and technologies of coal-bed methane extraction,  
Institute of coal Federal research Centre coal and coal chemistry SB RAS, 10, Leningradskiy Ave., Kemerovo, 650065,

## REFERENCES

1. Polevshchikov G.J., Kozyreva E.N., Shinkevich M.V., Bryuzgina O.V. *Basics for Effective Development of Coal-Methane Deposits of Kuzbass*. Vestnik KuzGTU. 2011. no 3. p. 8–11.
2. Tailakov O.V., Utkaev E.A., Zastrelov D.N., Sokolov S.V. *Physical modeling of fluid flow in the near-wellbore formation zone on the basis of equivalent materials*. Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol 770. pp 349–353.
3. Tailakov O.V., Kormin A.N., Zastrelov D.N., Utkaev E.A., Sokolov S.V. *Justification of a Method for Determination of Gas Content in Coal Seams to Assess Degasification Efficiency*. The 8th Russian-Chinese Symposium. Coal in 21st Century: Mining, Processing and Safety. 2016. pp. 324–329.
4. Seidle J. *Fundamentals of Coalbed Methane Reservoir Engineering*. PennWell Corporation. 2011. 401 p.in (Scientific and Technical Journal). 2013. no S6. pp. 165–169.
5. Tailakov O.V., Makeev M.P., Kormin A.N., Smyslov A.I. *Development of Method of Rapid Analysis of Particle Size Distribution of the Coal Charge Based on Digital Image Processing*. Applied mechanics and materials. 2015. Vol. 770. pp. 512–517.
6. *Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoj bezopasnosti «Pravila bezopasnosti v ugol'nyh shahtah»* [Federal regulations and rules in the field of industrial safety «safety Rules in coal mines»]. Seriya 05. Vypusk 40. Moscow: Zakrytoe akcionerное obshchestvo «Nauchno-tehnicheskij centr issledovanij problem promyshlennoj bezopasnosti», 2014. 200 p.
7. Karkashadze G.G., Mazanik E.V., Ermak G.P. *Snizhenie gazodinamicheskoj energii vybrosopasnogo ugol'nogo plastu v processe ego degazacii* [Reduction of gas-dynamic energy of an outlier coal seam in the process of its degassing]. Gornyj zhurnal no 9, 2015 g. pp. 37–40.
8. Alekseev A.D., Vasilenko T.A., Gumennik K.V., Kalugina N.A., Fel'dman E.P. *Diffuzionno-filtracionnaya model' vyhoda metana iz ugol'nogo plastu* [Diffusion-filtration model of methane release from the coal seam]. Zhurnal tekhnicheskij fiziki. 2007. T. 77. Vyp. 4. pp. 65–74.
9. Klishin V.I., Tacienko A.L., Opruk G.Yu. *Innovacionnye metody intensivkacii processa degazacii ugol'nyh plastov iz podgotovitel'nyh vyrabotok* [Opry Innovative methods of intensification of the process of degassing of coal seams from preparatory workings]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2017. no 6 (124). pp. 89–97.
10. Mazanik E.V., Mogileva E.M., Kolikov K.S. *Perspektivnye napravleniya izvlecheniya kondicionnyh metanovozdushnyh smesej pri degazacii ugol'nyh mestorozhdenij* [Promising directions of extraction of conditioned methane-air mixtures during degassing of coal deposits]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2017. no 5 (123). pp. 101–106.
11. Polevshchikov G.Ya., Kozyreva E.N., Ryabcev A.A., Rodin R.I., Nepeina E.S., Curan E.M. *Ocenka vliyaniya napryazhenij na gazonosnost' prikonturnoj chasti plastu* [Assessment of stress influence on the gas content of the near-boundary part of the formation]. Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti. 2016. no 1. pp. 16–24.
12. Kurlenya M.V., Serdyukov S.V., Patutin A.V., Shilova T.V. *Intensifikaciya podzemnoj degazacii ugol'nyh plastov metodom gidrorazryva* [The intensification of the underground degassing of coal seams by hydraulic fracturing]. Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh. 2017. no 6. pp. 3–9.



Е.В. Федоров

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ГАЗОНОСНОСТИ ПЛАСТА БОЛДЫРЕВСКИЙ НА ШАХТЕ ИМ. С.М. КИРОВА

Представлено краткое описание методики определения газоносности разрабатываемого угольного пласта на основе прямого измерения количества газа, выделяющегося из кернового образца скважины колонкового бурения, отобранного в действующей шахте. Приведены результаты экспериментальных работ по определению текущей величины газоносности пласта Болдыревский шахты им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс». Выполнен анализ полученных результатов. Сделаны выводы о применимости и путях совершенствования методики.

Ключевые слова: методика, газоносность угольных пластов, стандарт, дегазация угольных пластов, кернонаборник.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-158-164

В соответствии с [1] способы и параметры дегазации основных источников выделения метана угольных шахт выбирают с учетом газообильности и газового баланса очистных выработок. В свою очередь, газообильность горных выработок вновь строящихся шахт и шахт, подлежащих коренной реконструкции, рассчитывают по газоносности угольных пластов и вмещающих пород, которые определяют на этапе геологоразведочных работ в соответствии с инструкцией [2], вобравшей в себя опыт изучения газов метановых зон при разведке угольных месторождений СССР, начиная с 1946 года.

В практике действующих шахт непосредственными и наиболее надежными данными для анализа прогнозных оценок газоносности являются результаты газовых съемок фактической метанообильности очистных и подготовительных выработок, позволяющие рассчитывать газовый баланс выемочного участка шахты по источникам газовыделения [2]. Недостатком этого способа является высокая изменчивость содержания метана в призабойной зоне пласта и в отбитом угле («остаточный» метан), что делает невозможным определение природной газоносности с заданной точностью. В связи с этим, наиболее надежным способом оценки количественных показателей газоносности угольных

пластов и вмещающих пород является их прямое определение в шахтных условиях.

Выполняемые сегодня определения газоносности угольных пластов в действующих шахтах в большинстве случаев мировой практики основываются на нормах и требованиях американского стандарта ASTM D 7569–10 [3], австралийского стандарта AS 3980-1999 [4], а также методики немецкой компании DMT. Все перечисленные стандарты предполагают прямое определение газоносности путем измерения количества газа, выделяющегося из угольных образцов или буровых скважин в герметичные измерительные сосуды. При этом, американский и австралийский стандарты предполагают измерения газовыделения преимущественно из образцов в виде целых кусков угольного керна [5].

При прямом определении метаноносности угольных пластов точность измерения кинетики газовыделения и количества десорбированного газа в целом определяется, в первую очередь, техногенной нарушенностью образцов. Сломанные и разрушенные образцы теряют первоначальный газ с большей скоростью, чем целые и неповрежденные глыбы или куски керна, и чем ближе их состояние к природному, тем меньше неопределенность потерянного и остаточного газа.

«Методика определения газоносности разрабатываемых угольных пластов» была разработана институтом ИПКОН РАН в 2012 году на основе стандарта AS 3980-1999, прошла экспертизу промышленной безопасности (№ 12-2/12-П) с получением Заключения Ростехнадзора (регистрационный номер № 13-ИД-00385-2012).

Методика прошла опытно-промышленные испытания в 2015 г. [6] и предусматривает определение объема полного газовыделения из угольного керна в несколько этапов: измерения объемов выделяющегося газа в шахте (пересчитываемые в объемы газа, «потерянные» при выбуривании керна) –  $V_1$ , объемы газа, выделившегося из керна в лаборатории при атмосферном давлении  $V_2$  и объемы остаточного газа, выделившегося из пробы керна при измельчении в герметичной мельнице до крупности 0,2 мм –  $V_3$ .

#### • **Шахтные измерения объемов газа $V_1$ , выделяющегося из керна**

Шахтные измерения газоносности предусматривают измерения объемов газа, выделяющегося из выбуренного угольного керна после его помещения в герметичный контейнер в течение 20 минут с интервалом в 1–2 минуты.

В шахтных условиях заполняется Протокол измерений, в котором фиксируются: температура, давление, время начала и окончания выбуривания керна, время герметизации керна в контейнере; отбирается проба газа для исследования компонентного состава в лаборатории. Время между моментами извлечения керна из скважины и помещением его в контейнер не должно превышать 30 мин.

- **Лабораторные измерения объема газа, выделяющегося при атмосферном давлении  $V_2$**

После доставки контейнера с керном из шахты в лабораторию производятся измерения выделяющихся из керна объёмов газа. Заполняется протокол лабораторных измерений с фиксацией веса контейнера с керном, атмосферного давления, температуры. Измерения проводятся до тех пор, пока объемы газовыделения за 20 минут не превысят 2 минимальных делений на мерном цилиндре. Производят отбор газа для исследования его компонентного состава. Отбираются пробы для определения кажущейся плотности угля для дальнейших исследований.

- **Определение остаточного объема газа, выделяющегося при измельчении пробы угля  $V_3$**

После определения объёмов газа  $V_2$  керн извлекается из контейнера, из него отбираются две пробы весом по 160 г для измельчения в герметичной мельнице. Производится измельчение пробы угля в течение 7 минут до крупности 0,2 мм. с отбором выделяющегося при этом газа и его измерением на установке Рис. 4.

Заполняется протокол измерения объёмов газа  $V_3$  с указанием веса отобранных проб, температуры и атмосферного давления в момент измерений, среднего значения (по двум пробам) объёма газа. Измельченный уголь отбирается для лабораторных определений пикнометрической плотности и определения зольности и влажности угля.

- **Определение природной газоносности угольных пластов**

После проведенных шахтных и лабораторных измерений объемов газа, выделившегося из угольного керна, вычисления кажущейся и пикнометрической плотности угля, его зольности и влажности производят вычисления природной газоносности угольного пласта в месте отбора керна. Для этого полученные объёмы газа приводят к стандартным условиям. Затем по приведенным к стандартным условиям значениям



*Рис. 1. Установка для измерения выделяющегося газа  $V_1$  в шахте*



*Рис. 2. Извлечение керна из кернаборника*



*Рис. 3. Определение объема выделяющегося газа при атмосферном давлении в лаборатории ЦУХЛ*



**Рис. 4. Измерение объёмов газа, выделяющегося при измельчении пробы угля в герметичной мельнице**

$V_1$  определяют объём газа, выделившегося (потерянного) при выбурировании керна  $V_{1п}$ . После этого, отнесением получившихся объёмов  $V_{1п}$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  к соответствующим массам угля (керы и пробы для мельницы) и их суммированием получают значение природной газонасыщенности угольного пласта в  $\text{м}^3/\text{тн}$ . А с учетом определенной зольности и влажности проб - природную газонасыщенность в  $\text{м}^3/\text{тн}$  сухой беззольной массы.

В 2015–2017 г. сотрудниками ИПКОН РАН совместно со специалистами Центральной углехимической лаборатории (ЦУХЛ) и Управлением дегазации и утилизации метана (УДиУМ АО «СУЭК-Кузбасс») были проведены несколько серий экспериментальных определений газонасыщенности разрабатываемых угольных пластов.

Целью экспериментов было определение величины текущей газонасыщенности пластов в различных горно-геологических условиях, с учетом проведения подготовительных выработок, осуществления дегазационных мероприятий.

Исследования проводились на шахте им. С.М.Кирова на участках бурения дегазационных скважин по пласту Болдыревский: вентиляционные печи 2457, 2458, промежуточные штреки 2458-2, 2460-1, 2460-2. В общей сложности было проведено шесть серий измерений с отбором и изучением 4–5 кернов в каждой серии.



**Рис. 5, а Угольный керн из вентиляционной печи 2457**



**Рис. 5, б Угольный керн из промежуточного штрека 2460-1**

Бурение выполнялось с помощью самоходных установок VLD-1000A, IDC-90 и австралийского керноотборника, который в ходе экспериментов был модернизирован специалистами УДиУМа. Угольные керны отбирались с глубины 10–15 м, при этом качество кернового материала даже при одинаковых параметрах бурения существенно различалось в зависимости от структурных особенностей угольного пласта в месте отбора. В одних случаях, это был практически цельный керн, в других – в керноотборнике оказывалась спрессованная угольная масса, малопригодная для дальнейшего исследования рис. 5 а,б. В ряде случаев керн необходимого качества удавалось отобрать только со второй-третьей попытки.

В таблице представлены обобщенные результаты определения текущей величины газоносности угольного пласта Болдыревский.

№ по серии измерений	Место отбора керна	Глубина, м	Текущая величина газоносности $Q_{oi}$ , м <sup>3</sup> /тн	Природная газоносность Q, м <sup>3</sup> /тн
1	Вентиляционная печь 2457	360	9,6	12
2	Вентиляционная печь 2558	375	11,7	13
3	Промежуточный штрек 2458-2	395	11,9	15
4	Промежуточный штрек 2460-2	460	10,5	17
5	Промежуточный штрек 2460-1(север)	500	10,0	19
6	Промежуточный штрек 2460-1(юг)	510	9,6	19

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. «Методика...» ИПКОН РАН позволяет оперативно (в течение суток) производить прямое измерение газовой выделенности из угольного керна в шахтных и лабораторных условиях и рассчитывать на основе получаемых данных природную газоносность разрабатываемых угольных пластов;

2. Результаты определения газоносности в каждой серии (для каждого участка измерений) достаточно стабильны- величины  $Q_{oi}$  отличаются не более, чем на 5–7 %;

3. Определенные значения текущей величины газоносности существенно (на 20–49%) ниже параметров природной газоносности (изогазы  $CH_4$ ). Причин этому несколько.

– Природная газоносность определяется на стадии геологоразведочных работ для нетронутого угольного массива, тогда как отбор керна для определения текущей величины газоносности ведется из оконтуренного пластовыми выработками (а, следовательно, и частично «дегазированного») выемочного столба.

– «Методика...» предусматривает отбор керна с глубины, превышающей зону влияния горной выработки (2–3 её диаметра). Фактически же из-за габаритов применяемого бурового оборудования реализация этого требования сопряжена с определенными сложностями. В типовых выработках станки (WLD, IDC) реально могут бурить под углом 30-40 град к стенке выработки. Это означает, что для отбора керна с глубины 15 м (по нормали к стенке выработки) глубина скважины должна превышать 30 м, что в свою очередь, ведет к увеличению времени подъема снаряда и извлечения керна, а значит, к дополнительной потере выделяемого из керна газа;

– Отбор угольного керна производился в одной из скважин на участке бурения веера дегазационных скважин, что также ведет к снижению величины определяемой газоносности пласта;

4. Качество получаемого кернового материала, оперативность извлечения угольного керна в значительной степени зависят от используемой конструкции кернонаборника. Указанная конструкция благодаря усилиям специалистов УДиУМа постоянно совершенствуется, модернизируется, но, тем не менее, все ещё остается одним из наиболее проблемных вопросов внедрения «Методики...», требующих своего решения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по дегазации угольных шахт. — М., ЗАО НТЦ ПБ, 2012 г., серия 5, выпуск 22.

2. Инструкция по определению и прогнозу газоносности угольных пластов и вмещающих пород при геологоразведочных работах. — М., «Недра», 1977 г., -96 с. (Институт горного дела им. А.А. Скочинского).

3. ASTM D 7569-10 «Standard practice for determination of gas content of coal – direct desorption method» («Стандартная практика определения содержания газа в угле – метод прямой десорбции»). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

4. Australian Standard AS 3980-1999: Guide to the determination of gas content of coal seams. Direct desorption method (Справочник по определению газового содержания в угле. Метод прямой десорбции). Standards Association of Australia, 1999. North Sydney, NSW.M. Avriel. Nonlinear Programming: Analysis and Methods. Dover Publishing. 2003.

5. Ахметгареев Р.А., Федоров Е.В. О стандартах определения содержания газа в угле // Безопасность труда в промышленности. — 2015. — № 11. — С. 30–35.

6. Ахметгареев Р.А., Федоров Е.В. Опытнo-промышленные испытания методики определения газоносности разрабатываемого угольного пласта // Безопасность труда в промышленности. — 2015. — № 9. — С. 43–48. **ИИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Федоров Евгений Вячеславович — кандидат технических наук, заведующий отделом, evfedorov58@gmail.com, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Мельникова Н.В. Российской академии наук (ИПКОН РАН), 111020, Москва, Крюковский тупик, 4.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 158–164.

**Fedorov E.V.**

### **Experimental assessment of the gas content of the Boldyrevsky formation at the im mine S.M. Kirov**

A brief description of the method for determining the gas content of the coal seam developed on the basis of direct measurement of the amount of gas released from the core sample of the well core drilling, selected in the operating mine. The results of experimental work to determine the current value of the gas content of the reservoir Boldyrev mine. S.M. Kirov, JSC «SUEK-Kuzbass». The analysis of the obtained results was performed. The conclusions about the applicability and ways to improve the technique are made.

Key words: method, gas content of coal seams, standard, degassing of coal seams, core set.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-158-164

## AUTHORS

*Fedorov E.V.*, candidate of technical Sciences, head of Department, evfedorov58@gmail.com, Institute of problems of comprehensive exploitation of mineral resources to them. academician N. Melnikov In. Russian Academy of Sciences (ipcon RAS), 111020, Moscow, Kryukovsky deadlock, 4.

## REFERENCES

1. *Instrukciya po degazacii ugol'nyh shaht* [Manual for the degassing of coal mines]. Moscow, ZAO NTC PB, 2012, seriya 5, vypusk 22.
2. *Instrukciya po opredeleniyu i prognozu gazonosnosti ugol'nyh plastov i vmeshchayushchih porod pri geologorazvedochnyh rabotah* [Instructions for the definition and prediction of gas content of coal seams and host rocks during exploration]. Moscow, «Nedra», 1977, -96 p. (Institut gornogo dela im. A.A. Skochinskogo).
3. ASTM D 7569–10 «*Standard practice for determination of gas content of coal – direct desorption method*». ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
4. *Australian Standard AS 3980-1999: Guide to the determination of gas content of coal seams. Direct desorption method*. Standards Association of Australia, 1999. North Sydney, NSW.M. Avriel. Nonlinear Programming: Analysis and Methods. Dover Publishing. 2003.
5. Ahmetgareev R.A., Fedorov E.V. *O standartah opredeleniya sodержaniya gaza v ugle* [On the standards for determining gas content in coal]. Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2015. no 11. pp.30–35.
6. Ahmetgareev R.A., Fedorov E.V. *Opytno-promyshlennyye ispytaniya metodiki opredeleniya gazonosnosti razrabatyvaemogo ugol'nogo plasta* [Pilot tests of methods for determining the gas content of the coal seam under development]. Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2015. no 9. pp. 43–48.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ ИННОВАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА И ОПЕРАТИВНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗОНОСНОСТИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА\*

При разработке методов определения безопасных условий ведения горных работ большое внимание уделяется «порядку» точности входящих в алгоритм параметров. При этом чем ниже точность, тем выше должен быть «коэффициент запаса». Определяющим значением при расчете газообильности горных выработок, проводимых по угольному пласту, является природная газоносность угля. Уточнение газоносности необходимо с той позиции, что газовый фактор является основным препятствием повышения производительности горных работ на угольных шахтах. Невысокая точность определения газоносности с применением существующих методов прямого замера газоносности угольного пласта из горных выработок с применением керноотборников, в первую очередь, связана с расчетом объема упущенного газа до момента герметизации керна.

В статье рассматривается вопрос, посвященный основам создания метода и устройства замера газоносности угольного пласта, обладающего высокой точностью. Предлагается создание устройства, обеспечивающего полный замер содержащегося в пробе газа с момента ее выбуривания (при бурении шпура на расстоянии 4–6 метров от кромки пласта в забое подготовительной выработки) и до герметизации в термобарометрическую колбу (штыбприемник).

Ключевые слова: газоносность угольного пласта, газообильность выработок, безопасность горных работ, подготовительная выработка, газокинетическая реакция угольного пласта, расходомер, бурение шпура.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-165-173

При отработке газоносных угольных пластов подземным способом угледобывающие предприятия в России и в мире сталкиваются с

---

\* Статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы»; проект «Разработка технологии эффективного освоения угольных месторождений комплексом с роботизированным управляемым выпуском подкровельной толщи» (Соглашение №14.604.21.0173, Уникальный идентификатор Соглашения RFMEFI60417X0173).

проблемой повышенного содержания метана в рудничной атмосфере, которая, в свою очередь, усугубляется с увеличением глубины их залегания. Для расчета параметров вентиляционных мероприятий, обеспечивающих требуемое процентное газообразование в атмосфере выработки, необходимо прогнозировать ее газообильность. При этом «качество» прогноза напрямую зависит от определения величины природного содержания метана в угле.

В связи с этим оперативное определение газоносности угольных пластов для уточнения данных геологической разведки послужит дополнительной основой для принятия оптимального технологического решения, расчета вентиляционных и дегазационных систем шахты.

В настоящее время в России, согласно [1], для определения газоносности в основном применяется прямой [2] и косвенный методы [3]. Проблема применения косвенного метода заключается, в первую очередь, в соблюдении термодинамических условий, которые соответствовали бы природным условиям угольного пласта.

На достоверность определения газоносности прямым методом большое влияние имеет время подъема угольного керна до его герметизации. В работе [4] отмечается, что наиболее распространенный метод прямого определения природной газоносности с применением специальных колонковых снарядов и выбуриванием керна не приводит к снижению потерь, так как интенсивное снижение действовавших в нем напряжений с формированием давления свободного газа приводит к развитию микро-, а затем макротрещин в керне и соответствующему увеличению скорости выделения метана. При этом время выбуривания керна до его герметизации на порядок выше времени выбуривания такой же массы разрушенного угля. В результате формируется значительный объем упущенного (не замеренного) газа и при расчете газоносности сильно страдает точность определения.

В качестве зарубежных методик по определению газоносности углей можно отметить, например, десорбционный метод, утвержденный Горным Бюро США [5], Институтом Исследований Газа [6], метод медленной десорбции согласно австралийскому стандарту AS 3980 1999 [7].

Для прямого определения газоносности угольного пласта компания DMT GmbH & Co предлагает выбуривать разрушенный уголь при помощи бурового оборудования с пневматическим приводом и полых буровых штанг [8]. Для отбора пробы с определенной глубины скважины производится отсасывание угля через полые буровые штанги.

Этот процесс осуществляется при помощи эжектора, который устанавливается между бурильной колонной и источником сжатого воздуха. Перенос буровой мелочи от забоя скважины до сборочной емкости эжектора занимает несколько секунд. Применение данного оборудования позволяет производить отбор проб с расстояния более

20 м от забоя выработки, что позволяет достигать угля с ненарушенным содержанием газа.

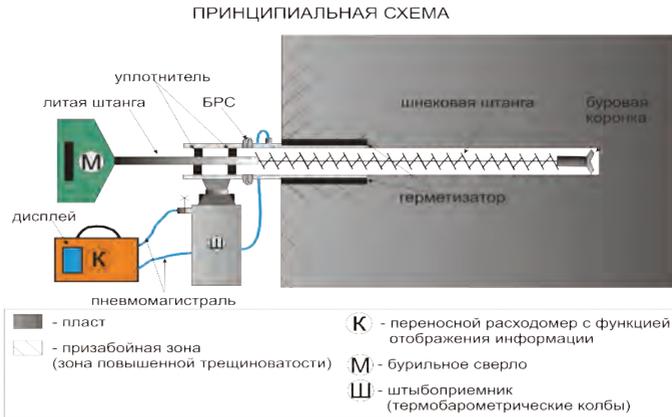
Однако в процессе отбора не происходит прямого замера потери газа из угля с момента его разрушения до герметизации. Таким образом оценка газоносности угля идет по данным полученным уже после герметизации образца разрушенного угля в процессе лабораторных испытаний. Данный метод позволяет оперативно оценить риски возникновения газодинамических явлений на основе установления аномальных зон на выемочном участке.

Исходя из вышеуказанного для разработки прямого метода замера газоносности необходима разработка спецоборудования, позволяющего производить полный замер газа с момента снижения природных напряжений в угле при отборе проб угля до их герметизации.

На рис. 1 представлена схема устройства, позволяющего выполнять замеры полного объема выделяющегося газа в процессе бурения интервала шпура.

### УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГАЗОНОСНОСТИ УГЛЯ

(Работа выполняется при поддержке ФЦП. Этап разработки рабочих чертежей)



**Рис. 1. Принципиальная схема устройства для оперативного измерения газоносности угля**

Пробы отбираются при бурении шпуров в забой подготовительной выработки на глубине 4–6 м от кромки пласта, при условии, что скорость подвигания забоя выработки составляет более 3,5 м/сут за последние 5 сут.

Основные этапы замера газоносности угольного пласта:

1. Подготовительный;
2. Отбор проб;
3. Лабораторный анализ;
4. Расчеты.

## Подготовительный этап

Данный этап включает такие технологические операции как выбор мест отбора проб по площади забоя, выбуривания ниши для установки оборудования в угольном массиве, подключение и настройка электрооборудования.

## Этап отбора проб

После установки устройства бурится шпур глубиной 4 м без отбора проб, но с замером параметров газокинетической реакции угольного пласта через вновь образованную поверхность шпура. Далее выполняется два цикла поинтервального бурения протяженностью по 1 м с отбором и герметизацией проб и с фиксацией параметров газовыделения во время бурения.

Отбор проб в виде штыба выполняется в специально разработанные термобарометрические колбы (ТБК) (штыбоприемник) [9], время с момента отбойки угля до момента герметизации составляет 40–100 с. Отобраны более 100 проб угля с использованием ТБК на шахтах Кузбасса, получены научные результаты [10], которые сопоставимые с мировыми [11–13].

## Этап выполнения лабораторного анализа

После отбора проб в шахтных условиях, ТБК с пробами доставляются в лабораторию и помещаются в термостат. Далее выполняется ряд операций по определению остаточной газоносности пробы, включающий ступенчатые спуски газа из ТБК и технический анализ проб угля.



*Рис. 2. Колба термобарометрическая (штыбоприемник)*

## Этап расчетов

Наибольшую сложность разрабатываемого метода представляет определение объема газа выделившегося в процессе разрушения пробы угля, поскольку значительную долю газа, учитываемую расходом, составляет метан с поверхности шпура. Разделение потоков при расчетах планируется выполнять, основываясь на современных представлениях о состоянии пласта в приконтурной его части [14,15]

и газокинетических характеристиках угля, полученных при разработке шпурового метода прогноза [16, 17].

Расчет газоносности пласта (пробы) выполняется по формуле

$$\chi_{пл} = \left( \frac{V_1 - V_2}{m_n} \right) + \chi_{прб} , \text{ см}^3/\text{г с.б.м.},$$

где  $V_1$  — общий объем газа, выделившийся при бурении интервала шпура, см<sup>3</sup>;  $V_2$  — объем газа, выделившийся со стенок шпура при отборе пробы, см<sup>3</sup>;  $m_n$  — масса пробы, г с.б.м.;  $\chi_{прб}$  — остаточная газоносность после герметизации пробы угля, см<sup>3</sup>/г с.б.м.

Замеры объемов газа возлагаются на совместную разработку Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН и Института физики полупроводников СО РАН – переносной расходомер с функцией отображения информации (ПР-1). ПР-1 предназначен для измерения и фиксации динамики расхода метана из шпура, посредством электронных датчиков и автономной микропроцессорной системы. В настоящее время разработка устройства ПР-1 на стадии создания опытного образца. Отличительной особенностью устройства ПР-1 является возможность настройки различных измерительных диапазонов расхода газовой смеси, что позволяет избежать влияние погрешностей на результаты измерения. Вторая особенность – возможность одновременного выполнения независимого измерения двух потоков газа: потока из пробы в штыбприемнике и с поверхности шпура (рис. 1).

Подводя итог, в результате выполненной работы кроме производственной выгоды в виде устройства и метода для высокоточного замера газоносности угольного пласта, необходимо отметить научную пользу. Разрабатываемое устройство позволит получать до 20 газокинетических и газодинамических характеристик «природного углеметана», что позволит получить новые знания о свойствах пористой структуры угля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по дегазации угольных шахт. Серия 05. Выпуск 22. – Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2012. – 250 с.
2. Рекомендации по определению газоносности угольных пластов. Серия 05. Выпуск 48. – Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2017. – 44 с.
3. *Потокина Р.Р., Журавлева Н.В, Исмагилов З.Р.* Лабораторные методы определения газоносности угольных пластов // Химия в интересах устойчивого развития. – 2013. – Т. 21. № 5. – С. 519–523.

4. Полевщиков Г.Я., Козырева Е.Н., Рябцев А.А., Родин Р.И., Нелеина Е.С., Цуран Е.М. Оценка влияния напряжений на газоносность приконтурной части пласта // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 1. – С. 16–24.

5. *Diamond W.P., Levine J.R.* Direct method determination of the gas content of coal – Procedures and results: U.S. Bureau of Mines Report of Investigations 8515. 1981. 36 p.

6. *McLennan J.D., Schafer P.S., Pratt T.J.* A Guide to Determining Coalbed Gas, Gas Research Institute Report GRI-94/0396. Chicago, Illinois. 1995. 123 p.

7. Standards Association of Australia, 1999, Australian Standard AS. 3980–1999: Guide to the Determination of Gas Content of Coal Seams. Direct Desorption Method, North Sydney, NSW.

8. *Imgrund T., Bauer F.* Relaxation and gas drainage boreholes for high performance longwall operations in low permeability coal seams. Mining Report, 149. 2013. pp. 159–166. doi: [10.1002/mire.201300019](https://doi.org/10.1002/mire.201300019)

9. Патент РФ № 2526962, 27.08.2014. Полевщиков Г.Я., Рябцев А.А., Нелеина Е.С., Цуран Е.М., Титов В.П., Ванин Е.А., Мельгунов М.С., Назарова Л.А., Назаров Л.А. Способ определения газокинетических характеристик угольного пласта. 2013. Бюл. № 24.

10. *Козырева Е.Н., Нелеина Е.Н., Шинкевич М.В.* Влияние температуры на сорбционную метаноемкость коксующихся углей Кузбасса // Кокс и химия. – 2018. – № 3. – С. 38–42

11. *Liu S., Harpalani S.* A new theoretical approach to model sorption induced coal shrinkage or swelling // AAPG Bulletin. 2013. Vol. 97. No. 7. pp. 1033–1049.

12. *Bo Li, Jianping Wei, Kai Wang, Peng Li, Ke Wang.* A method of determining the permeability coefficient of coal seam based on the permeability of loaded coal // International Journal of Mining Science and Technology. 2014. Issue 5. Vol. 24. pp. 637–641.

13. *Espinoza D.N., Pereira J.-M., Vandamme M., Dangla P., Vidal-Gilbert S.* Desorption-induced shear failure of coal bed seams during gas depletion // International Journal of Coal Geology 137. 2015. pp. 142–151.

14. *Мурашев В.И.* Разработка научных основ безопасного ведения горных работ в угольных шахтах на основе исследования геомеханических процессов: Дис. д.т.н. – М., 1980. – 36 с.

15. *Курленя М.В., Опарин В.Н.* Проблемы нелинейной геомеханики // ФТПРПИ. – 1999. – №3. – С. 12–26.

16. *Зыков В.С.* Внезапные выбросы угля и газа и другие газодинамические явления в шахтах. – Кемерово: Институт угля и углехимии СО РАН, 2010. – 333 с.

17. *Полевщиков Г.Я., Козырева Е.Н., Киряева Т.А.* Физико-химическая основа внезапности динамических газопроявлений в угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – №8. – С.81–87.

**ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Плаксин Максим Сергеевич* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории газодинамики угольных месторождений Института

угля, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, проспект Советский, 18, г. Кемерово, Россия, 650991, тел.: 8(3842)74–18–03, e-mail: [gas\\_coal@icc.kemsc.ru](mailto:gas_coal@icc.kemsc.ru).  
*Родин Роман Иванович* – младший научный сотрудник лаборатории газодинамики угольных месторождений Института угля, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, проспект Советский, 18, г. Кемерово, Россия, 650991,  
*Титов Виктор Петрович* – начальник инженерно-технического отдела электронной системотехники, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, проспект Лаврентьева, 13, г. Новосибирск, Россия, 630090.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 165–173.

**Plaksin M.S., Rodin R.I. , Titov V.P.**

### **The technical basis for the creation of innovative devices and an operational method of determining the gas content of coal seam**

In the development of methods for determining the safe conditions of mining, much attention is paid to the “order” of the accuracy of the parameters included in the algorithm. The lower the accuracy, the higher the “safety factor”. The determining value in the calculation of the gas content of mine workings carried out on the coal seam is the natural gas content of coal. Verification of gas content is necessary from the position that the gas factor is the main obstacle to improving the productivity of mining operations in coal mines.

Low accuracy of gas content determination using existing methods of direct measurement of gas content of the coal seam from the mine workings with the use of core collectors, primarily associated with the calculation of the volume of gas lost until the core sealing.

The article deals with the issue devoted to the basics of creating a method and device for measuring the gas content of a coal seam with high accuracy. It is proposed to create a device that provides a complete measurement of the gas contained in the sample from the moment of its drilling (when drilling a hole at a distance of 4–6 meters from the edge of the formation in the bottom of the preparatory work) and to sealing in a thermobarometric flask (fine coal reservoir). The value of the results obtained by thermobarometric flasks is noted.

Separately, the requirements for a portable flow meter, a device for measuring and recording information about the flow of gas when drilling a hole in the coal seam are considered. The expected difficulties in determining the volume of gas released from the surface of the well from the total volume of gas measured during drilling are noted.

In addition to the noted production benefits, the developed device will allow to obtain up to 20 gas-kinetic and gas-dynamic characteristics of “natural carbon”, which will provide new knowledge about the properties of the porous structure of coal.

Key words: gas content of a coal seam, gas content of workings, mine safety, preparatory development, gas-kinetic reaction of the coal seam, flow meter, drilling hole.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-165-173

## AUTHORS

*Plaksin M.S.*, candidate of technical Sciences, senior researcher of the laboratory of gas dynamics of coal deposits Of the Institute of coal, Federal research center of coal and coal chemistry of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Sovetsky Avenue, 18, Kemerovo, Russia, 650991, tel.: 8 (3842)74-18-03, e-mail: gas\_coal@icc.kemsc.ru,

*Rodin R.I.*, Junior researcher of the laboratory of gas dynamics of coal deposits Of the Institute of coal, Federal research center of coal and coal chemistry of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Sovetsky Avenue, 18, Kemerovo, Russia, 650991,

*Titov V.P.*, head of engineering and technical Department of electronic systems engineering, Institute of semiconductor physics. Rzhanova, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, 13, Lavrentyev Avenue, Novosibirsk, Russia, 630090.

## REFERENCES

1. *Instrukciya po degazacii ugol'nyh shaht* [Manual for the degassing of coal mines]. Seriya 05. Vypusk 22. Zakrytoe akcionerное obshchestvo «Nauchno-tehnicheskij centr issledovanij problem promyshlennoj bezopasnosti», 2012. 250 p.

2. *Rekomendacii po opredeleniyu gazonosnosti ugol'nyh plastov* [Recommendations for determining the gas content of coal seams]. Seriya 05. Vypusk 48. Zakrytoe akcionerное obshchestvo «Nauchno-tehnicheskij centr issledovanij problem promyshlennoj bezopasnosti», 2017. 44 p.

3. Potokina R.R., Zhuravleva N.V., Ismagilov Z.R. *Laboratornye metody opredeleniya gazonosnosti ugol'nyh plastov* [Laboratory methods for determining the gas content of coal seams]. Himiya v interesah ustojchivogo razvitiya. 2013. T. 21. no 5. pp. 519–523.

4. Polevshchikov G.Ya., Kozyreva E.N., Ryabcev A.A., Rodin R.I., Nepeina E.S., Curan E.M. *Ocenka vliyaniya napryazhenij na gazonosnost' prikonturnoj chasti plasta* [Evaluation of the stress influence on the gas-bearing part of the formation]. Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti. 2016. no 1. pp. 16–24.

5. Diamond W.P., Levine J.R. *Direct method determination of the gas content of coal Procedures and results*: U.S. Bureau of Mines Report of Investigations 8515. 1981. 36 p.

6. McLennan J.D., Schafer P.S., Pratt T.J. *A Guide to Determining Coalbed Gas, Gas Research Institute Report GRI-94/0396*. Chicago, Illinois. 1995. 123 r.

7. *Standards Association of Australia, 1999, Australian Standard AS. 3980–1999*: Guide to the Determination of Gas Content of Coal Seams. Direct Desorption Method, North Sydney, NSW.

8. Imgrund T., Bauer F. *Relaxation and gas drainage boreholes for high performance longwall operations in low permeability coal seams*. Mining Report, 149. 2013. pp. 159–166. doi: 10.1002/mire.201300019.

9. *Patent RF no 2526962, 27.08.2014*. Polevshchikov G.Ya., Ryabcev A.A., Nepeina E.S., Curan E.M., Titov V.P., Vanin E.A., Mel'gunov M.S., Nazarova L.A., Nazarov L.A. Sposob opredeleniya gazokineticheskikh karakteristik ugol'nogo plasta. 2013. Byul. no 24.

10. Kozyreva E.N., Nepeina E.N., Shinkevich M.V. *Vliyaniye temperatury na sorbciionnyuyu metanoemkost' koksuyushchihsya uglej Kuzbassa* [Effect of temperature on the sorption metanopoli coking coals of the Kuznetsk basin]. Koks i himiya. 2018. no 3. pp. 38–42

11. Liu S., Harpalani S. *A new theoretical approach to model sorption induced coal shrinkage or swelling*. AAPG Bulletin. 2013. Vol. 97. No. 7. pp. 1033–1049.

12. Bo Li, Jianping Wei, Kai Wang, Peng Li, Ke Wang. *A method of determining the permeability coefficient of coal seam based on the permeability of loaded coal*. International Journal of Mining Science and Technology. 2014. Issue 5. Vol. 24. pp. 637–641.

13. Espinoza D.N., Pereira J.-M., Vandamme M., Dangla P., Vidal-Gilbert S. *Desorption-induced shear failure of coal bed seams during gas depletion*. International Journal of Coal Geology 137. 2015. pp. 142–151.

14. Murashev V.I. *Razrabotka nauchnyh osnov bezopasnogo vedeniya gornyh rabot v ugol'nyh shahtah na osnove issledovaniya geomekhanicheskikh processov* [Development of scientific bases of safe mining operations in coal mines based on the study of geomechanical processes]: Dis. d.t.n. Moscow, 1980. 36 p.

15. Kurlenya M.V., Oparin V.N. *Problemy nelinejnoj geomekhaniki* [Problems of nonlinear geomechanics]. FTPRPI. 1999. no 3. pp. 12–26.

16. Zykov V.S. *Vnezapnye vybrosy uglja i gaza i drugie gazodinamicheskie yavleniya v shahtah* [Sudden emissions of coal and gas and other gas-dynamic phenomena in mines]. Kemerovo: Institut uglja i uglekhemii SO RAN, 2010. 333 p.

17. Polevshchikov G.Ya., Kozyreva E.N., Kiryaeva T.A. *Fiziko-himicheskaya osnova vnezapnosti dinamicheskikh gazoproyavlenij v ugol'nyh shahtah* [Physical and chemical basis of suddenness of dynamic gas occurrences in coal mines]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'. 2004. no 8. pp. 81–87.



## ФОРМИРОВАНИЕ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЭКРАНОВ МЕТОДОМ ГИДРОРАЗРЫВА В ОКРЕСТНОСТИ ДЕГАЗАЦИОННОЙ СКВАЖИНЫ\*

Рассмотрены вопросы герметизации дегазационных скважин с помощью трещин гидроразрыва, заполненных непроницаемым составом. Такой противофильтрационный экран предотвращает фильтрацию воздуха из выработки в зону отбора метана в углепородном массиве, что позволяет откачивать газовую смесь с высоким содержанием метана. Проблема герметизации особенно актуальна при кустовом бурении пластовых скважин, так как при этом возникает значительная трещиноватость и нарушенность массива вблизи буровой камеры.

В ходе исследований были изучены рабочие жидкости для создания трехкомпонентного полиуретанового состава, используемого для заполнения экрана, разработана схема и порядок их закачки. Рассмотрен способ подачи в трещину раскрепляющего материала, который препятствует смыканию её берегов и обеспечивает наличие дренажного канала, заполняемого водой под давлением, что не позволяет воздуху поступать в дегазационную скважину.

Приведена схема и общий вид скважинного устройства для создания трещины разрыва поперек оси скважины. Устройство состоит из герметизирующего элемента нажимного типа и механического якоря, выполненного в виде разрезной шайбы. При подаче рабочей жидкости в изолированный интервал раскрытый якорь создаёт дополнительное касательное нагружение в окрестности стенок скважины, что приводит к поперечному разрыву. Лабораторные и полевые испытания устройства показали перспективность предложенных технических решений.

Ключевые слова: изоляционный состав, дегазационная скважина, герметизация, поперечная трещина, гидроразрыв, скважинное устройство.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-174-181

Основным способом предварительной дегазации угольных пластов в мире является веерно-кустовое направленное бурение плотной сетки протяжённых скважин и их вакуумирование [1, 2]. Эффек-

---

\* Исследование выполнено при частичной поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области РФ в рамках научного проекта № 17-45-540686 p\_a.

тивность данного подхода зависит от наличия фильтрации воздуха из горных выработок в дегазационные скважины, что приводит к сокращению концентрации метана в откачиваемом газе. Особенно остро такая проблема стоит при кустовом бурении веерных скважин, когда породный массив вблизи буровой камеры подвергается интенсивному многократному техногенному воздействию. В этом случае наблюдается снижение депрессии на пласт и падение производительности дегазационных скважин [1].

Распространенным методом борьбы с поступлением воздуха в зону отбора метана является нанесение на стенки горной выработки специального состава. Недостатки этой технологии известны – это значительный расход дорогостоящих полимеров, а также фильтрация воздуха в обход такого покрытия через слой пород повышенной проницаемости вокруг выработки.

В работе [3] для предотвращения подсосов воздуха через породу предлагается создавать между горной выработкой и зоной отбора метана трещины гидроразрыва и заполнять их вязким твердеющим составом. Данный способ не получил широкого распространения из-за нарушения герметичности создаваемого экрана вследствие неравномерного заполнения трещины вязким составом и его отвердевания. Это ведёт к локальному падению давления ниже запирающей трещины гидроразрыва, смыканию её берегов и нарушению сплошности защитного слоя.

В настоящем исследовании для герметизации дегазационных скважин веерно-кустового бурения также предлагается использовать метод направленного гидроразрыва, но получаемую трещину планируется заполнять несколькими маловязкими жидкостями, реагирующими между собой в полости создаваемого экрана. Разработанный состав состоит из трёх рабочих жидкостей, одна из которых является жидкостью гидроразрыва, а две другие – компоненты полиуретановой смолы: преполимер пониженной вязкости с избытком изоцианата (далее, преполимер) и гидроксилсодержащий пластификатор с катализатором (далее, пластификатор) [4].

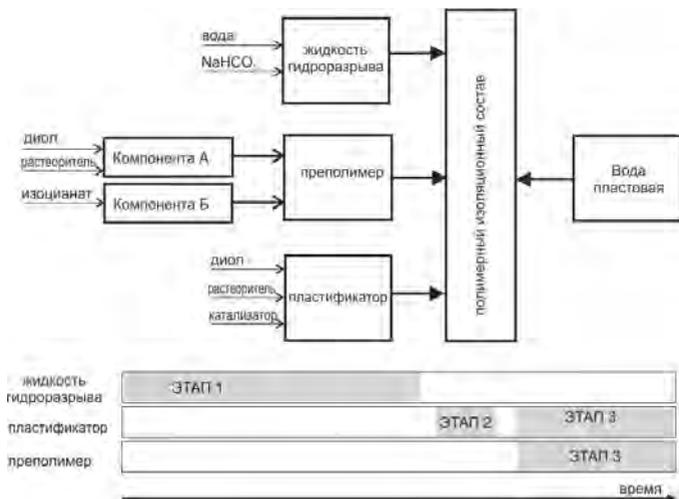
При выполнении работ по формированию изоляционной области горных пород в окрестности трещины гидроразрыва необходимо придерживаться следующего порядка закачки (см. рис. 1):

- 1) на этапе 1 в интервал разрыва подают рабочую жидкость до формирования в породе трещины требуемого размера. С течением времени давление в закрытом интервале разрыва снижается до пластового значения, при этом берега трещины смыкаются, и весь закаченный объём рабочей жидкости проникает в породный массив;

- 2) на этапе 2 в трещину гидроразрыва закачивают часть пластификатора в объёме 20–30% от планируемого объёма подачи преполимера и формируют слой породы, пропитанный этим составом;

3) на этапе 3 одновременно по двум отдельным рукавам высокого давления в трещину закачивают преполимер и оставшийся пластификатор в объёмном соотношении 1:1. Они смешиваются друг с другом в интервале разрыва и проникают во вмещающие породы через слой, предварительно пропитанный пластификатором. Диол, содержащийся в этом слое, реагирует со свободным изоцианатом, что приводит к росту вязкости преполимера.

Лабораторные исследования влияния изоляционного состава на проницаемость пористой среды показали его высокую эффективность [4].



**Рис. 1. Схема заправки рабочих жидкостей изоляционного полимерного состава в противофильтрационный экран**

В качестве альтернативы трёхкомпонентному составу, для заполнения трещины может использоваться раскрепляющий материал (проппант) низкой плотности и жидкость (вода), которые находятся в трещине под небольшим давлением. Такой экран должен пересекать основную группу скважин куста на удалении от борта горной выработки, не превышающем глубину перекрытия скважин обсадными трубами. Это позволит проводить герметизацию действующих скважин избирательно – только в случаях, когда на начальном периоде эксплуатации обнаружены недопустимые по интенсивности подсосы воздуха.

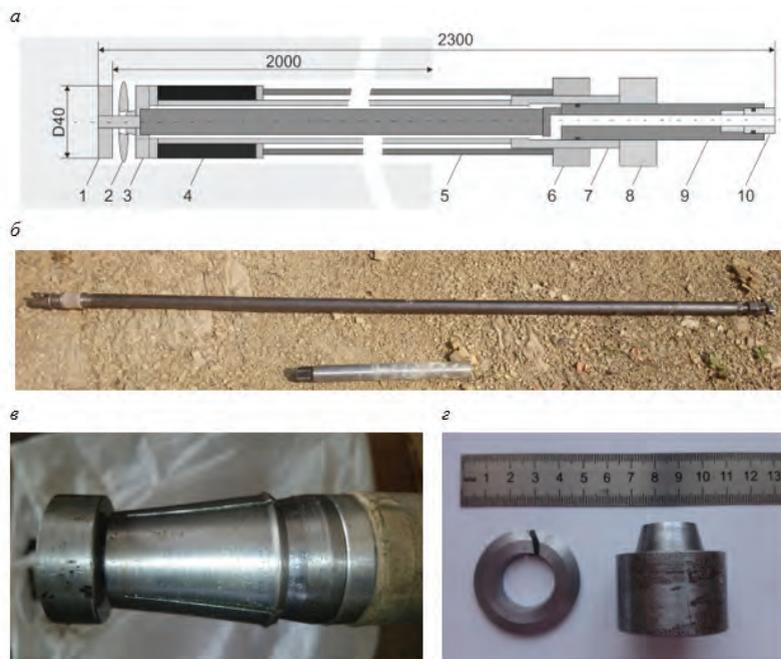
Раскрепление трещины проппантом препятствует смыканию её берегов и обеспечивает создание дренажного канала, заполняемого водой под давлением выше давления воздуха в горной выработке, что не позволяет воздуху поступать в дегазационную скважину. Утечки воды из экрана в массив только улучшают герметизацию скважин за счёт фор-

мирования слоя горных пород между экраном и горной выработкой с градиентом порового давления, который направлен против фильтрации воздуха в зону отбора метана. Если утечки жидкости чрезмерны, то для их снижения экран создаётся с предварительным пропитыванием прилегающего слоя горных пород полимерным изоляционным составом.

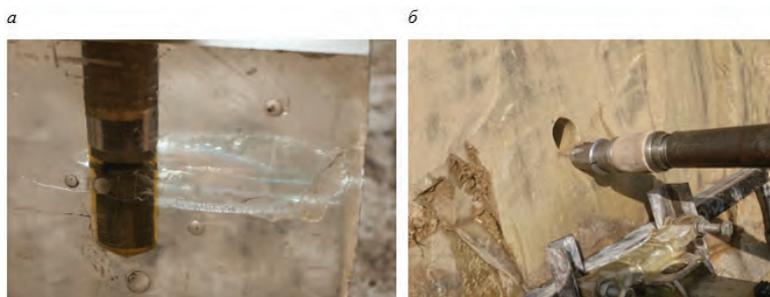
Для формирования поперечной трещины, направленной перпендикулярно оси скважины и являющейся основой противофильтрационного экрана используются несколько подходов. Известным способом направленного гидроразрыва является применение инициирующей щели для задания преимущественного направления развития трещины. Данный метод требует проведения дополнительной операции по созданию щелевого инициатора специальными механическими или гидроструйными устройствами [5, 6] и хорошо зарекомендовал себя в работах, связанных с контролируемым обрушением зависающей кровли, но является достаточно трудоёмким [7, 8]. Альтернативные способы заключаются в изменении поля напряжений вблизи скважины за счёт использования специальных устройств в виде якорей или инденторов, позволяющих задать начальное направление распространения трещины [9]. В этом случае нет необходимости проводить сложные и энергозатратные операции по нарезке щели, а время работ может быть снижено за счёт комплексирования нескольких операций в одном устройстве.

На рис. 2 приведена схема и общий вид устройства для создания поперечных трещин в скважине, а также фотографии анкеров старого и нового образца. В результате совместного действия нажимного герметизатора и анкера, вдавливаемого в стенки скважины, реализуется касательное нагружение, которое приводит к формированию поперечного разрыва; принцип работы устройства описывался ранее [10, 11]. Замена якорного элемента, выполненного на основе толстостенной трубы (рис. 2в) разрезной шайбой с заостренными краями (рис 2г) позволила повысить вероятность создания трещины поперек оси скважины.

Работоспособность устройства проверялась в лабораторных и полевых условиях. Лабораторные испытания проводились в блоке оргстекла с высверленным отверстием диаметром 42 мм. После установки устройства в отверстие анкер 2 расклинивался за счёт постепенного его перемещения по конусу упорной втулки 3 (см. рис. 2а). Это вызывало увеличение диаметра анкера (разрезной шайбы) и формирование области разрушения материала на стенках отверстия. В случае герметизации интервала, который содержит такую область, и подачи в него рабочей жидкости под давлением, распространение трещины происходило точно поперёк оси скважины (рис. 3а). Давление разрыва при этом составляло 95 бар, тогда как разрыв без формирования инициирующей зоны разрушения происходил при 160–170 бар.



**Рис. 2.** Общая схема скважинного устройства разрыва (а), фотографии устройства (б), анкера старого (в) и нового (г) образца: 1 – упор; 2 – анкер; 3 – упорная втулка; 4 – герметизатор; 5 – труба пакера; 6 – гайка пакера; 7 – труба анкера; 8 – гайка анкера; 9 – силовая труба; 10 – входной коллектор



**Рис. 3.** Поперечная трещина в блоке оргстекла (а) и испытания устройства в песчанике (б)

Полевые испытания устройства проводились на карьерах по добыче мрамора и песчаника в Новосибирской области. Скважины пробуривались с помощью установки алмазного бурения на глубину 1–2 метра, диаметр скважин составлял 51 мм; при этом диаметр гер-

метизатора был увеличен до 49 мм. Для подачи масла в качестве рабочей жидкости использовался ручной насос. Эксперименты на мраморе показали, что, несмотря на высокий момент затяжки гайки анкера, формирование инициирующей трещины и развитие поперечного разрыва не происходит даже при давлениях рабочей жидкости 400 бар. В песчанике наблюдалась обратная ситуация: сильная трещиноватость породы не позволяла создать разрыв в плоскости действия анкера; при подаче рабочей жидкости происходило развитие уже существующей системы трещин. В результате полевых испытаний была проверена функциональность устройства при высоких давлениях рабочей жидкости, отработана методика постановки и снятия анкера, оценены возможности герметизатора для изоляции пробуренных в различных породах скважин.

Предлагаемая схема скважинного устройства позволяет отказаться от дополнительных энергозатратных работ по нарезке инициирующей трещины. Использование якорных систем (анкеров) способствует возникновению растягивающих напряжений в интервале разрыва, что в конечном итоге создаёт условия для создания трещины в плоскости, перпендикулярной оси скважины. Лабораторные и полевые испытания устройства показали перспективность предложенных решений в реализации поперечного гидроразрыва.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lu S., Cheng Y., Ma J., Zhang Y. Application of In-Seam Directional Drilling Technology for Gas Drainage with Benefits to Gas Outburst Control and Greenhouse Gas Reductions in Daning Coal Mine, China // *Natural Hazards*, 2014, Vol. 73, no 3, pp. 1419–1437.
2. Hungerford F., Ren T., Aziz N. Evolution and application of in-seam drilling for gas drainage // *International Journal of Mining Science and Technology*, 2013, Vol. 23, no 4, pp 543–553.
3. Патент РФ № 2108464. Полевщиков Г.Я., Тризно С.К., Мельников П.Н. Способ герметизации дегазационных скважин. 1998. Бюл. 31.
4. Сердюков С.В., Шилова Т.В. Полимерный изоляционный состав для создания противofiltrационных экранов в породном массиве // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2016. – № 4. – С. 196–203.
5. Liu Y., Xia B., Liu X. A novel method of orienting hydraulic fractures in coal mines and its mechanism of intensified conduction // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, Vol. 27, pp. 190–199.
6. Леконцев Ю.М., Патутин А.В., Сажин П.В., Темиряева О.А. Комбинированное устройство для проведения направленного гидроразрыва // *ФТПРПИ*. – 2016. – № 3. – С. 90–94.
7. Huang B., Yu B., Feng F., Li Z., Wang Y., Liu J. Field investigation into directional hydraulic fracturing for hard roof in Tashan Coal Mine // *Journal of Coal Science and Engineering*, 2013, Vol. 19, no 2, pp. 153–159.

8. Леконцев Ю.М., Сажин П.В. Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // ФТПРПИ. – 2014. – № 5. – С. 137–142.

9. Шилова Т.В., Сердюков С.В. Защита действующих дегазационных скважин от поступления воздуха из горных выработок // ФТПРПИ. – 2015. – № 5. – С. 179–186.

10. Рыбалкин Л.А., Патутин А.В., Патутин Д.В. Разработка технических средств направленного гидроразрыва с касательным нагружением стенок скважины // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2017. – Т. 4. – № 2. – С. 275–278.

11. Патутин А.В., Рыбалкин Л.А., Шилова Т.В., Сердюков С.В. Устройство для формирования поперечных трещин в шахтных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 3 – С. 75–81. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Патутин Андрей Владимирович* – кандидат технических наук, с.н.с., andrey.patutin@gmail.com

*Сердюков Сергей Владимирович* – доктор технических наук, зав. лаб., Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, г. Новосибирск, Красный пр., 54.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 174–181.

**Patutin A.V., Serdyukov S.V.**

### **Formation of anti-seepage screens by hydraulic fracturing in the vicinity of the degassing well**

This article deals with the issues of sealing degassing wells with fractures of hydraulic fractures filled with impermeable composition. Such an anti-filtration screen prevents air filtration from the production into the methane extraction zone in the coal-bed, which allows pumping out the gas mixture with a high methane content. The problem of sealing is particularly relevant in the case of cluster drilling of formation wells, as there is a significant fracture and disturbance of the massif near the drilling chamber. During the research the working fluids for creation of three-component polyurethane composition used to fill the screen were studied, the scheme and the order of their injection were developed. A method for supplying a crack with a loosening material that prevents the closure of its shores and ensures the presence of a drainage channel filled with water under pressure, which does not allow air to enter the degassing well, is considered. The scheme and a General view of the downhole device for creating a fracture across the axis of the well are presented. The device consists of a pressure-type sealing element and a mechanical anchor, made in the form of a split washer. When the working fluid is fed into the isolated interval, the open anchor creates additional tangential loading in the vicinity of the well walls, which leads to a transverse rupture. Laboratory and field tests of the device showed the prospects of the proposed technical solutions.

Key words: insulating composition, methane drainage borehole, sealing, transverse crack, hydraulic fracturing, borehole tool.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-174-181

## AUTHORS

Patutin A.V., PhD in geomechanics, senior researcher, andrey.patutin@gmail.com, Serdyukov S.V., DrSc, Head of the Lab, Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Novosibirsk, Krasnyi ave., 54.

## REFERENCES

1. Lu S., Cheng Y., Ma J., Zhang Y. *Application of In-Seam Directional Drilling Technology for Gas Drainage with Benefits to Gas Outburst Control and Greenhouse Gas Reductions in Daning Coal Mine, China*. Natural Hazards, 2014, Vol. 73, no 3, pp. 1419–1437.
2. Hungerford F., Ren T., Aziz N. *Evolution and application of in-seam drilling for gas drainage*. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, Vol. 23, no 4, pp 543–553.
3. Patent RF no 2108464. Polevshchikov G.Ya., Trizno S.K., Mel'nikov P.N. Sposob germetizacii degazacionnyh skvazhin. 1998. Byul. 31.
4. Serdyukov S.V., Shilova T.V. *Polimernyj izolyacionnyj sostav dlya sozdaniya protivofil'tracionnyh ekranov v porodnom massive* [Polymer insulation composition for the creation of anti-filtration screens in the rock mass]. Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh. 2016. no 4. pp. 196–203.
5. Liu Y., Xia B., Liu X. *A novel method of orienting hydraulic fractures in coal mines and its mechanism of intensified conduction*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, Vol. 27, pp. 190–199.
6. Lekoncev Yu.M., Patutin A.V., Sazhin P.V., Temiryayeva O.A. *Kombinirovannoe ustrojstvo dlya provedeniya napravlennoho gidrorazryva* [Two-side sealing device, combine-based device for conducting directed hydraulic fracturing]. FTPRPI. 2016. no 3. pp. 90–94.
7. Huang B., Yu B., Feng F., Li Z., Wang Y., Liu J. *Field investigation into directional hydraulic fracturing for hard roof in Tashan Coal Mine*. Journal of Coal Science and Engineering, 2013, Vol. 19, no 2, pp. 153–159.
8. Lekoncev Yu.M., Sazhin P.V. *Tekhnologiya napravlennoho gidrorazryva porod dlya upravleniya trudnoobrushayushchimisya krovyami v ochestnyh zaboyah i degazacii ugol'nyh plastov* [Technology of directional hydraulic fracturing of rocks to control trudnoobogatimymi roofs in Stopes and degassing of coal seams]. FTPRPI. 2014. no 5. pp. 137–142.
9. Shilova T.V., Serdyukov S.V. *Zashchita dejstvuyushchih degazacionnyh skvazhin ot postupleniya vozduha iz gornyh vyrabotok* [Protection of existing degassing wells from the flow of air out of mines]. FTPRPI. 2015. no 5. pp. 179–186.
10. Rybalkin L.A., Patutin A.V., Patutin D.V. *Razrabotka tekhnicheskikh sredstv napravlennoho gidrorazryva s kasatel'nyim nagruzheniem stenok skvazhiny* [Development of technical means of directional hydraulic fracturing with tangential loading of borehole walls. Fundamental and applied problems of mining Sciences]. Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornyh nauk. 2017. T. 4. no 2. pp. 275–278.
11. Patutin A.V., Rybalkin L.A., Shilova T.V., Serdyukov S.V. *Ustrojstvo dlya formirovaniya poperechnykh treshchin v shahtnyh usloviyah* [Device for the formation of transverse cracks in mine conditions]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal). 2018. no 3. pp. 75–81.



**В.С. Забурдяев, А.В. Харченко**

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОЧИСТНЫХ ЗАБОВ В МЕТАНООБИЛЬНЫХ ШАХТАХ**

Рассмотрены факторы, влияющие на возникновение опасных по газу и угольной пыли ситуаций на шахтах. Приведены технологические решения для снижения газовыделения в горные выработки, определения газоносности и газоотдачи пластов угля, предотвращения взрывоопасных скоплений газов и пыли, а также прогноза риска взрывов газопылевых смесей.

Ключевые слова: метанообильность, дегазация, взрывоопасные ситуации, параметры разгрузки, технологические решения.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-182-188

Опасные по газу и угольной пыли ситуации в угольных шахтах формируются при определенном сочетании природных, горнотехнических, организационных и социальных факторов. Упомянутые факторы могут действовать одиночно или в их совокупности: возможны взрывы метановоздушных, метанопылевоздушных или гибридных смесей, компонентами которых могут быть метан, сероводород, угольная и пиритная пыль [1–3]. Источниками воспламенения могут быть неисправности электрооборудования, эндогенные возгорания углей, фрикционное искрение при контактах резцов исполнительных органов комбайна с крепкими породами, в том числе при наличии в пластах угля пирита, открытое пламя различного происхождения, курение и прочее. Существенная роль при этом отводится температуре воспламенения компонентов смеси и минимальная энергия их воспламенения (табл. 1 и 2).

Содержание пыли в отбитом угле повышается с ростом метаносности угольного пласта, а взрываемость взвешенной в воздухе пыли снижается в случае присутствия в рудничной атмосфере метана. Каждая шахта или шахтопласт имеют свои особенности, которые должны быть изучены и использованы при прогнозе взрываемости смесей.

Таблица 1

**Температура воспламенения и пределы взрываемости компонентов**

Показатели	Метан	Угольная пыль
Температура воспламенения, °С	650–750	575–850
Минимальная энергия воспламенения, мДж: при 25 °С при 150 °С	0,29 0,17	4,5 40
Период индукции, мс	2	40–280
Пределы взрываемости концентраций: по объему по массе, г/м <sup>3</sup>	5,3–14 –	– 5–3000

Таблица 2

**Минимальная энергия воспламенения компонентов гибридных смесей**

Газ, вещество	Формула	Энергия разрыва связей, кДж/моль	Нижний предел воспламенения, %	Минимальная энергия воспламенения, мДж
Метан	CH <sub>4</sub>	440	5,3	0,29
Метанол	CH <sub>4</sub> O	364	7,3	0,14
Водород	H <sub>2</sub>	435	4,0	0,01
Оксид углерода	CO	720	12,5	–
Сероводород	H <sub>2</sub> S	340	4,3	–

Технологические решения и средства для предотвращения условий формирования взрывоопасных смесей в угольных шахтах включают эффективные мероприятия по снижению интенсивности метановыделения в горные выработки, интенсивности пылеобразования в процессе разрушения угля резцами исполнительных органов комбайна и пылеотложения в выработках и выработанных пространствах. Часть этих мероприятий изложена в нормативных отраслевых документах [4–6] и отражена в патентах России на изобретения (Патенты РФ №№ 2524860, 2536544, 2610600).

Особая роль в совершенствовании технологических решений по предотвращению взрывоопасных ситуаций в угольных шахтах отводится способам прогноза [7, 8], в которых используются показатели загазирования выработок на базе статистических данных, воспламенения метанопылевоздушных смесей и их взрываемости (патенты РФ на изобретения №№ 2523482, 2541970, 2543238), а также способам прогноза риска взрывов метана и пыли, гибридных смесей (Патенты РФ №№ 2528807, 2536544).

Новые технологические решения на уровне изобретений для прогноза взрывоопасных ситуаций в угольных шахтах, оценки рисков от взрывов метановоздушных, метанопылевоздушных и гибридных смесей, назначение и область применения новых технологий в шахтах приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Группа патентов РФ на изобретения**

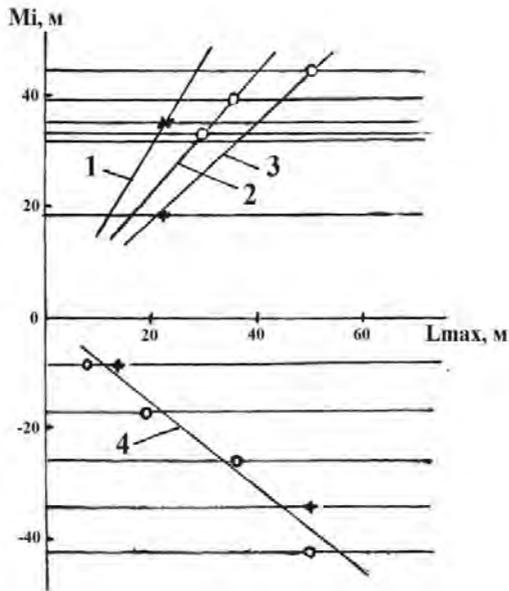
<b>Группа патентов на изобретения</b>	<b>Патенты РФ</b>	<b>Назначение</b>	<b>Эффект от использования изобретений</b>
1	2512049 2516674 2533479 2565311	Снижение газовой выработки в горные выработки	Повышение эффективности и безопасности ведения очистных работ по газовому фактору
2	2553121 2557022	Определение газонасыщенности и газоотдачи пластов угля	Повышение достоверности исходных данных
3	2541970 2569352 2584023	Предотвращение взрывоопасных скоплений газов и пыли	Повышение безопасности ведения очистных работ по факторам газа и пыли
1	2	3	4
4	2524860 2527096 2528807 2533482 2536544 2543238	Прогноз риска взрывов газопылевых смесей	Снижение вероятности опасных скоплений газов и пыли и их взрывов в шахтах

Весьма важная роль в обеспечении высокопроизводительной и безопасной по газу работы очистных забоев в шахтах отводится дегазации основных источников метановыделения, в числе которых разрабатываемые, сближенные подрабатываемые и надрабатываемые пласты угля, выработанные пространства действующих и ранее отработанных участков [4, 9]. Высокие скорости подвигания очистных забоев вносят коррективы в параметры дегазации угленосных толщ, поскольку степень их разгрузки от горного давления иная.

Имеющиеся в отраслевых нормативных документах РФ рекомендации по определению метанообильности выемочных участков не соответствуют новым условиям высоких скоростей подвигания лав. Скоростное ведение очистных работ существенно влияет на границы зон разгрузки и степень дегазации углепородного массива. Актуальным является изучение условий и обоснование параметров естественной дегазации пластов угля, обусловленной разгрузкой пород кровли

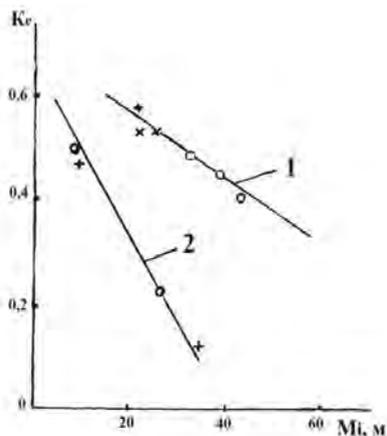
и почвы от горного давления, а также параметры искусственной дегазации, осуществляемой путем бурения скважин и подключения их к вакуумной системе шахты [10, 11].

Исследования выполнены на шахтах Кузбасса, Воркуты и Караганды при скоростях подвигания лав 2,5, 9,5 и 13,8 м/сутки, в интервале подработки угольных пластов 20–45 м и надработки – 10–42 м. Зависимости местоположения максимальных величин метановыделения в дегазационные скважины, пробуренные на подрабатываемые и надрабатываемые пласты угля, при упомянутых величинах междупластья и скоростях подвигания лав, а также степень естественной дегазации углепородных массивов, расположенных в кровле и почве отработываемого пласта показаны на рис. 1 и 2. Угол наклона прямых 1–4, характеризуемый коэффициентом к оси абсцисс (см. рис. 1), позволяет устанавливать местоположение зон максимального газовыделения в дегазационные скважины из сближенных пластов угля. Местоположение этих зон допустимо на практике рассчитывать отношением расстояния ( $L_{max}$ ) от линии очистного забоя до зоны максимального метановыделения в скважины к величине междупластья ( $M_i$ ).



Пласты: о — Кузбасса, + — Воркуты, х — Караганды

**Рис. 1. Зависимость  $L_{max}$  от междупластья  $M_i$  при различных скоростях подвигания лав**



**Рис. 2. Зависимость коэффициента естественной дегазации  $K_e$  угольных пластов от величины междупластья  $M$ ; 1 – подработка; 2 – надработка**

Установлены предельные зоны, степень разгрузки и дегазации углепородных массивов, что позволило уточнить параметры дегазации сближенных пластов угля подземными скважинными, предложить новые способы дегазации, признанные Роспатентом изобретениями (патенты РФ № 2569352, 2584023, 2646642). Новизна их заключается в научном обосновании зон дегазирующего влияния очистных работ на процессы разгрузки и дегазации сближенных пластов угля, на производительность очистных забоев по газовому фактору. При этом термины и их графическое изображение соответствуют Инструкции по дегазации угольных шахт (4).

Научно обоснованные способы и параметры дегазации сближенных угольных пластов скважинами при высоких скоростях продвижения лав позволят повысить эффективность технологических решений по обеспечению высоких нагрузок на лавы и снижению аварийности по газовому фактору.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шахтный метан: проблемы извлечения и утилизации / В.С. Забурдаев, В.Н. Захаров, В.Б. Артемьев и др. – М.: «Горное дело», 2014. – 256 с.
2. Ajay K. Singh, Jaywardhan Kumar. Fugitive Methane Emissions from Indian Coal Mining and Handling Activities: Estimates, Mitigation and Opportunities for its Utilization to Generate Clean Energy / Energy Procedia, Volume 90, December 2016, pp. 336–348.
3. Sujoy Chattaraj, Debadutta Mohanty, Tarkeshwar Kumar, Gopinath Halder. Thermodynamics, kinetics and modeling of sorption behaviour of coalbed meth-

ane – A review / Journal of Unconventional Oil and Gas Resources, Volume 16, December 2016, pp. 14–33.

4. Инструкция по дегазации угольных шахт. Серия 05. Выпуск 22. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем промышленной безопасности», 2012. – 250 с.

5. Руководство по борьбе с угольной пылью в угольных шахтах,. М.: Недра, 1979. – 320 с.

6. Инструкция по применению схем проветривания выемочных участков угольных шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства с помощью газоотсасывающих установок. – Серия 05. – Выпуск 18. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2012. – 152 с.

7. Ищук И.Г., Трубицина Н.В. и др. Совершенствование технологии борьбы с пылью для высокопроизводительной и безопасной выемки пыльных и весьма пыльных пластов // Научн. Сообщ. ННЦ ГП-ИГД им. А.А. Скочинского, 2002, Вып. №121. – С. 168–181.

8. Брабандер С.П., Костеренко В.Н., Палеев Д.Ю. Недостатки применения комбинированного способа проветривания. – Кемерово: ВостКузГТУ, 2006. - №2(53). – С. 9–12.

9. C. Özgen Karacan, Felicia A. Ruiz, Michael Cotè, Sally Phipps. Coal mine methane: A review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction / International Journal of Coal Geology, Volume 86, Issues 2–3, 1 May 2011, pp. 121–156.

10. Забурдяев В.С. Эффективность дегазации угольных пластов при высоких скоростях подвигания лав. / Безопасность труда в промышленности, 2015. - №4 – С. 26–29.

11. Забурдяев В.С., Подображин С.Н., Скатов В.В. Условия и причины формирования в шахтах взрывоопасных по газу и пыли ситуаций. / Безопасность труда в промышленности, 2017. – №3. – С. 65–68. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Забурдяев Виктор Семенович* – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ИПКОН РАН,

*Харченко Анна Викторовна* – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник ИПКОН РАН, e-mail: av-kharchenko@yandex.ru, тел. 8-495-360-07-35, 8-916-623-46-40.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 182–188.

**Zaburdyayev V.S., Kharchenko A.V.**

## **Technological solutions to ensure the high productivity of breakage faces in methane mines**

The factors influence to the beginning of gas and coal dust hazard situations in mines are considered. Technological solutions are given to reduce gas emissions in mining,

determine the gas content and gas recovery of coal seams, prevent explosive gas and dust accumulations, and predict the risk of gas-dust mixture explosions.

Keywords: methane content, degassing, explosive situations, technological solutions.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-182-188

## AUTHORS

Zaburdyaev V.S., Kharchenko A.V., Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Russia.

## REFERENCES

1. Zaburdyaev V.S., Zaharov V.N., Artem'ev V.B. i dr. *Shahitnyj metan: problemy izvlecheniya i utilizacii* [Coal mine methane: problems of extraction and utilization]. Moscow: «Gornoe delo», 2014. 256 p.

2. *Instrukciya po degazacii ugol'nyh shaht* [Manual for the degassing of coal mines]. Seriya 05. Vypusk 22. Moscow: ZAO «NTC issledovanij problem promyshlennoj bezopasnosti», 2012. 250 p.

3. *Rukovodstvo po bor'be s ugol'noj pyl'yu v ugol'nyh shahtah* [Guide to combating coal dust in coal mines]. Moscow: Nedra, 1979. 320 p.

4. Ishchuk I.G., Trubicina N.V. i dr. *Sovershenstvovanie tekhnologii bor'by s pyl'yu dlya vysokoproizvoditel'noj i bezopasnoj vyemki pyl'nyh i ves'ma pyl'nyh plastov* [Improvement of dust control technology for high-performance and safe excavation of dusty and very dusty layers]. Nauchn. Soobshch. NNC GP-IGD im. A.A. Skochinskogo, 2002, Vyp. no 121. pp. 168–181

5. Brabander S.P., Kosterenko V.N., Paleev D.Yu. *Nedostatki primeneniya kombinirovannogo sposoba provetrivaniya* [Disadvantages of the combined method of ventilation]. Kemerovo: VostKuzGTU, 2006. no 2(53). pp. 9–12.

6. Zaburdyaev V.S. *Effektivnost' degazacii ugol'nyh plastov pri vysokih skorostyah podviganiya lav* [Efficiency of degassing of coal seams at high rates of movement of lavas]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2015. no 4. pp. 26–29.

7. Zaburdyaev V.S., Podobrazhin S.N., Skatov V.V. *Usloviya i prichiny formirovaniya v shahtah vzryvoopasnyh po gazu i pyli situacij* [Conditions and causes of formation in the mines of explosive gas and dust situations]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2017. no 3. pp. 65–68.

8. Brabander S.P., Kosterenko V.N., Paleev D.Yu. *Nedostatki primeneniya kombinirovannogo sposoba provetrivaniya* [Disadvantages of the combined method of ventilation]. Kemerovo: VostKuzGTU, 2006. no 2(53). pp. 9–12.

9. C. Özgen Karacan, Felicia A. Ruiz, Michael Cotè, Sally Phipps. *Coal mine methane: A review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction*. International Journal of Coal Geology, Volume 86, Issues 2–3, 1 May 2011, pp. 121–156.

10. Zaburdyaev V.S. *Effektivnost' degazacii ugol'nyh plastov pri vysokih skorostyah podviganiya lav* [Efficiency of degassing of coal seams at high rates of movement of lavas]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2015. no 4. pp. 26–29.

11. Zaburdyaev V.S., Podobrazhin S.N., Skatov V.V. *Usloviya i prichiny formirovaniya v shahtah vzryvoopasnyh po gazu i pyli situacij* [Conditions and causes of formation in the mines of explosive gas and dust situations]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2017. no 3. pp. 65–68.



В.А. Бобин

## ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ НЕРАЗГРУЖЕННЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ДЛЯ ДОБЫЧИ ИЗ НИХ МЕТАНА

Перспективные для промышленной добычи метана метаноугольные месторождения представляют собой мощные углевлещающие толщи с большим количеством высокогазоносных угольных пластов и пропластков.

Заблаговременное извлечение метана из неразгруженных угольных пластов возможно при изменении их физико-механических, термодинамических и фильтрационных свойств. Для их реализации используются природоподобные и техногенные технологии, основная задача которых состоит в значительном увеличении природной проницаемости неразгруженных угольных пластов.

Показано, что природоподобные технологии увеличения проницаемости неразгруженных угольных пластов для добычи из них метана позволят с помощью систем как коллинеарных, так и компланарных горизонтальных скважин не только увеличить проницаемость этих угольных пластов в сотни раз по сравнению с природной, но и обеспечить промышленный дебита метана на уровне  $5 \text{ м}^3/\text{с}$ .

В свою очередь предлагаемые техногенные технологии увеличения проницаемости угольного пласта, а именно: технология вибровоздействия с частотой 10–100 Гц на добычную зону газонасыщенного угольного пласта пульсирующим гидродинамическим воздействием через искусственно созданные трещины гидроразрыва, а также технология формирования зоны перетока между частями пласта для повышения гидродинамической связи между горизонтальными скважинами, пробуренными по пласту увеличивают проницаемость пласта в 3–10 раз.

Ключевые слова: природоподобные и техногенные технологии, фильтрация, проницаемость, неразгруженные угольные пласты, добыча угольного метана

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-189-197

### Введение

Перспективные для промышленной добычи метана метаноугольные месторождения представляют собой мощные углевлещающие толщи с большим количеством высокогазоносных угольных пластов и пропластков.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 189–197.

© В.А. Бобин, 2018.

Заблаговременное извлечение метана из неразгруженных угольных пластов возможно при изменении их физико-механических, термодинамических и фильтрационных свойств. Для их реализации используются природоподобные и техногенные технологии, основная задача которых состоит в значительном увеличении природной проницаемости неразгруженных угольных пластов.

Основные положения концепции промышленного извлечения метана из угольных пластов сформулированы в трудах К.Н. Трубецкого, В.В. Гурьянова, Л.А. Пучкова и других исследователей [1–3].

### **Основная часть**

В ИПКОН РАН разработаны природоподобные технологии повышения проницаемости угольного пласта для заблаговременного извлечения метана из неразгруженных пластов. Наиболее перспективной технологией из них является технология, использующая горизонтальные скважины (ГС) [4–6].

Идея этого направления исследований заимствована в природе, где фильтрация метана из угольных пластов происходит вдоль трещин различного размера и направлений, которые образуются в пластах в результате сдвижения горного массива, что нарушает сплошность пластов с образованием тектонических нарушений различной интенсивности.

В этом смысле ГС являются магистральными трещинами, вокруг которых под действием природных сил формируются разветвленные ветви трещин меньшего размера, что резко увеличивают проницаемость пласта, и в этом смысле технологии их формирования можно назвать природоподобным. Система ГС формируется с помощью технологии бурения по радиусам [4].

Механизм дегазирующего влияния горизонтальных скважин связан с образованием зоны неупругих деформаций, где пористость угля увеличивается по отношению к природной, возрастает газопроницаемость пласта, что повышает скорость десорбции метана из этой зоны. За ней вглубь массива идет зона упругих деформаций, в которой перемещение метана происходит по макропорам и макротрещинам, и их наличие способствует движению газа в опережающую скважину.

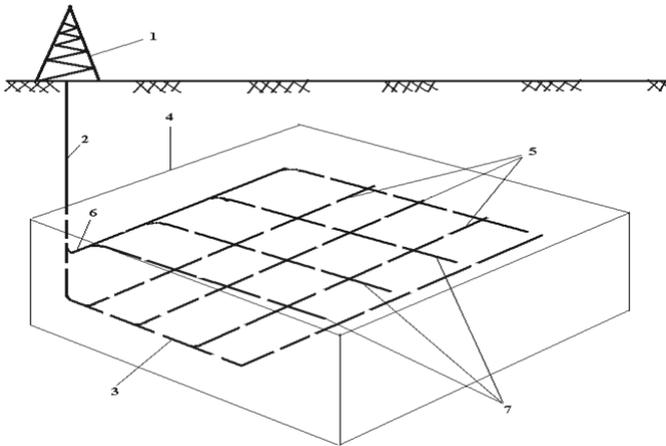
Общим свойством для этих зон является то, что в них нарушена целостность угольного пласта под действием энергии межмолекулярного отталкивания молекул метана, которая выражается сначала в разрыве связей между структурными элементами угольного вещества на микроуровне, а затем и в нарушении макроструктуры угля [7–8]. Для оценки проницаемости используется метод замера скорости газовыделения в скважину [9–11].

Характер изменения проницаемости угольного пласта с углублением в него от поверхности скважины описывается кубической параболой,

параметры которой определяются природная проницаемость пласта ( $5 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-5}$  мД), газопроницаемость пласта на поверхности обнажения в выработке ( $\lambda_0$ ), текущим значением радиуса от поверхности цилиндрической скважины вглубь угольного пласта. Расчеты дают значения для  $\lambda_0 = 6,3$  мД,  $R_{эфф} = 5$  м [10]. При этом начальное значение дебита метана из объема угля в скважину около  $1$  м<sup>3</sup>/с. Поэтому для обеспечения дебита метана, имеющего промышленное значение и составляющего  $5$  м<sup>3</sup>/с необходимо задействовать систему горизонтальных коллинеарных скважин.

Можно ожидать, что увеличение проницаемости для неразгруженных угольных пластов при коллинеарном расположении ГС составит почти три порядка величины. т.е. увеличится вокруг горизонтальной скважины почти в тысячу раз – с  $5 \times 10^{-3}$  мД до  $6,3$  мД.

В свою очередь природоподобная технология повышения проницаемости угольного пласта для добычи угольного метана из неразгруженных пластов, использующая систему компланарных ГС (рис.1), рационально использовать в таких случаях, когда неизвестна ориентация трещин квиважа в угольном пласте [5].



**Рис. 1. Схема реализации природоподобной технологии повышения проницаемости угольного пласта для добычи метана из неразгруженного угольного пласта с использованием компланарных ГС: 1 — буровая вышка, 2 — вертикально-восходящий ствол, 3 — первый горизонтальный ствол, 4 — угольный пласт, 5 и 7 — сеть скважин, 6 — второй горизонтальный ствол.**

Система компланарных скважин разбивает продуктивную в отношении метана область угольного пласта на два равновеликих объема. В каждом из них создана система параллельных горизонтальных скважин, являющихся для каждого отдельного объема угольного пласта

системой коллинеарных скважин. При этом для каждого объема угольного пласта значение коэффициента газопроницаемости определяется по выше приведенной методике, а коэффициент газопроницаемости всего угольного пласта определится как среднее арифметического значение полученных коэффициентов газопроницаемости для каждого отдельного объема.

Таким образом, природоподобные технологии увеличения проницаемости неразгруженных угольных пластов для добычи из них метана позволят с помощью систем как коллинеарных, так и компланарных ГС не только увеличить проницаемость этих угольных пластов в сотни раз по сравнению с природной, но и обеспечить промышленный дебита метана на уровне  $5 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Заблаговременное извлечение метана из неразгруженных угольных пластов возможно при изменении их физико-механических, термодинамических и фильтрационных свойств [12–13]. Для их реализации применяют техногенные воздействия с использованием гидродинамических систем, что отличает их от природоподобных технологий. В ИПКОН РАН разработаны две такие технологии для применения в Кузбассе [4–6].

Например, на рис. 2 представлена схема систем вибровоздействия (9,10) с частотой 10–100 Гц на добычную зону газонасыщенного угольного пласта (12) пульсирующим гидродинамическим воздействием через искусственно созданные трещины гидроразрыва (7,8)[5].

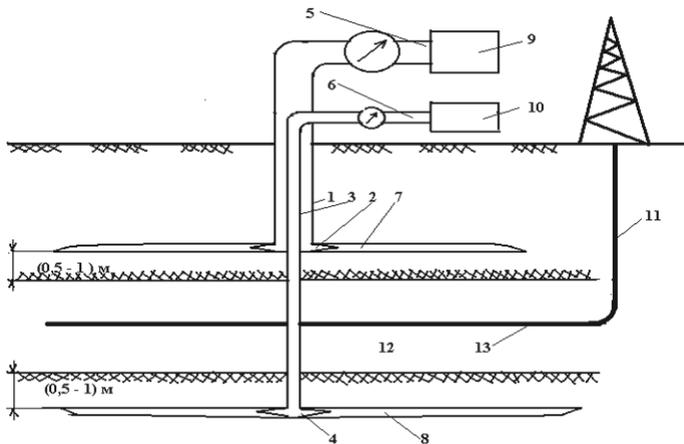


Рис. 2

Такую схему вскрытия угольного месторождения и добычи метана можно эффективно использовать, например, добыче метана из угленосных отложений Ускацкого района Кузбасса.

Проращение макропор-трещин происходит за счет десорбции метана в них из так называемого «жизненного пространства», которое окружает каждую макропору, в тот момент, когда давление в ней в результате циклов разгрузки и нагрузки при гидродинамическом воздействии не превышает значения, определяемого теорией трещин Гриффитса [14]. Результаты расчетов показали, что объем «жизненного пространства» для макропор радиусом  $10^{-4}$  м и толщиной  $1,5 \times 10^{-6}$  м оценивается величиной  $V_{\text{жпр}} = 0,146 \times 10^{-12}$  м<sup>3</sup>, а макропор радиусом  $10^{-3}$  м толщиной  $1,5 \times 10^{-6}$  м —  $V_{\text{жпр}} = 14,6 \times 10^{-12}$  м<sup>3</sup>, что на два порядка величины больше, чем объем «жизненного пространства» вокруг мелких макропор. Количество метана, находящегося в соответствующем «жизненном пространстве», а также его масса (m) равны соответственно  $5,84 \times 10^{-12}$  м<sup>3</sup>,  $4,2 \times 10^{-12}$  кг и  $5,84 \times 10^{-10}$  м<sup>3</sup>,  $4,2 \times 10^{-10}$  кг.

Кроме того, расчеты, проведенные в соответствие с теорией Гриффитса, дают для прочных газонасыщенных углей с  $E = 10 \times 10^3$  МПа значение  $\sigma_{\text{разр}} = 57,8$  МПа. В свою очередь для малопрочных газонасыщенных углей с  $E = 10^3$  МПа получим значения  $\sigma_{\text{разр}} = 5,8$  МПа. Сравнение этих величин с величиной давления метана в макропоре, полученном по истечении 80 циклов разгрузки-сжатия угольного пласта и равном  $P = 4,48$  МПа = 44,8 атм, показывает, при выбранных технических параметрах вибровоздействия интенсивное развитие макропор-трещин вполне вероятно для малопрочных газонасыщенных угольных пластов, имеющих модуль  $E = 10^3$  МПа и коэффициент поверхностного натяжения  $\gamma = 2,4$  Н/м.

Для эффективного использования гидровоздействия на прочные угольные пласты необходимо, во-первых, увеличить длительность цикла разгрузки сжатия, что позволит, во-вторых, интенсифицировать процесс закачивания метана в макропору, и таким образом, в-третьих, увеличить давление в ней за каждый цикл, что значительно сократит число этих циклов, чтобы достигнуть достаточных расчетных величин давления, составляющих порядка 200 атм.

В результате гидровоздействия, когда в процессе цикла разгрузка-сжатие будет достигнуто давление метана в макропоре, превышающее  $\sigma_{\text{разр}}$  тогда произойдет скачкообразный двукратный рост длины трещины. Это приведет к значительному росту и трещинной проницаемости, которая составит  $K_T = 0,29 - 0,46$  мД, т.е. в результате гидровоздействия трещинная проницаемость угольных пластов независимо от их прочностных свойств может быть увеличена в 3—10 раз, что естественно приведет к интенсификации метановыделения в добычные скважины.

Примером следующей техногенной технологии увеличения проницаемости неразгруженных угольных пластов является технология, в которой реализуется идея формирования зоны перетока между частями пласта для повышения гидродинамической связи между горизонтальными скважинами, пробуренными по пласту [15]. Эта зона

создается с помощью устойчивой система сквозных вертикальных трещин, которые вместе с трещинами гидроразрыва в породах почвы и кровли пласта формируют обширное газопроницаемое пространство,

Иницирующие полости создают (2,3), а трещины гидроразрыва (6,7) одновременно формируют соответственно в породах почвы и кровли угольного пласта на расстоянии, равном 0,1 м, где  $m$ -мощность пласта. Вторичные иницирующие полости (8,9) образуются через трещины гидроразрыва и ориентируются в вертикальной плоскости сечения пласта. С их помощью в единую гидродинамическую систему соединяют между собой трещины гидроразрыва, сформированные в породах почвы и кровли и горизонтальные скважины, пробуренные по пласту (рис. 3).

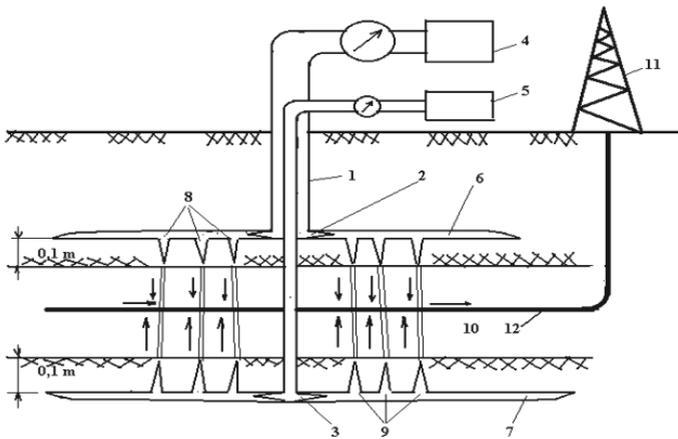


Рис. 3

Таким образом, в результате создания трещин гидроразрыва в породах почвы и кровли угольного пласта в пространстве будет сформирован объем, который при виде на него сверху похож на цилиндр с неправильной боковой поверхностью, пронизанный вертикальными трещинами.

Дальнейшее циклическое гидровоздействие повышает проницаемость угольных пластов в плоскости их поперечного сечения независимо от их прочностных свойств в 3–10 раз, а формирование системы сквозных вертикальных трещин в угольном пласте приводит к существенному увеличению (на порядок величины и более) проницаемости и коэффициента фильтрации угольного пласта в вертикальной плоскости, что интенсифицирует газодинамическую связь между его частями, расположенными в кровле и почве, и позволяет характеризовать угольный пласт в вертикальной плоскости, как развитую фильтрационную систему.

## Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

Природоподобные технологии увеличения проницаемости неразгруженных угольных пластов для добычи из них метана позволяют с помощью систем как коллинеарных, так и компланарных горизонтальных скважин не только увеличить проницаемость этих угольных пластов в сотни раз по сравнению с природной, но и обеспечить промышленный дебита метана на уровне 5 м<sup>3</sup>/с.

Предложенные техногенные технологии увеличения проницаемости угольного пласта, а именно: технология вибровоздействия с частотой 10–100 Гц на добычную зону газонасыщенного угольного пласта пульсирующим гидродинамическим воздействием через искусственно созданные трещины гидроразрыва, а также технология формирования зоны перетока между частями пласта для повышения гидродинамической связи между горизонтальными скважинами, пробуренными по пласту увеличивают проницаемость пласта в 3–10 раз, что обеспечивает высокий коэффициент дегазации угольного пласта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубецкой К.Н. и др. О развитии исследований и разработок по вопросам добычи метана угольных пластов, ГИАБ, 1996, вып.4, с.13–18.
2. Гурьянов В.В. и др. «Использование скважин с горизонтальным окончанием ствола – перспективное направление промысловой добычи газа из неразгруженных угольных пластов» ГИАБ №5. 2001, с. 77–80.
3. Пучков Л.А., Сластунов С.В., Коликов К.С. Извлечение метана из угольных пластов. М., Изд-во МГГУ, 2002, 383 с.
4. Патент РФ № 2211308 «Способ вскрытия угольного пласта для добычи метана». Трубецкой К.Н. и др. Бюл. № 24, 2003.
5. Патент РФ № 2211322 «Способ вскрытия углеводородсодержащих пластов». Трубецкой К.Н. Гурьянов В.В. и др. Бюл. № 24, 2003.
6. Патент РФ № 2211323 «Способ добычи угольного метана из неразгруженных пластов». Бобин В.А., Бобин А.В. Бюл. № 24, 2003.
7. Зимаков Б.М., Одинцев В.Н. и др. Оценка энергии межмолекулярного отталкивания молекул сорбата в микропорах угля. ФТПРПИ, №5, 1989, С.52–59.
8. Зимаков Б.М., Одинцев В.Н., Эттингер И.Л. и др. Модель опережающего разрушения угольного массива при выбросах угля и газа. Тезисы докладов. Симферополь, 1987, с.12.
9. Кузнецов С.В., Кригман Р.Н. Природная проницаемость угольных пластов. М., «Наука», 1978, 122 с.
10. Айруни А.Т. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах. М., «Наука», 1986, 300 с.
11. Бобин В.А. Сорбционные процессы в природном угле и его структура. ИПКОН АН СССР, 1987, 135 с.

12. *Ножкин Н.В.* Заблаговременная дегазация угольных месторождений. М., «Недра», 1979, 346 с.

13. *Васючков Ю.Ф.* Физико-химические способы дегазации угольных пластов. М., Недра», 1986, 255 с.

14. *Бобин В.А.* Оценка параметров волнового воздействия на микро- и макроструктурные образования в газонасыщенном угольном веществе с целью интенсификации добычи угольного метана». В сб. трудов Международной научно-практич. конф. «Метан угольных пластов Украины» . г.Днепропетровск, 1999 ,с. 79–84.

15. Патент РФ №1627673, кл.Е 21 В 43/00. Бюл. № 6, 1991. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Бобин В.А.* — доктор технических наук, заведующий отделом, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук, 111020, Москва, Крюковский тупик, 4, bobin\_va@mail.ru.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 189–197.

**Bobin V.A.**

### **Effective technologies to improve permeability coal seam stressed for extraction of methane**

Promising for fishing metanougolnye methane deposits constitute a powerful coal-containing strata with lots of vysokogazonosnyh coal seams and interlayers.

Advance extraction of methane from coal seams stressed perhaps if you change their physico-mechanical, thermodynamic, and filtration properties. Prirodopodobnyye are used for their realization and man-made technologies, whose main task is to significantly increase the natural permeability of the coal seams stressed.

It is shown that prirodopodobnyye technology increases the permeability of the coal seams stressed for the extraction of methane from them will using both systems collinear and coplanar horizontal wells not only increase the permeability of these coal seams hundreds of times in comparison with the natural, but also provide industrial methane 5 level flow m<sup>3</sup>/s.

In turn proposed man-made technologies of increasing permeability coal seam, namely vibration compacting technology with frequency 10–100 Hz in the mining area coal seam out pulsating hydrodynamic impact through artificial fracture, as well as technology transfer zone formation between parts of the reservoir to improve hydrodynamic link between horizontal wells, bored on reservoir permeability increase in 3–10 times.

Keywords: prirodopodobnyye and man-made technology, filtering, permeability, nerazgruzhennyye coal seams, coal bed methane extraction.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-189-197

## **AUTHORS**

*Bobin V.A.*, doctor of technical sciences, head of Department, Federal State budgetary institution of Science Institute for the integrated development of the

## REFERENCES

1. Trubeckoj K.N. i dr. *O razvitii issledovanij i razrabotok po voprosam dobychi metana ugol'nyh plastov* [Development of research and development on coalbed methane production], GIAB, 1996, vyp.4, pp. 13–18.
2. Gur'yanov V.V. i dr. *Ispol'zovanie skvazhin s gorizontalnym okonchaniem stvola – perspektivnoe napravlenie promyslovoj dobychi gaza iz nerazgruzhennyh ugol'nyh plastov* [The use of wells with a horizontal end of the trunk is a promising direction of commercial gas production from unloaded coal seams]. GIAB no 5. 2001, pp. 77–80.
3. Puchkov L.A., Slastunov S.V., Kolikov K.S. *Izvlечение метана из угольных пластов* [Extraction of methane from coal seams]. Moscow, Izd-vo MGGU, 2002, 383 p.
4. *Patent RF № 2211308* «Sposob vskrytiya ugol'nogo plasta dlya dobychi metana». Trubeckoj K.N. i dr. Byul. no 24, 2003.
5. *Patent RF № 2211322* «Sposob vskrytiya uglevodorodsoderzhashchih plastov». Trubeckoj K.N. Gur'yanov V.V. i dr. Byul. no 24, 2003.
6. *Patent RF № 2211323* «Sposob dobychi ugol'nogo metana iz nerazgruzhennyh plastov». Bobin V.A., Bobin A.V. Byul. no 24, 2003.
7. Zimakov B.M., Odincev V.N. i dr. *Ocenka energii mezhmolekulyarnogo ottalkivaniya molekul sorbata v mikroporah uglja* [Evaluation of the intermolecular repulsion of the molecules of sorbate in the micropores of coal]. FTPRPI, no 5, 1989, pp. 52–59.
8. Zimakov B.M., Odincev V.N., Ettinger I.L. i dr. *Model' operezhayushchego razrusheniya ugol'nogo massiva pri vybrosah uglja i gaza* [Model for faster destruction of the coal array with emissions of coal and gas]. Tezisy dokladov. Simferopol', 1987, 12 p.
9. Kuznecov S.V., Krigman R.N. *Prirodnaya pronicaemost' ugol'nyh plastov* [Natural permeability of coal seams]. Moscow, «Nauka», 1978, 122 p.
10. Ajruni A.T. *Prognozirovanie i predotvrashchenie gazodinamicheskikh yavlenij v ugol'nyh shahtah* [Prediction and prevention of gas-dynamic phenomena in coal mines]. Moscow, «Nauka», 1986, 300 p.
11. Bobin V.A. *Sorbcionnye processy v prirodnom ugle i ego struktura* [Sorptions processes in natural coal and its structure]. IPKON AN SSSR, 1987, 135 p.
12. Nozhkin N.V. *Zablagovremennaya degazaciya ugol'nyh mestorozhdenij* [Advance degassing of coal deposits]. Moscow, «Nedra», 1979, 346 p.
13. Vasyuchkov Yu.F. *Fiziko-himicheskie sposoby degazacii ugol'nyh plastov* [Physico-chemical methods of degassing of coal seams]. Moscow, Nedra», 1986, 255 p.
14. Bobin V.A. *Ocenka parametrov volnovogo vozdeystviya na mikro- i makrostrukturnye obrazovaniya v gazonasasyshchennom ugol'nom veshchestve s cel'yu intensivnizacii dobychi ugol'nogo metana* [Estimation of parameters of wave action on the micro- and macrostructure formation in gas-saturated coal substance with the purpose of enhanced recovery of coalbed methane]. V sb. trudov Mezhdunarodnoj nauchno-praktich. konf. «Metan ugol'nyh plastov Ukrainy». g. Dnepropetrovsk, 1999. pp. 79–84.
15. *Patent RF №1627673*, kl.E 21 V 43/00. Byul. № 6, 1991.



В.П. Денисенко

## ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗА МЕТАНООБИЛЬНОСТИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Рассмотрены методы прогнозирования и выявлены их достоинства и недостатки при прогнозе метанообильности горных выработок действующего выемочного участка угольных шахт. Предложен текущий прогноз выделения метана в горные выработки с использованием моделирования за счет применения искусственного интеллекта.

Ключевые слова: угольная шахта, выемочный участок, метан, текущий прогноз, нейросети.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-198-207

Основным моментом при принятии решений в управлении горными работами, с учетом метанового фактора, является текущее прогнозирование аэрогазового состояния атмосферы горных выработок выемочного участка. Конечная эффективность таких решений зависит от последовательности событий, возникающих уже после их принятия. Возможность предсказать неуправляемые аспекты этих событий перед принятием решения об интенсификации процесса выемки угля позволяет сделать правильный выбор, поэтому системы управления, обычно, реализуют функцию прогноза.

При всем принципиальном отличии направлений, прогнозирования объединяет единая цель – определение характера протекания процесса в будущем. Множество методов решения задачи прогнозирования имеет одну общую идею: обнаружение связей между прошлым и будущим, между информацией о процессе в контролируемый период времени и характером протекания процесса в дальнейшем. От того, насколько точно описаны исследуемые связи, будет зависеть точность прогнозирования.

Успешность прогнозирования зависит от объема и качества информации о прогнозируемом процессе, объекте управления; правильности формулирования задачи прогнозирования и обоснованности выбора способа ее решения; наличия необходимых вычислительных средств и вычислительного аппарата в соответствии с выбранным методом.

Современные технологии прогнозирования основаны на использовании различных математических теорий: функциональный анализ, теория рядов, теория экстраполяции и интерполяции, теория вероятности, математическая статистика, теория случайных функций и случайных процессов, корреляционный анализ, теория распознавания образов. Чтобы обосновать выбор того или иного средства прогнозирования, необходимо иметь возможность количественно оценить его качество.

Задачи моделирования и прогнозирования процессов, относящихся к различным областям исследований, давно обсуждаются на междисциплинарном уровне. Исследователи все чаще пытаются применить методы из области физики и математики для изучения различных проблем технологических процессов.

Отсутствие в настоящее время методических подходов и современных инструментальных средств проведения адекватно текущего прогнозирования метановыделения в горные выработки угольных шахт определяет актуальность работы.

Анализ последних достижений и публикаций указывает на многочисленные попытки решения проблемы текущего прогнозирования метановыделения в горные выработки угольных шахт различными математическими методами. Применение таких методов как разложение ряда метановыделения на составляющие [1], использование нейросетей для анализа и прогноза состояния атмосферы горных выработок [2, 3, 4], использование принципов синергетического подхода [5], автоматическое оперативное прогнозирование [6], использование элементов теории Хаоса и метода Singular Spectrum Analysis [7, 8] позволяет прогнозировать процесс метановыделения в горные выработки с определенными допущениями и не учитывает реальное время протекания технологического процесса.

Цель исследования – выбор метода прогнозирования адекватно предсказывающего текущее значение метанообильности выработок действующего выемочного участка.

Задачи исследования:

- провести анализ методов, применяемых для прогнозирования метанообильности выработок;
- выделить наиболее эффективные методы для прогнозирования процесса метановыделения.

На сегодняшний день существует большое количество методов анализа процессов, обладающих динамическими и нестационарными свойствами, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. В виду того, что процесс метановыделения обладает отмеченными свойствами применение классических методов анализа для его исследования затруднено. Использование таких методов как анализ Фурье, регрессионный анализ или вейвлет-анализ, в основе которых лежит разложение исходной функции в ряд по фиксированной системе

базисных функций, приводит к получению модели с периодическими составляющими. Это противоречит структуре реального процесса метановыделения, в силу того, что процесс метановыделения связан с неравномерностью физических и технологических процессов, протекающих при ведении горных работ. В отличие от спектрального анализа для АРПСС или метода экспоненциального сглаживания [9] длина сезонных компонент обычно известна (или предполагается) заранее и затем включается в некоторые теоретические модели скользящего среднего или автокорреляции.

Для решения задачи разложения ряда на аддитивные компоненты, такие как тренд, колебания и шум используется метод SSA (Singular Spectrum Analysis), основанный на динамической модификации метода главных компонент. Для одномерного ряда базовый метод SSA состоит в преобразовании исходного ряда в многомерный. Путем построения траекторной матрицы, ее последующем сингулярном разложении, выделении значимых компонент и дальнейшем восстановлении, основанном на группировке и диагональном усреднении [10]. Достоинством метода SSA является отсутствие требования априорного задания модели ряда, а также возможность выделения гармонических составляющих с изменяющимися амплитудами и частотами, что выгодно отличает его от методов, в основе которых лежит метод Фурье.

Недостаток метода SSA заключается в математической сложности его реализации. Также недостатком метода, ограничивающим возможности его применения, является предположение о линейности модели исследуемого ряда. На первый план выдвигается задача выбора достаточно универсальной модели временного ряда, позволяющей отразить существенные особенности его нелинейной динамики, зачастую носящей хаотический характер. Для решения подобных задач эффективны методы, основанные на ядерных методах (kernel methods), обеспечивающих возможность моделирования нелинейных связей во временных рядах при сравнительно малом объеме априорной информации.

Основными проблемами метода являются:

- выбор основных управляющих параметров  $N$  и  $m$ , отвечающих за размерность выборки, полученной из одномерного временного ряда;
- анализ промежуточных результатов, интерпретация и отбор главных компонент;
- метод не является абсолютно жестким и допускает различные модификации.

Прогнозирование на основе метода Группового Учета Аргументов (МГУА – GMDH) представляет собой поиск зависимости целевых переменных от остальных, в форме функций какого-то определенного вида. Например, в одном из наиболее удачных алгоритмов этого типа –

методе группового учета атрибутов (МГУА) – зависимость определяется в форме полиномов. Этот метод дает статистически более значимые результаты, чем нейронные сети. К тому же полученная формула зависимости поддается анализу и интерпретации.

Метод «Опорных Векторов» (SVM – Support Vector Machines). Как указывалось ранее недостатком большинства методов, является предположение о линейности модели исследуемого ряда. Метод «опорных векторов» (SVM – Support Vector Machines), позволяет оценить параметры модельного ряда в виде линейной комбинации ядерных функций радиально-базисного типа.

Метод опорных векторов неустойчив по отношению к шуму в исходных данных. Если обучающая выборка содержит шумовые выбросы, они будут существенным образом учтены при построении разделяющей гиперплоскости. Этому недостатка лишён метод релевантных векторов (relevance vector machine, RVM). До сих пор не разработаны общие методы построения спрямляющих пространств или ядер, наиболее подходящих для конкретной задачи. Построение адекватного ядра определяется не математически, а, как правило, опирается на априорные знания о предметной области. В общем случае, когда линейная делимость не гарантируется, необходимо подбирать управляющий параметр алгоритма.

Показатель Херста. Метод базируется на положении о том, что многие временные ряды можно исследовать с помощью статистического подхода – метода Херста [11]. Показатель Херста представляет собой инструмент, основанный на принципах теории хаоса и фракталов, позволяет оценить фрактальную размерность процесса, используя анализ масштабируемых рядов. Он позволяет проанализировать все доступные данные и определить «волатильность» и «тренды» данного процесса. При помощи показателя Херста можно оценить наличие трендовой составляющей, определить, когда процесс представляет собой случайную независимую систему, а когда его движение является обусловленным. Последовательности, для которых показатель Херста –  $H$  больше 0,5, относятся к классу персистентных – сохраняющих имеющуюся тенденцию. Таким образом, для процесса с  $H > 0,5$  наличие тренда в прошлом означает и большую вероятность сохранения тренда в будущем. Чем больше  $H$ , тем сильнее тенденция. При  $H = 0,5$  никакой выраженной тенденции процесса не выявляется, и нет оснований считать, что она появится в будущем. Случай  $H < 0,5$  характеризуется антиперсистентностью – рост в прошлом означает уменьшение в будущем, а тенденция к уменьшению в прошлом делает вероятным рост в будущем. И чем меньше  $H$ , тем больше эта вероятность. В таких процессах после роста обычно имеет место падение, а после падения – рост.

Основным недостатком данного метода является то, что при расчете значения фрактальной размерности двухмерное изображение

заменяется набором некоторых временных рядов с последующим их усреднением.

Нейросетевой анализ. Технический анализ сосредотачивается на реализации временного ряда вне его связи с остальными сопутствующими процессами и не позволяет в полной мере охватить основные характеристики протекающего процесса. В свою очередь подход к техническому анализу с привлечением технологии нейронных сетей обладает рядом неоспоримых достоинств.

Во-первых, нейросетевой анализ не предполагает никаких ограничений на характер входной информации. Это могут быть как данные исследуемого временного ряда, так и сведения о других сопутствующих процессах. Именно поэтому нейронные сети можно эффективно использовать при прогнозировании процессов, между которыми имеется корреляционная связь, что и наблюдается между технологическими и физическими процессами, протекающими в массиве при ведении горных работ [12].

Во-вторых, в отличие от технического анализа, основанного на общих рекомендациях, нейронные сети способны находить оптимальные для данного условия параметры и строить по ним оптимальную для исследуемого ряда стратегию предсказания. Более того, эти стратегии могут быть адаптивны, что особенно важно в условиях связанных с повышением интенсификации горных работ, увеличением глубины разработки, усложнением горно-геологических условий, разработкой и реализацией новых технологических решений.

Искусственные нейронные сети (ИНС) являются эффективным средством решения сложных плохо формализуемых задач, таких как задачи классификации, кластеризации, аппроксимации многомерных отображений, прогнозирования временных рядов, нелинейной фильтрации, идентификации, а также управления сложными техническими системами. В настоящее время нейротехнологии активно применяются для обработки аэрокосмических изображений и гидроакустических сигналов [3, 13], идентификации и управления нелинейными динамическими объектами в реальном времени [14, 15].

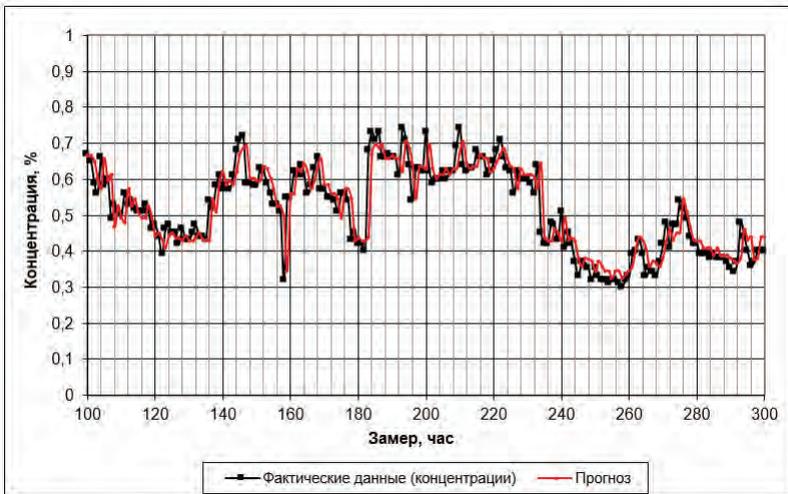
Использование нейросетевого моделирования является обоснованным и особенно эффективно при прогнозировании процессов, обладающих следующими свойствами [4, 9]:

- отсутствие возможности аналитического описания связей между прогнозируемыми процессами [1];
- исследуемый процесс характеризуется большими объемами входной информации;
- имеющиеся данные по процессу являются не полными, избыточными, зашумленными и частично противоречивыми.

Метановыделение является сложным динамическим процессом, зависящим от множества случайных факторов [16], и отвечает выше-

изложенным свойствам, поэтому для осуществления прогноза метанообильности выработок эффективно применение нейросетевого моделирования.

Для решения задачи прогноза метанообильности горных выработок действующего выемочного участка угольной шахты была создана многослойная нейронная сеть обратного распространения, входными сигналами которой являются смещенные временные ряды с четырехкратным шагом. В качестве активационной функции была выбрана логистическая сигмоидальная функция  $OUT = F(NET) = 1 / (1 + e^{-NET})$  [4]. Полученная сеть обратного распространения ошибки в состоянии адекватно определять прогнозные значения метановыделения, что четко прослеживается на примере моделирования процесса (рис. 1), для прогнозных значений метановыделения ошибка MAPE – 2,2 %.



**Рис. 1. Результаты моделирования метановыделения (ш. Самсоновская-Западная 1 восточная лава)**

Для получения адекватной модели метановыделения и повышения надежности прогнозируемого значения метанообильности выработок разработан алгоритм фильтрования незначущих исходных данных, сформирован состав комитета нейронных сетей (в виде отдельных экспертов) и выполнен выбор оптимальной структуры для каждой из нейронных сетей входящих в него. Дополнительно был разработан алгоритм расчета более точной прогнозной метанообильности из всех значений, полученных от комитета нейросетей. Таким образом, применение нейросетей в условиях ограниченного количества исходных данных и благодаря элементам адаптации позволяет прогнозировать

метанообильность выработок действующего выемочного участка в любых реальных условиях разработки газоносных угольных пластов.

На использовании элементов нейросетевого моделирования разработан программный комплекс «Поток» предназначенный для текущего прогноза уровня метанообильности и диагностики газового состояния атмосферы в исходящих струях выемочного участка угольных шахт. Прогноз осуществляется в реальном времени с использованием текущей исходной информации (концентрации метана в исходящих струях лавы и добычного участка, из выработанного пространства; количества проходящего воздуха; положения комбайна в лаве; нагрузки на очистной забой; данные сейсмоакустической активности пласта, дебита метана, извлекаемого дегазационными системами), глубина прогноза задается.

Разработанный программный комплекс позволяет осуществлять текущий прогноз метанообильности выработок выемочного участка в реальном времени для оперативного планирования и управления технологическим процессом выемки угля в условиях неравномерности метановыделения на больших глубинах разработки и при высокой нагрузке на очистной забой. ПК «Поток» прошел апробацию на высокометанообильных угольных шахтах ОАО «Краснодонуголь».

### **Выводы**

– метановыделение является сложным динамическим процессом, который зависит от большого количества случайных факторов. Классические математические методы не позволяют учесть весь перечень факторов, а, следовательно, и получить достоверные прогнозные значения уровня метанообильности;

– применение нейронных сетей для текущего прогнозирования метанообильности обеспечивает необходимую точность, предъявляемую к прогнозу;

– апробация способа показала, его работоспособность и возможность осуществлять текущий прогноз в реальном времени для оперативного управления газовой обстановкой в условиях неравномерности метановыделения на больших глубинах разработки и при высокой нагрузке на очистной забой.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Иванов Ю.А.* Математическая модель и методы экстраполяции изменения содержания метана на выемочных участках // Форум горняков. 2007: сб. науч. ст. – Днепропетровск, 2007. – Т 1.– С 92 – 100.

2. *Барский А.Б.* Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с.

3. *Бусыгин Б.С.* Применение искусственных нейронных сетей для анализа геолого-геофизических данных // Научный вестник НГУ: сб. науч. ст. – Днепропетровск, 2006. – № 3. – С. 62 – 70.

4. Денисенко В.П., Верба Р.В., Абакумова Е.В. Выбор структуры нейросети для прогнозирования метановыделения в горных выработках угольных шахт // Научный вестник НГУ: сб. науч. ст. – Днепропетровск, 2008. – № 10. – С. 15 – 20.

5. Корниенко В.И. Синергетический подход к синтезу оптимального управления рудоподготовкой с интеллектуальным прогнозированием // Научный вестник НГУ: сб. науч. ст. – Днепропетровск, 2008. – № 4. – С 38 – 42.

6. Медведев В.Н. Прогнозирование значений концентрации метана в рудничной атмосфере при интенсивных газовыделениях в горные выработки // Сборник научных трудов МакНИИ: сб. науч. ст. – Макеевка, 2007. – № 20. – С. 110 – 119.

7. Бубунец Ю.В. Потенциальная прогнозируемость метанообильности выработок угольных шахт //Сборник научных трудов ДонГТУ: сб. науч. ст. – Алчевск, 2009. – Вып. 28. – С. 134 – 143.

8. Подлипенская Л.Е. Компьютерное моделирование динамических рядов метановыделения выемочного участка //Сборник научных трудов ДонГТУ: сб. науч. ст. – Алчевск, 2008. – Вып. 27. – С. 153 – 160.

9. Абакумова Е.В. Прогнозирование метанообильности выработанного пространства в условиях неравномерности обрушений массива кровли // Научный вестник НГУ: сб. науч. ст. – Днепропетровск, 2007. – № 8. – С. 13 – 17.

10. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов: учеб. пособие. – СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. – 76 с.

11. Петерс Э. Хаос и порядок на рынках капитала. Новый аналитический взгляд на циклы и изменчивость рынка. Пер. с англ. – М.: Мир, 2000. – 333 с.

12. Antoni Tajdus, Marek Gala, Krzysztof Tajdus. Geomechanika w budownictwie podziemnym. – Krakow: AGH, 2012. – 762 p.

13. Крисилов Р.А., Тарасенко В.А. Предварительная оценка качества обучающей выборки для нейронных сетей в задачах прогнозирования временных рядов // Труды Одесского политехнического университета: сб. науч. ст. – Одесса, 2001. – Вып. 1. – С. 90 – 93.

14. Царегородцев В.Г. Определение оптимального размера нейросети обратного распространения через сопоставление средних значений модулей весов синапсов // Материалы XIV Международной конференции по нейрокибернетике: сб. науч. ст. – Ростов-на-Дону, 2005. – Т. 2. – С. 60 – 64.

15. Заенцев И.В. Нейронные сети: основные модели: учеб. пособие. – Воронеж.: ВГУ, 1999. – 76 с.

16. Staszek A., Simka A. Oznaczenie intensywności uwalniania metanu z pokładu węgla // Pr. nauk. GIG. Gor. i srod. – 2010. – № 3. – S. 123-142. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРЕ**

Денисенко В.П. — кандидат технических наук, доцент каф. разработки месторождений полезных ископаемых, Донбасский государственный технический университет, e-mail: denisenko.14@mail.ru, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Луганской Народной Республики «Донбасский государственный технический университет» Министерства образования и науки Луганской Народной Республики, 94204, г. Алчевск, Луганская Народная Республика, пр. Ленина, 16.

**Denysenko V.P.**

## **Problems prognostication of methane coal mines**

The methods of prognostication are considered and their dignities and disadvantage at prognostication of methane in the making of coal mines are exposed. The current prognosis of content of methane is offered in the active rock mining on the basis of design due to neuron nets.

Keywords: coal mine, active rock mining, methan, , current prognosis, neuron nets.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-198-207

## **AUTHORS**

*Denysenko V.P., Cand. tech. Sci., Associate Professor development of mineral deposits, Donbass State Technical University, e-mail: denisenko.14@mail.ru, The State Educational Institution of Higher Professional Education of the Lugansk People's Republic "Donbass State Technical University" of the Ministry of Education and Science of the Lugansk People's Republic, 94204, c. Alchevsk, Lugansk People's Republic, Lenin Avenue, 16.*

## **REFERENCES**

1. Ivanov Yu. A. *Matematicheskaya model' i metody ekstrapolyacii izmeneniya soderzhaniya metana na vyemochnyh uchastkah* [Mathematical model and methods of extrapolation of the changes of methane content at the excavation sites]. Forum gornjakov. 2007: sb. nauch. st. Dnepropetrovsk, 2007. T 1. pp 92–100.
2. Barskij A.B. *Nejronnye seti: raspoznavanie, upravlenie, prinyatie reshenij* [Networks: recognition, management, decision-making]. Moscow: Finansy i statistika, 2004. 176 p.
3. Busygin B.S. *Primenenie iskusstvennyh nejronnyh setej dlya analiza geologo-geofizicheskikh dannyh* [Application of artificial neural networks for the analysis of geological and geophysical data]. Nauchnyj vestnik NGU: sb. nauch. st. Dnepropetrovsk, 2006. no 3. pp. 62–70.
4. Denisenko V.P., Verba R.V., Abakumova E.V. *Vybor struktury nejroseti dlya prognozirovaniya metanovydeleniya v gornyh vyrabotkah ugol'nyh shaht* [The structure selection of neural networks to predict future methane release in the mine workings of coal mines]. Nauchnyj vestnik NGU: sb. nauch. st. Dnepropetrovsk, 2008. no 10. pp. 15–20.
5. Kornienko V.I. *Sinergeticheskij podhod k sintezu optimal'nogo upravleniya rudopodgotovkoj s intellektual'nym prognozirovanijem* [Synergetic approach to synthesis of optimal control by pretreatment with intelligent forecasting]. Nauchnyj vestnik NGU: sb. nauch. st. Dnepropetrovsk, 2008. no 4. pp 38–42.
6. Medvedev V.N. *Prognozirovanie znachenij koncentracii metana v rudnichnoj atmosfere pri intensivnyh gazovydeleniyah v gornye vyrabotki* [Prediction of methane concentration in the mine atmosphere at intensive gas emissions in mining]. Sbornik nauchnyh trudov MakNII: sb. nauch. st. Makeevka, 2007. no 20. pp. 110–119.
7. Bubunec Yu. V. *Potencial'naya prognoziruemosť metanoobil'nosti vyrabotok ugol'nyh shaht* [Potential predictability of metrobility workings of coal mines]. Sbornik nauchnyh trudov DonGTU: sb. nauch. st. Alchevsk, 2009. Vyp. 28. pp. 134–143.
8. Podlipenskaya L.E. *Komp'yuternoe modelirovanie dinamicheskikh ryadov metanovydeleniya vyemochnoho uchastka* [Computer simulation of time series of methane

release extraction area]. Sbornik nauchnyh trudov DonGTU: sb. nauch. st. Alchevsk, 2008. Vyp. 27. pp. 153–160.

9. Abakumova E.V. *Prognozirovanie metanoobil'nosti vyrabotannogo prostranstva v usloviyah neravnomernosti obrushenij massiva krovli* [Forecasting of metrobility out space in conditions of non-collapses of the array of roof]. Nauchnyy vestnik NGU: sb. nauch. st. Dnepropetrovsk, 2007. no 8. pp. 13–17.

10. Golyandina N.E. *Metod «Gusenica»-SSA: analiz vremennyh ryadov* [Method of «Caterpillar»-SSA: time series analysis]: ucheb. posobie. SPb: Izd-vo SPbGU, 2004. 76 p.

11. Peters E. *Haos i poryadok na rynkah kapitala* [Chaos and order in capital markets]. Novyj analiticheskij vzglyad na cikly i izmenchivost' rynka. Per. s angl. Moscow: Mir, 2000. 333 p.

12. Antoni Tajdus, Marek Gala, Krzysztof Tajdus. *Geomechanika w budownictwie podziemnym* [Geomechanika w budownictwie podziemnym]. Krakow: AGH, 2012. 762 p.

13. Krisilov R.A., Tarasenko V.A. *Predvaritel'naya ocenka kachestva obuchayushchej vyborki dlya neyronnyh setej v zadachah prognozirovaniya vremennyh ryadov* [Preliminary assessment of the quality of the training sample for the neural networks in the problems of time series forecasting]. Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta: sb. nauch. st. Odessa, 2001. Vyp. 1. pp. 90–93.

14. Caregorodcev V.G. *Opredelenie optimal'nogo razmera nejroseti obratnogo rasprostraneniya cherez sopostavlenie srednih znachenij modulej vesov sinapsov* [Determination of the optimal size of the neural network back propagation through a comparison of the average values of modules the weights of the synapses]. Materialy XIV Mezhdunarodnoj konferencii po neirokibernetike: sb. nauch. st. Rostov-na-Donu, 2005. T. 2. pp. 60–64.

15. Zaencev I.V. *Nejronnye seti: osnovnye modeli* [Neural networks: main models]: ucheb. posobie. Voronezh.: VGU, 1999. 76 p.

16. Staszek A., Simka A. *Oznaczenie intensywnosci uwalniania metanu z pokladu wegla*. Pr. nauk. GIG. Gor. i srod. 2010. no 3. pp. 123–142.



## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ ПО ГОРНЫМ ВЫРАБОТКАМ

В угольных шахтах основными факторами влияющими на безопасность являются наличие метана и угольной пыли, поэтому решение вопросов метано- и пылевзрывобезопасности должно быть комплексным [5]. Обеспечение пылевзрывобезопасности горных выработок и сохранение здоровья горнорабочих являются весьма актуальными задачами [3, 6, 7, 8]. Эффективность борьбы с пылью зависит от изученности процессов пылевыделения, распространения пыли под действием потоков воздуха и отложения пыли в горных выработках [4, 9]. Ввиду большого количества факторов, влияющих на распространение пыли, одним из основных способов получения достоверной информации о данном процессе являются шахтные исследования. На шахте им. А.Д. Рубана были проведены такие исследования. В результате исследований были апробированы методики по проведению шахтных экспериментов и собрана информация по запыленности воздуха в конвейерном штреке 812. В данной работе проанализированы полученные результаты. Выводы по проведенной работе помогут в дальнейших исследованиях, направленных на повышение уровня безопасности угольных шахт по пылевому фактору. Также анализ полученных данных поможет усовершенствовать приборную базу, применяемую для проведения пылевого мониторинга, и скорректировать методики применения датчиков. Исследования распределения пыли по горным выработкам являются источником данных для обоснования наиболее эффективных принципов измерения массы (концентрации) пыли, что повысит точность измерения, существующих и разрабатываемых приборов контроля пылевзрывобезопасности [10, 11].  
Ключевые слова: угольная шахта, вентиляция, угольная пыль, пылевзрывобезопасность.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-208-214

### Введение

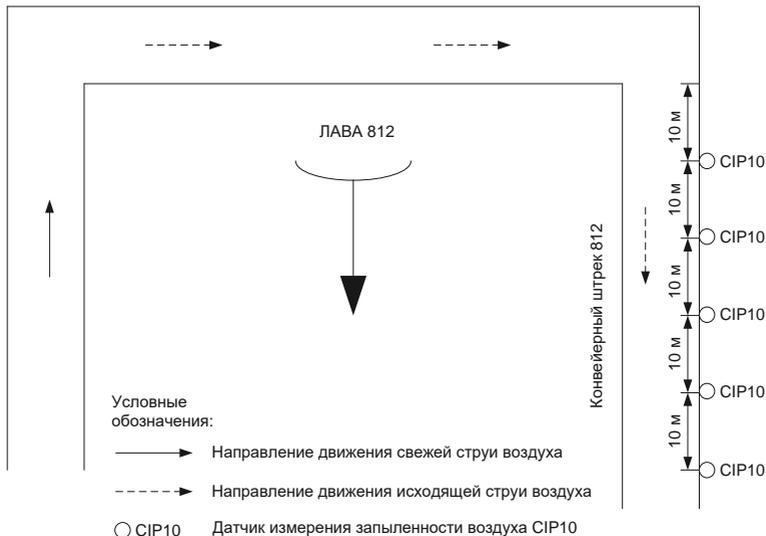
Проанализировав особенности выделения пыли (источник постоянно перемещается) [1, 2, 12], дисперсный состав пыли и изменения геометрии горных выработок (уменьшение длины выемочного столба и др.) мы пришли к выводу, что на некотором расстоянии от места сопряжения лавы и вентиляционной выработки будет находиться зона горной выработки с наиболее высокой вероятностью создания пылевзрыво-

описанной обстановки. Исходя из этого, была поставлена задача – найти зависимость запыленности (пылеотложения) в вентиляционной выработке от расстояния до лавы, с учетом изменяющейся длины выемочного столба, перемещения очистного комбайна по лаве и др.

### Проведение эксперимента

Первым этапом исследований был шахтный эксперимент на шахте им. А.Д. Рубана, лава 812. Предполагалось использовать подложки, установленные на почве горной выработки, для определения массы осевшей пыли. Однако, ввиду того что в непосредственной близости к очистному забою в подложки на почве попадает вода, уголь и др., также почва меняет свою геометрию (например, при очистке конвейерной ленты штыв перемещается на почву и др.), отбор достоверных проб практически невозможен. Проведение эксперимента с использованием подложек, установленных на почве, имеет множество недостатков, а данные такого эксперимента являются недостоверными.

Поэтому для проведения эксперимента применялись датчики СІР 10. Датчики располагались на борту выработки, на расстоянии 1,5 м от почвы. Размещение датчиков на борту выработки исключает случайный контакт горнорабочих с ними, попадание воды и кусков угля минимизируется. С точки зрения проведения эксперимента в условиях выемочного участка данный способ технически менее трудоёмок и более достоверен, в сравнении с использованием подложек, установленных на почве. Датчики развешивались через 10 метров (рис. 1).



**Рис. 1. Расположение датчиков измерения запыленности воздуха в конвейерном штреке 812**

Датчики развешивались до ЛТЗ (лабиринто-тканевая завеса). Измеряемым показателем была запыленность воздуха. Замер производился в первую смену. Комбайн отбивал уголь с 13:28 до 14:35 (67 минут).

### Обработка полученных данных

В лаборатории была проведена обработка проб пыли. В соответствии с инструкцией к СР 10, по изложенной в ней методике, была произведена сушка проб, затем пробы помещались в эксикатор на два часа. В табл. 1 представлены данные о массе мисочек датчиков СР10 до замеров и после (с сушкой и помещением мисочек в эксикатор).

Таблица 1

#### Масса замерных мисочек до измерения и после (с сушкой и помещением мисочек в эксикатор)

№ мисочки	Масса мисочек до замера, г	Масса мисочек после замера, после сушки при t = 60 °С, г	Масса мисочек после замера, после сушки при t = 60 °С, и 2-х часов в эксикаторе, г	Прирост массы на фильтре, г
1	6,0911	6,1138	6,1155	0,0244
3	5,9355	5,9559	5,9576	0,0221
5	5,9530	5,9752	5,9766	0,0236
6	5,9240	5,9539	5,9555	0,0315
9	5,9110	5,9318	5,9333	0,0223

Объем прокаченного воздуха составил 670 л/мин.  
Запыленность воздуха представлена в табл. 2.

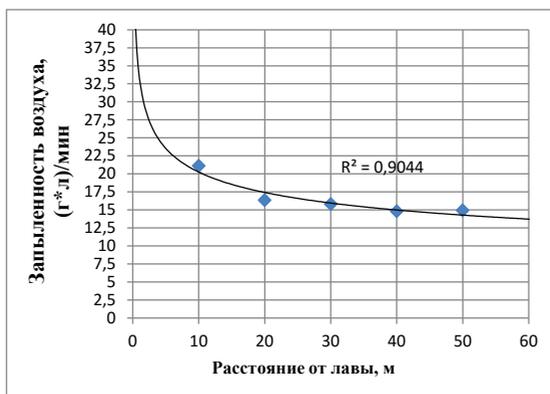
Таблица 2

#### Запыленность воздуха

№ мисочек	Расстояние от забоя, м	Прирост массы на фильтре, г	Запыленность воздуха, (гл)/мин
1	20	0,0244	16,348
3	40	0,0221	14,807
5	30	0,0236	15,812
6	10	0,0315	21,105
9	50	0,0223	14,941

По данным табл. 2 построен график (рис. 2), описывающий зависимость запыленности воздуха в конвейерной выработке 812 от расстояния до лавы 812.

По рис. 2 видно, что с увеличением расстояния от лавы запыленность воздуха уменьшается. Запыленность воздуха на расстоянии 40 м от лавы меньше чем запыленность на расстоянии 50 м от лавы, данная разница объясняется наличием дополнительного источника пылевыведения в горной выработке.



**Рис. 2. Запыленность воздуха в конвейерном штреке 812 в зависимости от расстояния от лавы**

### Выводы

В рамках исследований распространения пыли по горным выработкам выемочного участка, выявлено, что проведение эксперимента по определению массы осевшей пыли с применением подложек, установленных на почве вентиляционной горной выработки, имеет технические сложности, влияющие на достоверность полученных данных.

Применение датчиков закреплённых на бортах выработки, с точки зрения достоверности результатов, эффективнее, чем датчиков расположенных на почве выработки.

Данные эксперимента показывают, что с увеличением расстояния от лавы уменьшается запыленность воздуха, данная зависимость описывается степенным уравнением:  $y = 33,374x^{-0,217}$ . При анализе данных необходимо учитывать все источники пылевыведения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кобылкин А.С.* Исследование распространения и осаждения частиц пыли в горных выработках, с учётом расположенного в ней оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 6, специальный выпуск 32. – С. 61–66, DOI:10.25018/023–1493–2018–32–61–66.

2. *Кобылкин А.С.* Распределение пыли различного дисперсного состава в горных выработках, в зависимости от расположения источника пылевыведения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 6. – С. 291–302.

3. *Кобылкин А.С., Кобылкин С.С.* Трёхмерное моделирование при проведении инженерных расчётов по тактике горноспасательных работ // Горный журнал. – №5. – 2018. – С. 82–85, doi: 10.17580/gzh.2018.05.13.

4. Kaledina N.O., Kobylkin S.S. Ventilation of blind roadways in coal mines: problems and solutions // Eurasian Mining. – 2015. – № 2. – p. 26–30.

5. Puchkov L.A., Kaledina N.O., Kobylkin S.S. Systemic approach to reducing methane explosion hazard in coal mines // Eurasian Mining. – 2015. – № 2. – p. 3.

6. Kizilshstein L.YA., Kholodkov YU.I. Composition and dispersity of soaring coal dust of mines // Mining science and technology '99. – Proceedings of the '99 International Symposium on Mining Science and Technology. editors: H. Xie; editors: T.S. Golosinski. – Beijing. – 2002. – p. 109–112.

7. Edward L. Petsonk, Cecile Rose, Robert Cohen. Coal Mine Dust Lung Disease New Lessons from an Old Exposure // American journal of respiratory and critical care medicine. –VOL 187. – 2013. – p. 1178–1185.

8. Jennifer L. Perret, Brian Plush, Philippe Lachapelle and others. Coal mine dust lung disease in the modern era // Respirology. – 2017. – p. 1–9. – doi: 10.1111/resp.13034.

9. Колесниченко Е.А., Артемьев В.Б., Колесниченко И.Е., Любомищенко Е.И. Энергетические и химические закономерности взрывов угольной пыли в шахтах // Горная промышленность. 2012. – № 1 (101). – С. 24–30.

10. Кудряшов В.В. Разработка приборного обеспечения пылевого контроля в угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 1. – С. 512–535.

11. Кудряшов В.В., Иванов Е.С., Соловьева Е.А. Разработка аспиратора нового поколения для отбора проб пыли при гигиеническом и технологическом контроле запыленности воздуха // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 9. – С. 77–80.

12. Кудряшов В.В., Викторов С.Д., Кочанов А.Н. О распределении минеральных частиц по размерам при разрушении горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2006. – № 6. – С. 68–72. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРЕ**

Кобылкин А.С. – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИПКОН РАН, старший преподаватель кафедры «Безопасность и экология горного производства», Горного института, НИТУ «МИСиС», e-mail: aleksandr@kobylikin.ru, Институт проблем комплексного освоения недр им. Академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, 111020, г. Москва, Крюковский туп., д.4.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 208–214.

**Kobylkin A.S.**

### **Research of coal dust distribution in mines**

In coal mines, the main factors affecting safety are the presence of methane and coal dust, the solution of the problems of methane and dust explosion safety should be complex

[5]. Providing dust and explosion safety of mine workings and maintaining the health of miners are very topical tasks [3, 6, 7, 8]. The effectiveness of dust control depends on the study of the processes of dust generation, the spread of dust under the influence of air currents and the deposition of dust in the mine workings [4, 9]. Due to a large number of factors influencing the spread of dust, one of the main ways to obtain reliable information about this process are mine studies. As a result of the research, methods for conducting mine experiments were tested and information was collected on the dust content of air in the working. In this paper, the results are analyzed. Conclusions on the work carried out will help in further research aimed at increasing the level of safety of coal mines by the dust factor. Also, the analysis of the obtained data will help to improve the instrument base used for dust monitoring and to correct the methods of application of sensors. Studies of dust distribution in mining work are a source of data to justify the most effective principles for measuring dust mass (concentration), which will improve the accuracy of measurement of existing and developed dust explosion control devices [10, 11].

Key words: coal mine, ventilation, coal dust, dust and explosion safety.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-208-214

## AUTHORS

*Kobylykin A.S.* – Candidate of Technical Sciences, Senior researcher-IPKON RAS, senior lecturer of the Department “Safety and Ecology of Mining”, Mining Institute, MUST “MISIS”, e-mail: [aleksandr@kobylykin.ru](mailto:aleksandr@kobylykin.ru).

## REFERENCES

1. Kobylykin A.S. *Issledovanie rasprostraneniya i osazhdeniya chastic pyli v gornyh vyrabotkah, s uchyotom raspolozhennogo v nej oborudovaniya* [Research of distribution and deposition of dust particles in mine workings, taking into account the equipment located in it]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. 2018. no 6, special'nyj vypusk 32. pp. 61–66, DOI:10.25018/023–1493–2018–32–61–66.
2. Kobylykin A.S. *Raspredelenie pyli razlichnogo dispersnogo sostava v gornyh vyrabotkah, v zavisimosti ot raspolozheniya istochnika pylevydeleniya* [The distribution of dust of different dispersed composition in mine workings, depending on the location of the source of dust]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. 2017. no 6. pp. 291–302.
3. Kobylykin A.S., Kobylykin S.S. *Tryohmernoe modelirovanie pri provedenii inzhenernyh raschyotov po taktike gornospasatel'nyh rabot* [Three-Dimensional modeling during engineering calculations on the tactics of mining and rescue operations]. *Gornyj zhurnal*. no 5. 2018. pp. 82–85, doi: 10.17580/gzh.2018.05.13.
4. Kaledina N.O., Kobylykin S.S. *Ventilation of blind roadways in coal mines: problems and solutions*. *Eurasian Mining*. 2015. no 2. pp. 26–30.
5. Puchkov L.A., Kaledina N.O., Kobylykin S.S. *Systemic approach to reducing methane explosion hazard in coal mines*. *Eurasian Mining*. 2015. no 2. p. 3.
6. Kizilshstein L.YA., Kholodkov YU.I. *Composition and dispersity of soaring coal dust of mines*. *Mining science and technology '99. Proceedings of the '99 International Symposium on Mining Science and Technology*. editors: H. Xie; editors: T.S. Golosinski. Beijing. 2002. pp. 109–112.
7. Edward L. Petsonk, Cecile Rose, Robert Cohen. *Coal Mine Dust Lung Disease New Lessons from an Old Exposure*. *American journal of respiratory and critical care medicine*. VOL 187. 2013. p. 1178–1185.
8. Jennifer L. Perret, Brian Plush, Philippe Lachapelle and others. *Coal mine dust lung disease in the modern era*. *Respirology*. 2017. p. 1–9. doi: 10.1111/resp.13034.

9. Kolesnichenko E.A., Artem'ev V.B., Kolesnichenko I.E., Lyubomishchenko E.I. *Energeticheskie i himicheskie zakonomernosti vzryvov ugol'noj pyli v shahtah* [Energy and chemical principles of coal dust explosions in mines]. *Gornaya promyshlennost'*. 2012. no 1 (101). pp. 24–30.

10. Kudryashov V.V. *Razrabotka pribornogo obespecheniya pylevogo kontrolya v ugol'nyh shahtah* [Development of instrument support of dust control in coal mines]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. 2013. no 1. pp. 512–535.

11. Kudryashov V.V., Ivanov E.S., Solov'eva E.A. *Razrabotka aspiratora novogo pokoleniya dlya otbora prob pyli pri gigienicheskom i tekhnologicheskom kontrole zapylenosti vozduha* [Development of a new generation aspirator for dust sampling at hygienic and technological control of air dust content]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2014. no 9. pp. 77–80.

12. Kudryashov V.V., Viktorov S.D., Kochanov A.N. *O raspredelenii mineral'nyh chastic po razmeram pri razrushenii gornyh porod* [On the distribution of mineral particles by size in the destruction of rocks]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh*. 2006. no 6. pp. 68–72.



## ВЛИЯНИЕ СОРБЦИИ СМАЧИВАТЕЛЯ УГЛЕМ ИЗ РАСТВОРА НА ПЫЛЕОБРАЗУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ УГЛЯ ПРИ ЕГО УВЛАЖНЕНИИ

Приведен анализ причин низкой эффективности связывания пыли растворами смачивателей. Показано, что при реальных удельных расходах смачивателя его молекул не хватает для заполнения поверхности угля при его увлажнении. Полученная зависимость количества сорбированного углем смачивателя от концентрации раствора объясняет процесс сорбции. Предложен один из способов реализации полученных результатов.

Ключевые слова: уголь, сорбция, смачиватель, раствор, увлажнение, пыль, связывание.

---

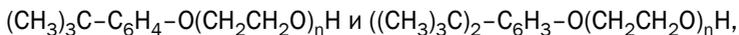
DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-215-225

Для борьбы с пылью в угольных шахтах и карьерах применяют воду в виде орошения мест, где происходит разрушение угля комбайном, и в пунктах погрузки и перегрузки отбитой горной массы по пути следования к поверхности. Удельные расходы жидкости реально находятся в пределах от 30 до 60 литров на тонну горной массы. Используют воду и для связывания пыли в массиве угля путем нагнетания ее под давлением. Удельные расходы воды в этом случае меньше, чем при орошении: 15–30 л/т [1–3].

Связывание пыли водой зависит от смачиваемости угля. Ископаемые угли в основном гидрофобны. Их смачиваемость и другие характеристики зависят от стадии метаморфизма угля.

Для повышения смачиваемости пыли в воду добавляют смачиватели – поверхностно-активные вещества (ПАВ). При орошении пыли и горной массы и увлажнении массива рекомендуется использовать растворы с концентрацией, равной критической концентрации мицеллообразования (ККМ). Это концентрация, при которой начинается образование мицелл.

Из ПАВ наилучшим в отношении смачивания угля до настоящего времени является смачиватель ДБ – продукт реакции оксида этилена и смеси моно- и дитретбутилфенолов. Его формула



где  $n$  в среднем равно 7, молекулярный масса – 500.

При разработке новых смачивателей их свойства следует сравнивать с ДБ.

В работах, посвященных применению растворов смачивателей, не учитывается, что распыляемая при орошении вода имеет большую удельную поверхность [2,4] и что сам уголь обладает большой удельной поверхностью и развитой трещиноватостью [5]. Поэтому реальные значения удельных расходов ПАВ определялись экспериментально. Учитывалось влияние стадии метаморфизма угля, от которой зависит его трещиноватость и смачиваемость, влияние времени контакта раствора с углем.

Методика определения удельных расходов ПАВ ( $q$ ) основана на измерении концентрации раствора ДБ до и после сорбции углем.

Она включала приготовление раствора смачивателя заданной концентрации ( $C_0$ ), заливку угля раствором определенного объема, определение концентрации ПАВ в растворе после сорбции углем ( $C_1$ ) и вычисление удельных расходов ( $q$ ) по формуле

$$q = \frac{m_p(C_0 - C_1)}{m_y} \text{ г/т}, \quad (1)$$

Здесь  $m_y$  – масса навески угля, г;  $m_p$  – масса раствора, г.

Измерение концентрации ПАВ согласно [6] производилось способом, основанным на зависимости числа капель, вытекающих из объема сталагмометра, от концентрации ПАВ.

Объектами исследования были Кузнецкие угли марок К, Ж, ГЖ, Г и мезопористый уголь марки Д. По вышеизложенной методике определялась сорбция этими углями смачивателя ДБ. Результаты представлены в таблице. Из рассмотрения данных вытекает следующее.

Основная масса ПАВ поглощается углем в первые часы контакта с раствором. Угли марок К и ГЖ обладают повышенной сорбционной емкостью в отношении ПАВ по сравнению с другими марками. Они являются наиболее гидрофобными, имеют повышенную трещиноватость. Затем идут жирные и газовые угли, у которых краевой угол смачивания водой меньше, чем у марок К и ГЖ. Длиннопламенные угли хорошо смачиваются водой. Среди них встречаются образцы, обладающие мезопористой структурой и в тысячи раз большей удельной поверхностью. В итоге, что примечательно, они сорбируют смачивателя в лишь 2–3 раза больше, чем угли не обладающие такой структурой. Удельную поверхность угля, занимаемую смачивателем ДБ, можно рассчитать по формуле:

$$S = \frac{qS_M N_A}{M}, \quad (2)$$

где  $q$  – количество смачивателя (г) в адсорбированном состоянии в 1 т угля, г/т;  $S_M$  – площадь «посадки» молекулы ДБ, см<sup>2</sup>;  $N_A$  – число Авогадро;  $M$  – молекулярный вес смачивателя г/моль. Таким образом, количество смачивателя, поглощенного мезопористым углем, зависит от удельной поверхности его и степени смачиваемости.

Величину удельной поверхности  $S$ , оценивали при следующих значениях величин, входящих в формулу (2):  $q = 200$  г/т,  $S_M = 40 \cdot 10^{16}$  см<sup>2</sup>,  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ ,  $M = 500$  г/моль.

$$S = \frac{200 \cdot 40 \cdot 10^{-16} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{500} \approx 10^5 \text{ см}^2/\text{т}, \text{ или } S \approx 0,1 \text{ м}^2/\text{г}.$$

У мезопористого угля  $q \approx 1500$  г/т и величина  $S \approx 0,75$  м<sup>2</sup>/г.

Удельная поверхность природного угля, не имеющего мезопор, определенная методом БЭТ по низкотемпературной сорбции азота, имеет значение, близкое к рассчитанному по сорбции ДБ, но значительно отличается от удельной поверхности мезопористого угля, которая для данного образца равна 80 м<sup>2</sup>/г. Изложенное свидетельствует о том, что молекулы ДБ не проникают ни в микро-, ни в мезопоры, размеры которых порядка 40 Å. Смачиватель ДБ садится на поверхности разрушенного угля, как это было принято при расчете в [7].

Полученные результаты имеют важное значение для оценки увлажнения разрушенного и нетронутого массива угля. Так, при пропитке раствором ПАВ разрушенного угля с поверхности кусков или угольного пласта через скважины в процессе увлажнения идет адсорбция ПАВ в слоях, расположенных вблизи поверхности кусков или поверхности скважины, до тех пор, пока весь смачиватель не поглотится углем. Грубо говоря с участием ПАВ смочится 0,1–0,15 объема угля. Остальные 0,85–0,9 частей объема будут увлажняться чистой, без ПАВ, водой. Поэтому эффективность связывания пыли в угле при расходах, равных 30 д/т и при концентрации смачивателя, равной 0,1–0,15 % будет на 90–85%, определяться эффективностью смачивания угля чистой водой и величиной поверхности, доступной для смачивания.

Сорбция ПАВ углем влияет на связывание пыли в увлажненной угольной массе. Это видно из рис. 2.

На рис. 2  $m_0/m$  – кратность снижения пылеобразующей способности угля, определенная по методике, изложенной в [8];  $q$  – удельные расходы растворов смачивателя ДБ с концентрацией  $C$  от 0,125 до 1 %, пошедшие на увлажнение угольной массы.

Таблица 1

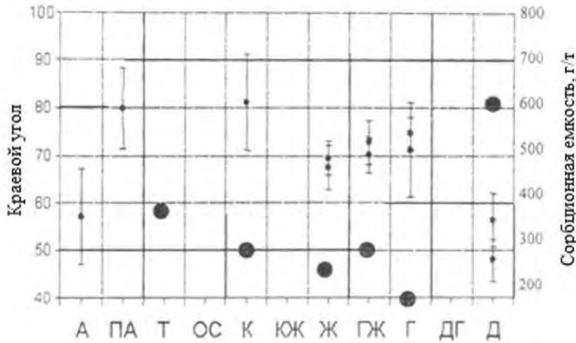
**Сорбционная емкость ископаемых углей в отношении смачивателя ДБ**

Марка		Бассейн, шахта	Краевой угол смачивания, °	Время контакта раствора с углем	Количество поглощенного смачивателя, г/кг
Ж	ЗАО «Распадская» Кольчугинская серия, пласт 4–5	60–70	2 суток	0,24	
			1,5 ч	0,194	
Г	Кузбасс, пласт 15	70–80	около 24 ч	0,161	
			8 суток	0,241	
			225 суток	0,329	
			около 24 ч	0,157	
			9 суток	0,202	
Д мез	Черногорский разрез	менее 60	около 22 ч	0,656	
			21 сутки	0,775	
			234 суток	1,647	
			около 23 ч	0,491	
К	Кузбасс, ш. Березовская пласт XXVII	70–90	около 25–26 ч	0,304	
			около 26 ч	0,198	
ГЖ	г. Новокузнецк, шахта Есаульская, пласт 29а	65–75	около 25 ч	0,305	
			около 25 ч	0,144	

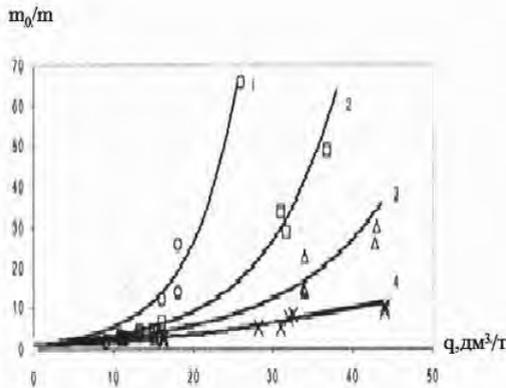
Из данных рис. 2 получены величины удельного расхода смачивателя  $M_c = qC$  и произведения  $M_c q$  для одинаковых значений  $m_o/m$  (табл. 2). Произведение  $M_c q$  оказалось постоянным при  $m_o/m = \text{const}$ . На рис. 3 представлена связь кратности связывания пыли и средних значений произведения  $qM_c = q^2C$ .

Из представленных материалов следует, что чем больше значение  $qM_c$ , тем выше эффективность связывания пыли  $m_o/m$ .

Вообще говоря, можно варьировать величинами  $q$  и  $M_c$ , получая в итоге произведение  $qM_c$  и соответствующую ему эффективность  $m_o/m$  связывания пыли в угольной массе, увлажненной раствором смачивателя.



**Рис. 1. Зависимость краевого угла смачивания угля и сорбции ДБ углем от стадии метаморфизма угля: ○ – краевого угол смачивания; ● – сорбционная емкость угля**



**Рис. 2. Зависимость эффективности связывания пыли от удельного расхода раствора при различных концентрациях смачивателя ДБ: 1 – C = 1; 2 – C = 0,5%; 3 – C = 0,25%; 4 – = 0,125**

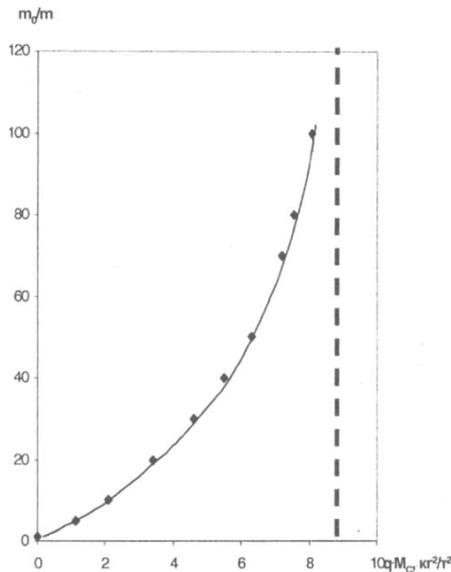
Однако необходимо иметь в виду, что при увлажнении массива удельные расходы жидкости не могут быть, как правило, более 30 кг/т, а удельные расходы смачивателя – более сорбционной емкости углей. Поэтому теоретически максимальной эффективности связывания пыли можно достичь при  $q \cdot M_c = 30 \cdot 0,3 = 9 \text{ кг}^2/\text{т}^2$ , реальной при  $q \cdot M_c = 4 \text{ кг}^2/\text{т}^2$ . Судя по графику на рис. 3, теоретически возможная эффективность равна  $\sim m_0/m = 150$ , реальная – 20. Концентрацию смачивателя в растворе можно определить по формуле. Теоретически возможные и реальные концентрации оказались равными 1%, то есть когда заполнен сорбционный объем угля (или поверхность капель).

Таблица 2

**Зависимость удельного расхода смачивателя  $M_c$  (кг/т) и произведения  $q \cdot M_c$  (кг<sup>2</sup>/т<sup>2</sup>) от концентрации смачивателя ( $C$ , %) и удельного расхода раствора  $q$  (кг/т) для различных значений кратности связывания пыли  $m_p/m$**

с, %	$m_p/m$											
	5			20			30			50		
	q	$M_c$	$q \cdot M_c$	q	$M_c$	$q \cdot M_c$	q	$M_c$	$q \cdot M_c$	q	$M_c$	$q \cdot M_c$
1	11,6	0,116	1,34	18	0,18	3,24	21	0,21	4,4	24	0,24	6,26
0,5	15,4	0,077	1,18	26	0,13	3,38	31	0,155	4,68	36	0,18	6,48
0,25	20	0,05	1	36	0,09	3,24	43	0,107	4,62	50,5	0,126	6,37
1,25	29	0,036	1,05	51,3	0,64	3,29	60,5	0,075	4,57	71,4	0,089	6,37
2	7,5	0,15	1,14	12,8	0,256	3,29	15,1	0,30	4,57	17,8	0,36	6,37

Примечание: выделенные данные получены расчетом



**Рис. 3. Зависимость эффективности связывания пыли  $m_p/m$  от  $q \cdot M_c$**

При такой концентрации будет сформирован адсорбционный слой молекул ПАВ (ДБ, синтанол, ДТ-7) на границе раствора с воздухом за сотые доли секунды [10]. Это значит, что будут созданы условия для сма-

чивания частиц пыли при орошении, имея в виду, что время перемещения капель до встречи с частицами и время их контакта с частицами также порядка сотых долей секунды.

Таким образом, использование смачивателей с удельными расходами, равными сорбционной емкости ископаемых углей в отношении ПАВ, обеспечивает связывание пыли в горной массе.

При удельных расходах смачивателей, равных и меньших сорбционной емкости ископаемых углей, ПАВ будут сорбироваться угольной массой и не будут непосредственно попадать в окружающую среду. А мезопористые угли, обладающие сорбционной емкостью в 5 раз большей сорбционной емкости других углей, могут использоваться для очистки от ПАВ шахтных вод в случае попадания в них этих веществ.

Для эффективного использования смачивателя предлагаются следующие способы увлажнения угля.

При орошении разрыхленной горной массы необходимо использовать крупнокапельное разбрызгивание раствора, исходя из рациональных удельных расходов раствора ( $q = 30$  кг/т). При погрузке и разгрузке обработанной растворами горной массы дополнительно можно орошать места образования пыли чистой водой.

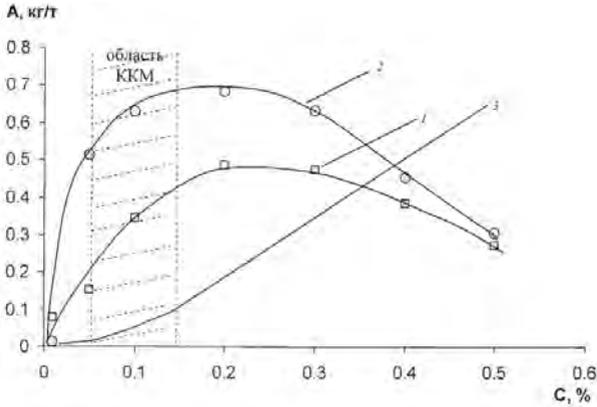
При увлажнении массива угля под давлением, при котором удельные расходы жидкости колеблются в пределах 10–20 кг/т, следует использовать повышенные концентрации смачивателя, определяемые по формуле (1). В этом случае за  $M_c$  следует брать сорбционную емкость данного угля, за  $q$  – удельный расход раствора, определенный экспериментально для данного пласта. После увлажнения массива раствором с концентрацией смачивателя, полученной расчетом, при выемке угля следует орошать места образования пыли чистой водой.

Как было показано ранее [7, 9], при нагнетании раствора смачивателя в угольный пласт под давлением концентрация смачивателя должна быть более критической концентрации мицеллообразования (ККМ), поэтому необходимо знать, как влияют концентрация смачивателя и давление на сорбцию его углем из раствора при концентрациях более ККМ.

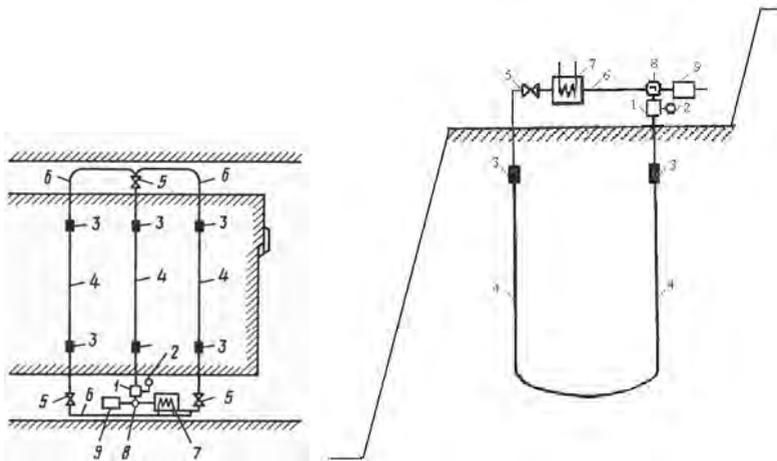
Из представленных на рис. 4 данных [11] следует, что с ростом концентрации от нуля до 0,1% идет резкое увеличение сорбции. Далее рост сорбции замедляется и при концентрации, равной 0,15–0,2%, стабилизируется, а затем сорбция уменьшается.

Повышение давления раствора ведет к увеличению сорбции более всего при концентрациях от 0,1 до 0,2%. При этих концентрациях в растворе находится достаточное количество молекул смачивателя, способных проникать в тонкие трещины, поэтому сорбция растет. С дальнейшим увеличением концентрации идет интенсивное образование мицелл и падение сорбции смачивателя углем. При концентрации

более 0,3% влияние давления на сорбцию смачивателя становится менее ощутимым. По-видимому, мицеллы не проникают в тонкие трещины. Они не сорбируются углем в силу своего строения, при котором в воду направлены гидрофильные части молекул.



**Рис. 4. Зависимость сорбции ДБ углем от концентрации раствора при температуре 20°C:**  
 1 – давление 0.1 МПа, 2 – давление 3 МПа; 3 – мицеллы



**Рис. 5. Схемы увлажнения массива для насыщения угля смачивателем:** 1 – насос; 2 – манометр; 3 – гидрозатворы; 4 – пробуренные в горном массиве скважины; 5 – вентили; 6 – гидромагистраль; 7 – емкость нагревателя; 8 – трехходовой кран; 9 – дозатор смачивателя

Так как из раствора сорбируются молекулы смачивателя, а не мицеллы, для насыщения угля смачивателем необходимо разработать такую технологию увлажнения массива под давлением, при которой насыщение угля смачивателем происходило бы из раствора с концентрацией 0,05–0,15%.

Например, можно нагнетать раствор с концентрацией 1–2 ККМ через скважины, соединенные между собой и с насосной установкой по замкнутому циклу до полного насыщения угля смачивателем (рис. 5) с восполнением дефицита смачивателя в растворе, обусловленного сорбцией его углем [12].

### **Заключение**

Эффективность связывания пыли раствором смачивателя в массиве или разрушенной угольной массе определяется произведением удельного расхода жидкости на величину сорбции смачивателя углем и достигает максимального значения при максимально возможной величине удельного расхода раствора и установленной сорбционной емкости данного угля в отношении смачивателя.

Для эффективного использования растворов смачивателя необходимо, чтобы удельный расход смачивателя был равен сорбционной емкости угля в отношении смачивателя. Активная сорбция смачивателя из раствора происходит при концентрации до 0,1–0,2%. При больших концентрациях сорбция смачивателя снижается из-за образования мицелл.

Для заполнения сорбционного объема угля смачивателем при концентрации раствора 0,1–0,2% предложен способ, при котором по мере сорбции молекул идет подпитка раствора смачивателем.

Использование повышенных расходов смачивателей удорожает борьбу с пылью несмотря на ожидаемый высокий эффект. Поэтому следует искать и учитывать сопутствующие явления, например, в виде ослабления массива, использования чистой воды на последующих производственных операциях после первичного увлажнения растворами массива или горной массы и др. Но уже сейчас ясно, что увеличив в 5–10 раз удельные расходы смачивателя, мы снизим в десятки раз концентрацию пыли и во столько же раз уменьшим риск заболевания шахтеров пневмокониозами, а также удлиним их жизнь. Кроме того, во столько же раз снизим пылеотложение в выработках и уменьшим вероятность взрывов пыли, увеличим период профилактических работ (обмыв, осланцевание выработок и пр.), увеличим прозрачность рудничного воздуха, тем самым снизим травматизм, остановки комбайнов, т. е. повысим производительность выемочных и проходческих машин и т. д.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Руководство по борьбе с пылью на угольных шахтах. М.: Недра, 1979.
2. Кудряшов В.В., Воронина Л.Д., Шуринова М.К. и др. Смачивание пыли и контроль запыленности воздуха в шахтах. – М.: Наука. – 1979 – 196 с.

3. Петрухин.П.М., Гродель Г.С., Жияев Н.И. и др. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах. М.: Недра, 1981, 271 с.

4. Никитина С.А., Таубман А.Б., Закиева С.Х. Борьба с силикозом. М.: Изд-во АН СССР. 1959. Т. III.С. 30.

5. Эттингер И.А., Шульман Н.В. Распределение метана в порых ископаемых углей. – М.: Наука. – 1975. – 112 с.

6. Шинода К., Накагава Т., Тамамуси Б., Исемура Т. Коллоидные поверхностно-активные вещества. – М.: Издательство «Мир». – 1966. – 317 с.

7. Кудряшов В.В. Научные основы гидрообеспыливания шахт Севера. – М.: Наука. – 1984. – 264 с.

8. Кудряшов В.В., Воронина Л.Д. Прибор для изучения параметров гидрообеспыливающего процесса и пылеподавляющих свойств жидкостей. // Управление газовойделением и пылеподавление в шахтах. – М.: Наука. – 1972. – С.96–111.

9. Кудряшов В.В. Борьба с силикозом. М.: Наука. – 1982. – Т.IX. – С. 11.

10. Кудряшов В.В. О диффузионном механизме формирования адсорбционного слоя молекул ПАВ на границе раздела раствора с воздухом. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2010. – №4. – С. 104–108.

11. Кудряшов В.В., Соловьева Е.А., Иванов Е.С. Влияние давления и концентрации раствора на сорбцию ПАВ ископаемым углем. Химия твердого топлива. – 2014. – №1. – С.37–42

12. Кудряшов В.В., Иванов Е.С., Соловьева Е.А., Поставнин Б.Н. Способ термовлажностной обработки угольного массива растворами поверхностно-активных веществ (смачивателями) и устройство его реализующее. Патент РФ на изобретение № 2599116. Приоритет изобретения 16 июля 2015 г. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Кудряшов Валерий Викторович* – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела Проблем геотехнологий ИПКОН РАН.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

No. 11 (special'nyy vypusk 49), pp. 215–225.

**Kudryashov V.V.**

### **The influence of sorption of wetting agent with coal from a solution on the dust-forming ability of coal when it is moistened**

The analysis of the reasons for the low efficiency of dust binding with wetting solutions is given. It is shown that with real specific consumption of the wetting agent, its molecules are not enough to fill the surface of the coal when it is wetted. The resulting dependence of the amount of sorbed wetting agent with the concentration of the solution explains the sorption process. The proposed one of the ways to implement the results.

Keywords: coal, sorption, wetting agent, solution, moisture, dust, binding.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-215-225

## AUTHORS

*Kudryashov V.V.*, doctor of technical Sciences, leading researcher of the Department of geotechnologies, IPCON RAS.

## REFERENCES

1. *Rukovodstvo po bor'be s pyl'yu na ugol'nyh shahtah* [Guidance on dust control in coal mines]. Moscow: Nedra, 1979.
2. Kudryashov V.V., Voronina L.D., Shurinova M.K. i dr. *Smachivanie pyli i kontrol' zapylennosti vozduha v shahtah* [Dust Wetting and air dust control in mines]. Moscow: Nauka. 1979 196 p.
3. Petruhin.P.M., Grodel' G.S., Zhilyaev N.I. i dr. *Bor'ba s ugol'noj i porodnoj pyl'yu v shahtah* [Fight against coal and rock dust in mines]. Moscow: Nedra, 1981, 271 p.
4. Nikitina S.A., Taubman A.B., Zakieva S.H. *Bor'ba s silikozom* [Elimination of silicosis]. Moscow: Izd-vo AN SSSR. 1959. T. III. p. 30.
5. Ettinger I.L., Shul'man N.V. *Raspredelenie metana v porah iskopaemyh uglej* [Distribution of methane in the pores of fossil coals]. Moscow: Nauka. 1975. 112 p.
6. Shinoda K., Nakagava T., Tamamusi B., Isemura T. *Kolloidnye poverhnostno-aktivnye veshchestva* [Colloidal surfactants]. Moscow: Izdatel'stvo «Mir». 1966. 317 p.
7. Kudryashov V.V. *Nauchnye osnovy gidroobespylivaniya shaht Severa* [Scientific bases of hydro-dusting of mines of the North]. Moscow: Nauka. 1984. 264 p.
8. Kudryashov V.V., Voronina L.D. *Pribor dlya izucheniya parametrov gidroobespylivayushchego processa i pylepodavlyayushchih svojstv zhidkostej* [Device for studying the parameters of the hydro-dusting process and dust-suppressing properties of liquids]. Upravlenie gazovydeleniem i pylepodavlenie v shahtah. Moscow: Nauka. 1972. pp. 96–111.
9. Kudryashov V.V. *Bor'ba s silikozom* [Fight against silicosis]. Moscow: Nauka. 1982. T.IH. p. 11.
10. Kudryashov V.V. *O diffuzionnom mekhanizme formirovaniya adsorbci-onnogo sloya molekul PAV na granice razdela rastvora s vozduhom* [On the diffusion mechanism of formation of the adsorption layer of surfactant molecules at the interface between the solution and air]. Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh. 2010. no 4. pp. 104–108.
11. Kudryashov V.V., Solov'eva E.A., Ivanov E.S. *Vliyanie davleniya i koncentracii rastvora na sorbciju PAV iskopaemyh uglem* [Effect of solution concentration pressure on the sorption of fossil coal]. Himiya tverdogo topliva. 2014. no 1. pp. 37–42.
12. Kudryashov V.V., Ivanov E.S., Solov'eva E.A., Postavnin B.N. *Sposob termovlazhnostnoj obrabotki ugol'nogo massiva rastvorami poverhnostno-aktivnyh veshchestv (smachivatelyami) i ustrojstvo ego realizuyushchee* [A method of heat and moisture treatment of coal massif with solutions of surfactants (wetting agents) and its implementing device]. Patent RF na izobreneniye no 2599116. Prioritet izobreneniya 16 iyulya 2015 g.



## ОСНОВЫ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО МЕТОДА ГИДРООБРАБОТКИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

Рассмотрена проблема низкой эффективности мероприятий, направленных на снижение негативных последствий, связанных с газовым фактором при проведении подготовительных выработок по высокогазоносным угольным пластам. Приводятся результаты исследований в области применения гидрорыхления угольного пласта при проведении подготовительных выработок по высокогазоносным угольным пластам с целью снижения газовой и газодинамической опасности.

Опасность инициирования газодинамических явлений, в том числе внезапных выбросов угля и газа, а также вероятность достижения взрывоопасных концентраций метана в атмосфере рабочего пространства, является основным фактором, влияющим на темпы проведения подготовительных выработок при постоянно совершенствующихся технических возможностях. Указывается, что только создание значительной зоны разгрузки в окрестности скважины инициирует ток метана, содержащегося в пласте в свободном и адсорбированном виде.

Представлен эффективный способ применения гидрорыхления угольного пласта при проведении подготовительных выработок с учетом технологических особенностей их проведения. Представлено устройство для выполнения метода гидрорыхления угольного пласта через шпур, пробуренные из забоя выработки. Уделяется внимание этапам выполнения метода эффективной гидрообработки угольного пласта впереди подготовительного забоя.

Ключевые слова: угольный пласт, подготовительная выработка, дегазация, шпур, дебит метана, начальное метановыделение, гидрорыхление.

---

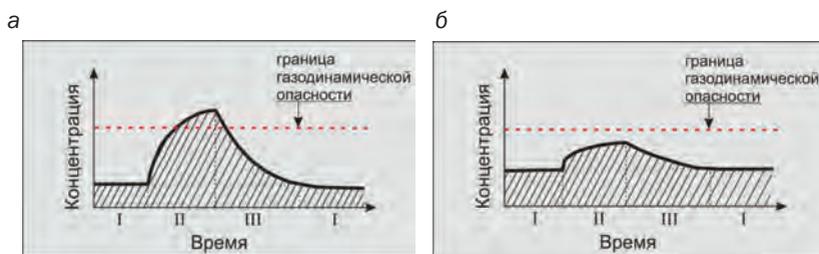
DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-226-234

Статья посвящена разработке метода повышения дебита метана угольных пластов в подземных условиях из шпуров (скважин) с целью снижения газовой и газодинамической опасности при проведении подготовительной выработки.

Проведение подготовительной выработки по газоносному угольному пласту приводит к изменению поля природных напряжений в углепородном массиве в ее окрестностях, в итоге чего формируется ток газа (в основном, метана) из приконтурной части пласта. Максимальная

концентрация метана в атмосфере выработки достигается в момент извлечения комбайном очередной полосы угля и в последующий непродолжительный период времени, вызванный перемещением границы зоны неупругих деформаций вглубь массива, а также газовыделением из отбитого угля. По интенсивности поступления метана в выработку ее метанообильность можно разделить на 3 типа (рис.1): фоновую, нарастающую во время работы проходческого комбайна и снижающуюся после взятия заходки (этап релаксации геомеханических напряжений).

Объем газа, который выделяется в выработку в процессе ее подвигания, поступает неравномерно [1]. Необходимо разработать мероприятия по усреднению метанообильности выработки, т.е. повышению фоновой метанообильности и снижению пиковой. На рис. 1, а и б заштрихованная часть имеет равные площади.



**Рис. 1. Изменение концентрации метана в забое подготовительной выработки в момент взятия заходки проходческим комбайном до (а) и после (б) проведения мероприятий по усреднению метанообильности выработки: I – фоновое метановыделение; II – метановыделение в процессе взятия заходки; III – метановыделение после взятия заходки, в момент интенсивных изменений геомеханических напряжений в приконтурной части угольного пласта**

Процесс метановыделения угольного пласта и проблема низкой эффективности дегазации [2] неразрывно связаны с его проницаемостью, а также с формами нахождения метана в нем.

Закономерность уменьшения проницаемости угольного пласта с увеличением глубины его залегания подтверждается в зарубежной [3] и отечественной [4] работах. В данных работах отмечается, что наиболее эффективным способом повышения проницаемости является снижение геостатических напряжений в пласте посредством отработки защитных пластов. При этом успешность его применения напрямую зависит от геологических особенностей месторождения угля.

В условиях невозможности повышения проницаемости за счет снижения геостатических напряжений посредством отработки защитных пластов необходимо искать способы разупрочнения угольного пласта, которые бы привели к его системной дезинтеграции [5–7].

В статье [8] приводится результат наблюдения изменения проницаемости в ходе продолжительной десорбции угольного пласта, вызванной развитием зоны влияния скважины, пробуренной с поверхности. Отмечается, что в ходе десорбции пласта проницаемость повышается также за счёт снижения механической прочности угля вплоть до частичного разрушения.

В работах [9,10] зарубежных коллег так же отмечается важная роль давления газа в угле на изменение проницаемости в угольном пласте. Изучая процессы адсорбции и десорбции в угле и их влияние на механические свойства при бурении скважины, авторы пришли к выводу, что при повышении давления свободного газа в кливаже, вследствие перераспределения напряжений в окрестности скважины, происходит сжатие угольной матрицы и снижение адсорбции.

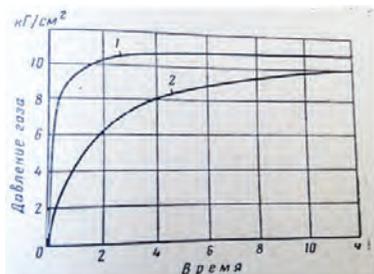
В настоящее время имеется несколько гипотез о формах связи метана с углем. Согласно гипотезам, метан в угле находится в различных формах: свободной, сорбированной, в виде твердого углегазового раствора (ТУГР) [11] и кристаллогидратов [12]. Однако, образование кристаллогидратов метана в угольных пластах напрямую связано с наличием влаги и определенным соотношением давления и температуры системы «уголь-метан-вода».

Авторы данной статьи склонны придерживаться гипотезы нахождения основного объема метана в системе по типу «уголь-метан», а именно в виде твердого углегазового раствора. Особенность данного соединения заключается в том, что с увеличением глубин залегания угольных пластов доля метана в составе ТУГР увеличивается, и главным условием его извлечения является разгрузка пласта от механических напряжений. Если угольный пласт не разгружен от геостатических напряжений, то объемы выделившегося из блоков угля газа можно увязать с площадью обнажения их поверхности фильтрующими трещинами, а сам процесс метановыделения происходит в основном за счёт диффузии свободного и адсорбированного метана. Таким образом, давление газа в трещинах зависит не только от их пропускной способности, но и от интенсивности диффузии газа из блоков. Данные свойства ТУГР обуславливают невысокую скорость выделения метана в скважины. Однако при распаде ТУГР в случае снижения напряжений интенсифицируется процесс диффузии, повышая градиент давления, необходимый для роста скорости фильтрации.

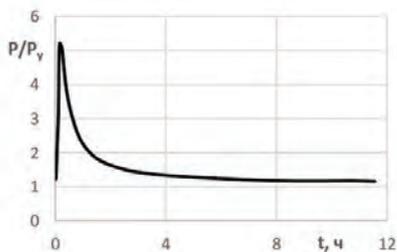
Учитывая данные особенности газовой выделения, можно заключить, что для предотвращения внезапных выбросов необходимо уменьшить скачкообразность изменения деформаций и напряженного состояния угольного пласта впереди движущейся выработки и способность массива накапливать потенциальную упругую энергию, а также требуется снизить до безопасного предела скорость выделения из угля газа [13].

В свою очередь, нагнетание воды в пласт приводит к закупорке угольных пор жидкостью и снижению газопроницаемости угля, а также изменению его механических свойств [14].

Для подтверждения вышесказанного, в работе [15] представлена информация о росте газового давления в скважине, пробуренной по пласту Лугутинский (рис.2.), и эффективности мероприятий по увлажнению пласта.

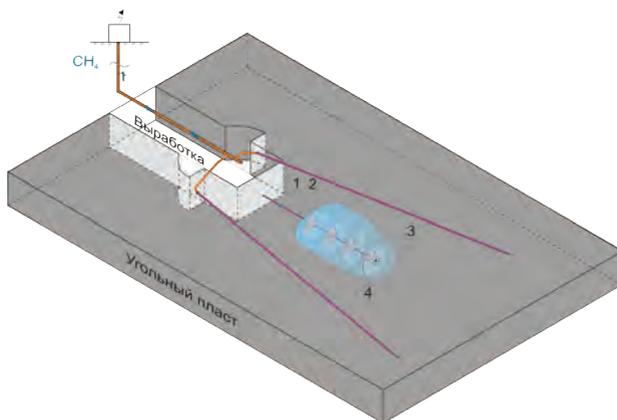


**Рис.2. Нарастание давление в скважине[15]: 1 – до увлажнения, 2 – после увлажнения**



**Рис.3. Отношение давления газа в скважину до и после увлажнения (результаты анализа данных на рис. 2)**

На рис.4 предлагается схема проведения мероприятий по снижению выбросоопасности призабойной части пласта и повышению фоновому метановыделению, а, следовательно, снижению пикового метановыделения, представленного на рис.3.



**Рис.4. Схема выполнения метода гидрорыхления угольного пласта впереди подготовительного забоя: 1 – бурение шпура (скважины); 2 – «сухой» гидроразрыв; 3 – нагнетание воды; 4 – разбуривание шпура (скважины)**

В данной схеме отображаются основные этапы данного мероприятия:

1. Бурение шпура на расстоянии 8 метров;

2. Установка пакера по длине шпура и выполнение серии «сухих» гидроразрывов. Под «сухим» гидроразрывом авторами подразумевается создание единой магистральной радиальной трещины из шпура и прекращение подачи жидкости до перехода к процессу увлажнения пласта. Серия гидроразрывов проводится через 10–15 см по скважине на расстоянии 4–8 метров от устья шпура (4 м от забоя неснижаемое опережение). Объем закачиваемой воды при выполнении одного «сухого» разрыва составляет порядка 20–60 л в зависимости от производительности насосной установки и физико-механических свойств угольного пласта;

3. Нагнетание через шпур воды в зону выполнения серии гидроразрывов с давлением 0,8 МПа. Объем закачиваемой жидкости в режиме увлажнения через сеть созданных трещин составляет в зависимости от физико-механических свойств угольного пласта и геометрических размеров выработки от 1 до 1,5 м<sup>3</sup> воды;

4. Разбуривание шпура до диаметра 90 мм с целью повышения эффективности тока метана в сторону шпура (скважины) за счет разгрузки.

Разработанные мероприятия выполняются коллективом из 2 рабочих ГРП, время выполнения 2–2,5 часа.

Выполнение гидроразрыва через шпуры возможно осуществить с помощью устройства «Пакер манжетный механический», разработанного в ИУ СО РАН (рис. 5). Устройство предназначено для образования направленных трещин в пласте через шпур в призабойной зоне методом гидроразрыва.



*Рис. 5. Пакер манжетный механический (ИУ СО РАН)*

## **Выводы**

Применение способа гидрорыхления через шпуры в большей степени будет способствовать снижению газодинамического потенциала призабойной зоны пласта, следовательно, представленный способ применения гидрорыхления возможно, к примеру, использовать в совокупности с барьерными скважинами для достижения более высоких результатов по снижению газовой и газодинамической опасности при проведении выработок по высокогазоносным пластам.

Развитие технологии эффективного гидровоздействия на угольные пласты и ее поэтапное внедрение в технологический процесс проведения подготовительных выработок по высокогазоносным угольным пластам создадут дополнительные возможности повышения темпов их продвижения, при этом не снижая уровня безопасности горных работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плаксин М.С., Рябцев А.А. Особенности развития динамических газопроявлений при проведении подготовительной выработки // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. – 2017. – №3. – С.67–73.
2. Родин Р.И. Эффективность дегазации шахт Кузбасса // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2011. – №2–2 – С.116–119.
3. Pinkun G., Yuanping C. Permeability prediction in deep coal seam: a case study on the No. 3 coal seam of the Southern Qinshui Basin in China // The Scientific World Journal. 2013. Vol. 2013. P. 10. doi:10.1155/2013/161457
4. Мазаник Е.В., Понизов А.В., Садов А.П., Сластунов С.В. Усовершенствованная технология предварительной дегазации угольных пластов на основе их гидроразрыва // Знание. 2016. №5–1(34). С. 111–116
5. Lecampion B., Desroches J., Jeffrey R.G., Bungler A.P. Experiments versus theory for the initiation and propagation of radial hydraulic fractures in low-permeability materials // Journal of Geophysical Research: Solid Earth 122 (2). 2017. pp. 1239–1263.
6. Плаксин М.С., Родин Р.И. Особенности повышения газопроницаемости угольных пластов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 1. – С. 42–48.
7. Klishin V.I., Opruk G.Y., Tatsienko A.L. Technology and means of coal seam interval hydraulic fracturing for the seam degassing intensification // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 53(1). 2017. doi: 10.1088/1755–1315/53/1/012019
8. Moore R.L., Loftin D, Palmer I. History matching and permeability increases of mature coalbed methane wells in San Juan Basin // SPE Asia pacific oil and gas conference and exhibition, 20–22 September 2011, Jakarta, Indonesia.
9. Espinoza D.N., Pereira J.-M., Vandamme M., Dangla P., Vidal-Gilbert S. Desorption-induced shear failure of coal bed seams during gas depletion // International Journal of Coal Geology 137. 2015. pp. 142–151.
10. Espinoza D.N., Vandamme M., Dangla P., Pereira J.-M., Vidal-Gilbert S. A transverse isotropic model for microporous solids – Application to coal matrix adsorption and swelling // Journal of Geophysical Research Solid Earth 118. 2013. pp. 6113–6123.
11. Диплом на открытие №9. Свойство органического вещества образовывать с газами метастабильные однофазные системы по типу твердых растворов / А.Д. Алексеев, А.Т. Айруни, Ю.Ф. Васючков, И.В. Зверев, В.В. Синолицкий, М.О. Долгова, И.Л. Эттингер – Акад. ест. наук, Ассоц. авт. науч. откр. от 10.11.1994, рег. №16, Москва. – 3 с.
12. Дырдин В.В., Опарин В.Н., Фофанов А.А, Смирнов В.Г., Ким Т.Л. О возможном влиянии вторичных осадков основной кровли при отработке угольных пластов на их выбороопасность при разложении газовых гидратов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – №5. С.3–14.
13. Пузырев В.Н. Увлажнение угольных пластов как метод борьбы с газовыделениями и внезапными выбросами // Сб. «Нагнетание воды в угольные пласты». М.: Недра. – 1965. – С. 73–90.

14. Чернов О.И. Развитие метода комплексной борьбы с угольной пылью, горными ударами, газовыделениями, внезапными выбросами угля и газа и эндогенными пожарами в угольных шахтах // Сб. «Нагнетание воды в угольные пласты». М.: Недра. – 1965. – С. 7–64.

15. Хашин В.Н. Увлажнение угольных пластов на шахтах Прокопьевского месторождения Кузбасса // Сб. «Нагнетание воды в угольные пласты». М.: Недра. – 1965. – С. 122–129. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Плаксин Максим Сергеевич* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории газодинамики угольных месторождений Института угля, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, проспект Советский, 18, г. Кемерово, Россия, 650991, тел.:8(3842)74–18–03, e-mail: gas\_coal@icc.kemsc.ru,

*Родин Роман Иванович* – младший научный сотрудник лаборатории газодинамики угольных месторождений Института угля, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, проспект Советский, 18, г. Кемерово, Россия, 650991,

*Горностаев Вадим Сергеевич* – главный инженер ООО «ММК – Уголь» шахта «Чертинская-Коксовая», ул. Промышленная 1, г. Белово, Россия, 652607 e-mail: Gornostaev.vs@mmk-coal.ru.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyy vypusk 49), pp. 226–234.

**Plaksin M.S., Rodin R.I. , Gornostayev V.S.**

### **Fundamentals of highly effective method of hydro manipulation a coal seam at the preparatory workings**

The paper deals with the problem of low efficiency of measures aimed at reducing the negative consequences associated with the gas factor during the preparatory workings on high-gas-bearing coal seams. The results of research in the field of application of coal seam hydro ripping during the preparatory workings on high-gas-bearing coal seams in order to reduce gas and gas-dynamic hazard are presented.

The danger of initiating gas-dynamic phenomena, including sudden emissions of coal and gas, as well as the probability of reaching explosive concentrations of methane in the atmosphere of the working space, is the main factor influencing the pace of preparatory workings with constantly improving technical capabilities. It is indicated that only the creation of a significant discharge zone in the vicinity of the well initiates the current of methane contained in the formation in free and adsorbed form.

An effective method of application of coal seam hydro ripping during the preparatory workings taking into account the technological features of their conduct is presented. A device for performing the method of coal seam hydro ripping through holes drilled from the bottom of the mine is presented. Attention is paid to the stages of implementation of the method of effective hydro manipulation of the coal seam ahead of the preparatory face.

It is noted that the development and gradual introduction of effective technology of hydro-action on coal seams in the technological process of preparatory workings on high-gas-bearing coal seams will serve as a reliable way to prevent gas-dynamic phenomena while ensuring an increase in the rate of advance workings without reducing the level of safety of mining.

Key words: coal seam, preparatory working, degassing, well, the flow rate of methane, the initial methane release, hydro ripping.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-226-234

## AUTHORS

*Plaksin M.S.*, candidate of technical Sciences, senior researcher of the laboratory of gas dynamics of coal deposits Of the Institute of coal, Federal research center of coal and coal chemistry of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Sovetsky Avenue, 18, Kemerovo, Russia, 650991, tel.: 8 (3842)74-18-03, e-mail: gas\_coal@icc.kemsc.ru,

*Rodin R.I.*, Junior researcher of the laboratory of gas dynamics of coal deposits Of the Institute of coal, Federal research center of coal and coal chemistry of the Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Sovetsky Avenue, 18, Kemerovo, Russia, 650991,

*Gornostayev V.S.*, chief engineer of JSC «MK – Coal» mine «Chertinskaya-Koksovaya», St. Promyshlennaya 1, g. Belovo, Russia, 652607 e-mail: Gornostaev.vs@mmk-coal.ru.

## REFERENCES

1. Plaksin M.S., Ryabcev A.A. *Osobennosti razvitiya dinamicheskikh gazoprovyavlenij pri provedenii podgotovitel'noj vyrabotki* [Features of the development of dynamic gas in the preparation of development]. Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nyh resursov. 2017. no 3. pp. 67–73.

2. Rodin R.I. *Effektivnost' degazacii shaht Kuzbassa* [Efficiency of degassing of mines of the Kuznetsk basin]. Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti. 2011. no 2–2. pp. 116–119.

3. Pinkun G., Yuanping C. *Permeability prediction in deep coal seam: a case study on the No. 3 coal seam of the Southern Qinshui Basin in China*. The Scientific World Journal. 2013. Vol. 2013. R. 10. doi:10.1155/2013/161457

4. Mazanik E.V., Ponizov A.V., Sadov A.P., Slastunov S.V. *Usovershenstvovannaya tekhnologiya predvaritel'noj degazacii ugol'nyh plastov na osnove ih gidrorazryva* [Advance technology of preliminary degassing of coal seams based on their hydraulic fracturing]. Znanie. 2016. no 5–1(34). pp. 111–116

5. Lecampion B., Desroches J., Jeffrey R.G., Bungler A.P. *Experiments versus theory for the initiation and propagation of radial hydraulic fractures in low-permeability materials*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 122 (2). 2017. pp. 1239–1263.

6. Plaksin M.S., Rodin R.I. *Osobennosti povysheniya gazopronicaemosti ugol'nyh plastov* [Features of increase of gas permeability of coal seams]. Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti. 2016. no 1. pp. 42–48.

7. Klishin V.I., Opruk G.Y., Tatsienko A.L. *Technology and means of coal seam interval hydraulic fracturing for the seam degassing intensification*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 53(1). 2017. doi: 10.1088/1755–1315/53/1/012019

8. Moore R.L., Loftin D, Palmer I. *History matching and permeability increases of mature coalbed methane wells in San Juan Basin*. SPE Asia pacific oil and gas conference and exhibition, 20–22 September 2011, Jakarta, Indonesia.

9. Espinoza D.N., Pereira J.-M., Vandamme M., Dangla P., Vidal-Gilbert S. *Desorption-induced shear failure of coal bed seams during gas depletion*. International Journal of Coal Geology 137. 2015. pp. 142–151.

10. Espinoza D.N., Vandamme M., Dangla P., Pereira J.-M., Vidal-Gilbert S. *A transverse isotropic model for microporous solids Application to coal matrix adsorption and swelling*. Journal of Geophysical Research Solid Earth 118. 2013. pp. 6113–6123.

11. Alekseev A.D., Ajruni A.T., Yu.F. Vasyuchkov, Zverev I.V., Sinolickij V.V., Dolgova M.O., Ettinger I.L. *Diplom na otkrytie no 9. Svoystvo organicheskogo veshchestva obrazovyvat' s gazami metastabil'nye odnofaznye sistemy po tipu tverdyh rastvorov* [Diploma for the opening no 9. The property of organic substances to form gases of metastable single-phase system-type solid solutions]. Akad. est. nauk, Assoc. avt. nauch. otkr. ot 10.11.1994, reg. no 16, Moscow. 3 p.

12. Dyrdin V.V., Oparin V.N., Fofanov A.A, Smirnov V.G., Kim T.L. *O vozmozhnom vliyanii vtorichnyh osadkov osnovnoj krovli pri otrabotke ugol'nyh plastov na ih vybrosopasnost' pri razlozhenii gazovyh gidratov* [On the possible influence of secondary precipitation of the main roof during the development of coal seams on their emission hazard in the decomposition of gas hydrates]. Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh. 2017. no 5. pp. 3–14.

13. Puzyrev V.N. *Uvlazhnenie ugol'nyj plastov kak metod bor'by s gazovydeleniyami i vnezapnymi vybrosami* [Humidification of coal seams as a method of combating gas emissions and sudden emissions]. Sb. «Nagnetanie vody v ugol'nye plasty». Moscow: Nedra. 1965. pp. 73–90.

14. Chernov O.I. *Razvitie metoda kompleksnoj bor'by s ugol'noj pyl'yu, gornymi udarami, gazovydeleniyami, vnezapnymi vybrosami uglja i gaza i endogennymi pozharemi v ugol'nyh shahtah* [Development of a method of integrated management of coal dust, rock bursts, gas emissions, sudden emissions of coal and gas and endogenous fires in coal mines]. Sb. «Nagnetanie vody v ugol'nye plasty». Moscow: Nedra. 1965. pp. 7–64.

15. Hashin V.N. *Uvlazhnenie ugol'nyh plastov na shahtah Prokop'evskogo mestorozhdeniya Kuzbassa* [Moisture of coal seams Prokopyevsk in mines, deposits of the Kuznetsk basin]. Sb. «Nagnetanie vody v ugol'nye plasty». Moscow: Nedra. 1965. pp. 122–129.



## ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ ДЕСОРБЦИИ МЕТАНА ИЗ КАМЕННОГО УГЛЯ\*

Цель исследований состоит в получении и сопоставлении экспериментальной информации о механизмах транспорта метана в твердых углеводородах для понимания природы изменения сорбционной кинетики в метаморфическом ряду углей. Экспериментальной базой для этого служили полученные нами данные о кинетике десорбции метана из образцов активированного угля, покрытых полимерной пленкой, и каменного угля низкой метаморфизации марки «Д». Процесс формирования пленки на активированном угле контролировали по ширине спектра ядерного магнитного резонанса на протонах  $^1\text{H}$ . Методика эксперимента включала подготовку образцов активного угля с полимерной пленкой на поверхности, а также измельчение каменного угля до фракции 0,2–0,25 мм и насыщение всех образцов метаном при температуре 300К в контейнере высокого давления (3 МПа) в течение 10 суток. Измерения последующей десорбции производили в сосуд известного объема. Регистрация и визуальное наблюдение кинетики заполнения сосуда происходило в режиме реального времени с интервалом 0,65 с.

Для обработки экспериментальных результатов применен метод анализа, основанный на представлении о характерном времени десорбции. Получена информация о величинах коэффициента эффективной диффузии  $D_{\text{eff}}$  метана в полимерной пленке покрытия и каменном угле. Обнаружено, что в полимере величина  $D_{\text{eff}} \approx 10^{-15} \text{ м}^2/\text{с}$ , а в угле  $\approx 6 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$ . Такие величины  $D_{\text{eff}}$  дают основание считать, что транспорт метана в полимерной пленке и блоках угля происходит в виде твердотельной диффузии через аморфное вещество. Высказано предположение, что по мере метаморфизации проницаемость блоков и роль системы пор должна возрастать.

Ключевые слова: метан, активированный уголь, блоки угля, метаморфизация, коэффициент эффективной диффузии, твердотельная диффузия, полимерная пленка, десорбция, окислительная полимеризация

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-235-248

### Введение

Эффективное выполнение дегазационных мероприятий и прогноз загазованности невозможны без изучения особенностей транспорта газа в ископаемых углях. Различная степень метаморфизации углей,

---

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16–05–00816-а

неоднородная пористость, трещиноватость и влажность определяют широкий спектр параметров, влияющих на кинетику движения газа, что затрудняет сравнительный анализ опытных данных. В итоге, как следует из литературы [1–6], до сих пор не прекращается дискуссия о механизмах движения газа в углях. И хотя считается, что в пористых материалах, возможны процессы фильтрации и диффузии или их суперпозиция [7–12], такое предположение развивается, в основном, в теоретических представлениях без достаточного экспериментального обоснования.

Прогресс в понимании характера движения метана связан с развитием представлений о блочном строении ископаемых углей [7], согласно которым вся масса угля разбита соединяющимися между собой трещинами и макропорами на отдельные структурные элементы – блоки. Трещины и макропоры образуют фильтрационный объём, сообщающийся с внешней поверхностью угля. Упомянутые блоки также иссечены, однако более мелкими каналами - микропорами, которые, как полагают авторы, являются основным коллектором метана в угле. При десорбции, метан после истечения путем диффузии из микропор блоков поступает в фильтрационные каналы – трещины и макропоры и далее выходит на поверхность угля.

Уникальность структуры вещества блоков состоит не только в способности аккумулировать метан, но и в особенностях его эмиссии. Последние исследования показали [8], что, чем ниже метаморфизация угля, тем, как правило, меньше сорбционная емкость блоков и продолжительнее диффузионная релаксация. Авторы высказывают предположение, что это связано со снижением степени упорядочения структурных элементов в блоках углей. В этой связи будет полезна экспериментальная информация о кинетике движения метана в аморфном веществе, полученном, например, путем окислительной полимеризации жидкого углеводорода.

**Цель** работы состоит в получении и сопоставлении экспериментальной информации о механизмах транспорта метана в твердых углеводородах для понимания природы изменения сорбционной кинетики в метаморфическом ряду углей.

### **Метод анализа кинетики десорбции газа в накопительный сосуд**

Рассмотрим объемный метод регистрации десорбции газа из твердого тела (ТТ). В этом случае газ из твердого тела поступает в накопительный сосуд (НС) известного объема, в результате чего концентрация  $n$  газа в сосуде с течением времени  $t$  растет до равновесного значения  $n_0$ . Согласно теории нестационарной диффузии в завершающей фазе (при больших  $t$ ) должна наблюдаться экспоненциальная зависимость концентрации газа в накопительном сосуде от времени  $t$ : В терминах количества молекул газа в сосуде  $N_{НС}(t)$  и образце  $N_{ТТ}(t)$  получаем удобные для анализа выражения:

$$N_{HC}(t) = N_0(1 - \exp(-t/\tau)) \quad (1)$$

$$N_{TT}(t) = N_0 - N_{HC}(t) = N_0 \exp(-t/\tau) \quad (2)$$

$$dN_{HC}(t)/dt = (1/\tau)N_0 \exp(-t/\tau) \quad (3)$$

В этих выражениях  $N_0$  – количество газа до начала десорбции из твердого тела, имеющего радиус  $R$ . Логическим следствием уравнений (2) и (3) является следующая формула

$$N_{TT}(t) / \frac{dN_{HC}(t)}{dt} = \tau = R^2 / D, \quad (4)$$

где  $\tau$  – характерное время релаксации системы твердое тело – газ при диффузии, а  $D$  – коэффициент диффузии.

В случае, когда десорбция происходит из пористого тела, такого как ископаемый уголь, возможен иной – диффузионно-фильтрационный – механизм истечения газа. Поэтому логично ввести новые обозначения: характерное время десорбции –  $\tau^{des}$  и эффективный коэффициент диффузии –  $D_{eff}$

Характерное время десорбции газа  $\tau^{des}$  удобно использовать в качестве базового параметра при анализе результатов эксперимента. Преимущество такого подхода обусловлено несколькими причинами. Одна – это высокая чувствительность характерного времени к размеру гранул угля. Вторая, не менее важная, связана с тем, что величина  $\tau^{des}$  не зависит от количества образца и объема накопительного сосуда. И третья – это удобство компьютерного расчёта параметра  $\tau^{des}$ , который входит в формулу для интерполяционной функции, описывающей ход изменения дискретных экспериментальных данных. Сведения о величине этого параметра позволяют судить о механизмах и транспортных характеристиках твердого тела.

Для характеристики количества газа используем далее термин «объём» газа – в накопительном сосуде или в образце. В соответствии с (4), параметр

$$\tau^{des}(t) = Q_{об}(t) / [dQ_{HC}(t)/dt] \quad (5)$$

– это время истечения всего метана  $Q_{об}(t)$ , который в данный момент времени  $t$  содержится в образце, в предположении, что поток десорбируемого газа  $dQ_{HC}/dt$  останется таким же, как и в момент времени  $t$ , а другие источники (или поглотители) газа отсутствуют. Как показывает опыт, кинетика выделения газа из угля при десорбции имеет широкий диапазон констант времени ( $\tau^{des}$ ) – от нескольких минут до суток в зависимости от стадии десорбции, уровня метаморфизации, температуры и других факторов, в частности, от энергетики диффузионного процесса.

В отличие от гомогенных материалов в ископаемых углях, благодаря их пористой структуре, имеет место дисперсия длины пути диффузии молекул флюида (газа). Эффективный коэффициент десорбции  $D_{eff}(t)$  газовых молекул следует принимать как его усредненное значение по объёму тела угля. Это обусловлено сложной надмолекулярной структурой угольного вещества, иерархией вида и размера пустот, формирующих поровое пространство.

Зависимость характерного времени десорбции от  $D_{eff}(t)$  и энергии активации  $\varepsilon$  диффузионного процесса описывается выражениями, следующими из теории диффузии в твердых телах [5]

$$\tau^{des}(t) = R^2/D_{eff}(t), \quad (6)$$

$$D_{eff}(t) = D_0 \exp(-\varepsilon/k_B T), \quad (7)$$

где параметры  $D_0$  предэкспоненциальный множитель,  $k_B$  постоянная Больцмана,  $T$  температура;  $R$  – радиус куска твердого тела.

Если из эксперимента известна зависимость параметра  $\tau^{des}$  от времени десорбции, то с помощью выражения (6), можно оценить эффективный коэффициент диффузии  $D_{eff}(t)$  на любой стадии эмиссии газа из образца угля. Подобная информация была получена для случая диффузии метана в полимерной пленке на активированном угле и соотносилась с аналогичными данными для ископаемого угля низкой метаморфизации. Результаты сравнения использованы для физической интерпретации особенностей кинетики десорбции метана из угля в гранулах различного размера.

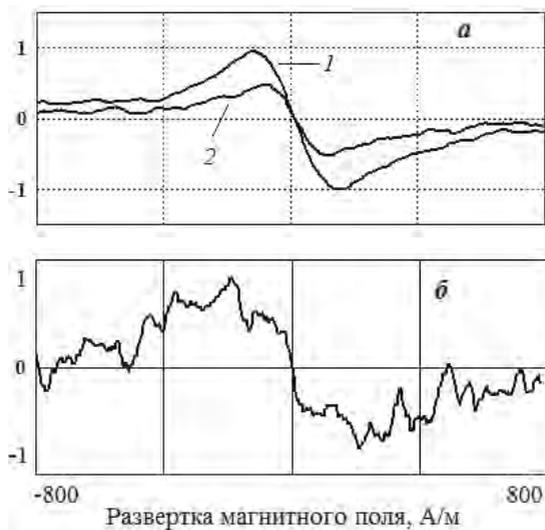
### **Кинетика эмиссии метана из активированных углей с загрязненной поверхностью**

Материал статьи предваряют исследования кинетики истечения метана из активированного угля с искусственно загрязненной поверхностью. Предполагается, что наличие тонкой органической пленки на поверхности активированного угля может существенно ослабить эмиссию газовых молекул, моделируя, тем самым, диффузионный процесс в природных углях.

Изучалась кинетика эмиссии метана из активированного угля с полимерным покрытием и из сухого каменного угля методом десорбции в вакуумированный сосуд. Точность метода определяется точностью измерения объема сосуда, его термостатирования и измерения давления газа, собранного в сосуде. Этот метод свободен от влияния атмосферной влажности и, таким образом, позволяет регистрировать ход десорбции длительное время.

Подготовка образцов. Для образования органической пленки активированный уголь марки СКТ в гранулах 1–5 мм погружался в жид-

кость – раствор вакуумного масла (ВМ6) в бензине. Вариация степени загрязнения достигалась изменением концентрации масла – от 0,1 до 1 г на 100 г бензина марки «калоша». Извлеченный из раствора уголь выдерживался сутки на фильтрационной бумаге. В последующем и чистые и загрязнённые активированные угли подвергались термообработке при  $T \approx 180^\circ\text{C}$  в течение 8-ми часов для полимеризации поверхностного слоя масла на угле. Процесс полимеризации контролировали по ширине линии спектров ядерного магнитного резонанса ЯМР на протонах  $\text{H}^1$ . После термообработки образцов, выдержанных в растворах с различной концентрацией масла, ширина линий спектра достигала 250 А/м (3 Э). На рис. 1, а демонстрируются два спектра резонанса протонов в полимерных пленках различной толщины – результат различной степени покрытия поверхности активного угля в двух образцах, подготовленных к проведению сорбционных опытов. Заметно, что чем больше уголь загрязнен органическими флюидами, тем больше отношение «сигнал/шум».



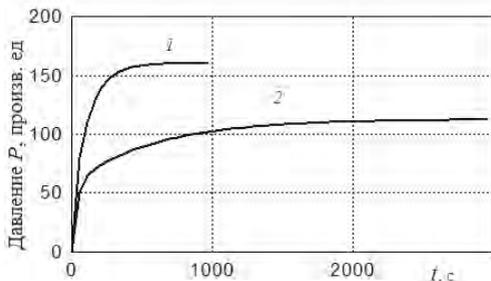
**Рис. 1. Вид спектров ЯМР  $\text{H}^1$  в полимерных пленках на активированных углях – а и ископаемом угле марки «Д» – б. 1 – «сильно загрязненный» уголь, 2 – «грязный» уголь. Амплитуда спектров приведена в произвольных единицах**

Линии спектров 1 и 2 отличаются по амплитуде, но имеют одинаковую ширину, что указывает на равную степень полимеризации. Технология получения полимерного покрытия активного угля не позволяет оценить толщину пленки. Можно утверждать только, что её толщина в образце 1 больше, чем в образце 2. Важным для нашего исследования

являются тот факт, что пленки, как любой полимер, имеют аморфную структуру и характеризуются низкой растворимостью и сорбируемостью метана.

Известно, что структура полимеров зависит от многих факторов: строения макромолекул, их величины, а также от условий их получения (образования). Процесс окислительной полимеризации масла априори неадекватен метаморфизации угольного вещества, которая сопровождается образованием пор и происходит без доступа воздуха. Отличия полимера искусственного от полимеров угольного вещества находят отражение в ширине линий спектров ЯМР. На рис. 1, б представлен спектр ЯМР для угля марки «Д». Видно, что ширина спектра для природного угля больше, чем для полимерной пленки и составляет около 400 А/м (5 Э). После того после термообработки как ширина линий ЯМР стабилизировалась, контейнеры с образцами подключали к баллону с сжатым метаном (давление 3,0 МПа) и выдерживали уголь в метановой среде в течение 7 суток. После вскрытия контейнера и сброса сжатого газа в атмосферу контейнер подсоединяли к вакуумированному накопительному сосуду и регистрировали в нём изменение давления Р газа. (Из-за неконтролируемой потери газа при расконсервации контейнеров сравнение газоносности образцов угля не проводили). Результаты измерений показаны на рис. 2.

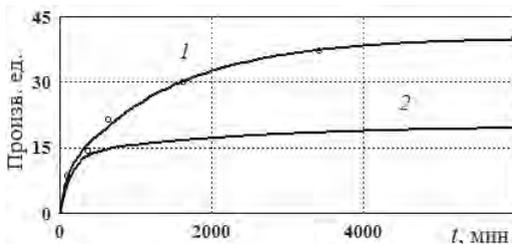
Из рис. 2 видно, что, чистый активированный уголь при десорбции полностью теряет метан за 10 мин, а в случае «грязного» образца на это требуется уже около 30 мин.



**Рис. 2. Изменение давления  $P$  в накопительном сосуде в ходе десорбции метана из чистого активированного угля – 1, и «грязного» угля – 2**

Чистый активированный уголь обладает только открытой сорбционной поверхностью. Поэтому время установления сорбционного равновесия (при десорбции) будет определяться характерным временем  $\tau^f(t)$  нестационарной фильтрации газа в каналах между гранулами сыпного угля [9]. Время релаксации  $\tau^f(t)$  зависит от давления  $P_k(t)$  газа в контейнере как  $\tau^f(t) \propto 1/P_k(t)$ .

Наиболее интересна кинетика десорбции метана из «сильно загрязненного» активированного угля и ископаемого угля марки «Д» в гранулах размером 0,2–0,25 мм. Как видно из рис. 3, продолжительность истечения метана через полимер составляет не десятки, а тысячи минут, что превышает время эмиссии газа из природных углей [5]. В отличие от полимерной пленки интенсивность десорбции метана из вещества угля характеризуется двумя участками, которые можно связывать с «быстрой» и «медленной» десорбцией. Интерпретация особенностей кинетики десорбции газа из каменных углей дана в следующем разделе статьи. Данные, представленные на рис.3, позволяют оценить эффективный коэффициент диффузии  $D_{eff}(t)$  метана в органической пленке на поверхности активного угля. Причем эта величина будет получена в условиях, когда диффузия не сопряжена с другими видами массопереноса.



**Рис. 3.** Изменение давления  $P$  в накопительном сосуде в процессе десорбции метана из «сильно загрязненного» активированного угля – кривая 1 и угля марки «Д» – кривая 2

Расчет величины  $D_{eff}(t) = l^2 / \tau(t)$  можно выполнить, если известны длина  $l$  пути диффузии и характерное время  $\tau$  диффузионного процесса. Можно предположить, что полимерная пленка покрывает всю поверхность угля, и её толщина составляет, например, 10 микрон. Считая, что характерное время  $\tau$  заключительной фазы десорбции через полимер равно 1500 мин, средняя величина эффективного коэффициента диффузии метана в пленке, покрывающей уголь, составляет  $\approx 10^{-15}$  м<sup>2</sup>/с. Близкая величина коэффициента диффузии получена и в угле марки «Д» –  $D_{eff} \approx 6 \cdot 10^{-14}$  м<sup>2</sup>/с. Такие величины  $D_{eff}$  дают основание считать, что транспорт метана в полимерной пленке и блоках угля низкой метаморфизации происходит в виде твердотельной диффузии через аморфное вещество (со слабыми признаками упорядочения в углях марки «Д»).

Результат выполненных исследований дает нам право (по аналогии с блоковой моделью) рассматривать сами блоки как совокупность менее и более структурированных образований. Можно предположить, что это – распределенные по объёму блока неоднородные по степени упорядочения элементы угольного вещества, состоящие из пачек

ароматических слоев, сшитых углеводородными звеньями. По мере метаморфизации и упорядочения в таких элементах их проницаемость должна возрастать.

### **Интерпретация параметров интерполяционной функции хода десорбции**

При анализе экспериментальных данных по десорбции (или сорбции) метана из каменных углей всегда возникают трудности в выборе вида интерполяционной функции, описывающей процесс выхода газа. В первом разделе упоминалось, что ход десорбции газа из угля нельзя описать одной экспоненциальной функцией. Для обеспечения удовлетворительного приближения к опытным данным, необходимо использовать сумму большого числа таких функций, что усложняет аналитическое описание кинетики эмиссии газа. Нами обнаружено, что меньшее среднеквадратичное отклонение от эксперимента обеспечивается интерполяцией, имеющий вид комбинации «обратно-корневой» и экспоненциальной зависимостей:

$$Q_{HC}(t) = a(1 - (1 + bt)^{-0.5}) + c(1 - \exp(-t/\tau)) \quad (8)$$

Рассчитанный на основе этой формулы параметр  $\tau^{des}(t)$ , непрерывно изменяется во времени, что отражает реальный процесс десорбции. Очевидны так же и неудобства такой интерполяции: теряется наглядность физической интерпретации параметра  $b$  в первом слагаемом выражения (8). Поэтому в дальнейшем мы будем пользоваться приближением суммы двух экспонент

$$Q_{HC} = a(1 - \exp(-t/\tau_1)) + c(1 - \exp(-t/\tau_2)) \quad (9)$$

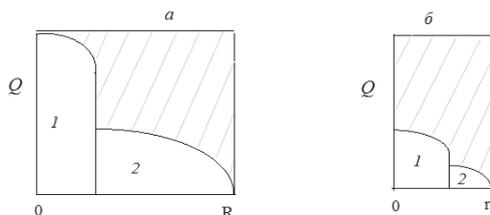
Параметр  $\tau^{des}(t)$  в этом приближении также зависит от  $t$ , однако, эта зависимость слабее, чем при интерполяции вида (8).

Таким образом, сделав выбор в пользу приближения (9), мы жертвуем точностью количественных оценок в пользу удобства качественного анализа. Заметим, что в данном случае параметры  $a$  и  $c$  (точнее, их сумма) отражают максимальный объем газа в накопительном сосуде после завершения десорбции. При другой методике регистрации десорбции, например, ЯМР на протонах метана в угле, может быть применима интерполяция вида  $a \exp(-t/\tau_1) + c \exp(-t/\tau_2)$  и параметры  $a$  и  $c$  будут связаны уже с количеством молекул метана в угле.

Исследования показали, что многие особенности кинетики десорбции метана хиз каменных углей являются следствием суперпозиции двух механизмов: газ путем диффузии из закрытых пор поступает в, частично уже свободные, открытые поры и трещины, в которых он, двигаясь далее к поверхности угля, испытывает эффект фильтрации. Последний приводит к зависимости плотности потока газа, времени

его истечения от средней длины и других характеристик транспортных каналов. Поскольку при вязком течении коэффициент фильтрации уменьшается в ходе десорбции, то существует момент времени, когда устанавливается баланс диффузионного и фильтрационного потоков. Таким образом, весь процесс десорбции можно условно разделить на две фазы: первая – это фаза процессов, предшествующих установлению баланса потоков, и вторая – завершающая фаза, когда источником выделяемого углем газа есть только его диффузия из блоков угля в открытые поры. Очевидно, что кинетика выхода газа в этих фазах должна быть различна.

Ниже, на рис. 4, схематично показаны элементы угля, состоящие из блока угля и, примыкающей к нему, открытой поры для гранул угля большого (а) и малого (б) размера. Здесь же иллюстрируется характер распределения в этих элементах количества (объема) газа при десорбции.

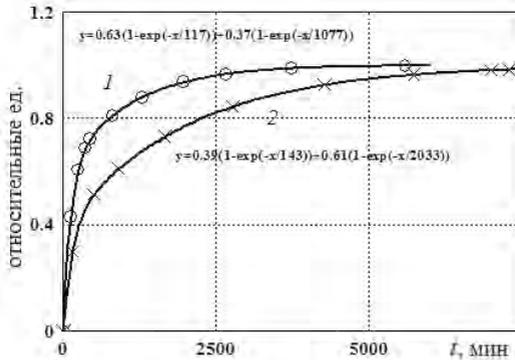


**Рис. 4. Схема распределения объема  $Q$  метана в блоках угля – а в открытых порах – б при балансе диффузионного и фильтрационного потоков. Гранулы большего (а) и меньшего (б) размеров**

Заштрихованная область показывает изменение объема газа в элементе угля за время первой фазы десорбции. В мелких гранулах угля из-за короткого пути фильтрации и большой начальной интенсивности газового потока, упомянутый выше баланс, наступает после значительного истощения содержания газа в транспортных каналах и блоках. В крупных гранулах, наоборот, баланс потоков происходит при меньшем истощении газа. Можно предположить, что обе составляющие интерполяционной функции (9) отражают кинетику выхода газа в каждой фазе десорбции. В этом случае следует ожидать, что переход от крупных гранул к мелким должен сопровождаться изменением соотношения параметров  $a$  и  $c$ , т.е.  $a/c$  будет больше в малых гранулах.

С целью выявить зависимость параметров  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $a$ ,  $c$  от размера гранул угля нами была проведена регистрация десорбции метана из каменного угля в гранулах  $0,2 \div 0,25$  мм и  $2,0 \div 2,5$  мм. В качестве образцов использован сухой уголь шахты им. А.Ф. Засядько. Ход десорбции из угля шахты им. Засядько представлен на рис. 5. Видно, что

кинетика эвакуации метана в накопительный сосуд удовлетворительно описывается функцией вида (9). Заметна также зависимость параметров функции от размера гранул угля. Для всех исследованных образцов обнаружено, что уменьшение размера гранул сопровождается ростом «быстрого» вклада (с малым  $\tau$ ) и, соответственно, уменьшением вклада «медленного».



**Рис. 5.** Характер десорбции метана из угля в гранулах: 0,2–0,25мм – кривая 1; 2,0 – 2,5мм – кривая 2

Этот результат дает основание связать «быструю» составляющую функции (3) с переходной фазой десорбции, а «медленную» с фазой десорбции в условиях баланса диффузионного и фильтрационного потоков. Представленный анализ можно рассматривать как физическое обоснование терминов «быстрый» и «медленный» метан, которые используются в угледобывающем производстве.

### Заключение

Результаты опытов по диффузии метана в полимерной пленке и в угле низкой метаморфизации позволяют расширить наши представления о микроструктуре блоков углей, характере её изменения в метаморфическом ряду ископаемых углей. Обнаружено, что в аморфной полимерной пленке, покрывающей активированный уголь, и в природном угле низкой метаморфизации, параметры транспорта метана при десорбции идентичны. Согласно экспериментальным данным коэффициент диффузии метана в пленке составляет  $\approx 10^{-15}$  м<sup>2</sup>/с, а в блоках угля марки «Д» –  $6 \cdot 10^{-14}$  м<sup>2</sup>/с. Практически равные величины параметров диффузии в полимере и блоках угля низкой метаморфизации дают основание считать, что блоки угля марки «Д» также имеют аморфную структуру. Поскольку в результате метаморфизации проницаемость угольных блоков растет [8], логично

связать это с трансформацией аморфной структуры блоков в структуру более упорядоченную.

В диффузионно-фильтрационной модели предложен вид интерполяционной функции, описывающей процесс выхода газа из угля. Дана физическая интерпретация составляющих функции и её параметров. Показано, что в приближении «двухвременной» функции можно объяснить характер трансформации кинетических параметров при изменении размера куска угля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alexeev A.D., Feldman E.P., Vasilenko T.A. Kinetics of Methane Desorption from Coal Nano- and Mesostructures // *Energy Fuels*, 2010, Vol. 24, no 8, pp 4375–4379.

2. Liu Y., Zhu Y., Li W. A hierarchical methane adsorption characterization through a multiscale approach by considering the macromolecular structure and pore size distribution. *Marine and Petroleum Geology*. 2018, Vol. 96, pp. 304–314.

3. Naveen P., Asif M, Ojha K. [et al.] Sorption Kinetics of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> Diffusion in Coal: Theoretical and Experimental Study // *Energy Fuels*, 2017, Vol. 31, no 7, pp. 6825–6837.

4. Li X., Shi J., Du X. [et al.] Transport mechanism of desorbed gas in coalbed methane reservoirs // *Petroleum Exploration and Development*. 2012, Vol. 39. no 2. pp. 218–229.

5. Алексеев А.Д. Физика угля и горных процессов. – Киев: Наук. Думка, 2010. – 424 с.

6. B. Xu, X. Li, M. Zhao [et al.] Phase Behavior and Flow Mechanisms of Desorption Gas in Coal Matrix // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* – 2015, Vol. 37. – no 4. pp. 365–371.

7. Алексеев А.Д., Василенко Т.А., Гуменник К.В. [и др.] Диффузионно-фильтрационная модель выхода метана из угольного пласта // *Журнал технической физики*. – 2007. – № 4. – С. 65–74.

8. Алексеев А.Д., Фельдман Э.П., Василенко Т.А., Калугина Н.А. Кинетика газовыделения метана из угля // *Деформирование и разрушение материалов с дефектами, и динамические явления в горных породах и выработках: XIV Межд. науч. школы. им. академика С.А. Христиановича; материалы*. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2004. – С. 5–6.

9. Alexeev A.D., Feldman E.P., Vasilenko T.A. Methane desorption from a coalbed // *Fuel*. 2007, Vol. 86, no 16, pp. 2574–2580.

10. Фельдман Э.П., Василенко Т.А., Калугина Н.А. Истечение метана из угля в замкнутый резервуар: роль явлений диффузии и фильтрации // *Физика и техника высоких давлений*. – 2006. – № 2. – С. 92–107.

11. Алексеев А.Д., Фельдман Э.П., Василенко Т.А. [и др.] Оценка времени образования опасных концентраций метана в замкнутых объемах // *Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: XVI Межд. науч. школа. им. академика С.А. Христиановича; материалы*. – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2006. – С. 7–9.

12. *Lama R.D., Nguyen V.U.* A model for determination of methane flow parameters in coal from desorption tests // Proceedings of the Twentieth International Symposium on the application of Computers and Mathematics in the mineral industries. Mining. 1987, Vol. 1. pp. 275–282.

13. *Васильковский В.А., Минеев С.П.* Распределение и механизмы движения метана в блоках угля // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. ст. / Ин-т физики горных процессов НАН Украины. – Донецк, 2017. – Вып.19. – С. 19–32.

14. *Лейбензон Л.С.* Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. – М.-Л.: ОГИЗ. – 1947. – 244 с. **ГИАБ**

## **КОРТКО ОБ АВТОРАХ**

*Васильковский Всеволод Алексеевич* — зав. отделом, доктор технических наук, Институт физики горных процессов НАН Украины (ИФГП НАН Украины), 49600, Днепр, ул. Симферопольская, 2-а, Украина, тел. +380660613380, *Ульянова Екатерина Васильевна* — доктор технических наук, вед. науч. сотр., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук им. Н.В. Мельникова. (ИПКОН РАН), г. Москва, Крюковский тупик, 4. Россия, тел.+7 9264991404, e-mail: ekaterina-ulyanova@yandex.ru.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 235–248.

**Vasilkovskiy V.A., Ulyanova E.V.**

## **Features of the kinetics of methane desorption from coal**

The aim of the research is to obtain and to compare experimental information on the mechanisms of methane transport in solid hydrocarbons to understand the nature of the change in sorption kinetics in the metamorphic coals. The experimental basis for this was the data obtained on the kinetics of methane desorption from samples of activated carbon coated with a polymer film and coal of low metamorphic grade "D". The process of film formation on the active carbon was monitored over the width of the nuclear magnetic resonance spectrum on protons  $^1\text{H}$ . The experimental procedure involves preparing samples of active coal with a polymer film on the surface, as well as grinding the coal to a fraction of 0.2–0.25 mm and saturating all samples with methane at a temperature of 300 K in a high-pressure container (3 MPa) for 10 days. The desorption measurements were carried out in a vessel of known volume. Registration and visual observation of the kinetics of filling the vessel occurred in real time with an interval of 0.65 s.

To analyze the experimental results, a method based on the characteristic desorption time is applied. Information was obtained on the effective diffusion coefficient  $D_{\text{eff}}$  of methane in the polymer coating film and coal. It was found that in the polymer, the value of  $D_{\text{eff}} \approx 10\text{--}15 \text{ m}^2 / \text{s}$ , and in the fossil coal  $\approx 6 \cdot 10\text{--}14 \text{ m}^2 / \text{s}$ . Such values correspond to the transport of methane in the polymer film and blocks of coal as a solid diffusion through an amorphous substance. It has been suggested that, as metamorphism proceeds, the permeability of blocks and the role of the pore system should increase. In the framework of the diffusion-

filtration model, the form of the interpolation function is proposed to describe desorption. The physical interpretation of the components of the function and its parameters is given. The approximation of the “two-time” function explains the character of the transformation of the kinetic parameters when the size of a piece of coal changes.

Key words: methane, activated carbon, coal blocks, metamorphism, effective diffusion coefficient, solid-state diffusion, polymer film, desorption, oxidative polymerization

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-235-248

## AUTHORS

*Vasilkovskiy V.A.* – Doktor of Technical Sciences, Head of Department, Institute for Physics of Mining Processes National Academy Sciences of Ukraine. (IPMP NAS of Ukraine), 49600, Dnepr, Simferopolskaya st., Ukraine, tel. +380660613380 e-mail: v.vasilkovskiy@inbox.ru,

*Ulyanova E.V.* – Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources by name N.V. Melnikov. Russian Academy of Sciences, Moscow, Kryukovsky tupik, 4, tel. +7 9264991404, e-mail, ekaterina-ulyanova@yandex.ru.

## REFERENCES

1. Alexeev A.D., Feldman E.P., Vasilenko T.A. *Kinetics of Methane Desorption from Coal ,Nano- and Mesostructures*. Energy Fuels, 2010, Vol. 24, no 8, pp 4375–4379.

2. Liu Y., Zhu Y., Li W. *A hierarchical methane adsorption characterization through a multiscale approach by considering the macromolecular structure and pore size distribution*. Marine and Petroleum Geology. 2018, Vol. 96, pp. 304–314.

3. Naveen P., Asif M, Ojha K. [et al.] *Sorption Kinetics of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> Diffusion in Coal: Theoretical and Experimental Study*. Energy Fuels, 2017, Vol. 31, no 7, pp. 6825–6837.

4. Li X., Shi J., Du X. [et al.] *Transport mechanism of desorbed gas in coalbed methane reservoirs*. Petroleum Explorativn and Development. 2012, Vol. 39. no 2. pp. 218–229.

5. Alekseev A.D. *Fizika uglja i gornyh processov* [Physics of coal and mining processes]. Kiev: Nauk. Dumka, 2010. 424 p.

6. B. Xu, X. Li, M. Zhao [et al.] *Phase Behavior and Flow Mechanisms of Desorption Gas in Coal Matrix*. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 2015, Vol. 37. no 4. pp. 365–371.

7. Alekseev A.D., Vasilenko T.A., Gumennik K.V. [i dr.] *Diffuzionno-filtratsionnaya model' vyhoda metana iz ugol'nogo plasta* [Diffusion-filtration model of methane release from a coal seam]. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. 2007. no 4. pp. 65–74.

8. Alekseev A.D., Fel'dman E.P., Vasilenko T.A., Kalugina N.A. *Kinetika gazovydeleniya metana iz uglja* [Kinetics of methane gas release from coal]. Deformirovanie i razrushenie materialov s defektami, i dinamicheskie yavleniya v gornyh porodah i vyrabotkah: XIV Mezhd. nauch. shkoly. im. akademika S.A. Hristianovicha; materialy. Simferopol': Tavrich. nac. un-t, 2004. pp. 5–6.

9. Alexeev A.D., Feldman E.P., Vasilenko T.A. *Methane desorption from a coal-bed*. Fuel. 2007, Vol. 86, no 16, pp. 2574–2580.

10. Fel'dman E.P., Vasilenko T.A., Kalugina N.A. *Istechenie metana iz uglja v zamknutyj rezervuar: rol' yavlenij diffuzii i fil'tracii* [The expiration of methane from coal in a closed reservoir: the role of diffusion and filtration]. Fizika i tekhnika vysokih davlenij. 2006. no 2. pp. 92–107.

11. Alekseev A.D., Fel'dman E.P., Vasilenko T.A. [i dr.] *Ocenka vremeni obrazovaniya opasnykh koncentracij metana v zamknutykh ob'emah. Deformirovanie i razrushenie materialov s defektami i dinamicheskie yavleniya v gornah porodah i vyrabotkah* [Estimation of the time

of formation of dangerous concentrations of methane in the closed volumes. Deformation and destruction of materials with defects and dynamic phenomena in rocks and mines]: XVI Mezhd. nauch. shkola. im. akademika S.A. Hristianovicha; materialy. Simferopol': Tavrich. nac. un-t, 2006. pp. 7–9.

12. Lama R.D., Nguyen V.U. *A model for determination of methane flow parameters in coal from desorption tests*. Proceedings of the Twentieth International Symposium on the application of Computers and Mathematics in the mineral industries. Mining. 1987, Vol. 1. pp. 275–282.

13. Vasil'kovskij V.A., Mineev S.P. *Raspredelenie i mekhanizmy dvizheniya metana v blokah uglja* [Distribution and mechanisms of the movement of methane in coal blocks]. Fiziko-tekhicheskie problemy gornogo proizvodstva: sb. nauch. st. In-t fiziki gornyh processov NAN Ukrainy. Doneck, 2017. Vyp.19. pp. 19–32.

14. Lejbenzon L.S. *Dvizhenie prirodnyh zhidkostej i gazov v poristoj srede* [Movement of natural liquids and gases in a porous medium]. Moscow-Leningrad: OGIz. 1947. 244 p.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОСАЖДЕНИЯ ПЫЛИ НА ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКАХ

Рассмотрены экспериментальные исследования уровней запыленности и интенсивности пылеотложения в выработках выемочных участков, которые проветриваются по схемам с выдачей исходящей струи в конвейерную выработку. Использовались методы прямого измерения уровня отложившейся пыли с помощью подложек. Исследование интенсивности отложений пыли проводилось на 50 метровом участке штрека, примыкающего к лаве. В ходе проведения измерений места расположения подложек варьировались. Получены данные по замерам масс отложения пыли: вдоль обоих бортов выработки; с помощью нескольких подложек, расположенных в «одной точке» измерений; изменению суммарной массы отложений пыли в нескольких сечениях вдоль конвейерного штрека с исходящей струей воздуха. Выявлены существенные отличия в интенсивности отложения пыли в различных точках 50-метровых участков выработок, содержащих внутренние источники выделения пыли. Целью работы является совершенствование существующих и создание новых методов оперативного контроля уровня пылеотложений с целью определения взрывоопасных состояний горных выработок и периодичности работ по нейтрализации взрывчатых свойств угольной пыли.

Ключевые слова: угольный аэрозоль, дисперсный состав, взрывоопасность, предел взрываемости, каменный уголь, концентрация пыли, динамика запыленности, масса, интенсивность пылеотложения, схемы проветривания, струя воздуха.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-249-256

При разработке угольных месторождений подземным способом важным фактором безопасности является показатель пылевзрывобезопасности горных выработок, состоящий из двух оцениваемых параметров – запыленность и пылеотложение. Однако, как на практике выполнять данные требования ввиду отсутствия четких указаний не ясно [1], особенно в условиях сложных потоков движения воздушной струи с учетом сорбции метана в рудничную атмосферу [2]. Для решения данной проблемы необходимо комплексно изучить процессы, протекающие в горных выработках выемочных и проходческих участках, понять какой фактор является показателем взрывоопасного состояния иссле-

дуемого объекта для случая контроля запыленности рудничной атмосферы и для случая контроля пылеотложений. В ходе ведения горных работ при возникновении вспышки метана возникает вероятность, под действием воздушной перевод осевшей угольной пыли во взвешенное состояние и под действием источника (инициатора) тепла её взрыв. Взрыв угольной пыли является событием, для возникновения которого необходимо наличие в ограниченном пространстве горючего аэрозоля, окислителя ( $O_2$ ), а также мощного первоначального инициатора воспламенения [3–6]. Необходимо отметить, что взрывная реакция горения угольной пыли возникает только в случае нахождения твердых диспергированных частиц в аэрозольном (взвешенном) состоянии. При этом аэрозоли, образуемые при основных производственных операциях даже в максимально-разовых значениях имеют концентрацию ( $C_{\text{внт}}$ ) в 200–1000 менее нижнего предела взрываемости (НПВ или НКПР). Формирование опасных по взрыву пыли условий в шахтах происходит при последовательном протекании процессов:

- образование угольных аэрозолей в концентрациях ниже НКПР и их отложение по сети горных выработок;

- накопление в течение некоторого периода времени отложений пыли советующей такому количеству пыли, нахождение которой бы во взвешенном состоянии представляло бы собой взрывоопасную концентрацию (необходимо накопление пылеотложений в 2–3 раза выше НКПР);

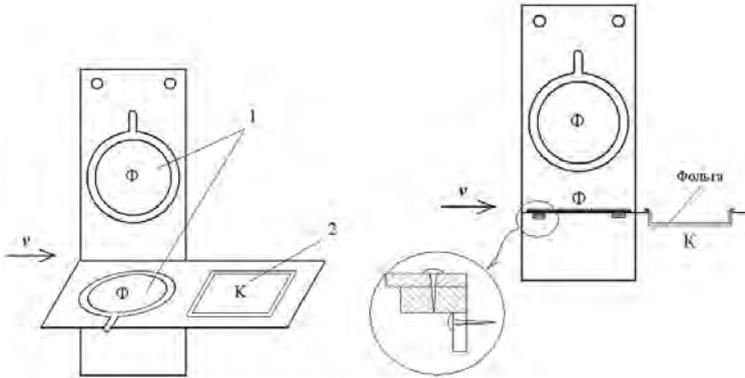
- наличие мощного импульса давления («толчка»), способного повторно перевести отложившуюся пыль в аэрозольное состояние.

На практике [7,8,9] в качестве численной характеристики накопления отложений пыли используется показатель  $P_t$  – интенсивность пылеотложения в горных выработках ( $г/м^3\cdot\text{сут}$ ), рассчитываемый на основе экспериментального определения количества пыли, отложившейся на

подложки, по формуле:  $P_t = 4,35 \cdot \frac{b \cdot M}{F \cdot S \cdot t} \cdot q_B$ ,  $г/м^3\cdot\text{сут}$ , где –  $b$  – ширина выработки по почве,  $м$ ;  $M$  – масса осевшей на подложки пыли,  $г$ ;  $F$  – суммарная площадь подложек,  $м^2$ ,  $M$  – массы пыли, собранной с подложек.

В конце прошлого столетия интенсивность пылеотложения принималась постоянной [7, 9]. Современные технологии привели к изменениям схем проветривания выемочных участков (п. 135 действующих Правил безопасности [8]). При этом, выдача исходящей струи воздуха производится по конвейерному штреку и процессы перемещения и осаждения пыли из очистного забоя происходящие в выработках значительно осложнились. Поэтому для определения фактических закономерностей процесса отложения угольной пыли необходимо произвести экспериментальные исследования на производственных участках шахты.

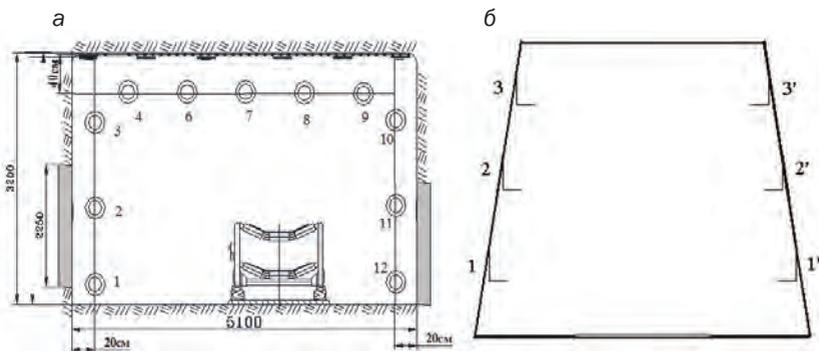
Такое исследование процессов образования, перемещения и осаждения угольных аэрозолей проводилось на высокопроизводительных участках шахты им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс» [10, 11]. В ходе экспериментальных наблюдений для фиксации отложившейся пыли использовались подложки, состоявшие из кювет и фильтров АФА 40, расположенные вертикально и горизонтально (рис. 1).



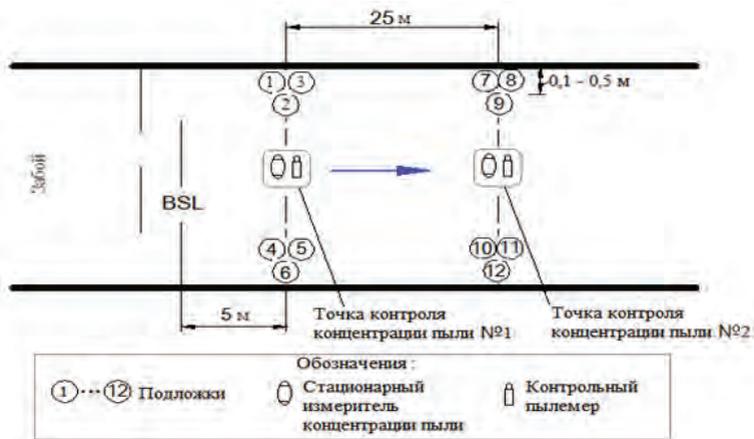
**Рис. 1. Конструкция подложки для фиксации отложившейся пыли**

Производились замеры количества отложившейся пыли по вертикальному сечению горной выработки (рис. 2), как по всему контуру (рис. 2 а), так и по бортам (рис. 2 б). При этом подложки расставлялись вдоль выработки. Производилась фиксация уровня отложившейся пыли в двух сечениях (рис. 3) на входе воздушной струи в выработку. Первое сечение располагалась в 5 метрах от перегружателя с лавного на ленточный конвейер, второе сечение в 25 м от первого. В каждом сечении размещалось по 6 подложек (по 3 с правого и левого бортов выработки) в непосредственной близости одна от другой и гравиметрические пылемеры. Кроме этого, выполнялись замеры уровня отложившейся пыли вдоль выработки. Подложки в этом случае подложки по пять штук размещались по бортам выработки через 10 метров (рис. 4).

Все измерения привязывались к интенсивности работы выемочного комбайна, которая определялась по числу рабочих проходов («стружкам»). Наблюдения производились в течении нескольких дней и периодически повторялись. После обработки результатов замеров было выявлено, что несмотря на большой разброс данных от «стружки» к «стружке» наблюдается устойчивая релаксационная, близкая к экспоненциальной, зависимости пылеотложения от расстояния от входа потока в штрек (рис. 4).



**Рис. 2. Замеры отложившейся пыли в вертикальном сечении горной выработки**



**Рис. 3. Схема размещения подложек и приборов контроля запыленности рудничной атмосферы в двух сечениях**

Наибольший интерес представляет выявленная зависимость уровня пылеотложений от высоты установки подложки (рис. 6). Произведенные наблюдения неоспоримо доказывают, что в основном пыль оседает в нижней части выработки от подошвы до 1.2 м и на расстоянии 25–50 м от сопряжения с лавой. Мелко дисперсные частицы, находящиеся в верхней части выработки, практически не оседают и распространяются вместе с воздушной струей на значительные расстояния.

Основными результатами проведенных натурных наблюдений за процессом осаждения угольной пыли на высокопроизводительных выемочных участках, использующих схемы проветривания с выдачей исходящей струи в транспортную выработку несмотря на существенную

неравномерность седиментации вдоль 50 – метрового участка штрека следует считать. Во-первых, выявленную зависимость снижения уровня отложений пыли по мере удаления от очистного забоя по экспоненциальному закону. Во-вторых, асимметричность отложения пыли вдоль правого и левого бортов конвейерной выработки вследствие несимметричности воздушного потока, вызванного ленточным конвейером и который к тому же является вторичным источником пылеобразования. В-третьих, выявленную верхнюю границу в 1,2 метра, проверенную неоднократно повторными экспериментальными наблюдениями на нескольких шахтах, распространения пылевой аэрозоли такого диапазона



Рис. 4. Схема размещения подложек и приборов контроля запыленности рудничной атмосферы в пяти точках вдоль обоих бортов горной выработки

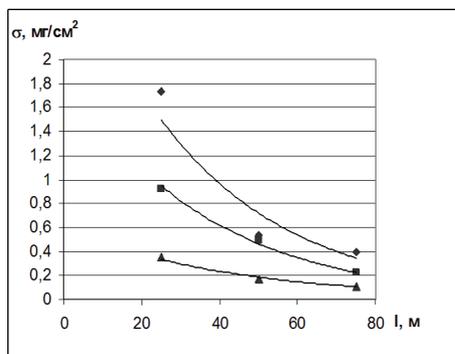
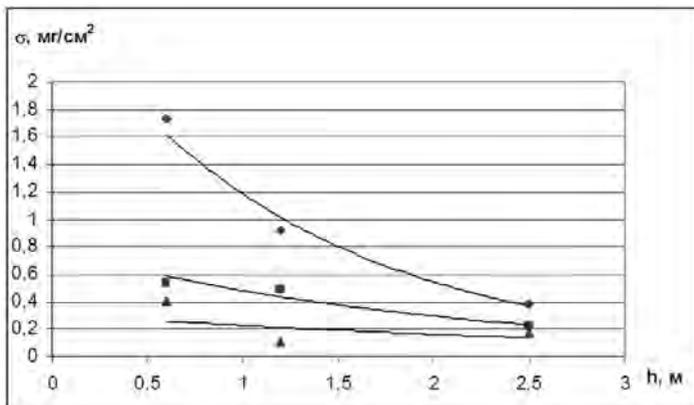


Рис. 5. Зависимость пылеосаждения  $\sigma$  (мг/см<sup>2</sup>) от расстояния  $l$  от входа пылевого потока в штрек при разных высотах установки подложек (фильтров): 1 – 0,6 м, 2 – 1,2 м, 3 – 2,5 м



**Рис. 6. Зависимость поверхностной плотности осадка  $\sigma$  (мг/см<sup>2</sup>) от высоты  $h$  (м) установки фильтра-коллектора при разных расстояниях от входа вентиляционной струи в штрек: 1 – 25 м, 2 – 50 м, 3 – 75 м**

дисперсного состава, который является источником пылевых отложений. Поэтому, размещения любых приборов и датчиков для измерения и контроля уровня пылитоотложений в горных выработках угольных шахт на высоте не более 1–1,2 метра от подошвы выработки не имеет смысла.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кубрин С.С., Решетняк С.Н., Дегтёрев В.В. Анализ методов пылевого контроля горных выработок угольных шахт. Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: Горная книга. – 2017. Специальный выпуск 29. С. 9–18
2. Siemek J., Rajtar J. Simulation of gas outflow from porousfissured media // Arch. Mining. Sci. – 1989. – 34, no 1. – Pp. 119–128.
3. Романченко С.Б., Руденко Ю.Ф., Костеренко В.Н. Пылевая динамика в угольных шахтах.-М.: Горное дело, 2011. – 256 с.
4. Лебецки К.А., Романченко С.Б. Пылевая взрывоопасность горного производства. – М.: Горное дело, 2012. – 464 с.
5. Cybulski W. Wybuchy pyłu węglowego i ich zwalczanie. Katowice : “Śląsk”, 1973.451 s.
6. Lebecki.K. Zagrozenia pyłowe w górnictwie.Katowice : Główny Instytut Górnictwa, 2004, 399 s.
7. Правила безопасности в угольных шахтах. Книга 3. Инструкция по борьбе с пылью и пылевзрывозащите / Госгортехнадзор России. Липецк: Липецкое издательство, 1999. 109 с.
8. Правила безопасности в угольных шахтах: М.: Ростехнадзор (Приказ Ростехнадзора № 550 от 19.11.2013), зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 31.12.2013, № 30961.

9. Инструкция по борьбе с пылью в угольных шахтах. Введена в действие приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 14.10. 2014 г. №462.

10. Кудряшов В.В., Кубрин С.С., Кобылкин А.С. Опыт исследования осаждения пыли на поверхности горной выработки. Горный информационно-аналитический бюллетень. — М.: Горная книга. — 2018. Специальный выпуск 1. Труды международного научного симпозиума «Неделя горняка-2018». С. 275—282.

11. Романченко С.Б., Костеренко В.Н., Трубицин А.А., Кубрин С.С. Процессы седиментации взрывоопасных аэрозолей при современных технологиях добычи угля. Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — Кемерово. — 2018. №2 стр. 6—15. **PLAS**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Костеренко Виктор Николаевич* – кандидат физ.-мат. наук, начальник управления противоаварийной устойчивости предприятий АО «СУЭК», г. Москва, Россия, 8-968-963-23-42, kosterenkovn@suek.ru,

*Кубрин Сергей Сергеевич* – профессор, докт. техн. наук, заведующий лабораторией Геотехнологических рисков освоения недр, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Россия, 8-495-360-07-35, E-mail: s\_kibrin@mail.ru,

*Терешкин Александр Иванович* – инженер, главный специалист по технологии обеспыливания Дирекции аэрологической безопасности подземных горных работ АО «СУЭК-Кузбасс», г. Ленинск-Кузнецкий, Россия, 8-38456-9-32-07, E-mail: tereshkinai@suek.ru.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyy vypusk 49), pp. 249–256.

**Kosterenko V.N., Kubrin S.S., Tereshkin A.I.**

### **The study of deposition of dust at the bay**

Experimental studies of dust levels of air and the intensity of dust emission in the extraction sites that ventilated according to the schemes with the issuance of the outgoing jet in the conveyor production. Methods of direct measurement of the deposited dust level using substrates used. The intensity of dust deposits studied at the 50-meter section of the drift adjacent to the face. In the course of measurements, the arrangement of the substrates varied, data on the mass of dust deposition were obtained: along the different sides of the production; for several substrates located in the “one point” of measurement; change of the total mass of dust deposition in different sections along the conveyor belt with the outgoing air stream. Significant differences in the intensity of dust deposition at different points of 50-meter workings involving internal sources of dust emission are shown. The results of the work are aimed at creating methods for rapid determination of explosive conditions of mine workings and the frequency of work to neutralize the explosive properties of coal dust.

Keywords: coal aerosol, particulate composition, explosion, explosive limit, the concentration of coal dust, the dynamics of the dust content, mass, intensity, dust, ventilation circuit, the flow of air.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-249-256

## AUTHORS

*Kosterenko V.N.*, AO «SUEK», Head of industrial safety Department Moscow, Russia, kosterenkovn@suek.ru,  
*Kubrin S.S.*, IPKON RAN, PhD, Head library of Geo technological risks of subsurface exploration, Moscow, Russia, s\_kibrin@mail.ru,  
*Tereshkin A.I.*, engineer, chief specialist in dust removal technology of the Directorate of aerology safety of underground mining operations of JSC “SUEK-Kuzbass”, Leninsk-Kuznetsky, Russia, E-mail: tereshkinai@suek.ru.

## REFERENCES

1. Kubrin S.S., Reshetnyak S.N., Degtyarev V.V. *Analiz metodov pylevogo kontrolya gornyh vyrabotok ugol'nyh shaht* [Analysis of methods of dust control of mine workings of coal mines]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'. Moscow: Gornaya kniga. 2017. Special'nyj vypusk 29. pp. 9–18
2. Siemek J., Rajtar J. *Simulation of gas outflow from porousfissured media*. Arch. Mining. Sci. 1989. 34, no 1. Pp. 119–128.
3. Romanchenko S.B., Rudenko Yu.F., Kosterenko V.N. *Pylevaya dinamika v ugol'nyh shahtah* [The dynamics of dust in coal mines]. Moscow: Gornoe delo, 2011. 256 p.
4. Lebecki K.A., Romanchenko S.B. *Pylevaya vzryvoopasnost' gornogo proizvodstva* [Dust explosion hazards of mining]. Moscow: Gornoe delo, 2012. 464 p.
5. Cybulski W. *Wybuchy pylu węglowego i ich zwalczanie*. Katowice : “Śląsk”, 1973. 451 p.
6. Lebecki K. *Zagrożenia pyłowe w górnictwie*. Katowice: Główny Instytut Górnictwa, 2004, 399 p.
7. *Pravila bezopasnosti v ugol'nyh shahtah* [Safety rules in coal mines]. Kniga 3. Instrukciya po bor'be s pyl'yu i pylevzyvozashchite / Gosgortekhnadzor Rossii. Lipeck: Lipeckoe izdatel'stvo, 1999. 109 p.
8. *Pravila bezopasnosti v ugol'nyh shahtah* [Safety rules in coal mines]: Moscow: Rostekhnadzor (Prikaz Rostekhnadzora no 550 ot 19.11.2013), zaregistrirrovany v Ministerstve yusticii Rossijskoj Federacii 31.12.2013, no 30961.
9. *Instrukciya po bor'be s pyl'yu v ugol'nyh shahtah. Vvedena v dejstvie prikazom Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 14.10. 2014* [Instruction on dust control in coal mines. It was put into effect by the order of the Federal service for environmental, technological and nuclear supervision of 14.10. 2014]. no 462.
10. Kudryashov V.V., Kubrin S.S., Kobytkin A.S. *Opyt issledovaniya osazhdeniya pyli na poverhnosti gornoj vyrabotki* [Experience in the study of dust deposition on the surface of mining]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'. Moscow: Gornaya kniga. 2018. Special'nyj vypusk 1. Trudy mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma «Nedelya gornyaka-2018». pp. 275–282.
11. Romanchenko S.B., Kosterenko V.N., Trubicin A.A., Kubrin S.S. *Processy sedimentacii vzryvoopasnyh aerozolej pri sovremennyh tekhnologiyah dobychi uglja* [The sedimentation Processes of explosive aerosols in the modern technologies of coal mining]. Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti. Kemerovo. 2018. no 2. pp. 6–15.



## ПРИНЦИПЫ ПЫЛЕВОГО КОНТРОЛЯ В УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Рассмотрен новый подход к проблеме пылевого контроля в угольной промышленности. Он базируется на измерении массы пылевого осадка, попадающего в легкие при дыхании, на измерении массы пыли, осажденной на фильтр из фиксируемого объема воздуха для определения эффективности средств и способов борьбы с пылью в шахтах и на измерении массы пылевого осадка на подложках для решения задачи непрерывного контроля взрывоопасного состояния горных выработок. Отмечено, что самой трудно решаемой проблемой в настоящее время является разработка непрерывного контроля взрывоопасного состояния выработок. Эта проблема нуждается в серьезной научной проработке.

Ключевые слова: пылевой контроль, новый подход, вдыхаемая пыль, оценка способов борьбы, взрывоопасность выработок.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-257-272

Пылевой контроль преследует следующие цели: определение пылевой нагрузки на организм – количество пыли, попавшей в легкие при дыхании в запыленной атмосфере; оценку эффективности средств борьбы с пылью и контроль взрывоопасного состояния горных выработок.

Все составляющие пылевого контроля базируются на том положении, что основными параметрами, характеризующими состояние среды и подлежащими оценке, служат масса пыли и размер частиц. Другие характеристики частиц (плотность, коэффициент отражения и показатель преломления света, электростатическая зарядность, способность поглощать радиоактивное излучение ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) и т.д.) в той или иной мере связаны с основными. Они используются при разработке косвенных методов измерения концентрации и массы пыли и при оценке погрешности этих методов.

Масса пыли, попавшая в легкие при дыхании – пылевая доза, определяет риск заболевания пневмокозиозом [1, 2]. Она выражается через концентрацию пыли во вдыхаемом воздухе  $n$ , мг/м<sup>3</sup>; объем легочной вентиляции  $q$ , дм<sup>3</sup>/мин; время пребывания человека в запыленной атмосфере  $t$ , мин (иногда это время называют экспозицией):

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 257–272.

© С.С. Кубрин, В.В. Кудряшов, А.И. Терешкин, 2018.

$$m = nqt \cdot 1000, \text{ мг} \quad (1)$$

Так как непосредственно измерить массу пыли, попавшей в легкие и отложившейся в различных участках дыхательного тракта, практически невозможно, то принято характеризовать риск заболевания пневмокозиозом через концентрацию пыли в воздухе в зоне дыхания рабочего на рабочем месте или на месте его постоянного пребывания, а не через массу пыли, попавшей в легкие.

Из-за того, что действие пыли на организм носит накопительный характер, измеряются осредненные за смену концентрации пыли – среднесменные концентрации. Дисперсный и вещественный (содержание в пыли свободного диоксида кремния) составы пыли используются для расчета пылевых нагрузок. Для определения среднесменных концентраций производят разовые измерения в течение рабочей смены. Затем вычисляют среднее значение  $n_{cc}$ , учитывая «весовую» долю по времени каждого разового измерения [1,2]

$$n_{cc} = \frac{n_1 t_1 + n_2 t_2 + \dots}{t_1 + t_2 + \dots} \quad (2)$$

где  $t_i$  – время отбора пробы при разовом измерении концентрации  $n_i$ .

Концентрацию пыли  $n_i$  определяют весовым методом, протягивая запыленный воздух через предварительно взвешенный фильтр с постоянной объемной скоростью  $q$ ,  $\text{дм}^3/\text{мин}$  в течение  $t$  мин. Затем фильтр сушат и взвешивают. Концентрацию  $n_i$  вычисляют по формуле

$$n_i = \frac{P_2 - P_1}{qt} \cdot 1000, \text{ мг/м}^3. \quad (3)$$

где  $P_2$  и  $P_1$  – вес фильтра мг, соответственно, после и до отбора проб воздуха.

$P_2 - P_1$  – масса пылевого осадка может измеряться также косвенными методами (см. ниже).

Массу пыли  $m$ , вдыхаемой в течение рабочей смены, когда используются аспираторы или индивидуальные пылепробонаборники, вычисляют по формулам

$$m = \frac{P_2 - P_1}{q_0} q \text{ или } m = \frac{P_2 - P_1}{Q_0} Q \quad (4)$$

где  $P_2 - P_1$  – вес пыли, отобранной на фильтр при прокачке воздуха со скоростью  $q_0$ ;  $q$  – объемная скорость легочной вентиляции работающего в запыленной атмосфере;  $Q$  – объем легочной вентиляции за рабочую смену;  $Q_0$  – объем воздуха, прокачанного через фильтр за смену.

Для научных исследований пневмокозиозоопасности рабочих мест в работе [1] описан информативный способ оценки пылевого

фактора по результатам разовых определений концентрации. Он основан на том, что распределение концентраций пыли в течение производственного процесса подчиняется логнормальному закону. С его помощью можно рассчитывать среднесменные концентрации, а также, что весьма важно, определять максимальные значения концентраций и их «весовую» долю в общем процессе. Кроме того, параметры распределения характеризуют наиболее часто встречающиеся концентрации (мода) и величину разброса концентраций (стандартное геометрическое отклонение), то есть степень равномерности распределения концентраций во времени, иными словами, стабильность процесса пылеобразования.

Суммарная масса пыли, поступившая в организм за время работы в запыленной атмосфере (трудового стажа), показывает, насколько полученная суммарная пылевая доза приближена к предельной величине. Это приближение используется для принятия решения по снижению действия пыли на организм, например, перевод на работу с низким содержанием пыли в атмосфере.

При определении пылевой дозы учитывается содержание в пыли свободнорастворимого диоксида кремния, от которого зависит степень вредности пыли и, соответственно, предельно допустимая концентрация ее в воздухе рабочей зоны. От содержания в пыли диоксида кремния зависит величина предельных пылевых экспозиционных доз, называемых контрольными пылевыми нагрузками.

Таким образом, следует непосредственно измерять массу пыли, попавшую (или способную попасть) в легкие при работе в запыленной атмосфере.

Еще одна важная и трудная задача пылевого контроля состоит в оценке массы пыли, оседающей в различных участках дыхательного тракта. Многочисленными исследованиями конца двадцатого века установлены кривые задержки пыли. В соответствии с ними российским (ГОСТ Р ИСО 7708—2006) и европейским (ИСО 7708:1995) стандартами рекомендуется измерять содержание в воздухе разных фракций пыли (см. рис. 1): респираторную (частицы, попадающие в безресничные отделы легких), торакальную (частицы, попадающие в область ниже гортани) и вдыхаемую.

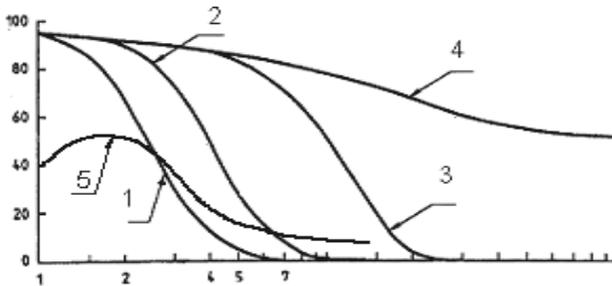
На рис. 1 по оси абсцисс отложен аэродинамический диаметр частиц  $D$ , мкм; по оси ординат – процент частиц, прошедших через разделительные устройства (циклоны, элютриаторы и др.).

К сожалению, пределы допустимых отклонений от указанных зависимостей не оговорены.

При определении массы вдыхаемой пыли необходимо учитывать условия отбора частиц максимального размера, потому что величина вдыхаемой фракции зависит от скорости и направления движения воздуха, от частоты дыхания и других факторов. Кривая отбора проб у

приборов, улавливающих вдыхаемую фракцию, усредненную по всем направлениям движения воздуха, должна соответствовать кривой для скоростей потока воздуха  $u \leq 4 \text{ м/с}$ . Процентное содержание  $E_i$  частиц с аэродинамическим диаметром  $D$  (мкм), подлежащих улавливанию, задается следующим уравнением

$$E_i = 50(1 + \exp[-0,06D]). \quad (5)$$



**Рис. 1. Характеристика устройств для отбора: респиральной фракции для групп повышенного риска (1); респиральной фракции для здоровых взрослых (2); фракции для торокальной области (3); вдыхаемой фракции (4); задержка частиц в нижних дыхательных путях (5)**

При скоростях потока воздуха  $u > 4 \text{ м/с}$  предлагается использовать уравнение

$$E_i = 50(1 + \exp[-0,06D]) + 10^{-3} \cdot u^{2,75} \cdot \exp[0,055D]. \quad (6)$$

Его не рекомендуется применять, когда в воздухе витают частицы размером  $D > 90 \text{ мкм}$  или при  $u > 9 \text{ м/с}$ .

Частицы угольной пыли размером более  $90 \text{ мкм}$  в рудничных пылевых потоках практически отсутствуют (табл.1).

Таблица 1

**Зависимость размера витающих угольных частиц ( $\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$ ) от скорости потока воздуха в выработке**

Диаметр частиц, d, мкм	Скорость витания в восходящем потоке, см/с	Скорость горизонтального потока, м/с
1	0,0045	0,0011
5	0,1126	0,028
10	0,450	0,11
15	1,013	0,25
20	1,800	0,45

Диаметр частиц, d, мкм	Скорость витания в восходящем потоке, см/с	Скорость горизонтального потока, м/с
30	4,047	1,02
40	7,200	1,81
45	9,113	2,29
50	11,25	2,81
60	16,20	4,05
70	22,05	5,51
112,15	60,0	14,14
149	100	25
182	-	-

Заметим, что в зависимости от отношения скорости на входе в пробоотборный канал к скорости потока из-за несоблюдения условий изокINETИЧНОСТИ пробоотбора будет изменяться дисперсный состав отбираемой пыли. Однако, это изменение дисперсного состава будет таким же как и при вдыхании человеком запыленного воздуха.

Что касается усреднения условий отбора частиц по всем направлениям движения воздуха, то реализовать их можно, отбирая частицы при помощи горизонтальной щели, образуемой двумя круглыми плоскостями, в одной из которых по центру находится отверстие пробоотборного канала. Можно использовать вертикальную трубку, грибок с щелью, а также прямоточные циклончики и другие устройства. Для каждой кривой разделения должно быть соответствующее разделительное устройство. Этот вопрос недостаточно проработан в нашем аэрозольном приборостроении.

Учитывая трудности технического осуществления рекомендаций упомянутых стандартов, на ближайшее время следует остановиться на ранее сделанных членами бывшего СЭВ предложениях измерять концентрацию всей витающей пыли и тонкой (респиральной) фракции (см. табл. 2).

Эти рекомендации вошли в ГОСТ [2].

Таблица 2

**Зависимость эффективности разделения пылевых частиц сепараторами (циклонами) от аэродинамического диаметра частиц D, мкм при двухступенчатом способе измерения концентрации пыли**

Аэродинамический диаметр частиц D, мкм	«Грубая» фракция, выделяемая I ступенью прибора (циклоном), %	«Тонкая» (респиральная) фракция, поступающая во II ступень прибора, %
2	не более 10	более 90
4	от 60 до 40	от 40 до 60
9	более 95	менее 5

О целесообразности измерения массы тонкой и всей витающей пыли говорят данные, представленные на рис. 2, из которых следует неравноценность по воздействию на организм частиц при низких и высоких концентрациях из-за различного содержания в них тонкой фракции.

Если использовать разделительные устройства для выделения респираторной фракции, то необходимо отбирать столько пылевых частиц, чтобы можно было достоверно измерить массу каждой фракции. Может оказаться, что чувствительности весов будет недостаточно для измерения грубой или тонкой фракции. Например, в угольных шахтах (рис. 2) массовая доля частиц тонкой фракции может составлять 95–98% при концентрации 10 мг/м<sup>3</sup> и 2–5% при концентрации 400 мг/м<sup>3</sup>. При отборе пробы в течение 30 мин с объемной скоростью, равной 20 дм<sup>3</sup>/мин, при концентрации 10 мг/м<sup>3</sup> на фильтр осядет 6 мг пыли. Масса тонкой фракции в пробе будет 5,7–5,8 мг, а грубой – 0,12–0,3 мг. При определении массы грубой фракции только погрешность взвешивания на рядовых аналитических весах составит около 100%. Аналогичную погрешность получим при определении респираторной фракции, когда общая концентрация пыли будет равна 400 мг/м<sup>3</sup>. Поэтому рекомендуется измерять концентрацию всей витающей пыли и отдельно концентрацию респираторной фракции.



**Рис. 2. Содержание тонких фракций в витающей пыли в угольной шахте в зависимости от концентрации пыли всех размеров по общей массе [3]**

При определении концентрации пыли (или измерении ее массы, попадающей в легкие), а также при разработке аспираторов и пылесосов необходимо знать допустимые погрешности измерения величин, входящих в расчетные формулы

$$n = \frac{m}{qt} \cdot 1000, \text{ мг/м}^3 \quad (7)$$

$$n = \frac{m}{Q} \cdot 1000, \text{ мг/м}^3 \quad (8)$$

В формуле (8)  $Q$  – объем протянутого воздуха через фильтр при отборе пробы,  $\text{дм}^3$ .

Наибольшее значение относительной погрешности  $\Delta n$  измерения массовой концентрации пыли представляется в виде суммы относительных погрешностей величин, входящих в формулы (7) и (8)

$$\frac{dm}{m} = \frac{dn}{n} + \frac{dq}{q} + \frac{dt}{t}. \quad (9)$$

В этом выражении относительная погрешность измерения концентрации пыли  $dn/n$ , варьируемой в течение смены, должна определяться для каждого источника пыли и для каждого шахтопласта. Величина  $dq/q$  – относительная погрешность скорости прокачки воздуха аспиратором. По данным разработчиков аспираторов ПП-2, ПП-2У ее величина может составлять 3% и менее. Относительная погрешность измерения продолжительности рабочей смены –  $dt/t$  – пренебрежимо мала.

Оценим эти погрешности, полагая, например,  $dn/n = 15\%$  и  $25\%$ , как это рекомендуется в [2], и  $dt/t = 0$ .

Теперь при  $dn/n = 15\%$   $dm/m = 0,15 + 0,3 = 0,18 = 18\%$ , а абсолютная погрешность измеренной массы пыли будет не более  $dm = 0,18m$ .

При  $dn/n = 25\%$   $dm/m = 0,25 + 0,3 = 0,28 = 28\%$  и  $dm = 0,28m$ .

Аналогичные результаты оценки ошибок измерения массы пыли будут получены при использовании формулы (8).

В руководящих материалах [2,4] по методам измерения концентрации пыли преимущественно фиброгенности действия не указана зависимость допустимой погрешности измерения от концентрации пыли менее ПДК. Лишь отмечается, что она должна быть 40% при концентрации 0,3 ПДК или такая же при концентрации 0,5 ПДК. Значения погрешности внутри интервалов (0–1) ПДК отсутствуют. Поскольку зависимость погрешности от концентрации в этих пределах носит гиперболический характер, то ее можно выразить в общем виде как

$$\Delta\% = \frac{a}{n} + 25 - a. \quad (10)$$

Положив  $n = 0,3$  ПДК и  $\Delta = 40\%$ , получим величину  $a = 6,43$ .  
Теперь зависимость погрешности от величины  $n$ , кратной ПДК, будет

$$\Delta\% = \frac{6,43}{n} + 18,57. \quad (11)$$

Здесь концентрация  $n$  представлена в единицах ПДК.  
Если  $n = 1$  ПДК, то  $\Delta = 25\%$ , если  $n = 0,3$  ПДК, то  $\Delta = 40\%$ . При  $n = 10$  ПДК  $\Delta = 19,2\%$ .

В случае погрешности, равной 40% при концентрации 0,5 ПДК, зависимость (6) будет иметь вид

$$\Delta\% = \frac{15}{n} + 10. \quad (12)$$

Изложенные материалы и опыт работы в области развития методов и совершенствования средств пылевого контроля позволяют сделать следующие выводы.

1. Вредность пыли для организма следует определять, непосредственно измеряя массу пыли, вдыхаемой в течение рабочей смены, применяя аспираторы или индивидуальные пылепробонаборники. Масса вдыхаемых частиц рассчитывается по формулам

$$m = m_0 \frac{q}{q_0} \text{ или } m = m_0 \frac{Q}{Q_0}$$

где  $m_0$  – масса пыли, отобранной аспиратором на фильтр в течение смены;  $q_0$  – производительность аспиратора;  $q$  – объемная скорость легочной вентиляции работающего;  $Q$  – объем легочной вентиляции за рабочую смену;  $Q_0$  – объем воздуха, прокачанного аспиратором через фильтр за смену.

2. Отбор проб пыли следует производить в зоне дыхания осредненно по всем направлениям движения воздуха.

3. Условия отбора проб пыли должны обеспечивать попадание в пробоотборный канал частиц размером менее 90 мкм.

4. В процессе отбора проб пыли должно производиться разделение частиц на фракции в соответствии с рекомендуемыми кривыми разделения. На данном этапе допускается деление частиц на две фракции: 90–7 мкм и 7–0 мкм или 90–0 мкм и 7–0 мкм.

5. Отбор проб должен производиться с постоянной объемной скоростью прокачки воздуха независимо от величины пылевого осадка на фильтре.

6. Аспираторы должны потреблять минимум энергии, что может достигаться использованием объемных фильтров, обладающих низким аэродинамическим сопротивлением при высокой пылеемкости. В результате будет снижаться масса прибора и повышаться электробезопасность.

7. В аспираторах должны быть предусмотрены непрерывный контроль скорости прокачки воздуха, объема прокачанного воздуха и индикация массы пылевого осадка.

Все требования к пылевому контролю реально выполнимы. Необходимо разработать многолетнюю программу и определиться с исполнителями и источником финансирования.

Изложенным требованиям во многом отвечает зарубежный пробоотборник СР-10, из отечественных – частично отвечает серийно выпускаемый ВостЭко ПКА-01 и экспериментальный образец ПП-2У, разработанный в ИПКОН РАН [5]. Однако последние в соответствии с современными требованиями к пылевому контролю нуждаются в модернизации.

Оценку эффективности средств борьбы с пылью можно производить несколькими способами.

Один из них состоит в измерении концентрации пыли в воздухе до и после применения, например, гидрообеспыливания при выемке угля. В этом случае стоит вопрос, в каком месте, каким образом и какими средствами следует производить измерение концентрации. Что касается места измерения, то это зона дыхания, приборы – СР-10 и другие аспираторы. Способ простой, но его недостаток неоперативность: результат получается через сутки. Погрешность определения эффективности способа может быть значительной из-за изменчивости концентрации пыли по времени и от расстояния места измерения до источника.

Другой способ оценки эффективности гидрообеспыливания состоит в определении массы пыли, поглощаемой работником за смену или при выемке одной или нескольких стружек угля, снимаемых комбайном. Место измерения то же, что и в первом случае. При его реализации не нужно измерять время и расход воздуха. Расход воздуха (производительность аспиратора) должен быть постоянным, а масса пыли, осаждаемой на фильтр, определяется либо за смену, либо при снятии одной или нескольких стружек в случае недостаточной пылеемкости фильтра и высокой концентрации пыли при выемке угля. Погрешность измерения эффективности гидрообеспыливания значительно меньше, чем в первом случае, так как колебания концентрации пыли усредняются со временем и по мере выемки угля. Недостаток способа тот же – неоперативность.

Третий способ оценки эффективности средств борьбы с пылью состоит в измерении концентрации пыли на выбранном расстоянии от источника, например от комбайна в лаве по ходу вентиляционной струи. Но для этого необходимо установить закономерности распределения концентрации пыли в вентиляционном потоке после источника на некотором расстоянии от него и в сечении выработки. Выполнять измерение концентрации можно при помощи экспресс-пылемеров ПКА-01, ИКАР и аспиратора ПП-2У. В этих приборах измеряемой вели-

чиной является масса пыли, осажденной на фильтр из фиксируемого объема протянутого воздуха. Масса пылевого осадка определяется косвенными методами: аэродинамическим сопротивлением осадка (ПКА-01), поглощением или рассеянием свет (СДП-1), поглощением мягкого бета-излучения (ИКАР). Из-за изменчивости дисперсного состава пыли погрешность измерения массы оптическим и депремометрическим методами могут достигать 60% и более [6]. Эта погрешность неприемлема для оценки эффективности способов борьбы с пылью.

Радиоизотопный метод базируется на зависимости поглощения бета-излучения пылевым осадком, которое пропорционально его массе. Этот метод может использоваться и для установления распределения концентрации пыли в пылевом потоке, и для последующей оценки эффективности проводимых мероприятий по борьбе с пылью, но при условии выбранного постоянного места измерения.

Таким образом, для определения эффективности средств и способов борьбы с пылью следует использовать способ измерения массы пыли, попадающей в легкие, при котором не требуется установления места отбора проб воздуха.

Для быстрой оценки эффективности средств и способов борьбы с пылью на месте можно использовать экспресс-пылемеры при условии установления представительной точки в пылевом потоке. Этот вопрос нуждается в научной проработке.

Наиболее трудная и актуальная на данный момент проблема пылевого мониторинга – это отслеживание взрывобезопасного состояния выработок. Его следует осуществлять, непрерывно измеряя пылеотложение до достижения критического значения на участке, который принято считать взрывоопасным, но который не обоснован теоретически и экспериментально.

Для этого есть два пути: измерять пылеотложение по разности концентраций на заданном участке выработки (то есть по потере массы пыли на этом участке) и непосредственно по пылеотложению на датчиках массы.

Оба способа имеют достоинства и недостатки. Первый способ хорош тем, что измеряемое пылеотложение не зависит от предыстории аэрозоля: от типа источника пылеобразования, расстояния до него, изменяющегося во времени, от других источников, расположенных ниже по вентиляционной струе и т.д. Недостаток способа – это отсутствие метода непрерывного измерения массы пыли, проходящей через всё сечение выработки. Предложение измерять массу пыли индивидуальным пылемером СИР наподобие измерения средней скорости воздуха в сечении выработки, не решает задачу непрерывного контроля пылеотложения.

Как показывает анализ методов измерения концентрации пыли, ни оптический, ни электрический, ни депремометрический, ни пьезо-

метрический акустический (весовой) и даже радиоизотопный методы по разным причинам не годятся для непрерывного измерения массовой концентрации витающей пыли, а, следовательно, и для измерения массы пыли, проходящей через все сечение выработки.

Для реализации способа необходимо изыскать новые метод и подходы к измерению средней концентрации пыли в сечении выработки. Это сложная задача, на решение которой должен быть направлен поиск ученых и внимание лиц, заинтересованных в решении проблемы пылевзрывобезопасности в угольных шахтах. Должна быть разработана специальная многолетняя программа с достаточным финансированием.

Второй способ оценки взрывобезопасного состояния выработок весьма неопределен из-за вышеупомянутых причин, влияющих на формирование пылеотложения, особенно, когда имеет место протяженный очистной забой и скоростная выемка угля. Формирование пылевого осадка не может характеризоваться постоянной во времени зависимостью.

При этом способе с датчиками пылеотложения дело обстоит несколько лучше. Как показывают материалы [7–9] реально могут использоваться пьезоэлектрические – электронные микровесы и радиоизотопные датчики пыли. Принцип работы первых основан на зависимости резонансной частоты колебания пластинки от ее массы. Вторые работают по принципу поглощения или рассеяния пылевым осадком мягкого бета-излучения. Как показано в [7], взрывоопасное пылеотложение, приходящееся на единицу поверхностной выработки, соответствует максимальной поверхностной плотности осадка, измеряемой радиоизотопным методом. Процедура измерения поверхностной плотности осадка должна быть аналогична той, что принята в радиоизотопном пылемере ИКАР [10].

Радиоизотопные датчики в принципе не чувствительны к воздействию механических ударов и колебаний. Однако они вынуждены функционировать с перерывами на измерение поверхностной плотности до получения сигнала об опасном пыленакоплении в среде с высокой интенсивностью пылеотложения. При их использовании должно быть учтено оптимальное для каждой интенсивности пылеотложения отношение интервала времени накопления осадка к времени его измерения (1–2 мин.). По предварительным расчетам временем измерения массы осадка радиоизотопным методом можно пренебречь.

Для измерения пылеотложения радиоизотопным методом без осаждения пыли на подложки и без перерывов [11] потребуются открытые источники излучения, опасные для окружающих. Это делает непрерывное, без осаждения пыли на подложку, измерение пылеотложения радиоизотопным методом неприемлемым.

Электронные микровесы могут измерять взрывоопасное пылеотложение, но обладают тем недостатком, что они нуждаются в защите от механических ударов и вибрации, в изоляции элементов и электроники от влаги и пыли. Они имеют большие габариты и неудобны для размещения в выработке. При их использовании необходимо знать погрешность измерения непрерывно возрастающей массы пыли, должны быть решены вопросы очистки пылеосадительной платформы и т.д.

Для реализации способа определения пылеотложения с использованием датчиков массы необходимо знать закономерности формирования осадка во времени на протяжении выбранного потенциально опасного участка выработки, а затем установить на этом участке место для датчика (или нескольких датчиков), с тем, чтобы характеризовать пылеотложение на всем протяжении выбранного участка. Это весьма сложная задача, учитывая, что пункт замера, например, в вентиляционном штреке будет перемещаться навстречу подвиганию очистного забоя. Из-за этого распределение пылеотложения по длине и периметру выработки будет меняться.

Для обоих случаев контроля пылеотложения необходимо знать протяженность участка выработки, на котором образуется взрывоопасное количество пыли и время его накопления.

Возникает вопрос, какой участок выработки следует считать взрывоопасным: равный 10 м, 50 м или 100 м? И на 10 метрах выработки пыль может принять участие во взрыве, и на 50 м и на 100 м.

Следующий вопрос: на каком расстоянии от источника пыли следует располагать датчик пылеотложения и в каком месте периметра боковой поверхности выработки? Как рассчитывать по его показаниям пылеопасное состояние выработки? Далее, какое значение величины измеряемого пылеотложения должно служить сигналом о взрывоопасном состоянии выработки?

Заметим, что в [12] рассматривался случай неподвижного источника пыли в вентиляционной выработке. На самом деле при высокоскоростной выемке угля, при длине лавы более 100 м и при наличии пересыпов и погрузочных пунктов, расположенных ниже по вентиляционной струе, картина с пылеотложением будет значительно сложнее. Датчик пылеотложения необходимо будет перемещать, сохраняя постоянным расстояние до источника пыли, либо перемещение источника потребует включить в алгоритм расчета пылеотложения.

Поставленные вопросы требуют экспериментального решения по-видимому с использованием нескольких датчиков пылеотложения и концентрации пыли. Необходимо также разработать математический аппарат для расчета пылеотложения в динамике.

Решение вопроса о непрерывном измерении пылеотложения в выработках около погрузочных пунктов и пересыпов может быть более

простым по сравнению с измерением пылеотложения в вентиляционных выработках из-за того, что источник пыли стационарный. Может оказаться достаточным поместить датчик в том месте, в котором пылеотложение характеризует взрывоопасное состояние наиболее опасного участка выработки. Но для этого необходимо предварительно определить это место. И это должно производиться у каждого источника пыли.

Из вышеизложенного вытекает необходимость

- установления закономерности формирования пылеотложения по длине выработки с учетом скоростной выемки угля и большой протяженности забоя;

- усовершенствования или создания новых датчиков непрерывного контроля пылеотложения и массовой концентрации пыли по всему сечению выработки;

- разработки алгоритма расчета пылеотложения по показаниям датчиков с учетом факторов, влияющих на динамику формирования пылеотложения;

- разработки методики определения мест установки датчиков для характеристики пылеотложения на заданном участке выработки;

- определения протяженности взрывоопасного участка выработки, состояние которого должно контролироваться и др.

Рассмотренные здесь вопросы во многом были решены институтами МакНИИ и ВостНИИ, ИГД им.А.А.Скочинского, Сектором физико-технических горных проблем ИФЗ им О.Ю.Шмидта АН СССР в 60–90ые годы прошлого столетия применительно к технологии добычи угля того времени и с учетом тех возможностей, которые представляла в то время наука и техника.

При внедрении скоростной техники выемки угля увеличилась интенсивность пылеобразования, изменился характер пылеотложения, оно стало динамичным. Все это требует новых подходов к решению прежних и возникающих задач, чему способствует современная электроника, вычислительная техника, автоматика, точное приборостроение, достижения физики аэрозолей и других наук.

Без государственной программы эти проблемы не будут решены.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. Р 2.2.2006–05 М.2005, 142 с.

2. ГОСТ Р 54578–2011 Воздух рабочей зоны. Аэрозоли преимущественно фиброгенного действия. Общие принципы гигиенического контроля и оценки воздействия.

3. *Воронина Ю.В.* Изучение свойств пыли угольных шахт с целью создания экспресс-пылемера. Автореферат канд. диссерт., М.: ИПКОН АН СССР, 1979, 20 с.

4. ОСТ 153–12.0–004–01. Рудничная атмосфера. Методы контроля запыленности.

5. *Кудряшов В.В.* Разработка приборного обеспечения пылевого контроля в угольных шахтах. ГИАБ. Труды Международного симпозиума. 2013. Отд. вып. №1 «Горная книга». С. 512–535.

6. *Кудряшов В.В.* Современное состояние и задачи в области развития приборов и технического обеспечения пылевого контроля. Измерение и нормирование аэрозолей фиброгенного действия. Материалы симпозиума специалистов стран–членов СЭВ, работающих по комплексной проблеме «Гигиена труда и профессиональные заболевания», 16–20 октября 1979 г. М.: Издательский отдел Управления делами Секретариата СЭВ, 1982, с. 15–23

7. *Кудряшов В.В.* О непрерывном контроле пылеотложения в горных выработках угольных шахт. Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск. – М.: Изд. «Мир горной книги». – 2007. – С. 245–255.

8. *Клименко А.П.* Методы и приборы для измерений концентрации пыли. – М.: «Химия». – 1978. – 207 с.

9. *Поздняков Г.А., Закутский Е.Л.* Методы и средства контроля пылевзрывобезопасности угольных шахт. Горный информационно-аналитический бюллетень №12 «Аэрология». – М.: МГУ. – 2007. – С. 58–70.

10. *Кудряшов В.В., Воронина Л.Д., Шуринова М.К. Воронина Ю.В. и др.* Смачивание пыли и контроль запыленности воздуха.

11. *Нецепляев В.В., Любимова А.И., Петрухин П.И. и др.* Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах. – М.: «Недра». – 1992. – 208 с.

12. *Онтин Е.И., Старков С.П.* Расчетный способ определения пылеотложения в горных выработках шахт как основа нормализации сланцевой защиты. – В сб. Вопросы безопасности в угольных шахтах. – М.: Недра. – 1992. – 208 с.

**ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Кубрин Сергей Сергеевич* – профессор, докт. техн. наук, заведующий лабораторией Геотехнологических рисков освоения недр, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва, Россия, 8-495-360-07-35, E-mail: s\_kibrin@mail.ru,

*Кудряшов В.В.* –

*Терешкин Александр Иванович* – инженер, главный специалист по технологии обеспыливания Дирекции аэрологической безопасности подземных горных работ АО «СУЭК-Кузбасс», г. Ленинск-Кузнецкий, Россия, 8-38456-9-32-07, E-mail: tereshkina1@suek.ru.

**Kubrin S.S., Kudryashov V.V., Tereshkin A.I.**

## **Principles of dust control in the coal industry**

The paper considers a new approach to the problem of dust control in the coal industry. It is based on the measurement of the dust mass of sediment that enters the lungs during breathing. On the other hand, by measuring the mass of dust deposited on a filter from a fixed volume of air. This is necessary to determine the effectiveness of tools and methods to combat dust in the mines. In addition, to measure the mass of dust sediment on the substrate to solve the problem of continuous monitoring of the explosive state of mine workings. It noted that the most difficult problem to solve now is the development of continuous monitoring of the explosive state of workings. This problem needs serious scientific study.

Key words: dust control, a new approach, respirable dust evaluation of methods of struggle, the explosion of the mine workings.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-257-272

## **AUTHORS**

*Kubrin S.S., Professor, doctor. tech. Sciences, head of laboratory of Geotechnical risk of the development of mineral resources, Institute of problems of comprehensive exploitation of mineral resources RAS, g, Moscow, Russia, 8-495-360-07-35, E-mail: s\_kibrin@mail.ru,*

*Kudryashov V.V.,*

*Tereshkin A.I., engineer, chief specialist in dust removal technology of the Directorate of aerological safety of underground mining operations of JSC SUEK-Kuzbass, Leninsk-Kuznetsky, Russia, 8-38456-9-32-07, E-mail: tereshkina@ suek.ru.*

## **REFERENCES**

1. *Rukovodstvo po gigienicheskoy ocenke faktorov rabochej sredy i trudovogo processa. Kriterii i klassifikaciya uslovij truda* [Guidelines for hygienic assessment of working environment and labor process factors]. R 2.2.2006-05. Moscow. 2005, 142 p.
2. *GOST R 54578–2011 Vozduh rabochej zony. Aerozoli preimushchestvenno fibrogenogo dejstviya. Obshchie principy gigienicheskogo kontrolya i ochenki vozdeystviya* [GOST R 54578-2011 the Air of the working area. Aerosols predominantly fibrogenic action. General principles of hygienic control and impact assessment].
3. *Voronina Yu.V. Izuchenie svojstv pyli ugol'nyh shaht s cel'yu sozdaniya ekspress-pylemera* [The study of the properties of coal mine dust in order to create an Express dust]. Avtoreferat kand. dissert., Moscow: IPKON AN SSSR, 1979, 20 p.
4. *OST 153-12.0-004-01. Rudnichnaya atmosfera. Metody kontrolya zapylennosti* [OST 153-12.0-004-01. Mine atmosphere. Dust control methods].
5. *Kudryashov V.V. Razrabotka pribornogo obespecheniya pylevogo kontrolya v ugol'nyh shahtah* [Development of instrument support of dust control in coal mines]. GIAB. Trudy Mezhunarodnogo simpoziuma. 2013. Otd. vyp. no 1 «Gornaya kniga». pp. 512–535.
6. *Kudryashov V.V. Sovremennoe sostoyanie i zadachi v oblasti razvitiya priborov i tekhnicheskogo obespecheniya pylevogo kontrolya. Izmerenie i normirovanie aerorozolej*

*fibrogenogo dejstviya* [Current state and tasks in the field of development of devices and technical support of dust control]. Materialy simpoziuma specialistov stran–chlenov SEV, rabotayushchih po kompleksnoj probleme «Gigiena truda i professional'nye zabolevaniya», 16–20 oktyabrya 1979. Moscow: Izdatel'skij otdel Upravleniya delami Sekretariata SEV, 1982, pp. 15–23

7. Kudryashov V.V. *O nepreryvnom kontrole pyleotlozheniya v gornyh vyrabotkah ugol'nyh shaht* [On the continuous control of dust deposition in the mine workings of coal mines]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'. Otdel'nyj vypusk. Moscow: Izd. «Mir gornoj knigi». 2007. pp. 245–255.

8. Klimenko A.P. *Metody i pribory dlya izmerenij koncentracij pyli* [Methods and devices for measuring dust concentration]. Moscow: «Himiya». 1978. 207 p.

9. Pozdnyakov G.A., Zakutskij E.L. *Metody i sredstva kontrolya pylevzryvobezопасnosti ugol'nyh shaht* [Methods and means of control of dust and explosion safety of coal mines]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' no 12 «Aerologiya». Moscow: MGGU. 2007. pp. 58–70.

10. Kudryashov V.V., Voronina L.D., Shurinova M.K. Voronina Yu.V. i dr. *Smachivanie pyli i kontrol' zapylennosti vozduha* [Wetting dust and dust control].

11. Neceplyaev V.V., Lyubimova A.I., Petruhin P.I. i dr. *Bor'ba so vzryvami ugol'noj pyli v shahtah* [Fight against coal dust explosions in mines]. Moscow: «Nedra». 1992. 208 p.

12. Ontin E.I., Starkov S.P. *Raschetnyj sposob opredeleniya pyleotlozheniya v gornyh vyrabotkah shaht kak osnova normalizacii slancevoj zashchity* [Calculation method for determining dust deposition in mine workings as a basis for the normalization of shale protection]. V sb. Voprosy bezопасnosti v ugol'nyh shahtah. Moscow: Nedra. 1992. 208 p.



---

**Секция 4**  
**ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**  
**И ОХРАНА ТРУДА**

---



**О.В. Тайлаков, С.В. Соколов,  
А.В. Герасимов, А.А. Колмакова**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗОН, ХАРАКТЕРИСТИК УСТОЙЧИВОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ КРОВЛИ МЕТОДОМ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ НА ПРОХОДЯЩИХ ВОЛНАХ\***

Рассмотрены подходы к определению устойчивости кровли, выявлению аномальных тектонических зон и геологических нарушений углепородного массива методом сейсмического просвечивания на проходящих волнах. Представлены и обсуждаются результаты исследований выемочного столба в шахтных условиях с использованием сейсмоакустической аппаратуры. Описаны особенности распределения скоростных характеристик на регистрируемых волновых картинах и интерпретированы области изменения физико-механических параметров кровли выемочного столба.

Ключевые слова: угольная шахта, сейсмическое просвечивание, проходящие волны, управляемость, устойчивость кровли, скорость прохождения упругих волн, выемочный столб.

---

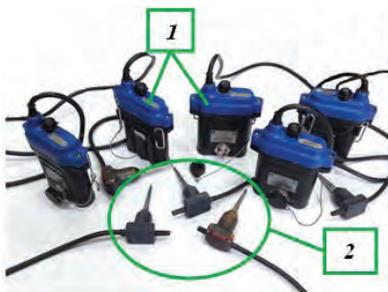
DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-275-282

### **Введение**

В последнее время расширяющееся применение для уточнения условий залегания угольных пластов и поиска геологических нарушений находят методы геофизических исследований на поверхности шахтных полей [1, 2]. Однако их использование не всегда возможно в условиях сложного рельефа местности, больших глубин залегания исследуемых угольных пластов и вмещающих горных пород, а также их перекрытия выработанным пространством, характеризующимся низкой скоростью распространения акустических волн. В этих условиях более эффективно проводить исследования углепородного массива из горных выработок угольных шахт с применением специализированной аппаратуры сейсмического просвечивания [3, 4].

---

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-17-01143).



**Рис. 1. Комплект сейсмического оборудования: 1 – автономные сейсмические станции «Р-1»; 2 – геофоны GS-20DX**

Методика проведения измерений и аппаратура. Способ сейсмического просвечивания основан на связи между скоростными и упругими свойствами среды и заключается в регистрации проходящих волн через участок исследуемого массива [5,6]. Скорости распространения продольных и поперечных волн являются основными параметрами, характеризующими литологический состав горных пород, их состояние и свойства [7].

При проведении геофизических работ был использован комплект сейсмического оборудования, состоящий из (рис. 1):

- автономной сейсмической станции «Р-1», обеспечивающей сохранение получаемого сигнала в цифровом формате;
- геофонов GS-20DX, определяющих количество каналов в выполняемом исследовании;
- источника механических ударных колебаний.

Характеристики комплекта сейсмического оборудования представлены в табл. 1.

С применением сейсмоакустического оборудования проведены исследования в пределах выемочного поля одной из угольных шахт Кузбасса для определения возможных аномальных тектонических зон и характеристик кровли. С учетом плана горных работ и фактического расположения выработок, были определена схема расстановки геофизических пикетов (ПК) приема и возбуждения колебаний, выполнена

Таблица 1

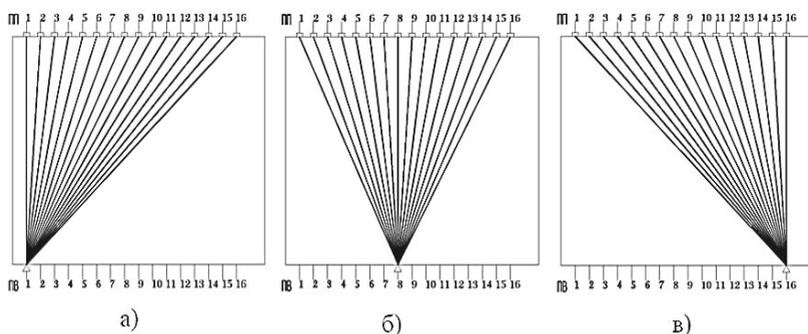
### Сейсмическое оборудование и его характеристики

Наименование	Назначение	Характеристики
Автономная сейсмическая станция «Р-1»	Реализация многоканальных систем наблюдения с неограниченным количеством пунктов приема сейсмических данных от различных источников возбуждения упругих колебаний	Количество каналов регистрации – 1; Максимальный объем накопителя CompactFlash – 16 GB; Усиление предусилителя, раз – 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64; Полоса регистрируемых частот – 0–3200 Гц; Погрешность временной привязки – менее ± 1 мс/8ч; Шаг дискретизации – 1 мс; Срез встроенного фильтра – 500 Гц.

Наименование	Назначение	Характеристики
Геофон GS-20DX	Регистрация горизонтальных и вертикальных упругих колебаний	Собственная частота (Гц) – $8 \pm 5\%$ ; Чувствительность по внутреннему напряжению ( $B^*c/cm$ ) – $0,28 \pm 5\%$ ; смещение катушки индуктивности – 1,5 мм; Сопротивление катушки индуктивности (Ом) – $395 \pm 5\%$ ; Искажение < 0,2%.

координатная привязка измерительных систем. Регистрирующие пикеты были установлены по линии вентиляционной печи, а источники колебаний – со стороны конвейерной печи.

Возбуждение упругих волн выполнялось с различных пикетов по схеме, представленной на рис. 2. Вызванные колебания регистрировались геофонами с последующим преобразованием в электрический импульс и передачей в регистрирующий комплекс. Зафиксированные данные были обработаны на основе применения специализированного программного обеспечения «RadexProPlus» с их последовательной сортировкой, полосовой частотной фильтрацией, выделением и анализом особенностей распространения полезных волн [8, 9].



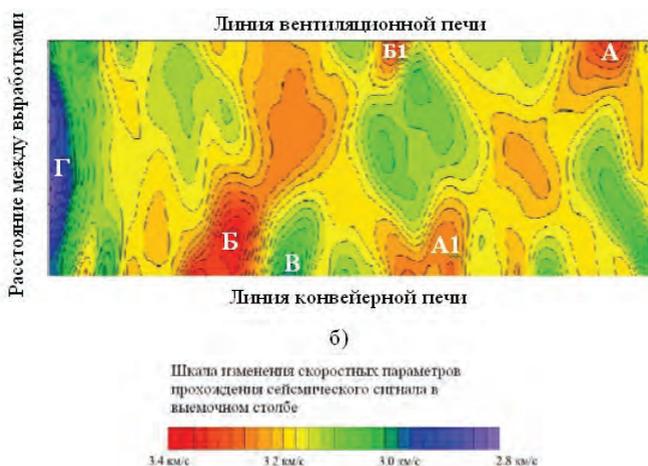
**Рис. 2. Схема распространения проходящих волн в теле выемочного столба от различных пикетов возбуждения колебаний (ПВ) к пикетам приема колебаний (ПП): а — с первого ПВ; б — с центрального ПВ; в — с последнего ПВ**

Далее была проведена пикировка волн, по результатам которой определены временные отметки регистрации продольных проходящих волн [10]. Зарегистрированные временные отметки прохождения сейсмических волн в выемочном столбе внесены в программу обработки томографических данных для оценки изменения мгновенных скоростей в площади выемочного столба. Последующая оценка проведена путем программного моделирования среды, находящейся между двумя выработками (вентиляционной и конвейерной печами). Значения мгновен-

ных скоростей определены на отдельных участках выемочного столба, деление на которые выполнено путем его оцифровки и пикселизации с учетом реальных координат. Результаты были сохранены в виде скоростной модели среды [11].

На заключительном этапе обработки данных на основе полученных скоростных моделей с помощью программного комплекса была построена двумерная модель анизотропной среды и горизонтальный геофизический разрез распределения скоростных характеристик с выделенными областями изменения физико-механических параметров кровли выемочного столба (рис. 3).

Результаты сейсмического просвечивания в границах выемочного столба. На основе выполненных сейсморазведочных исследований в пределах выемочного столба аномальных тектонических зон не зарегистрировано. При этом установлено, что изменение физико-механических свойств кровли на рассматриваемом участке происходит равномерно (рис. 3). Выемочный столб характеризуется скоростями прохождения продольных сейсмических волн в интервале 2,8–3,4 км/с. Средняя скорость в выемочном столбе – 3,2 км/с, которая соответствует непосредственной кровле пласта, сложенной аргиллитом со средней устойчивостью. В пределах выемочного столба выделяются области В и Г с пониженными скоростями прохождения продольных сейсмических волн (2,8 – 3,0 км/с). Область снижения скоростей – Г является результатом разгрузки, вызванной наличием монтажной камеры. Положение области В обусловлено сочетанием зоны дробления дизъюнктивного нарушения и промежуточного штрека [12].



**Рис. 3. Геофизический разрез распределения скоростных характеристик с нанесением областей изменения физико-механических параметров кровли выемочного столба**

В выемочном столбе также зарегистрированы области А, А1, Б, Б1 с максимальными скоростями прохождения сейсмических волн 3,4 км/с, которые характеризуют общую тенденцию к снижению мощности непосредственной кровли (аргиллита) и проявлениями вышележащих пород песчаника в области непосредственной кровли [13]. На основе распределения скоростных характеристик в области геофизических измерений в пределах выемочного столба прогнозируется преимущественно среднеустойчивая непосредственная кровля. В соответствии с классификацией, обнажения площадью 10 м<sup>2</sup> – 15 м<sup>2</sup> могут сохранять устойчивость до 60 минут.

Полный индекс активной кровли выемочного столба: активная кровля – трудноуправляемая; непосредственная кровля – среднеустойчивая, с возможностью проявления неустойчивой. По нагрузочным свойствам основная кровля тяжелая. По управляемости – трудноуправляемая.

### **Заключение**

Выполненные исследования подтверждают возможность применения метода сейсмического просвечивания на проходящих волнах для определения и прогнозирования геомеханических свойств массива, аномальных тектонических зон, а также характеристик кровли. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения горно-геологических условий и разработки мероприятий, направленных на повышение эффективности угледобычи и безопасности ведения горных работ.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Тайлаков О.В., Макеев М.П., Соколов С.В., Уткаев Е.А.* Применение сейсмоакустического профилирования для уточнения условий залегания угольных пластов // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. статей // Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. Новокузнецк. 2012. С. 266-267.

2. *Соколов С.В.* Применение сейсмической разведки для оценки условий залегания угольных пластов и определения в углеродном массиве зон с измененными характеристиками // ISBN 978-5- 902305-46-0, Ежегодная молодежная конференция ИУ СО РАН – 2015 [Электронный ресурс]: сб. тр. конференции, Кемерово, 16–17 апреля 2015 г. – С 97–104.

3. *Брагин В.М., Жуков Е.М., Лугинин И.А., Кропотов Ю.И.* Возможности и преимущества метода сейсмического просвечивания, применяемого для уточнения геологического строения углеродного массива выемочных столбов // Молодой ученый. – 2015. – №24. – С. 295-299.

4. *Stuart Crampin, Yuan Gao.* Evidence supporting New Geophysics // Volume2, Issue 3. 2018. Pages 173-188.

5. Сейсмоакустический метод прогноза горно-геологических условий эксплуатации угольных месторождений // Н.Я. Азаров, Д.В. Яковлев. – М.: Недра, 1988.

6. Jean Louis Briaud. Elements of Geophysics // Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils. 2013. Chapter 8.

7. Бондарев В.И. Основы сейсморазведки: Учебное пособие для вузов. Екатеринбург. Издательство УГГГА, 2003. 332 с.

8. Kenzhin B.M., Smirnov Yu.M. Special features of processing and interpreting mining seismic acoustic information // International research journal of. 2012. pp. 97 – 100.

9. Achyuta Ayan Misra, Soumyajit Mukherjee. Introduction to Seismic Data // Atlas of Structural Geological Interpretation from Seismic Images. 2018. Chapter 1.

10. Теория и практика шахтной сейсморазведки. А.В. Анциферов. — Донецк: ТОВ «АЛАН», 2003. – 311 с.

11. Азаров Н.Я., Яковлев Д.В. Сейсмоакустический метод прогноза горно-геологических условий эксплуатации угольных месторождений. – М.: Недра, 1988. – 199 с.

12. Молев М.Д. Основные положения теории комплексной интерпретации результатов подземных геофизических исследований // Научно-технический журнал ГИАБ. – 2010. №1.

13. Инструкция по геологическим работам на угольных месторождениях Российской Федерации. ВНИМИ, г. Санкт-Петербург, 1993 г. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Тайлаков О.В.*<sup>1</sup> — доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, [tailakov@uglmetan.ru](mailto:tailakov@uglmetan.ru),

*Соколов С.В.*<sup>1</sup> — младший научный сотрудник,

*Герасимов А.В.*<sup>1</sup> — аспирант,

*Колмакова А.А.* — студент 5 курса Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева Институт угля

<sup>1</sup> Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 650065, г. Кемерово, пр-т Ленинградский, 10.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 275–282.

**Tailakov O.V., Sokolov S.V., Gerasimov A.V., Kolmakova A.A.**

### **The determination of anomalous tectonic zones and sustainability and controllability characteristics of mine roof by the seismic transmission tomography**

The approaches for determining of the roof stability and the determination of anomalous tectonic zones and geological disturbances of the massif by the seismic tomography in coal mining are considered. Results of exploration of a working area with usage of seismic equipment are presented and discussed. The features of the distribution of velocity

characteristics on the recorded wave patterns are described. The areas of changes of the physical-mechanical parameters of the roof mine are interpreted.

Keywords: coal mine, seismic transmission, passing waves, controllability, stability roofing, speed of passage of elastic waves, excavation stanchion.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-275-282

## AUTHORS

Tailakov O.V.<sup>1</sup>, doctor of technical science, professor, deputy director for science, Sokolov S.V.<sup>1</sup>, junior researcher, the lab of resources and technologies of coal-bed methane extraction,

Gerasimov A.V.<sup>1</sup>, postgraduate,

Kolmakova A.A., Fifth-year student of KuzSTU,

<sup>1</sup>Coal Institute Federal research center for coal and coal chemistry Siberian branch of the Russian Academy of Sciences Russia, 650065, Kemerovo, Leningrad Avenue, 10.

## REFERENCES

1. Tajlakov O.V., Makeev M.P., Sokolov S.V., Utkaev E.A. *Primenenie sejsmoakusticheskogo profilirovaniya dlya utochneniya uslovij zaleganiya ugol'nyh plastov* [Application of the seismoacoustic profiling to clarify the conditions of occurrence of coal seams]. Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nyh resursov: sb. nauchn. statej. Sib. gos. industr. un-t; pod obshchey red. V.N. Fryanova. Novokuzneck. 2012. pp. 266–267.

2. Sokolov S.V. *Primenenie sejsmicheskoy razvedki dlya ocenki uslovij zaleganiya ugol'nyh plastov i opredeleniya v ugleporodnom massive zon s izmenennymi harakteristikami* [Use of seismic surveys to assess the conditions of occurrence of coal seams and determine the coal in the array of zones with altered characteristics]. ISBN 978-5-902305-46-0, Ezhegodnaya molodezhnaya konferenciya IU SO RAN 2015 [Elektronnyj resurs]: sb. tr. konferencii, Kemerovo, 16–17 aprelya 2015 g. pp. 97–104.

3. Bragin V.M., Zhukov E.M., Luginin I.A., Kropotov Yu.I. *Vozmozhnosti i preimushchestva metoda sejsmicheskogo prosvechivaniya, primenyaemogo dlya utochneniya geologicheskogo stroeniya ugleporodnogo massiva v yemochnyh stolbov* [Possibilities and advantages of the method of seismic transmission, used to clarify the geological structure of the column]. Molodoy uchenyj. 2015. no 24. pp. 295–299.

4. Stuart Crampin, Yuan Gao. *Evidence supporting New Geophysics*. Volume2, Issue 3. 2018. pp. 173–188.

5. Azarov N.Ya., Yakovlev D.V. *Sejsmoakusticheskij metod prognoza gorno-geologicheskikh uslovij ekspluatatsii ugol'nyh mestorozhdenij* [Seismoacoustic method of prediction of mining and geological conditions of exploitation of coal deposits]. Moscow: Nedra, 1988.

6. Jean Louis Briaud. *Elements of Geophysics*. Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils. 2013. Chapter 8.

7. Bondarev V.I. *Osnovy sejsmorazvedki* [Fundamentals of seismic exploration]: Uchebnoe posobie dlya vuzov. Ekaterinburg. Izdatel'stvo UGGGA, 2003. 332 p.

8. Kenzhin B.M., Smirnov Yu.M. *Special features of processing and interpreting mining seismic acoustic information*. International research journal of. 2012. pp. 97–100.

9. Achyuta Ayan Misra, Soumyajit Mukherjee. *Introduction to Seismic Data*. Atlas of Structural Geological Interpretation from Seismic Images. 2018. Chapter 1.

10. Anciferov A.V. *Teoriya i praktika shahtnoj sejsmorazvedki* [Theory and practice of mine seismic exploration]. Doneck: TOV «ALAN», 2003. 311 p.

11. Azarov N.Ya., Yakovlev D.V. *Sejsmoakusticheskiy metod prognoza gorno-geologicheskikh uslovij ekspluatatsii ugol'nyh mestorozhdenij* [Seismoacoustic method of prediction of mining and geological conditions of operation of coal deposits]. Moscow: Nedra, 1988. 199 p.

12. Molev M.D. *Osnovnye polozheniya teorii kompleksnoj interpretatsii rezul'tatov podzemnyh geofizicheskikh issledovanij* [Main provisions of the theory of complex interpretation of the results of underground geophysical studies]. Nauchno-tekhnicheskij zhurnal GIAB. 2010. no 1.

13. *Instrukciya po geologicheskim rabotam na ugol'nyh mestorozhdeniyah Rossijskoj Federacii* [Instructions for geological work on coal deposits of the Russian Federation]. VNIMI, g. Sankt Peterburg, 1993.



Е.А. Зеляева, Е.А. Разумов, В.Г. Венгер, Т.О. Григорьева

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗОН ПРЕДРАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В ОКРЕСТНОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Изложены положения по прогнозированию зон предразрушенных и разрушенных горных пород с использованием комплекса методов, включающих результаты геофизического, аналитического, численного методов прогноза состояния массива горных пород в окрестности горных выработок с оценкой адекватности параметров зон предразрушения по результатам точечного инструментального мониторинга в шахтных условиях.

Ключевые слова: зона предразрушения, георадар, гитс, анжел-т, кровля, подземные горные выработки, методы прогноза состояния массива.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-283-289

Прогноз формы и размеров зон предразрушения горных пород в окрестности выработок с использованием аналитического и численного методов осуществляется посредством решения дифференциальных уравнений механики анизотропного массива горных пород. Результаты прогноза в виде формы и размеров зон предразрушения и отношение остаточной прочности угля и пород к исходной прочности в этих зонах используются для выбора параметров крепи, способов и средств управления горным давлением.

Для геофизической оценки формы и размеров зон предразрушения горных пород используют комплексы: ГЕОРАДАР, GITS и ANGEL-M.

Принцип работы комплексов основан на регистрации электромагнитных импульсов, по результатам которых оцениваются параметры стационарных геофизических полей, связанных с разрушением горных пород в окрестности исследуемых участков выработок.

В качестве объекта исследования рассматривается реальная или проектируемая ситуации при отработке свиты пластов, панели, блока, выемочного участка. Приводится подробное описание существующего положения и планируемого пространственно-временного развития горных работ с указанием формы и размеров выработок, их положения относительно кровли и почвы пластов, способов и средств крепления, функционального назначения.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 283–289.

© Е.А. Зеляева, Е.А. Разумов, В.Г. Венгер, Т.О. Григорьева, 2018.

Особое внимание следует уделить детальному описанию геологического строения участка шахтного поля.

### Методика определения формы и размеров зон предразрушения горных пород геофизическими методами

#### Аппаратно программный комплекс GITS

Горно-геологический мониторинг проводится при помощи системы GITS. Выносные модули GITS устанавливаются в удаленных от базовых модулей (до 8 км) скважинах. Принимая сигналы от входящих в комплект датчиков (трехкомпонентных пьезоакселерометров), выносные

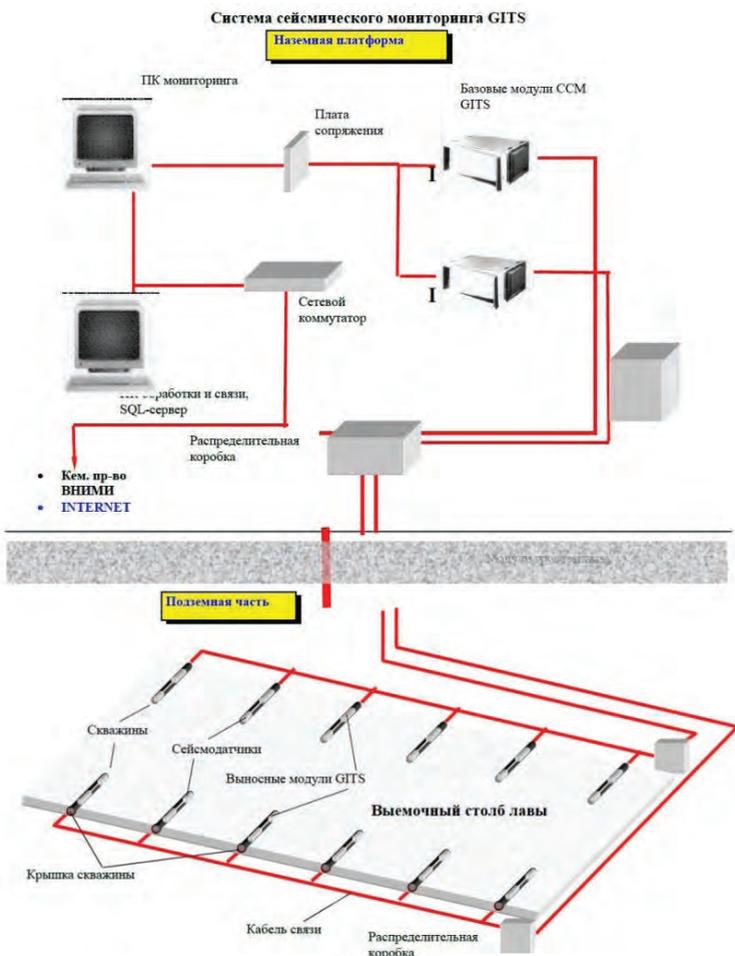


Рис. 1. Система сейсмического мониторинга GITS

модули через программируемые усилители-фильтры оцифровывают и по последовательному каналу передают их на базовый модуль GITS.

### **ГЕОРАДАР**

Для обнаружения зон предразрушения пород в окрестности выработок и определения их размеров используется георадиолокация – электромагнитный метод геофизики, изучает отклик среды на излучаемое электромагнитное поле. Для данных целей используется георадар, портативный радиотехнический прибор подповерхностного зондирования.

Принцип действия георадара, основан на излучении сверхширокополосных наносекундных импульсов, приеме сигналов, отраженных от границ раздела сред, стробоскопической обработке принятых сигналов и последующим измерением временных интервалов между отраженными импульсами.

### **ANGEL-M**

Измерения активности электромагнитного излучения производятся прибором «ANGEL-M», который в автоматическом режиме выполняет в течение заданного интервала времени прием на антенну сигналов переменного магнитного поля с последующим накоплением информации об излучении, а также запись результатов оценки в память для вывода на компьютер и документирования.

Регистрация электромагнитных импульсов от источников электромагнитных или упругих колебаний в окрестности выработок при помощи прибора «ANGEL-M» производится следующим образом.

Для обработки данных необходимо по исследуемому выемочному участку иметь следующую информацию:

- выкопировку с плана горных работ участка с нанесением маркшейдерских пикетов;
- данные о глубине залегания, мощности и обводненности (по данным замеров в горных выработках);
- данные о пространственном положении геологических нарушений с указанием их параметров;
- геологические разрезы по трассе исследуемых горных выработок.

### **Определение формы и размеров зон предразрушения горных пород аналитическими методами**

#### ***Динамика конвергенции пород кровли***

В продолжение всего срока эксплуатации выработок и сопряжений должен производиться систематический контроль работоспособности анкерной крепи путем визуальной оценки состояния анкеров, верхняков, подхватов, затяжки и величины смятия демпфирующих податливых элементов.

Визуальный контроль ведётся по наблюдениям за относительным смещениям базового и контрольного индикаторов, контрольного и контурного индикаторов.

Визуальные наблюдения за смещением промежуточных индикаторов относительно базового между реперами ведётся для обоснования рационального выбора длины анкеров, плотности их установки, для обоснования или подтверждения ширины выбранных полосок, критериев оценки безопасных (опасных) состояний контура выработок в конкретных условиях и для других целей.

Контроль относительного смещения и скорости смещения контурного и контрольного индикаторов необходим для установления тенденций развития деформаций на ранней стадии.

### **Методика прогноза формы и размеров зон предразрушения горных пород численными методами геомеханики**

Сравнение измеренных в шахтных условиях и вычисленных с помощью комплекса компьютерных программ геомеханических параметров является критерием соответствия деформирования расчётной модели реальным процессам.

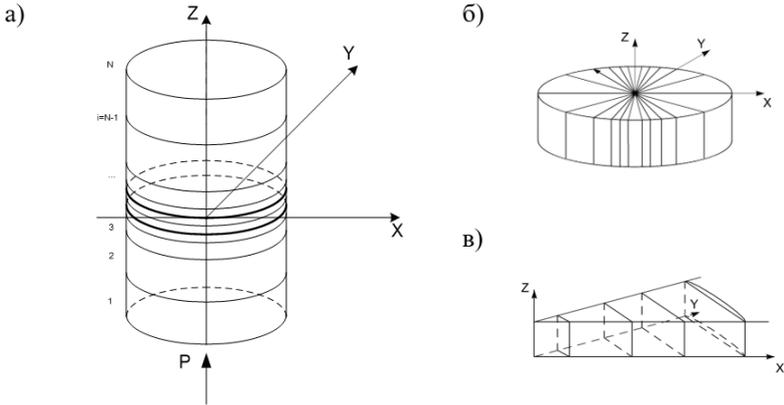
Сущность алгоритма адаптации МКЭ состоит в замене исследуемого объекта моделью в виде совокупности конечного числа дискретных элементов, связанных между собой в узлах. Неизвестными величинами являются смещения вершин элементов по трем осям координат, т.е. задача решается в перемещениях. Для этого проводится минимизация потенциальной энергии, зависящей от работы напряжений и внешней приложенной нагрузки. Затем составляются локальные для каждого элемента и глобальная матрицы жесткости, и решается система алгебраических уравнений. По известным перемещениям вершин каждого элемента вычисляются компоненты тензоров деформаций и напряжений.

Для прогноза формы и размеров зон предразрушения горных пород пространственного НДС углепородного массива использован МКЭ, разработанный Л. Сегерлингом и реализованный авторами в работе. В процессе адаптации этого варианта МКЭ разработаны:

- схемы дискретизации образца или участка углепородного массива, включающего однородный деформируемый материал из строительной смеси, твердые и мягкие включения, имитирующие трещины, геологические нарушения разрывного типа, твердые породы и другие неоднородности;
- схемы дискретизации слоистого углепородного массива, включающего систему пересекающихся горных выработок;
- метод оценки остаточной прочности горных пород с использованием теорий прочности;
- метод настройки результатов моделирования посредством сравнения расчетных и фактических зон предразрушения горных пород в кровли и боках выработки.

Для решения численной задачи выполняется дискретизация модели массива горных пород на конечные элементы. Комплекс программ настроен для геометрической модели в цилиндрической системе

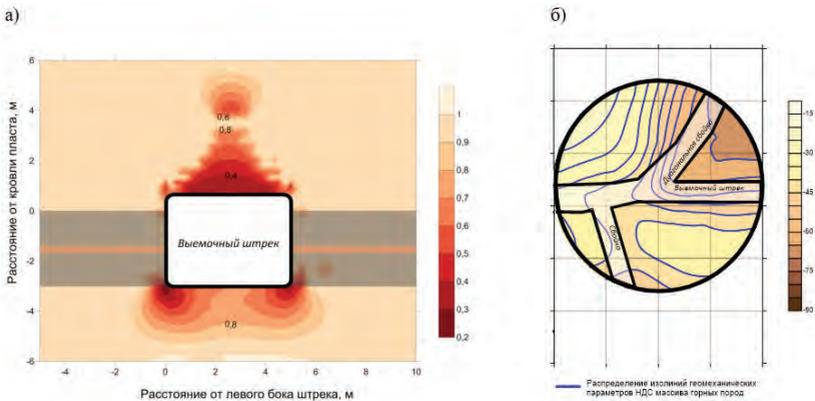
координат. В силу этого исследуемая область представляется в виде цилиндра, разделенного по вертикальной оси параллельными слоями, имитирующими угольные пласты и породные слои, ось цилиндра совпадает с геометрическим центром цилиндрической модели (рис. 2, а).



**Рис. 2. Дискретизация физической модели: а) схема деления на слои; б) схема деления на сектора; в) схема деления на тетраэдры**

Каждый слой в виде усеченного цилиндра (шайбы) делится на сектора (рис. 2, б). Сектор разбивается на пятигранные или шестигранные призмы (рис. 2, в).

На рис. 3 представлена визуализация расчётных геомеханических параметров НДС массива горных пород в окрестности примыкающих горных выработок сложной конфигурации.



**Рис. 3. Схема распределения изолиний геомеханических параметров НДС массива горных пород**

Одним из наиболее эффективных при расчёте параметров напряжённо-деформированного состояния пород в окрестности горных выработок и их сопряжений является метод конечных элементов. Это подтверждается такими положительными возможностями метода конечных элементов (МКЭ), как: дискретизация исследуемого образца на конечные элементы с учетом нерегулярных границ минералов и трещин, сгущение сетки конечных элементов в местах ожидаемой концентрации напряжений и зон предразрушений пород, учет различных граничных условий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 21.07.1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (с изменениями на 13.07.2015 г.).
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах». Серия 05. Выпуск 40. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014 г. – 200 с.
3. Инструкция по дегазации угольных шахт. Серия 05. Выпуск 22. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2012. – 250 с.
4. Пучков Л.А., Сластунов С.В., Каледина Н.О. и др. Концепция обеспечения метанобезопасности угольных шахт России на 2006-2010 гг. - М.: Издательство МГУ, 2006. 18 с.
5. Методические рекомендации о порядке дегазации угольных шахт. М.: ОАО «НТЦ «Промышленная безопасность», сер. 05, вып. 14. РД-15-09-2006.
6. Калиев С.Г., Преображенская Е.И., Садчиков В.А. и др. Управление газовой безопасностью на угольных шахтах. М.: Недра, 1980. 221 с.
7. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля (породы) и газа. РД 05-350-00.
8. Инструкция по безопасному ведению горных работ на шахтах, разрабатывающих угольные пласты, склонные к горным ударам. РД 05-328-99. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Зеляева Е.А. — научный сотрудник,  
Разумов Е.А. — руководитель НИЦ ГТБ,  
Венгер В.Г. — заведующий лабораторией геомеханики,  
Григорьева Т.О. — лаборант-исследователь,  
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева в г. Прокопьевске 653039, Кемеровская обл., г. Прокопьевск, ул. Ноградская, 19а, nipgtb@yandex.ru.

**Zelyaeva E.A., Razumov E.A., Wenger E.V., Grigoryeva T.O.**

## **Forecasting of parameters of zones of predestruction of rocks in the neighborhood of underground developments of coal mines**

In the present article provisions on forecasting of zones of the predestroyed and destroyed rocks with use of a complex of the methods including results of geophysical, analytical, numerical methods of the forecast of a condition of the massif of rocks in the neighborhood of excavations with assessment of adequacy of parameters of zones of predestruction by results of pointed tool monitoring in mine conditions are stated.

Keywords: predestruction zone, georadar, gits, angel-m, roof, underground excavations, methods of the forecast of a condition of the massif.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-283-289

### **AUTHORS**

*Zelyaeva E.A.*, researcher,  
*Razumov E.A.*, Director,  
*Wenger E.V.*, head of geomechanics laboratory,  
*Grigoryeva T.O.*, laboratory assistant-researcher,  
Prokopyevsk branch of Kuzbass State Technical University.

### **REFERENCES**

1. *Federal'nyj zakon ot 21.07.1997 g. № 116-FZ «O promyshlennoj bezopasnosti opasnyh proizvodstvennyh ob»ektov» (s izmeneniyami na 13.07.2015 g.)* [Federal law of 21.07.1997 № 116-FZ «On industrial safety production facilities « (as amended on 13.07.2015)].
2. *Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoj bezopasnosti «Pravila bezopasnosti v ugol'nyh shahtah»* [Federal regulations and rules in the field of industrial safety «safety Rules in coal mines»]. Seriya 05. Vypusk 40. Moscow: Zakrytoe akcionerное obshchestvo «Nauchno-tekhnicheskij centr issledovaniy problem promyshlennoj bezopasnosti», 2014. 200 p.
3. *Instrukciya po degazacii ugol'nyh shaht* [Manual for the degassing of coal mines]. Seriya 05. Vypusk 22. Moscow: Zakrytoe akcionerное obshchestvo «Nauchno-tekhnicheskij centr issledovaniy problem promyshlennoj bezopasnosti», 2012. 250 p.
4. Puchkov L.A., Slastunov S.V., Kaledina N.O. i dr. *Koncepciya obespecheniya metanobezopasnosti ugol'nyh shaht Rossii na 2006–2010* [Concept of providing metrobasement coal mines of Russia for 2006–2010]. Moscow: Izdatel'stvo MGGU, 2006. 18 p.
5. *Metodicheskie rekomendacii o poryadke degazacii ugol'nyh shaht* [Methodical recommendations about the order of degassing of coal mines]. Moscow: OAO «NTC «Promyshlennaya bezopasnost'», ser. 05, vyp. 14. RD-15-09-2006.
6. Kaliev S.G., Preobrazhenskaya E.I., Sadchikov V.A. i dr. *Upravlenie gazovydeleniem na ugol'nyh shahtah* [Gas emission control at coal mines]. Moscow: Nedra, 1980. 221 p.
7. *Instrukciya po bezopasnomu vedeniyu gornyh rabot na plastah, opasnyh po vnezapnym vybrosam uglja (porody) i gaza. RD 05-350-00* [Instructions for the safe conduct of mining operations on layers dangerous for sudden emissions of coal (rock) and gas. RD 05-350-00].
8. *Instrukciya po bezopasnomu vedeniyu gornyh rabot na shahtah, razrabatyvayushchih ugol'nye plasty, sklonnye k gornym udaram. RD 05-328-99* [Instructions for safe mining operations in the mines, developed handling coal seams prone to bumps mining. RD 05-328-99].

## УСТАНОВЛЕНИЕ ПРИЕМЛЕМОГО СПОСОБА ГИДРООБРАБОТКИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПО АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ\*

Изложена сущность метода установления приемлемого способа гидрообработки угольного пласта по акустической эмиссии, сопровождающей процесс нагнетания жидкости в скважину. Принято, что способ противовыбросноударной гидрообработки пласта является приемлемым и гидравлические параметры его (давление и темп нагнетания) считаются оптимальными, если требуемый объем закачки жидкости в скважину достигается за технологически допустимое время. На основе анализа региональных и локальных способов гидрообработки показано, что они различаются режимом нагнетания жидкости. Этих режимов два: фильтрации, когда жидкость распространяется по существующим трещинам без их развития, и гидрорыхления, когда под давлением жидкости трещины скачкообразно растут, увеличивая площадь фильтрации жидкости в микротрещины и поры. Каждый акт скачка трещины сопровождается импульсом акустической эмиссии (АЭ). Для измерения активности АЭ должен применяться прибор, имеющий амплитудную и частотную селекцию сигналов АЭ от растущих трещин на фоне акустических шумов от работающего в соседних выработках оборудования. Перед гидрообработкой измеряется фоновая активность АЭ, обусловленная ростом трещин под действием горного давления. Обосновано, что режим фильтрации осуществляется при таких гидравлических параметрах, при которых активность АЭ не превышает фоновую активность на 1–2 импульса за 2-х минутный интервал контроля. Ключевые слова: угольный пласт, газодинамические явления, способы гидрообработки, режим нагнетания, давление жидкости и темп закачки, развитие трещин, акустическая эмиссия.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-290-299

### Введение

Для предотвращения динамических явлений (ДЯ) в угольных шахтах России «Инструкцией по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений» регламентируются мероприятия, включающие региональные и локаль-

---

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17–17–01143).

ные способы гидрообработки угольных пластов [1]. Причем в качестве региональных способов предлагаются региональное увлажнение из подготовительных горных выработок, а также глубинное и низконапорное увлажнение угольных пластов. В качестве локальных способов гидрообработки предложены нагнетание воды в пласт, низконапорная пропитка и низконапорное увлажнение угольного пласта, а также гидрорыхление [1]. В отличие от предыдущего издания Инструкции в действующем документе не упоминается гидроотжим пласта, хорошо зарекомендовавший себя для пластов с низкими характеристиками прочности и водопроницаемости угля [2]. Другое отличие состоит в том, что этот документ лишь перечисляет названия способов гидрообработки и указывает области их применения.

Технологии осуществления указанных способов гидрообработки и параметры нагнетания (давление и объем закачанной жидкости) изложены в другом нормативном документе – «Рекомендациях по безопасному ведению горных работ на склонных к динамическим явлениям угольных пластах» [3].

Следует отметить, что в указанных новых нормативных документах не отражены такие перспективные методы гидравлического воздействия на угольный пласт с целью повышения дегазации как импульсное нагнетание жидкости [4–5], подземный гидроразрыв пласта [6–9] и его поинтервальный разрыв [10].

К недостаткам новых нормативных документов [1, 3] следует отнести также то обстоятельство, что в них нет рекомендаций о том, как выбрать наиболее приемлемый способ гидрообработки угольного пласта в конкретных условиях.

Цель данной работы — предложить методику установления для конкретных условий приемлемого способа гидрообработки угольного пласта и оптимальных давления и темпа нагнетания по акустической эмиссии, сопровождающей процесс нагнетания жидкости в угольный пласт.

### **1. Связь режима гидрообработки угля с акустической эмиссией**

Несмотря на многообразие названий указанных в нормативных документах способов гидрообработки, вызванное главным образом отличием технологических параметров: расположением скважин, из которых ведется гидрообработка; их количеством и размерами; глубиной герметизации, — цель у них одна: увлажнение угольного пласта до величины, при которой внезапные выбросы и горные удары никогда не происходили. Эта величина составляет 5–6% [3, 11]. При этой влажности жидкость закупоривает газ в микротрещинах и порах угля, не допуская его десорбцию и переход в свободное состояние. Уголь становится более пластичным, что приводит к уменьшению максимума опорного давления и отодвиганию его в глубь массива, тем самым уменьшая запасенную упругую энергию и энергию газа под давлением, в итоге

устраняя опасность проявления любых типов ДЯ. Следует добавить, что жидкость, внедряясь в пласт, вытесняет (замещает) метан в порах, а также производит поршневое вытеснение метана из трещин [12–13].

Увлажнение угля возможно двумя режимами [12, 14]. В первом (режим фильтрации) жидкость распространяется из скважины по существующим трещинам и из них в микротрещины и далее в поры. Этот режим возможен в том случае, если темп нагнетания не превышает природную приемистость угольного пласта (без принудительного роста трещин). В этом режиме осуществляются способы: низконапорное увлажнение и низконапорная пропитка пласта, и, вероятнее всего, региональное и глубинное увлажнение пласта.

Во втором режиме (режим гидрорыхления) темп нагнетания превышает природную приемистость пласта, в результате происходит скачкообразный рост имеющихся в пласте трещин (в том числе трещин кливажа) и жидкость расходуется на заполнение полостей растущих трещин и фильтрацию из них в микротрещины и поры угля. В этом режиме осуществляется гидрорыхление пласта.

Очевидное первое отличие режимов состоит в отсутствии или наличии принудительного роста трещин под действием нагнетаемой жидкости. Поскольку трещины в угле развиваются скачкообразно, регистрировать скачки наиболее удобно методом акустической эмиссии (АЭ), т.к. трещина в процессе скачкообразного роста излучает акустический импульс [15]. Отсюда и способ разграничения режимов нагнетания: нет импульсов АЭ — осуществляется режим фильтрации, регистрируются импульсы АЭ — осуществляется режим гидрорыхления.

Второе отличие состоит в том, что при длительном поступлении жидкости в пласт в режиме фильтрации равномерность увлажнения достигается высокой, тогда как при относительно кратковременном гидрорыхлении пласта равномерность увлажнения тем ниже, чем быстрее завершено гидрорыхление. Поэтому можно предположить, что надежность обеспечения выбросоударобезопасности увлажнением в режиме фильтрации выше, чем в режиме гидрорыхления.

## **2. Сущность метода определения наиболее приемлемого способа гидрообработки по акустической эмиссии**

Время увлажнения в этих режимах определяется водопроницаемостью угля. Поэтому одним из основных параметров при обосновании способа увлажнения пласта является технологически допустимое время для осуществления способа. При региональной гидрообработке пласта оно может составлять несколько месяцев, при локальной – чаще всего несколько часов, желательна в ремонтную смену.

Будем полагать, что способ противовыбросоударной гидрообработки пласта при ведении выработки по уголю является приемлемым и гидравлические параметры его (давление и темп нагнетания) счита-

ются оптимальными, если соответствующий данному способу контрольный параметр (5÷6-процентная влажность угля — при низконапорном и глубинном увлажнении (пропитке) и гидрорыхлении) достигается за технологически допустимое время.

Выбор приемлемого способа гидрообработки и определение его оптимальных гидравлических параметров удобно осуществить по результатам опытных нагнетаний воды в пласт, в процессе которых осуществляется мониторинг методом АЭ режима гидрообработки и измерение гидравлических параметров.

Исходя из надежности осуществления способов гидрообработки, первоначально целесообразно устанавливать возможность применения за технологически допустимое время (приемлемость) тех из них, которые осуществляются в режиме фильтрации. При неприемлемости этих способов следует установить приемлемость гидрорыхления. При неприемлемости гидрорыхления следует применить иной способ предотвращения ДЯ. Одним из них может быть забытый в настоящее время гидроотжим пласта.

Опытное нагнетание следует проводить в ремонтную смену, когда отсутствуют интенсивные акустические шумы от работающего оборудования в выработке, призабойное пространство которой подлежит увлажнению. Осуществляют его следующим образом. В 10–15 м от устья скважины в борт выработки бурится шпур на глубину 1,0–1,5 м, в который устанавливается геофон прибора контроля АЭ. Прибор должен осуществлять как минимум амплитудную и частотную селекцию импульсов АЭ, образующихся при скачкообразном росте трещин под действием нагнетаемой жидкости, на фоне возможных непрерывных акустических шумов, излучаемых работающим горным оборудованием в соседних выработках или производимых в процессе выполнения ремонтных работ в контролируемой выработке. Характеристики прибора могут быть аналогичными УКАЭ-1 [16].

Перед нагнетанием жидкости в течение 20–30 мин осуществляют измерение фоновой активности АЭ (числа импульсов АЭ в интервал времени, например, в 2-х минутный), обусловленной развитием трещин в призабойном пространстве под действием лишь горного давления. Это особенно актуально при гидрообработке призабойного пространства вблизи очистной выработки, где величина фоновой активности АЭ сильно зависит от длины зависающей кровли. В качестве примера на рис. 1 показана активность АЭ до и после посадки кровли, замеренная в лаве пласта Андреевского шахты «Анжерская» в Кузбассе.

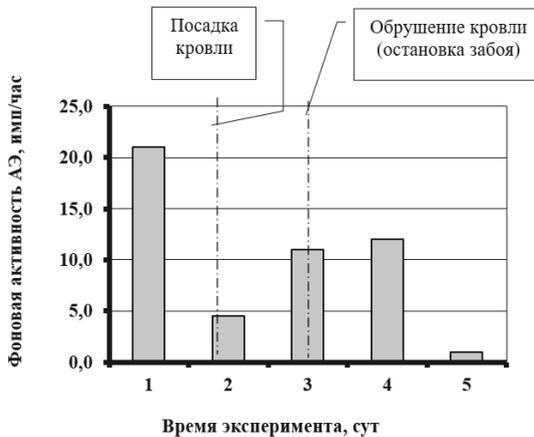
Затем начинают нагнетание с плавным увеличением темпа нагнетания путем слива части жидкости с высоконапорного выхода насоса на его вход (всас). При этом регистрируют возрастающее давление жидкости и активность АЭ. При ее увеличении над фоновым значением на 1–2 имп/инт регистрируют темп нагнетания, который принимают за

оптимальный для осуществления способов гидрообработки в режиме фильтрации. В этом убеждаются в течение нескольких последующих минут контроля АЭ.

Зная темп нагнетания, непрерывно контролируемый счетчиком-расходомером, оценивают в соответствии с [3] время, требуемое для осуществления увлажнения прилегающего к скважине объема угольного пласта. Если оно не превышает технологически допустимое, то гидрообработка в режиме фильтрации в данном забое считается приемлемой, а темп нагнетания — оптимальным.

Если окажется, что оптимальное значение темпа нагнетания меньше производительности насосной установки (у насосов с жесткой рабочей характеристикой темп нагнетания практически сохраняется постоянным), то для исключения слива части жидкости с выхода на всас можно увеличить фильтрующую часть скважины или подключить к насосу одновременно две скважины. Подключение большего числа скважин существенно усложняет процесс нагнетания и поэтому не рекомендуется.

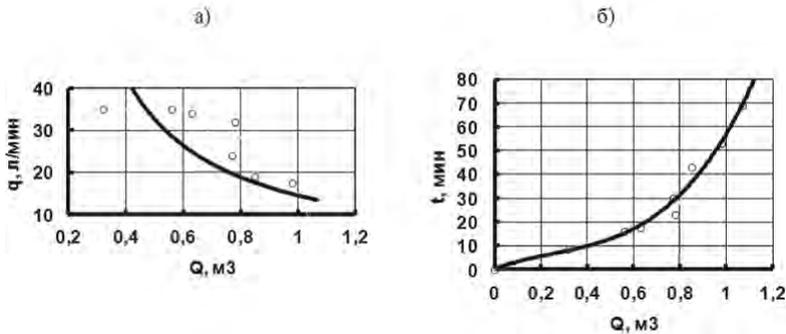
Если установленное время нагнетания в режиме фильтрации превышает технологически допустимое, переходят к определению приемлемости гидрорыхления пласта. Для этого в конкретном забое на данном пласте проводят серию опытных нагнетаний при различном темпе закачки жидкости в скважину. При этом регистрируют темп нагнетания и активность АЭ во времени. Установлено, что зависимость активности АЭ от времени имеет максимальное значение на начальном этапе нагнетания [17, 18]. Если активность АЭ, по крайней мере на начальном этапе нагнетания, превышает фоновое значение, то это свидетельствует о том, что гидрообработка осуществляется в режиме гидрорыхления.



**Рис. 1.** Фоновая активность АЭ в лаве пласта Андреевского шахты «Анжерская» в процессе управления кровлей

Установлено также, что чем выше темп нагнетания, тем быстрее одна из растущих трещин достигнет поверхности забоя выработки, и тем меньший объем жидкости поступит в скважину до ее прорыва на забой. Сказанное подтверждается результатами эксперимента по гидрорыхлению пласта Коксового на шахте «Анжерская», приведенными на рис. 2.

После осуществления серии нагнетаний при различном темпе нагнетания строят зависимость времени нагнетания до прорыва жидкости от объема поступившей в скважину жидкости. Для выбранной технологической схемы гидрорыхления угольного пласта определяют в соответствии с [3] необходимый объем закачки жидкости в скважину до ее прорыва на забой. На графике зависимости времени нагнетания от объема поступившей в шпур (скважину) жидкости для требуемого объема закачки определяют требуемое время нагнетания. Если оно меньше или равно технологически допустимому времени, то гидрорыхление на данном участке пласта считается приемлемым при темпе нагнетания, соответствующем требуемому объему закачки жидкости в скважину. Соответствующая требуемому объему нагнетания величина максимальной начальной активности АЭ будет являться оптимальной для осуществления гидрорыхления на данном участке пласта. Мониторинг этой величины при последующих нагнетаниях позволит обеспечивать оптимальный режим гидрорыхления.



**Рис. 2. Зависимость темпа  $q$  (а) и времени  $t$  (б) нагнетания до прорыва воды в выработку от объема  $Q$  поступившей в шпур воды при гидрорыхлении пласта Коксового на шахте «Анжерская»**

Если окажется, что оптимальное значение темпа нагнетания меньше производительности насосной установки, то, как и в случае режима фильтрации, для исключения слива части жидкости с выхода на всас можно увеличить фильтрующую часть скважины или подключить к насосу одновременно две скважины.

## Заключение

Наметившееся в последнее время снижение объемов профилактической гидрообработки угольных пластов, склонных к динамическим явлениям, объясняется, на мой взгляд, двумя причинами. Во-первых, необходимостью приобретения соответствующего оборудования: насосных установок, гидрозатворов, запорной арматуры, счетчиков-расходомеров жидкости для измерения давления и темпа на выходе насоса. Во-вторых, — отсутствием методики определения наиболее приемлемого способа гидрообработки и ее оптимальных параметров в конкретных горных условиях. Данная работа направлена на устранение этого недостатка.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений». Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15.08.2016 г. №339. – 129 с.

2. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля, породы и газа (РД 05–350–00). Предупреждение газодинамических явлений в угольных шахтах (Сборник документов). – М.: Государственное предприятие НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2000. – С. 120–303.

3. Руководство по безопасности «Рекомендации по безопасному ведению горных работ на склонных к динамическим явлениям угольных пластах». Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 21.08.2017 г. №327. – 89 с.

4. *Купавых К.С., Шипулин А.В.* Опробование импульсного способа дегазации угольных пластов // Горный журнал. 2018. №5. – С. 78–82.

5. *Cooley W.C.* Rock breakage by pulsed high pressure water jets // Proceeding of the 1<sup>st</sup> International Symposium on Jet Cutting Technology. – Cranfield, 1972. P. 125–132.

6. *Сластунов С.В., Ютяев Е.П., Мазаник Е.В., Ермак Г.П.* Исследование эффективности усовершенствованной технологии подземного гидроразрыва угольного пласта для его дегазации // Горный журнал. 2018. №1. – С. 83–87.

7. *Jeffrey R.G., Boucher C.* Sand Propped Hydraulic Fracture Stimulation of Horizontal In-seam Gas/Drainage Holes at Dartbrook Coal Mine // Coal Operators' Conference, University of Wollongone & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy (Wollongon, February 4–6, 2004). Wollongon: University of Wollongone, 2004. – P. 169–179.

8. *Haijun Guo, Yuanping Cheng, Liang Wang, Shougig Lu, Kan Jin.* Experimental study on the effect of moisture on low-rank coal adsorption characteristics // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2015. Vol. 24. P.245–251.

9. *Курленя В.М., Сердюков С.В.* Физико-технические проблемы интенсификации подземной дегазации угольных пластов методом гидроразрыва // 50 лет

Российской научной школе комплексного освоения недр Земли. Материалы Международной научно-практической конференции. 13–16 ноября 2017. – М.: ИПКОН РАН, 2017. – С. 191–196.

10. Клишин В.И., Опрук Г.Ю., Тащиенко А.Л. Применение поинтервального гидроразрыва угольного пласта для интенсификации пластовой дегазации // Научное издание «Технологии разработки и использования минеральных ресурсов»: науч. журнал / Сиб. гос. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2016. – №2. с. 33–39.

11. Чернов О.И., Пузырев В.Н. Прогноз внезапных выбросов угля и газа. – М.: «Недра», 1979. – 296 с.

12. Ножкин Н.В. Заблаговременная дегазация угольных месторождений. – М.: Недра, 1979. – 271 с.

13. Бирюков Ю.М. Влияние трещиноватости и гидропроводности выбросоопасного угольного пласта на его площадную обработку через скважины гидрорасчленения с поверхности // Безопасность труда в промышленности. – 2017. – №5. – С 8–16.

14. Гельфанд Ф.М., Журавлев В.П., Поелуев А.П., Рыжих Л.И. Новые способы борьбы с пылью в угольных шахтах. – М.: Недра, 1975. – 288 с.

15. Шадрин А.В. Сейсмоакустическая реакция угольного массива на процесс его гидрообработки // Физ.-техн. пробл. разработки полезных ископаемых, 1983, №6. С. 29–34.

16. Шадрин, А.В., Зыков В.С. Акустическая эмиссия выбросоопасных пластов. Обзорная информация ЦНИЭИуголь. – М., 1991. – 43 с.

17. Шадрин А.В., Клишин В.И. Установление связи параметров акустической эмиссии с фильтрационно-коллекторскими свойствами массива и характеристиками насосной установки при гидрообработке кровли и угольного пласта // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2018, №1. – С. 77–87.

18. Shadrin A.V., Klishin V.I. Acoustic emission of rock mass under the constant-rate fluid injection / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 134, conference 1. (2018), 012057. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Шадрин А.В.* — доктор технических наук, чл.-корр. РАЕН, в.н.с., Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук (Институт угля).

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 290–299.

**Shadrin A.V.**

### **Determining the appropriate method of a coal seam hydrotreating using acoustic emission**

The idea of the method for determining the appropriate way of a coal seam hydrotreating using acoustic emission that accompanies the process of injecting the fluid into the drill is introduced in the paper. It is accepted that the method of outburst and rock bump preventive

hydrotreating is considered to be appropriate and its hydraulic parameters (pressure and injecting tempo) are considered to be optimal in case the required volume of the fluid injection into the drill is achieved within technologically acceptable period of time. On the bases of the analysis of regional and local methods of hydrotreating it is shown that they differ by the fluid injecting mode. There are two modes: filtrating mode – it is when the fluid penetrates through the existing fractures without their further growing, and the mode of hydraulic ploughing – when the fractures grow in a jump-like mode under the influence of the fluid pressure and increase the surface of fluid filtration into the micro-fractures and pores. Every 'jump' of the fracture is accompanied by the acoustic emission (AE) impulse. To measure the acoustic emission activity a special device that can fulfill amplitude and frequency selection of acoustic emission signals emitted by the growing fractures against the background of acoustic noises produced by operating in the neighbouring workings equipment should be applied. Before the hydrotreating a background activity of acoustic emission caused by the growing fractures under the influence of a rock pressure is measured.

It is proved that the filtrating mode manifests under such hydraulic parameters when acoustic emission activity does not overtop the background activity on 1 or 2 impulses per 2-minute interval control. Under the greater acoustic emission activity hydraulic ploughing of a seam is fulfilled.

In the process of experimental series of fluid injections under different tempos the dependences of the tempo and the time duration of injection on the volume of the fluid injected into the drill before its breaking through into the face are built. Using the dependence of a time duration of injection on the volume of injected fluid the time necessary for injecting projected volume of fluid is defined. In case this time duration does not exceed technologically acceptable one the respective injecting tempo is considered optimal.

Key words: coal seam, gas-dynamic phenomena, hydrotreating methods, injecting mode, fluid pressure and injecting tempo, fracture development, acoustic emission.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-290-299

## AUTHOR

*Shadrin A.V.*, Doctor of technical sciences, corresponding member of Russian Academy of Natural Sciences, leading scientific worker, Federal State Budget Scientific Institution «The Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences» (Institute of Coal).

## REFERENCES

1. *Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoj bezopasnosti «Instrukciya po prognozu dinamicheskikh yavlenij i monitoringu massiva gornyh porod pri otrabotke ugol'nyh mestorozhdenij»* [Federal norms and rules in the field of industrial safety «instruction on the prediction of dynamic phenomena and monitoring of rock mass in the development of coal deposits]. Uтверzhdeny prikazom Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 15.08.2016. no 339. 129 p.

2. *Instrukciya po bezopasnomu vedeniyu gornyh rabot na plastah, opasnyh po vnezapnym vybrosam uglja, porody i gaza (RD 05–350–00). Preduprezhdenie gazodinamicheskikh yavlenij v ugol'nyh shahtah (Sbornik dokumentov)* [Instructions for safe mining operations on layers dangerous for sudden emissions of coal, rock and gas (RD 05-350-00). Prevention of gas-dynamic phenomena in coal mines (Collection of documents)]. Moscow: Gosudarstvennoe predpriyatie NTC po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortekhnadzora Rossii, 2000. pp. 120–303.

3. *Rukovodstvo po bezopasnosti «Rekomendacii po bezopasnomu vedeniyu gornyh rabot na sklonnyh k dinamicheskim yavleniyam ugol'nyh plastah»* [Safety guide «Recommendations for the safe conduct of mining operations on dynamic coal seams»]. Uтверzhdeny prikazom Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 21.08.2017 g. no 327. 89 p.

4. Kupavyh K.S., Shipulin A.V. *Oprobovanie impul'snogo sposoba degazacii ugol'nyh plastov* [Sampling pulse method of degassing of coal seams]. Gornyj zhurnal. 2018. no 5. pp. 78–82.

5. Cooley W.C. *Rock breakage by pulsed high pressure water jets*. Proceeding of the 1st International Symposium on Jet Cutting Technology. Cranfield, 1972. pp. 125–132.

6. Slastunov S.V., Yutyayev E.P., Mazanik E.V., Ermak G.P. *Issledovanie effektivnosti usovershenstvovannoj tekhnologii podzemnogo gidrorazryva ugol'nogo plasta dlya ego degazacii* [Study of the effectiveness of enhanced technology of underground hydraulic fracturing of a coal seam for the decontamination]. Gornyj zhurnal. 2018. no 1. pp. 83–87.

7. Jeffrey R.G., Boucher C. *Sand Propped Hydraulic Fracture Stimulation of Horizontal In-seam Gas Drainage Holes at Dartbrook Coal Mine*. Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy (Wollongong, February 4–6, 2004). Wollongong: University of Wollongong, 2004. P. 169–179.

8. Haijun Guo, Yuanping Cheng, Liang Wang, Shougig Lu, Kan Jin. *Experimental study on the effect of moisture on low-rank coal adsorption characteristics*. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2015. Vol. 24. pp. 245–251.

9. Kurlenya V.M., Serdyukov S.V. *Fiziko-tehnicheskie problemy intensivifikacii podzemnoj degazacii ugol'nyh plastov metodom gidrorazryva* [Physical and technical problems of intensification of underground degassing of coal seams by hydraulic fracturing]. 50 let Rossijskoj nauchnoj shkole kompleksnogo osvoeniya nedr Zemli. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. 13–16 noyabrya 2017. Moscow: IPKON RAN, 2017. pp. 191–196.

10. Klishin V.I., Opruk G.Yu., Tacienco A.L. *Primenenie pointerval'nogo gidrorazryva ugol'nogo plasta dlya intensivifikacii plastovoj degazacii* [Application of interval hydraulic fracturing of the coal seam to intensify degassing reservoir]. Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nyh resursov: nauch. zhurnal. Sib. gos. un-t; pod obshej red. V.N. Fryanova. Novokuzneck, 2016. no 2. pp. 33–39.

11. Chernov O.I., Puzyrev V.N. *Prognoz vnezapnyh vybrosov uglya i gaza* [Forecast of sudden coal and gas emissions]. Moscow: «Nedra», 1979. 296 p.

12. Nozhkin N.V. *Zablago vremennaya degazaciya ugol'nyh mestorozhdenij* [Early degassing of coal deposits]. Moscow: Nedra, 1979. 271 p.

13. Biryukov Yu.M. *Vliyanie treshchinovatosti i gidroprovodnosti vybrosoopasnogo ugol'nogo plasta na ego ploshchadnyuyu obrabotku cherez skvazhiny gidroraschleneniya s poverhnosti* [Influence of fracturing and hydraulic conductivity of a coal seam at its areal processing through wells from the surface hidroeskadriala]. Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2017. no 5. pp. 8–16.

14. Gel'fand F.M., Zhuravlev V.P., Poeluev A.P., Ryzhikh L.I. *Novye sposoby bor'by s pyl'yu v ugol'nyh shaftah* [New methods of dust control in coal mines]. Moscow: Nedra, 1975. 288 p.

15. Shadrin A.V. *Sejsmoakusticheskaya reakciya ugol'nogo massiva na process ego gidroobrabotki* [Seismoacoustic response of the coal massif in the process Hydrotreating]. Fiz.-tenhn. probl. razrabotki poleznyh iskopaemyh, 1983, no 6. pp. 29–34.

16. Shadrin, A.V., Zikov V.S. *Akusticheskaya emissiya vybrosoopasnyh plastov* [Acoustic emission of hazardous layers]. Obzornaya informaciya CNIEUgol'. Moscow, 1991. 43 p.

17. Shadrin A.V., Klishin V.I. *Ustanovlenie svyazi parametrov akusticheskoy emissii s fil'tracionno-kollektorskimi svojstvami massiva i harakteristikami nasosnoj ustanovki pri gidroobrabotke krovl'i i ugol'nogo plasta* [The communication parameters acusticas emission with filtration and collector properties of the massif and characteristics of the pumping unit in the hydrotreatment of the roof and coal seam]. Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti. 2018, no 1. pp. 77–87.

18. Shadrin A.V., Klishin V.I. *Acoustic emission of rock mass under the constant-rate fluid injection* / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 134, conference 1. (2018), 012057.



**О.В. Тайлаков, М.П. Макеев,  
С.В. Соколов, Е.А. Салтымаков**

## **ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ РЕГИСТРАЦИИ КОЛЛЕКТОРОВ УГОЛЬНОГО МЕТАНА НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО АНАЛИЗА СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ДАННЫХ**

Рассмотрено совершенствование процесса получения детальных горно-геологических данных о состоянии и условиях залегания разрабатываемых угольных пластов. Для этого предложен подход к повышению оперативности регистрации одного из возможных типов коллекторов шахтного метана – дизъюнктивных нарушений на основе сейсмических измерений. Особенностью подхода является применение нейронных сетей для автоматизации процесса камеральной обработки данных сейсморазведки. В рамках работы выполнена оценка изменения динамических параметров сейсмического сигнала. На основе проведенного анализа выделены основные критерии регистрации структурного нарушения, обеспечивающие удовлетворительную работу нейронной сети. Представлены примеры применения подхода для обработки полевой сейсмической информации. Установлено, что нейросетевой анализ способен обеспечить сокращение временных и трудовых затрат на выполнение сейсмических исследований. Определены основные направления развития предложенного подхода.

Ключевые слова: горные работы, угольный метан, угольный пласт, сейсмическая разведка, дизъюнктивное нарушение, амплитуда сейсмической волны, частота сейсмической волны, нейронная сеть.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-300-312

### **Введение**

Процесс подземной угледобычи требует постоянного уточнения детализации горно-геологических данных о состоянии и условиях залегания разрабатываемых угольных пластов. При этом учет коллекторов шахтного метана является важным аспектом как обеспечения безопасности ведения горных работ, так и обеспечения энергоэффективного и экологичного функционирования предприятия [1]. Разрывные нарушения, характеризующиеся трещиноватой, разупрочненной зоной дробления потенциально являются областями скопления извлекаемого

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 300–312.

© О.В. Тайлаков, М.П. Макеев, С.В. Соколов, Е.А. Салтымаков, 2018.

газа [2–4]. Получить информацию о наличии дизъюнктива только по результатам геологоразведочного бурения не всегда возможно. В этих случаях применяются методы разведочной геофизики, одним из которых является сейсморазведка. В процессе сейсморазведочных работ камеральная обработка и интерпретация сейсмических данных – этапы, характеризующиеся значительными временными затратами. Автоматизация процесса определения области распространения дизъюнктивного нарушения угольного пласта способна обеспечить сокращение временных и трудовых затрат на выполнение сейсмических исследований, а также снизить зависимость результатов измерений от квалификации интерпретатора, качества основной и наличия дополнительной информации. Для повышения оперативности и качества камеральной обработки данных сейсморазведки угольных месторождений сотрудниками ФИЦ УУХ СО РАН были опробованы инструменты нейросетевого анализа данных.

### **Теория вопроса**

Современный уровень развития геофизики определяет возможность ее применения в качестве прикладного инструмента получения актуальной горно-геологической информации. Наиболее существенным негативным фактором, влияющим на возможность оценки структурных особенностей углепородного массива, является наличие фоновых помех различной природы, состава и интенсивности, сопутствующих процессу угледобычи [5]. На основе оценки опыта развития нефтегазовой сейсморазведки можно также проследить усложнение базовых условий выполнения геофизических измерений в результате обработки большинства месторождений, наличие которых определено путем интерпретации лишь структурных изменений [6]. В настоящее время изыскания сосредоточены на обеспечении возможности регистрации углеводородных коллекторов на основе комплекса измененных физико-механических параметров [7]. Это требует анализа прежде всего динамических характеристик сейсмического сигнала. Современные комплексы обработки сейсмических данных могут включать свыше 30 атрибутов, основанных только на вариациях амплитудно-частотных характеристиках сигнала [8]. Такой подход характеризуется необходимостью оперировать внушительными массивами данных и как следствие увеличением объемов камеральных работ и снижением производительности.

Исходя из успешного опыта применения нейронных сетей в различных областях, предполагающих исследование значительных упорядоченных и неупорядоченных массивов данных, их внедрение является рациональным шагом для повышения оперативности камеральной обработки сейсмических данных [9–11]. При этом сокращение временных затрат на обработку возможно прежде всего в случае упро-

щения процедуры анализа, построении его на основе стандартных характеристик сейсмического сигнала, доступных в пакетах обработки и интерпретации сейсмических данных.

### **Методика проведения измерений**

Задача определения дизъюнктивного нарушения как процесс оценки геомеханических характеристик массива относится к категории разработки функциональных моделей. В соответствии с этим выбран метод обучения «с учителем», включающий как представление исходных данных (входных сигналов), так и требуемых результатов интерпретации (выходных сигналов), подготовленных обработчиком. Для выполнения исследования выбран следующий подход: первичная регистрация данных, обработка и интерпретация части сейсмоданных геофизиками, обучение нейронной сети, интерпретация оставшегося массива сейсмической информации. Обучение нейронных сетей выполнено на основе использования данных геофизических измерений с подтвержденными горными работами дизъюнктивными нарушениями. При обучении использованы два классификационных признака: «1» — наличие нарушения, «0» — отсутствие дизъюнктивного нарушения. Исходя из требуемого интервала классификационных признаков наличия нарушения в тестируемых нейронных сетях использована логистическая активационная функция:

$$f(x) = 1/(1 + \exp(-x)). \quad (1)$$

Процесс нейросетевого анализа сейсморазведочных данных после обучения выполнен в соответствии со следующей схемой. На вход подается геофизическая информация параметры сейсмического сигнала. Затем на основе подобранных в процессе обучения синапсов формируется нейрон, который в результате использования логистической активационной функции, обеспечивает на выходе значения, соответствующие заявленным классификационным признакам позволяющие определить положение дизъюнктивного нарушения угольного пласта:

$$Y = f\left(\sum_{i=1}^n x_i w_i\right),$$

где  $x_i$  – входной сигнал  $i$ -го нейрона (среднее значение частоты; видимая частота сигнала; максимум амплитуды; отношение сигнал/помеха);  $w_i$  – вес  $i$ -го нейрона;  $f$  – активационная логистическая функция.

### **Материалы и методы анализа**

Для опробования предложенного подхода в качестве массива анализируемой информации были использованы сейсмические данные, зарегистрированные совокупностью геофизических профилей с

поверхности горного отвода нескольких действующих угольных шахт по методу общей глубинной точки [12–14]. Измерения осуществлялись на планируемых к отработке выемочных участках, что обеспечило более высокое качество регистрируемого сигнала по сравнению с областями активного ведения горных работ. К анализу были приняты стандартные характеристики сейсмического сигнала. Для корректной оценки изменения физико-механических свойств массива в области влияния нарушения и учета изменения гипсометрии породных слоев оценка параметров сейсмического сигнала вдоль геофизического профиля выполнена в широких (до 40 мс) временных окнах, пересекающих горизонты залегания пласта.

Анализ характеристик сейсмического сигнала, предлагаемых программной средой в окне, соответствующем пределам горизонта залегания угольного пласта показало наиболее контрастные изменения в области положения дизъюнктивов следующих параметров:  $f_c$  — среднее значение частоты;  $f_v$  — видимая частота сигнала;  $A_m$  — максимум амплитуды;  $s/n$  — отношение сигнал/помеха.

Так как в расчетах используются данные различного порядка, при обучении сети предварительно выполняется их нормирование в интервале (-1; 1), либо (0; 1). Пример нормирования данных представлен в табл. 1. По результатам оценки сформирована первичная обучающая выборка.

Таблица 1

**Фрагмент исходных данных, нормируемых в интервале (0;1)**

		Номер общей глубинной точки							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Исходные данные	$f_c$	137,32	226,82	171,94	212,34	161,82	224,34	108,32	167,05
	$f_v$	18,89	34,92	27,42	36,38	26,93	46,42	16,41	35,32
	$A_m$	489195	665947	565058	614422	368252	373048	521380	457843
	$s/n$	1,16	1,28	1,65	1,98	1,64	2,41	1,29	1,92
Нормированные данные	$f_c$	0,33	0,79	0,51	0,72	0,46	0,78	0,18	0,48
	$f_v$	0,07	0,24	0,16	0,26	0,16	0,37	0,04	0,25
	$A_m$	0,26	0,38	0,31	0,34	0,18	0,18	0,28	0,24
	$s/n$	0,05	0,08	0,17	0,26	0,17	0,37	0,08	0,24

С целью упрощения процесса обработки использованы инструменты нейросетевого анализа данных NNtools среды MatLab. Выбор функции обучения, функции настройки для режима адаптации, функции активации слоя, наиболее удовлетворяющих условиям поставленной

задачи, выполнен из перечня основных стандартных функций, используемых при расчетах нейронных сетей.

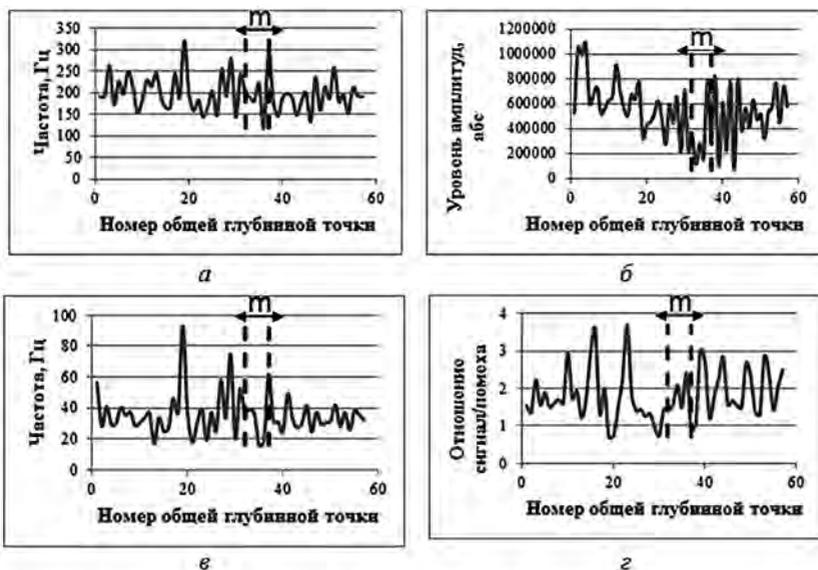
Статистическая обработка. При оценке выделенных характеристик сейсмического сигнала общий тренд их изменения, как и положительное либо отрицательное его значение может изменяться в различных вариациях [15]. Для оценки качества работы нейронной сети были проанализированы два дизъюнктивных нарушения  $m$  и  $n$ , зарегистрированные по геофизическим профилям А и В. В качестве примера на рис. 1 представлено дизъюнктивное нарушение  $m$  по профилю А. Область его влияния, отмеченная пунктирной линией, проявляется на интервале общих глубинных точек 32–37.

Во временном окне 40 мс в пределах указанных точек среднее значение частоты (рис. 2, а) и видимая частота сигнала (рис. 2, в) характеризуются локальными минимумами (118 и 16 Гц соответственно), являющимися следствием общего тренда к убыванию значений. Схожая ситуация наблюдается для максимумов амплитуд: минимальное значение 68745 зарегистрировано в зоне влияния нарушения (рис. 2, б). Изменение отношения сигнал/помеха не выделяется явной приуроченностью к области нарушения. При этом область влияния дизъюнктива находится на участке спада среднего уровня анализируемых значений (рис. 2, г).

По профилю В во временном окне 40 мс нарушение  $n$  проявляется на интервале общих глубинных точек 22–33. Изменения частотных характеристик представлены проявлением в интервале 22–33 локальных минимумов: среднего значения частоты 77 Гц, видимой частоты сигнала 14 Гц. Для максимума амплитуд в области влияния дизъюнктива наблюдается снижение среднего уровня анализируемых значений, при этом локальный минимум 101927 фиксируется в пределах общей глубинной точки 17. Изменение соотношения сигнал/помеха также характеризуется спадом среднего уровня значений в совокупности с локальным минимумом (1,0001) в пределах общей глубинной точки 27.



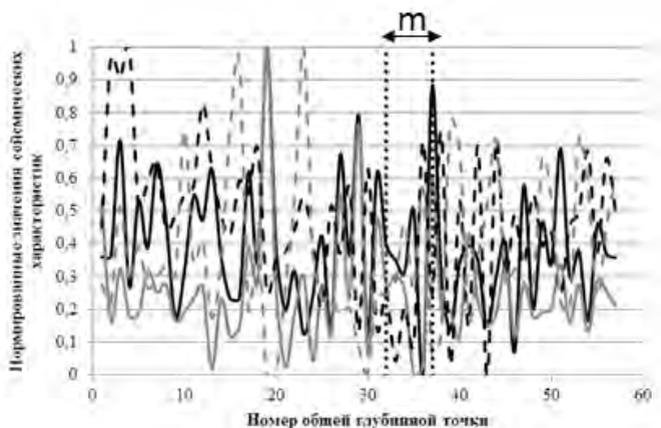
**Рис. 1. Временной сейсмический разрез по геофизическому профилю А**



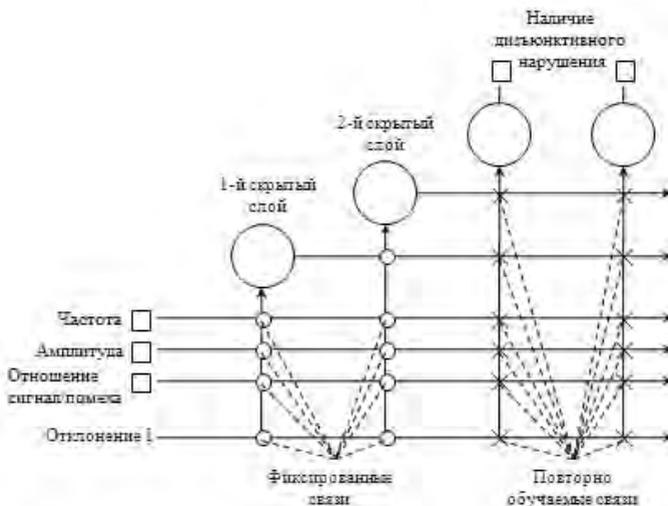
**Рис. 2. Характер изменения сейсмических характеристик в пределах геофизического профиля**  
**А: а) среднего значения частоты; б) максимумов амплитуд; в) видимой частота сигнала;**  
**г) отношения сигнал/помеха.**

В целом обозначенные параметры сейсмического сигнала демонстрируют заметное изменение в пределах области влияния дизъюнктива, хотя и не все они отличаются последовательностью своих градаций. Наиболее ярко это прослеживается на общих графиках, нормированных в диапазоне 0–1 данных (рис. 3). На основе параметров:  $f_c$ ;  $f_v$ ;  $A_m$ ;  $s/n$  сформированы выборки сейсмических данных для подачи на вход нейронной сети.

В рамках анализа выполнена апробация 4 стандартных типов нейронных сетей: линейный слой с возможностью обучения, персептрон, сеть с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки, каскадная сеть с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки. Результаты исследования показали, что наиболее удовлетворительное решение задачи определения области дизъюнктивного нарушения обеспечивает каскадная сеть с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки. Принцип построения каскадной нейронной сети представлена на рис. 4. Ее особенностью является применение каскадной корреляции, которая обеспечивает построение сети с наименьшим количеством слоев, при этом часть слоев добавляется и остается фиксированными, а остальные добавляются в ходе реализации обучающего алгоритма [16].



**Рис. 3. Характер изменения нормированных сейсмических характеристик в пределах геофизического профиля А**



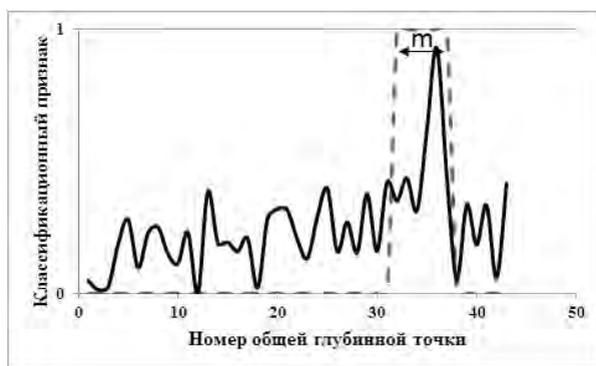
**Рис. 4. Принципиальная модель обучения нейронной сети после добавления двух скрытых слоев**

### Обсуждение результатов

Результаты применения нейронной каскадной сети с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки свидетельствуют о различной степени эффективности анализа для про-

филей А и В. Пример расчетных данных для геофизического профиля А представлен на рис. 5. По итогам нейросетевого анализа данных, зарегистрированных по профилю, содержащему структурное нарушение *m* отмечено значительное превышение среднего уровня значений. Данному событию присвоен классификационный признак «1» — наличие дизъюнктива. Остальные события в соответствии с их значениями можно отнести к категории «0» — отсутствие дизъюнктива. Положение нарушения угольного пласта определено в пределах общей глубинной точки 36, что соответствует результатам камеральной обработки, выполненной геофизиком.

По профилю В, содержащему структурное нарушение *n*, средний уровень значений напротив ближе к классификационному признаку «1». Данные не демонстрируют общего тренда к его повышению в пределах области влияния дизъюнктива. Тем не менее, в интервале, соответствующем наличию нарушения *n* отмечено событие, максимально близкое к классификационному признаку «1». Сравнение с результатом камеральной обработки, выполненной геофизиком, показало расхождение координат зарегистрированного нарушения угольного пласта в 15 м.



**Рис. 5. Результат применения нейросетевого анализа для геофизического профиля А**

Выявленная различная степень эффективности анализа для профилей А и В свидетельствует о необходимости доработки предложенного подхода. Наиболее очевидными для этого видятся 3 пути: расширение обучающей выработки данных и дополнительная коррекция параметров используемых нейронных сетей; внедрение предварительной фильтрации для выборок оцениваемых данных и внедрение дополнительных сторонних процедур анализа; составление отдельных обучающих выборок в соответствии с различными типами дизъюнктивных нарушений.

Заключение. По результатам проведенных исследований подтверждена принципиальная возможность оценки наличия потенциальных коллекторов шахтного метана, сосредоточенных в структурных нарушениях угольного пласта, на основе нейросетевого анализа сейсмических данных. Применение нейронной сети как инструмента для камеральной обработки повышает оперативность камеральных работ. Представленный подход обеспечивает регистрацию присутствующего в массиве дизъюнктива с использованием в качестве анализируемых критериев средних значений частоты, видимой частоты сигнала, максимумов амплитуды и соотношения сигнал/помеха. Тем не менее, на сегодняшний момент методика требует совершенствования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тайлаков О.В., Тайлаков В.О., Макеев М.П., Соколов С.В., Кормин А.Н.* К оценке ресурсов Шахтного метана в выработанном пространстве. // Отдельный выпуск Горного Информационно-аналитического бюллетеня. 2013. № 06 6. – С. 160–165.
2. *Анциферов А.В., Тиркель М.Г., Глухов А.А., Анциферов В.А.* Моделирование процесса формирования и распространения сейсмоакустических волновых полей в угленосном массиве с учетом зон вероятного скопления метана // Геомеханические и геодинамические аспекты повышения добычи шахтного и угольного метана. – С.-Петербург ВНИМИ, 2007. – С. 231–239.
3. *Тайлаков О.В., Смыслов А.И., Уткаев Е.А.* Оценка фильтрационных свойств угольных пластов на основе гидроиспытаний // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. №8. – С. 291–293.
4. *Тайлаков О.В., Макеев М.П., Соколов С.В., Уткаев Е.А.* Применение сейсмоакустического профилирования для уточнения условий залегания угольных пластов // Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов: сб. научн. статей, Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2012. – С. 266–267.
5. *Тайлаков О.В., Соколов С.В.* К вопросу повышения достоверности прогноза динамических явлений и контроля напряженного состояния в угольных шахтах с использованием сейсмоакустических методов // Горная промышленность, 2017, №6 (136). – С 72–75.
7. *Гик Л.Д.* Изучение нефтегазовых коллекторов на основе признака повышенного затухания сейсмических волн // Технологии сейсморазведки. 2010. №3. – С 43–49.
8. *Копунов С.Э., Писецкий В.Б.* Концепция технологии оценки структуры и параметров флюидодинамической геомеханической модели нефтегазового бассейна по сейсмическим данным // Технологии сейсморазведки. 2016. №3. – С 22–27.
9. *Смирнов В.Н., Натеганов А.А., Девятка А.П.* Автоматизация процесса атрибутивного анализа сейсмических данных // Технологии сейсморазведки. 2010. № 4. – С. 14–17.
10. *Latifovic R, Pouliot B, Campbell J.* Assessment of Convolution Neural Networks for Surficial Geology Mapping in the South Rae Geological Region, Northwest Territories, Canada // Remote Sensing, 2018, Vol 10(2): 307.

11. Jalloh A-B, Sasaki K, Jalloh Y, Karim Barrie A. Integrating artificial neural networks and geostatistics for optimum 3D geological block modeling in mineral reserve estimation: A case study // International Journal of Mining Science and Technology, 2016, Vol 26, Iss 4, pp 581–585

12. Гафуров Д.О., Гафуров О.М., Конторович В.А. Интерпретация данных геофизических исследований Талканского нефтегазоконденсатного месторождения обучаемыми нейронными сетями, прогноз строения Осинского горизонта // Технологии сейсморазведки, 2014. №4. – С. 85–92.

13. Тайлаков О.В, Овчинников В.И, Соколов С.В. Применение малоглубинной сейсморазведки для уточнения условий залегания угольных пластов и локализации изменений их газосодержания // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр., ИГТМ НАН Украины, 2010. №17. – С. 22–26

14. Bruno, P.P. High-resolution seismic imaging in complex environments: A comparison among common-reflection-surface stack, common-midpoint stack, and prestack depth migration at the Ilva-Bagnoli brownfield site, Campi Flegrei, Italy // Geophysics, 2015 Vol 80(6), pp 203–214.

15. Stratford W., Peirce C., Paulatto M., Funnell M., Watts A.B., Grevemeyer I., Bassett D. Seismic velocity structure and deformation due to the collision of the Louisville Ridge with the Tonga-Kermadec Trench // Geophysical Journal International, 2015, Vol 200, Iss 3, pp 1503–1522

16. Азаров Н.Я., Яковлев Д.В. Сейсмоакустический метод прогноза горно-геологических условий эксплуатации угольных месторождений. — М.: Недра, 1988. – 199 с.

17. Fahlman S.E., Lebiere C. The cascade-correlation learning architecture // Tech. Rep. CMU-CS-90–100, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, August 1991. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АТОРАХ**

*Тайлаков Олег Владимирович* — заместитель директора по научной работе, e-mail: tailakov@uglemetan.ru,

*Макеев Максим Павлович* — кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории ресурсов и технологий извлечения угольного метана,

*Соколов Сергей Владиславович* — младший научный сотрудник лаборатории ресурсов и технологий извлечения угольного метана,

*Салтымаков Евгений Алексеевич* — ведущий инженер лаборатории ресурсов и технологий извлечения угольного метана,

Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, пр.Ленинградский, 10, 650065, г. Кемерово, Россия.

**Tailakov O.V., Makeev M.P., Sokolov S.V., Saltymakov E.A.**

## **The justification of criteria of coal-bed methane collectors detecting on the basis of neural network analysis of the seismic exploration data**

The improvement of process of detailed mining and geological data receiving is presented. For this purpose the approach for increasing of rapidity of seismic exploration of disjunctive dislocations which are potential coal-bed methane collectors are proposed. The neural networks usage for automatization of seismic data treatment is considered. The changes of seismic data dynamic parameters are estimated in the context of this research. The basic criteria of registration of disjunctive dislocations which enforce the satisfactory operation of neural network was selected on the basis of the is analysis. The examples of this approach usege for seismic aquisition data processing are presented. The possibility of reduction of labour and time costs for seismic surveys as a result of neural network analysis using are determined. The basic trends of development of proposed approach are defined.

Keywords: mining operations, coal-bed methane, coal seam, seismic survey, disjunctive dislocation, seismic wave amplitude, seismic wave frequency, neural network.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-300-312

## **AUTHORS**

*Tailakov O.V.*, doctor of technical science, professor, deputy director for science, *Makeev M.P.*, PhD, senior researcher, the lab of resources and technologies of coal-bed methane extraction,

*Sokolov S.V.*, junior researcher, the lab of resources and technologies of coal-bed methane extraction,

*Saltymakov E.A.*, lead engineer, the lab of resources and technologies of coal-bed methane extraction,

Institute of coal Federal research Centre coal and coal chemistry SB RAS, 10, Leningradskiy Ave., Kemerovo, 650065.

## **REFERENCES**

1. Tajlakov O.V., Tajlakov V.O., Makeev M.P., Sokolov S.V., Kormin A.N. *K ocenke resursov Shahtnogo metana v vyrabotannom prostranstve* [On the assessment of Coal mine methane resources in the developed space]. *Otdel'nyj vypusk Gornogo Informacionno-analiticheskogo byulletenya*. 2013. no. OV 6. pp. 160–165.

2. Anciferov A.V., Tirkel' M.G., Gluhov A.A., Anciferov V.A. *Modelirovanie processa formirovaniya i rasprostraneniya sejsmoakusticheskikh volnovykh polej v ugleporodnom massive s uchetom zon veroyatnogo skopleniya metana* [Modeling of the process of formation and propagation of seismoacoustic wave fields in coal-bearing rock massifs taking into account areas of probable methane accumulation]. *Geomekhanicheskie i geodinamicheskie aspekty povysheniya dobychi shahtnogo i ugol'nogo metana*. S.-Peterburg VNIMI, 2007. pp. 231–239.

3. Tajlakov O.V., Smyslov A.I., Utkaev E.A. *Ocenka fil'tracionnyh svojstv ugot'nyh plastov na osnove gidroispytaniy* [Evaluation of reservoir properties of coal seams based on the hydraulic testing]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*. 2004. no 8. pp. 291–293.

4. Tajlakov O.V., Makeev M.P., Sokolov S.V., Utkaev E.A. *Primenenie sejsmoakusticheskogo profilirovaniya dlya utocneniya uslovij zaleganiya ugot'nyh plastov* [Application of the seismoacoustic profiling to clarify the conditions of occurrence of coal seams]. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nyh resursov: sb. nauchn. statej, Sib. gos. industr. un-t; pod obschhej red. V.N. Fryanova. Novokuzneck, 2012. pp. 266–267.*

5. Tajlakov O.V., Sokolov S.V. *K voprosu povysheniya dostovernosti prognoza dinamicheskikh yavlenij i kontrolya napryazhennogo sostoyaniya v ugot'nyh shahtah s ispol'zovaniem sejsmoakusticheskikh metodov* [On the issue of improving the reliability of the forecast of dynamic phenomena and control of the stress state in coal mines using seismoacoustic methods]. *Gornaya promyshlennost'*, 2017, no 6 (136). pp. 72–75.

7. Gik L.D. *Izuchenie neftegazovyh kollektorov na osnove priznaka povyshennogo zatuhaniya sejsmicheskikh voln* [Study of oil and gas reservoirs based on the characteristic of high attenuation of seismic waves]. *Tekhnologii sejsmorazvedki*. 2010. no 3. pp. 43–49.

8. Kopunov S.E., Piseckij V.B. *Koncepciya tekhnologii ocenki struktury i parametrov flyuidodinamicheskoj geomekhanicheskoj modeli neftegazovogo bassejna po sejsmicheskim dannym* [Concept of technology assessment of the structure and parameters of fluid-dynamic geomechanical model of oil and gas basin seismic data]. *Tekhnologii sejsmorazvedki*. 2016. no 3. pp. 22–27.

9. Smirnov V.N., Nateganov A.A., Devyatka A.P. *Avtomatizaciya processa atributnogo analiza sejsmicheskikh dannyh* [Automation of the process attribute analysis of seismic data]. *Tekhnologii sejsmorazvedki*. 2010. no 4. pp. 14–17.

10. Latifovic R, Pouliot V, Campbell J. *Assessment of Convolution Neural Networks for Surficial Geology Mapping in the South Rae Geological Region, Northwest Territories, Canada*. *Remote Sensing*, 2018, Vol 10(2): 307.

11. Jalloh A-B, Sasaki K, Jalloh Y, Karim Barrie A. *Integrating artificial neural networks and geostatistics for optimum 3D geological block modeling in mineral reserve estimation: A case study*. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016, Vol 26, Iss 4, pp. 581–585.

12. Gafurov D.O., Gafurov O.M., Kontorovich V.A. *Interpretaciya dannyh geofizicheskikh issledovaniy Talkanskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniya obuchaemymi neyronnymi setyami, prognoz stroeniya Osinskogo gorizonta* [Interpretation of data of geophysical studies of oil and gas condensate field Talgarskogo trainees neural networks, prediction of the structure of the OSA horizon]. *Tekhnologii sejsmorazvedki*, 2014. no 4. pp. 85–92.

13. Tajlakov O.V, Ovchinnikov V.I, Sokolov S.V. *Primenenie maloglubinnoj sejsmorazvedki dlya utocneniya uslovij zaleganiya ugot'nyh plastov i lokalizacii izmenenij ih gazonosnosti* [Application of shallow seismic survey to clarify the occurrence conditions of coal seams and localization of changes in their gas content]. *Geotekhnicheskaya mekhanika: Mezhd. sb. nauchn. tr., IGTM NAN Ukrainy*, 2010. no 17. pp. 22–26.

14. Bruno, P.P. *High-resolution seismic imaging in complex environments: A comparison among common-reflection-surface stack, common-midpoint stack, and prestack depth migration at the Ilva-Bagnoli brownfield site, Campi Flegrei, Italy*. *Geophysics*, 2015, Vol 80(6), pp 203–214.

15. Stratford W., Peirce C., Paulatto M., Funnell M., Watts A.B., Grevemeyer I., Bassett D. *Seismic velocity structure and deformation due to the collision of the Louisville Ridge with the Tonga-Kermadec Trench*. *Geophysical Journal International*, 2015, Vol 200, Iss 3, pp. 1503–1522.

16. Azarov N. Ya., Yakovlev D.V. *Sejsmoakusticheskiy metod prognoza gorno-geologicheskikh uslovij ekspluatatsii ugol'nyh mestorozhdenij* [Seismoacoustic method of prediction of mining and geological conditions of exploitation of coal deposits]. Moscow: Nedra, 1988. 199 p.

17. Fahlman S.E., Lebiere C. *The cascade-correlation learning architecture*. Tech. Rep. CMU-CS-90-100, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, August 1991.



## ОСОБЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ И ПРИКЛАДНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СИСТЕМ ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Подземная добыча полезных ископаемых тесно сопряжена с риском возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характеров. Одним из способов повышения безопасности на рудниках и шахтах является совершенствование нормативно-правовой базы на основе анализа и предупреждения аварийных событий. Серьезным изменением в национальном стандарте стало повышение точности локализации персонала и техники до  $\pm 20$  метров. Связанное с этим повсеместное внедрение систем точного позиционирования на угольных шахтах не просто позволяет определить местоположение персонала под землей, но также открывает широкие возможности в реализации дополнительных функций, существенно влияющих на эффективность и безопасность добычного процесса. Примерами разработанных систем, использующих инфраструктуру точного позиционирования, являются системы блокировки рабочих органов проходческих комбайнов и системы предотвращения столкновений и наезда на персонал, что способствует предотвращению травматизма на производстве. Системы автоматической светофорной сигнализации повышают пропускную способность перекрестков, что влечет за собой повышение эффективности использования внутришахтной техники и как следствие уменьшение срока окупаемости системы точного позиционирования. В статье рассмотрены способы минимизации затрат и времени внедрения систем точного позиционирования персонала в горных выработках, а также принципы функционирования и построения системы точного позиционирования МФСБ «Flexcom» и ее возможности повышения эффективности повседневных процессов в угольных шахтах. Ключевые слова: угольная шахта, подземное позиционирование персонала и техники, многофункциональная система безопасности, подземные коммуникации.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-313-325

### Особенности систем точного позиционирования

В последние годы наблюдается существенное улучшение статистики предупреждения и ликвидации аварий на российских угольных шахтах [1]. Эта тенденция обусловлена общим развитием технологий и, в частности, ужесточением отечественных стандартов и правил в области подземной угледобычи. Одним из требований недавно введенного ГОСТ

Р 55154-2012 [2] является позиционирование персонала и техники под землей с разрешением не более 20м, что позволяет сравнительно точно фиксировать местоположение персонала шахты на момент начала аварии. Кроме того, точное позиционирование позволяет повысить эффективность и безопасность ежедневных процессов за счет осуществления непрерывного мониторинга персонала и транспорта, определения маршрутов движения, учета количества рабочих циклов движения транспорта, контроля заезда в заданные зоны и ограничении зоны доступа в опасные выработки.

Не смотря на неоспоримые плюсы оснащения угольных шахт системами точного позиционирования, существуют два основных типа проблем, связанных с внедрением новой информационной системы на подземный объект [3]. Первая проблема носит экономический характер и связана с серьезными финансовыми затратами на полное оснащение шахты устройствами новой системы. В общем случае системы точного позиционирования подразумевают большее количество считывателей, чем зонные системы, что ведет к увеличению суммарной стоимости оборудования и монтажа. В случае, если на шахте отсутствует разветвленная кабельная инфраструктура, в смету также включается прокладка линий питания и связи. Набирающие популярность беспроводные сети связи и позиционирования в большинстве случаев не являются абсолютно беспроводными и также требуют прокладки кабельной инфраструктуры питания.

Вторая проблема связана с вмешательством в технологический процесс предприятия на период установки и тестирования системы точного позиционирования. В соответствии с пунктом 75 Правил безопасности при ведении горных работ [4] к настоящему моменту времени практически все шахты оборудованы системами зонного позиционирования, в которых локализация персонала осуществляется в стратегически важных точках: ламповых, порталах, выходах на горизонты, перекрестках, ответвлениях, входах в забои и т.д. Новое требование в обеспечении непрерывного позиционирования по всему объекту создает потребность замены или модернизации уже установленных систем. Замена вызывает серьезные сомнения с точки зрения нерациональности капиталовложений, а модернизация подразумевает перерывы в получении данных о местоположении персонала на период подключения дополнительных элементов системы, что противоречит соображениям безопасности. Кроме того, необходимо учитывать возможные перерывы в работоспособности на период отладки и тестирования обновленной системы, так как распространение высокочастотных радиосигналов в замкнутых пространствах не всегда является предсказуемым [5, 6] и требует определенной пространственной адаптации оборудования.

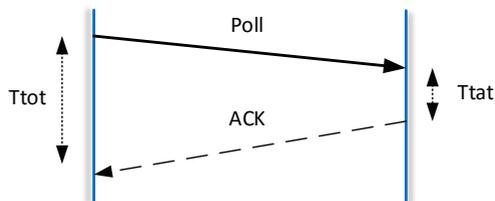
Кроме обозначенных выше проблем, как правило, системы точного позиционирования требовательны к пропускной способности канала связи в виду трансфера информации с десятков или сотен устройств в зависимости от размеров шахты. Такие объемы данных очень чувствительны к задержкам среды передачи и подразумевают наличие высокопроизводительного сервера обработки. Стоит также отметить важность резервирования каналов передачи данных, потому как ни один из существующих способов передачи не может обеспечивать требуемый уровень надежности в условиях шахты: кабельные линии связи чувствительны к обрывам, а любые беспроводные соединения подвержены риску изменений условий радиовидимости, что может привести к разрушению каналов связи.

Целью данной статьи является минимизация влияния рассмотренных проблем на внедрение системы точного позиционирования в подземных выработках на примере многофункциональной системы безопасности «Flexcom» компании Mine Radio Systems и представление дополнительных функциональных возможностей с применением инфраструктуры системы точного позиционирования.

### **Система точного позиционирования МСБ «Flexcom»**

Система точного позиционирования является частью многофункциональной системы «Flexcom» и обеспечивает определение местоположения персонала в подземных выработках с разрешением не более  $\pm 20$  м с учетом направления и скорости движения объекта [7, 8, 9]. Обеспечение заданной точности осуществляется за счет комбинации нескольких принципов измерения расстояний, в частности определения времени задержки распространения радиосигнала Time of Flight [10], измерения уровня сигнала Received Signal Strength Indication [11] и использования статистических методов оценки многократного обмена данными между подвижными и стационарными компонентами системы.

Система базируется на применении считывателей и персональных транспондеров, работающих в открытом диапазоне 2,4 ГГц и использует собственные протоколы обмена, основанные на стандарте IEEE 802.15.4 [12]. Этот стандарт используется также в качестве основы ZigBee [13], ISA100.11a [14], WirelessHART [15], MiWi [16], 6LoWPAN [17]. Устройства МСБ «Flexcom» обеспечивают одновременную поддержку собственного протокола, ZigBee и 6LoWPAN. Между устройствами системы производится многократный обмен запросами и подтверждениями, по которым оценивается задержка времени (рис. 1). Устройство-инициатор процесса измеряет общее время (Total Time,  $T_{tot}$ ) между передачей запроса (Poll) и получением подтверждения (ACK). Встречное устройство передает время, затраченное на выдачу подтверждения Turnaround Time ( $T_{tat}$ ). Вычитание этого времени из Total Time дает двойное время прохождения дистанции между устройствами.



**Рис. 1. Механизм определения времени задержки распространения радиосигнала**

Аппаратно поддерживаемая разрешающая способность измерения времени прохождения сигнала находится на уровне единиц пикосекунд, что соответствует разрешающей способности менее десяти сантиметров. Однако в реальных условиях присутствуют множественные отражения радиосигнала, что приводит к разбросу измерений в зависимости от того, по какому пути сигнал был принят. С целью минимизировать ошибку измерения расстояния, измерения производятся многократно, причем инициаторами запроса выступают попеременно, как считыватель, так и персональный транспондер. Это позволяет более точно оценить влияние окружающего пространства на величину отраженных сигналов и, после математической обработки полученного массива измерений, отфильтровать сигналы прямой видимости от отраженных и получить время их прохождения. Длительность процедуры измерения времени прохождения сигнала составляет 4 миллисекунды, что позволяет без заметного увеличения общего времени оценки местоположения производить многократные измерения, оценивать окружающую обстановку, производить фильтрацию ложных отражений и таким образом повышать точность измерения. Без дополнительных калибровок и подстроек алгоритмов обработки под конкретные условия размещения считывателей, в системе позиционирования обеспечивается точность позиционирования до 20 метров при условии нахождения считывателей системы позиционирования в пределах прямой видимости (типично 150–200 метров). При необходимости дальнейшего увеличения точности производится индивидуальная калибровка считывателей по месту их расположения.

На коротких дистанциях (менее 10 метров, характерных для, например, системы предотвращения столкновений), когда множественные отражения радиосигнала приводят к очень большому разбросу результатов измерений времени распространения, дополнительно к оценке по времени используется механизм измерения уровня сигнала (Received Signal Strength Indication). Разрешающая способность измерения уровня сигнала составляет 1 дБ, что делает его эффективным для альтернативной оценки и повышения точности измерения, начиная примерно с 20 метров дистанции.

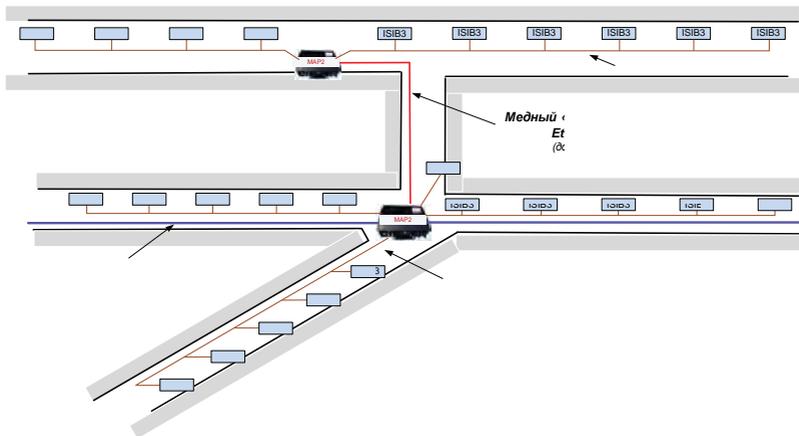
Комбинация механизмов Time of Flight и Received Signal Strength Indication позволяет получить точность позиционирования на дистанции 100 метров не хуже 10 метров и на дистанции в несколько метров не хуже 0,5 метра, что позволяет использовать описываемый интерфейс в системах предотвращения столкновений транспортных средств и предотвращения наезда на персонал.

Реализация системы позиционирования «Flexcom» базируется на цифровой системе передачи данных, использовании оптоволоконных сетей, проводной и беспроводной коммуникации. Подсистема может включать в себя, как собственную среду передачи данных системы «Flexcom», так и использовать каналы передачи уже имеющиеся на объекте. Таким образом, подсистема может интегрироваться с уже установленными системами передачи данных, что существенно сокращает время внедрения и конечную стоимость системы.

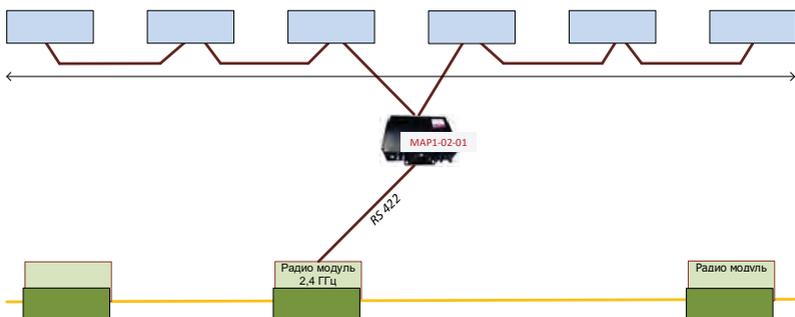
В качестве коммутационных узлов применяются искробезопасные мультиинтерфейсные точки доступа MAP2, которые обеспечивают подключение к ВОЛС считывателей системы позиционирования и одновременно могут использоваться для решения других вопросов автоматизации - подключения видеокамер и другого подземного оборудования (опрос и управление) по интерфейсам Ethernet, RS-485, Digital I/O и др.

В системе точного позиционирования используются считыватели ISIB3, работающие в диапазоне 2,4 ГГц. В большинстве находящихся в эксплуатации систем позиционирования «Flexcom» реализован зонный принцип позиционирования с использованием считывателей, работающих в диапазоне 433 МГц. При переходе к системе точного позиционирования возможно дооснащение этих считывателей вторым радиointерфейсом диапазона 2,4 ГГц и постепенное дооснащение носимых устройств дополнительными метками этого диапазона. Дальнейшее модернизация системы зонного позиционирования до системы точного позиционирования осуществляется наращиванием сегментов точного позиционирования. Сегментное внедрение позволяет производить дооснащение имеющихся систем зонного позиционирования без продолжительных перерывов в сервисе и проводить тестирование точного позиционирования с наличием резерва. Кроме того, этот принцип позволяет последовательно внедрять сегменты точного позиционирования в зависимости от приоритета и опасности участка, что благоприятно сказывается на безопасности добычи.

На рисунках 2 и 3 представлены примеры организации сегментов точного позиционирования с подключением их к различным кабельным инфраструктурам передачи данных.



**Рис. 2. Сегменты точного позиционирования на ВОЛС**



**Рис. 3. Сегменты точного позиционирования на излучающем кабеле**

При построении сегмента системы точного позиционирования, включающего устройства считывания ISIB3 и головное устройство сегмента MAP2 (мультиинтерфейсная точка доступа) следует учитывать следующие аспекты:

- считыватели должны устанавливаться в подземных выработках последовательно на расстоянии прямой видимости друг от друга, при этом расстояние между смежными считывателями до 200 м (типично 100 м);
- считыватели соединяются между собой витым медным кабелем по шинной топологии интерфейса RS-485, образуя ветвь;
  - максимальное количество считывателей на одной ветви – 15;
  - общая длина ветви не должна превышать 1000 м (максимально 1200 м) кабеля (т.е. с учетом прокладки: – обычно +10% к расстояниям прямой видимости);

- головное устройство сегмента MAP2 позволяет подключить к портам интерфейса RS-485 одну или две ветви считывателей. Подключение каждой из ветвей к порту интерфейса RS-485 мультиплексора MAP2 можно производить на любом участке ветви, что способствует рациональной организации ответвлений;

- шинная топология интерфейса RS-485 предусматривает подключение устройств по 2-м информационным проводам и 2-м проводам питания. Питание считывателей обеспечивается от MAP2 (+12/24 В).

Помимо интеграции в существующие сети передачи данных и возможности постепенной модернизации уже внедренных систем зонного позиционирования, система точного позиционирования «Flexcom» позволяет резервировать проводные и оптические каналы связи между мультиинтерфейсными точками при помощи организации оптических колец или беспроводной технологии Wi-Fi. Опционально MAP2 оснащается беспроводной точкой доступа Wi-Fi, которая может как создавать беспроводные резервные Mesh-линки на случай повреждения физической линии связи, так и обеспечивать высокоскоростное беспроводное соединение для абонентов и устройств IoT (Internet of Things).

Стоит также отметить, что одной из важнейших особенностей сегментированного устройства системы является наличие обработки данных со считывателей внутри каждого сегмента, что ведет к уменьшению количества информации, отправляемой на сервер. С одной стороны, это позволяет существенно снизить нагрузку на магистральные каналы передачи данных и как следствие снизить требования к их пропускной способности, а с другой стороны уменьшить нагрузку на сервер. В этом случае серверу не требуется непрерывно обрабатывать информацию с сотен устройств, а достаточно управлять уже подготовленными данными. При аварийном разрушении каналов связи, данные о позиционировании внутри сегмента не теряются, а буферизируются и передаются на сервер при восстановлении линии. Кроме того, локальная обработка сокращает чувствительность системы позиционирования к задержкам инфраструктуры связи, потому как все вычисления, требующие точную привязку ко времени, осуществляются внутри сегмента.

Инфраструктура систем точного позиционирования открывает широкие возможности в реализации дополнительных функций на углубных шахтах. Несмотря на то, что данные функции не входят в перечень обязательных требований к многофункциональным системам безопасности, они играют существенную роль в повышении уровня безопасности и эффективности добычного процесса. Ниже приведены примеры реализации некоторых из них.

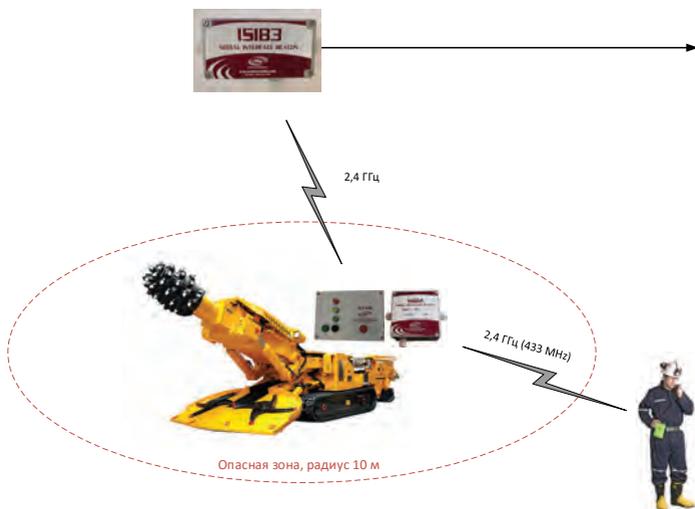
### **Система блокировки рабочих органов проходческих комбайнов**

Основным назначением системы блокировки подвижных механизмов комбайнов является обеспечение безопасности при проведении

работ в подготовительном забое. Система обеспечивает блокирование рабочего органа проходческого комбайна в случае несанкционированного нахождения персонала в опасной зоне, составляющей менее 10 метров от проходческого комбайна.

Для обеспечения работы проходческого комбайна как минимум один человек может находиться в опасной зоне, а для проведения обслуживания комбайна может быть определен список ограниченного количества персонала для работы в опасной зоне. Список формируется на сервере системы позиционирования и передается в систему блокировки по каналам системы позиционирования.

Для контроля за персоналом в системе используются установленные в лампы персональные транспондеры системы позиционирования 2,4 ГГц (433 МГц в случае постепенного перехода от зоновой системы). Связь оборудования системы блокировки, устанавливаемого на комбайне, со стационарным оборудованием системы позиционирования осуществляется по радиointерфейсу 2,4 ГГц. В зоне работы проходческого комбайна устанавливается считыватель системы точного позиционирования ISIB3 на расстоянии 50-150 м от комбайна, чтобы обеспечивалась устойчивая связь с оборудованием системы блокировки (рис. 4).



**Рис. 4. Система блокировки рабочих органов проходческого комбайна**

На комбайне устанавливается комплект оборудования, включающий в себя устройство считывания ISIB2 с модулем контроллера интерфейса 2,4 ГГц, модуль световой и звуковой индикации NTAB и искробезопасный источник питания.

### **Система обеспечивает:**

- связь с верхним уровнем (сервером системы позиционирования), получение списка персонала (транспондеров) с допуском в опасную зону;
- контроль опасной зоны комбайна на присутствие персонала с транспондером;
- в случае появления в опасной зоне персонала с транспондером без допуска, передачу в систему управления сигнала блокирования рабочего органа комбайна;
- управление модулем индикации, включение световой и звуковой сигнализации в случае появления персонала без допуска в опасной зоне;
- после выхода персонала без допуска из опасной зоны, формирование и передачу в систему управления комбайном сигнала отключение блокирования рабочего органа комбайна;
- передачу на сервер в режиме онлайн информации о текущем состоянии системы.

На рабочем месте диспетчера отображается информация о текущем состоянии системы блокирования и о всех случаях срабатывания системы. Все информация сохраняется в архиве на сервере системы.

### **Система предотвращения столкновений и наездов, проезда перекрестков**

Немаловажным решением с точки зрения обеспечения безопасности является применение системы предотвращения столкновений и наездов, поскольку она практически полностью исключает вероятность опасных сближений персонала и транспортных средств. На рисунке 5 отображено применение системы предотвращения столкновений PSVS при проезде перекрестков и тоннелей.

Система предотвращения столкновений PSVS базируется на инфраструктуре системы точного позиционирования и подразумевает установку комплекта оборудования на транспортные средства. Для пешего персонала PSVS использует персональные транспондеры системы точного позиционирования.

Комплект оборудования PSVS предназначен для установки на транспортные средства и обеспечивает:

- заблаговременное предупреждение водителя транспортного средства, оснащенного комплектом позиционирования и контроля, о наличии в опасной зоне другого транспортного средства, оснащенного такой же системой, или транспортной меткой, а также персонала, оснащенного радиометками системы позиционирования. Водителю выдается информация о количестве, типе объектов, их положении относительно направления движения транспортного средства и предупреждение об опасном сближении;



**Рис. 5. Система предотвращения столкновений и наездов PSVS**

- опционально поддерживается управление автоматическими светофорами, регулирующими порядок проезда транспортными средствами перекрестков и транспортных тоннелей;
- возможность накопления и передачи телеметрической информации от бортового компьютера и датчиков транспортного средства на сервер системы;
- возможность ограждения опасных зон;
- звуковые и визуальные предупреждения;
- возможность создания подробной отчетности, задаваемой пользователем.

### **Заключение**

Внедрение систем точного позиционирования с разрешением не более 20 метров для непрерывного контроля местоположения персонала и техники в угольных шахтах имеет ряд специфических особенностей, которые необходимо учитывать при интеграции в существующую инфраструктуру подземного объекта. Значительно облегчить внедрение могут помочь такие методы, как модернизация систем зонowego позиционирования, оборудование участков шахты в соответствии с их приоритетом, использование существующих кабельных и оптических линий связи в качестве магистрали данных точного позиционирования. Сегментное построение сети способствует снижению нагрузки на линии связи и серверное оборудование и является более надежным в виду расширенных возможностей резервирования и накопления данных. Система точного позиционирования «Flexcom» позволяет организовать ряд дополнительных функций на базе собственной инфраструктуры, существенно влияющих на повышение производительности и безопас-

ности добычи угля, в частности системы предотвращения столкновений и наездов, автоматической светофорной сигнализации и системы блокировки рабочих органов комбайнов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов В.И., Панарин В.И. и др. Оценка уровня промышленной безопасности угольной промышленности и технического состояния отечественного горного оборудования // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2017. – №4. – С. 121-130.

2. ГОСТ Р 55154-2012 «Оборудование горно-шахтное. Системы безопасности угольных шахт многофункциональные. Общие технические требования»: Введ. 22.11.2012. – М.: Стандартинформ, 2013.

3. Стадник Д.А. Разработка структуры единой отраслевой системы автоматизированного проектирования угольных шахт // Горная промышленность. – 2017. – №4 (134). – С. 353-359.

4. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» (утверждены приказом Ростехнадзора от 11.12.2013 №599, зарегистрированы Минюсте России 02.06.2014 г. №32935). Сер. 03. Вып. 78. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем промышленной безопасности», 2014. 276 с.

5. Ranjan A. Studies on Propagation Characteristics of Radio Waves for Wireless Networks in Underground Coal Mines // Wireless Personal Communications, 2017, Vol. 97, no 2, pp. 2819-2832.

6. Farjow W., Kaamran R., Xavier F. Novel wireless channels characterization model for underground mines // Applied Mathematical Modelling, 2015, Vol. 39 №19, pp. 5997-6007.

7. Поберезкин В.А. Многофункциональная система безопасности Flexcom // Глобус, – 2012. – № 1(20). – С. 68-72.

8. Зальт И.А. Настоящее и будущее многофункциональной системы безопасности Flexcom // Горная промышленность, – 2015. – №3 (121). – С. 60-65.

9. Зальт И.А. Многофункциональная система безопасности Flexcom: реализация новых требований Ростехнадзора к дискретности позиционирования  $\pm 20$  м // Глобус, – 2017. – №1(45). – С. 58-60.

10. U.S. Patent No. 9,742,737, 22.08.2017. Steiner I., Jonathan S. Authenticated time-of-flight indoor positioning systems and methods. 2017.

11. Nurminen H., Marzieh D., and Piché R. A survey on wireless transmitter localization using signal strength measurements // Wireless Communications and Mobile Computing, 2017, Vol. 2017, pp. 12-24.

12. IEEE 802.15 WPAN [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html> Дата обращения 3.09.2018.

13. Zigbee Compliant Platforms [Электронный ресурс] – Режим доступа : <https://www.zigbee.org/zigbee-compliant-platforms/> Дата обращения 3.09.2018.

14. ISA100, Wireless Systems for Automation [Электронный ресурс] – Режим доступа : <https://www.isa.org/isa100/> Дата обращения 3.09.2018.

15. HART communication protocol [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://fieldcommgroup.org/technologies/hart/hart-technology> Дата обращения 3.09.2018.

16. MiWi™ Protocol [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.microchip.com/design-centers/wireless-connectivity/embedded-wireless/802-15-4/software/miwi-protocol> Дата обращения 3.09.2018.

17. IPv6 over Low-Power Wireless Area Networks [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://6lowpan.tzi.org> Дата обращения 3.09.2018. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Королькова Е.Б.* — системный инженер ООО «МРС-Р», [kkorolkova@mineradio.ru](mailto:kkorolkova@mineradio.ru), +79086479391,

*Зальт И.А.* — технический директор SIA «Аквариус», [i.zalts@mineradio.ru](mailto:i.zalts@mineradio.ru).

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

№. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 313–325.

**Korolkova E.B., Zalt I.A.**

### **Features of implementation and application opportunities of the high fidelity tracking systems in coal mines**

Underground mining industry is closely connected with the risk of emergency situations. One of the ways to increase safety in mines is to improve the legal framework by means of the analysis and prevention of emergency situations. A major change in the national standard was the increase in the accuracy of localization of personnel and underground vehicles up to  $\pm 20$  meters. The associated implementation of high fidelity tracking systems in coal mines allows to determine the location of personnel underground and also opens up wide opportunities for implementing additional functions that significantly affect the efficiency and safety of the mining process. Examples of systems which use a high fidelity tracking system infrastructure are the blocking systems of combines and collision avoidance systems, which help to prevent injuries underground. Automatic traffic signaling systems increase the throughput of intersections, which improve the efficiency of using underground vehicle equipment and as a consequence a reduction in the payback period of the high fidelity tracking system implementation. The paper shows ways of minimizing the cost and time of implementation of the high fidelity tracking systems for personnel in mines, as well as the principles of the functioning of the "Flexcom" high fidelity tracking system and its opportunities for increasing the efficiency of everyday processes in coal mines.

Key words: coal mine, underground personnel tracking system, high fidelity tracking system, personnel localization, multifunctional safety system, underground communication system, collision avoidance system, automatic traffic signaling system.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-313-325

## **AUTHORS**

*Korolkova E.B.*, systems engineer, «Mine Radio Systems-R» LTD, [kkorolkova@mineradio.ru](mailto:kkorolkova@mineradio.ru), +79086479391,

*Zalt I.A.*, CTO, SIA «Аквариус», [i.zalts@mineradio.ru](mailto:i.zalts@mineradio.ru).

## REFERENCES

1. Efimov V.I., Panarin V.I. i dr. *Ocenka urovnya promyshlennoj bezopasnosti ugol'noj promyshlennosti i tekhnicheskogo sostoyaniya otechestvennogo gornogo oborudovaniya* [Assessment of level of industrial safety of the coal industry and the technical state of the domestic mining equipment]. Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle. 2017. no 4. pp. 121–130.
2. GOST R 55154–2012 «Oborudovanie gorno-shahtnoe. Sistemy bezopasnosti ugol'nyh shaht mnogofunkcional'nye. Obshchie tekhnicheskije trebovaniya [GOST R 55154-2012 «mining Equipment. Coal mine safety systems are multifunctional. General technical requirements]: Vved. 22.11.2012. Moscow: Standartinform, 2013.
3. Stadnik D.A. *Razrabotka struktury edinoj otraslejvoj sistemy avtomati-zirovannogo proektirovaniya ugol'nyh shaht* [Development of the structure of a single industry-aided design of coal mines]. Gornaya promyshlennost'. 2017. no 4 (134). pp. 353–359.
4. *Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoj bezopasnosti «Pravila bezopasnosti pri vedenii gomnyh rabot i pererabotke tverdyh poleznyh iskopaemyh» (utverzhdeny prikazom Rostekhnadzora ot 11.12.2013 no 599, zaregistrirovany Minyuste Rossii 02.06.2014 g. no 32935)* [Federal norms and rules in the field of industrial safety «safety Rules for mining operations and processing of solid minerals» (approved by the order of Rostekhnadzor of 11.12.2013 №599, registered by the Ministry of justice of Russia 02.06.2014 №32935)]. Ser. 03. Vyp. 78. Moscow: ZAO «NTC issledovaniy problem promyshlennoj bezopasnosti», 2014. 276 p.
5. Ranjan A. *Studies on Propagation Characteristics of Radio Waves for Wireless Networks in Underground Coal Mines*. Wireless Personal Communications, 2017, Vol. 97, no 2, pp. 2819–2832.
6. Farjow W., Kaamran R., Xavier F. *Novel wireless channels characterization model for underground mines*. Applied Mathematical Modelling, 2015, Vol. 39 no 19, pp. 5997–6007.
7. Poberezkin V.A. *Mnogofunkcional'naya sistema bezopasnosti Flexcom* [Multi-function security system Flexcom]. Globus, 2012. no 1(20). pp. 68–72.
8. Zal't I.A. *Nastoyashchee i budushchee mnogofunkcional'noj sistemy bezopasnosti Flexcom* [Present and future of multifunction security Flexcom]. Gornaya promyshlennost', 2015. no 3 (121). pp. 60–65.
9. Zal't I.A. *Mnogofunkcional'naya sistema bezopasnosti Flexcom: realizaciya novyh trebovanij Rostekhnadzora k diskretnosti pozicionirovaniya  $\pm 20$  m* [Multi-function security system Flexcom: implementation of the new requirements of Rostekhnadzor to the discrete positioning of  $\pm 20$  m]. Globus, 2017. no 1(45). pp. 58–60.
10. U.S. Patent No. 9,742,737, 22.08.2017. Steiner I., Jonathan S. *Authenticated time-of-flight indoor positioning systems and methods*. 2017.
11. Nurminen H., Marzieh D., and Piché R. *A survey on wireless transmitter localization using signal strength measurements*. Wireless Communications and Mobile Computing, 2017, Vol. 2017, pp. 12–24.
12. IEEE 802.15 WPAN [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa : <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html> Data obrashcheniya 3.09.2018.
13. Zigbee Compliant Platforms [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa : <https://www.zigbee.org/zigbee-compliant-platforms/> Data obrashcheniya 3.09.2018.
14. ISA100, Wireless Systems for Automation [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa : <https://www.isa.org/isa100/> Data obrashcheniya 3.09.2018.
15. HART communication protocol [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa : <https://fieldcommgroup.org/technologies/hart/hart-technology> Data obrashcheniya 3.09.2018.
16. MiWi™ Protocol [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa : <http://www.microchip.com/design-centers/wireless-connectivity/embedded-wireless/802-15-4/software/miwi-protocol> Data obrashcheniya 3.09.2018.
17. IPv6 over Low-Power Wireless Area Networks [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa : <http://6lowpan.tzi.org> Data obrashcheniya 3.09.2018.



## КОМПЛЕКСНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ АО «СУЭК-КУЗБАСС»

Комплексный подход к обеспечению безопасности производства на угольных предприятиях обеспечивается не только большим набором используемого инструментария, но и целенаправленным, системным их применением на практике. В основу системы обеспечения безопасности труда заложены цель предприятия и ключевые задачи, которые отображены в политике компании. Постоянное решение задач и достижение целей обеспечивает непрерывное совершенствование всей системы обеспечения безопасности. На современном этапе развития ключевым элементом данной системы становится механизм управления рисками, функционирование которого позволяет обеспечивать комплексный подход.

Ключевые слова: безопасность производства, угольная компания, комплексный подход, управление риском, опасная производственная ситуация.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-326-334

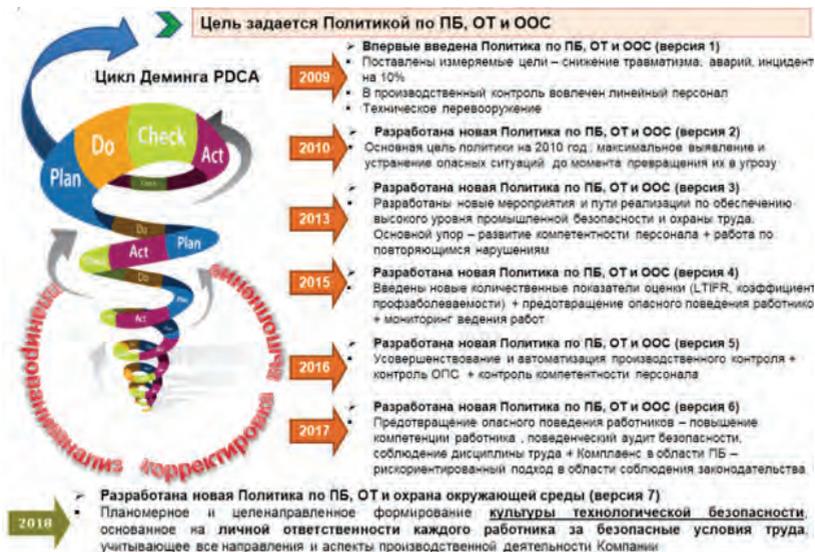
«СУЭК-Кузбасс» является самым крупным региональным производственным объединением АО «СУЭК». В состав «СУЭК-Кузбасс» входят 7 угольных шахт, 2 угледобывающих разреза, 5 обогатительных фабрик, 1 объединенное ПТУ, 13 сервисных предприятий. Численность работающих 14,4 тысяч человек. Компания находится в режиме постоянного роста производства. Так, с 2014 по 2017годы добыча угля возросла с 33,1 до 38,5 млн т., а проходка – с 77,3 до 81,1 км.

Активная позиция компании на международном рынке угля определяет необходимость постоянного совершенствования системы обеспечения безопасности динамично развивающегося производственного процесса.

Высокий уровень безопасности труда на предприятиях АО «СУЭК-Кузбасс» обеспечивается комплексным решением трех крупных задач:

- постоянным совершенствованием системы управления охраной труда и промышленной безопасностью (СУОТ и ПБ);
- постоянным совершенствованием системы управления производственным риском;
- обеспечением высокого уровня медицины труда.

Постоянство совершенствования СУОТ и ПБ обеспечивается заложенным в систему циклом Деминга (PDCA). Началом работы по совершенствованию СУОТ и ПБ в «СУЭК-Кузбасс» является 2009 г., когда была разработана и внедрена первая версия Политики по промышленной безопасности, охране труда и охране окружающей среды (ПБ, ОТ и ООС). В рамках этого документа практически ежегодно ставятся цели в области обеспечения безопасности, достигаются целевые показатели и решаются ключевые задачи (рис. 1).



**Рис. 1. Совершенствование системы управления ПБ и ОТ 2009–2019 гг.**

В соответствие с поставленными в Политике компании целями и задачами корректируется Положение о системе управления охраной труда и промышленной безопасностью, вместе с тем, совершенствуется деятельность дирекции по ПК и ОТ.

Следует отметить, что положения о СУОТ и ПБ постоянно обновляются – за 5 лет разработано 5 версий этого документа. Эти изменения являются результатом «тонкой» настройки инструментов по управлению промышленной безопасностью и охраной труда, с учетом нарабатанного опыта и изменением производства и законодательства.

Анализ контрольно-надзорной деятельности, проведенный в рамках производственного контроля, позволил установить, что общая масса нарушений состоит из однотипных повторяющихся нарушений, источником которых является несовершенство организации работ, нормативной базы и технические условия. Работа по выявлению и

анализу повторяющихся нарушений началась с 2009г. и к настоящему времени позволила снизить их количество на 25%.

Важной проблемой оказалась высокая длительность существования нарушений от момента выявления до их устранения. Методическая работа над этой проблемой на основе выявления природы системных нарушений позволила с 2015г. по 2017г. снизить продолжительность существования нарушений в 2 раза, достигнув среднего значения 1 день.

Важнейшим методическим достижением работы дирекции по ПБ и ОТ является введение в систему функции контроля опасных производственных ситуаций. Освоение данного инструментария началось в 2014 г. Несмотря на то, что данное понятие пока не принято в нормативную базу, оно получило широкое распространение на предприятиях «СУЭК-Кузбасс». Его применение позволяет распознать опасные факторы и, что особенно важно, опасную (критическую с точки зрения высокой вероятности травмы или аварии) совокупность этих факторов, взять его под контроль и разработать меры по его плановому устранению.

Не менее важной задачей, решаемой в рамках совершенствования системы управления ПБ и ОТ, является управление производственным риском. Управление производственным риском ведется по всем элементам структуры производственного риска: фоновому и добавленному.

Так, снижение фонового риска, обусловленного свойствами месторождения и существующим уровнем развития отрасли и общества в целом, обеспечивается совершенствованием техники и технологии. На их развитие только в 2017г. было инвестировано более 5 млрд. рублей:

- введен в эксплуатацию первый в России очистной забой длиной 400м на шахте им. В.Д. Ялевского, в оснащение лавы 5003 инвестировано 1,3 млрд руб.;
- приобретен первый российский проходческий комплекс «Урал-400А» фронтального типа для проведения выработок с анкерным креплением – объем инвестиций 300 млн руб.

Добавленный системный риск, обусловленный нарушениями требований безопасности, вызванный недостаточным уровнем организации производства, контролируется следующими мероприятиями:

- анализ повторяющихся нарушений – выявление причин системных недостатков, выделение из них нарушений, способных сформироваться в опасную производственную ситуацию;
- контроль ОПС – встраивание процесса обеспечения безопасных условий труда в производственный процесс через планирование работ с учетом мероприятий по контролю ОПС;
- контроль за стадией развития ОПС.

Добавленный индивидуальный риск, обусловленный нарушениями требований безопасности, вызванный недостаточной квалификацией

и низкой дисциплиной персонала, управляется путем формирования «сознания» безопасного поведения через добровольное согласие работника работать безопасно (поведенческий аудит), контроль компетентности работника (видеотерминалы), контроль дисциплины труда (жетонная система).

Результаты контроля ОПС в 2017г. приведены на рис 2. Всего было зарегистрировано 7190 ОПС: 85% ОПС удержаны на стадии «зарождение», (13%) ОПС находятся в стадии «развитие». На стадии «реализации» под контролем находились (2%) ОПС, которые не были реализованы в травмы и аварии и не повлекли ущерба ни работникам, ни окружающей среде.



Рис. 2. Результаты контроля ОПС в 2017 г.

Решение задачи повышения культуры производства возможно путем вовлечения всего персонала в процесс обеспечения безопасных условий труда. С этой целью специалистами Дирекции по ПБ АО «СУЭК-Кузбасс», совместно с Управлением аэрологической безопасности предприятий АО «СУЭК» разработан модуль «Госконтроль» в ИАС БПО. При внесении предписания в ИАС БПО происходит автоматическая рассылка предписаний Ростехнадзора должностным лицами согласно их зоне ответственности (специалисты производственных служб АУП, функциональные директора, диспетчеры, АО «СУЭК») для оперативного принятия мер и контроля выполнения.

Для повышения культуры безопасности с 2018г. вводится трехступенчатый контроль состояния промышленной безопасности и охраны труда.

Первая ступень контроля предназначена для линейных инженерно-технических работников (ИТР) производственной единицы. Они осуществляют непосредственный контроль за исполнением работ на подконтрольном объекте в соответствии с требованиями локальных нормативных актов, технической документации, требованиями федерального законодательства.

Вторая степень контроля предназначена для старших ИТР производственных единиц. Эта степень контроля необходима для осуществления детальной проверки общего технического состояния оборудования, аэрологической, пожарной, энергетической, промышленной безопасности и охраны труда на всех участках, установках, площадках в зоне своей ответственности.

Третья степень контроля предназначена для руководителей и специалистов АУП АО «СУЭК-Кузбасс».

Координация производственного контроля и методическое руководство по его осуществлению на производственных единицах АО «СУЭК-Кузбасс» осуществляет Дирекция по промышленной безопасности.

Руководители и специалисты АУП проводят проверки в зоне своей ответственности с оценкой эффективности осуществления контроля I и II ступеней.

Результаты совершенствования системы управления ПБ и ОТ приведены на рис. 3.



Рис. 3. Показатели динамики производственного травматизма

Одним из важнейших элементов управления профессиональным риском является повышение компетентности работников АО «СУЭК-Кузбасс». Это объясняется тем, что нами выявлена прочная взаимосвязь между компетентностью и травматизмом. Профессиональный риск травматизма по причине компетентности – это вероятность получения травмы различной степени тяжести вреда здоровью в результате некомпетентных действий работника при исполнении им трудовой функции.

Основной метод управления профессиональным риском – это контроль компетентности и её учет при организации работ.

Основными задачами управления профессиональным риском являются:

- не допустить нахождения в опасной производственной ситуации работника с высоким индивидуальным риском травмирования;
- не допускать травмирования работника из-за его личных некомпетентных действий и не создавать опасность другим работникам.

Для совершенствования медицины и гигиены труда работников предприятий СУЭК внедрена система персонифицированной медицины. В 2017 году бросили курить 975 работников из 1 118 участников Программы «Антиникотин»

Результаты совершенствования системы медицины и гигиены труда представлены на рис. 4.



**Рис. 4. Результаты совершенствования системы медицины и гигиены труда на предприятиях СУЭК-Кузбасс**

Постоянное совершенствование системы управления ПБ и ОТ и обеспечение высокого уровня медицины труда на предприятиях АО «СУЭК – Кузбасс» позволило получить следующие результаты:

- снизить общий травматизм с 14, 8 травм на 1 млн тонн добытого угля в 2004г. до 0,5 в 2018г.;
- снизить смертельный травматизм с 0,58 травм на 1 млн тонн добытого угля в 2004 г. до 0,0 в 2018 г.;
- снизить значение индекса LTIFR с 5,33 в 2007 г. до 0,9 в 2018 г.;
- снизить количество дней ВН по общим заболеваниям и травмам на 1 работника в год с 15,1 в 2010 году до 6,5 в 2017 г.;
- увеличить количество неболеющих работников с 49% в 2010г. до 72% в 2017г.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. *Артемьев, В.Б. и др.* Безопасность производства (организационный аспект)/Артемьев В.Б., Галкин В.А., Кравчук И.Л. – М.: «Горная книга», 2015. – 144с.

2. *Добровольский, А.И. и др.* Вовлечение персонала в совершенствование системы производственного контроля в ОАО «Ургалуголь» /А.И. Добровольский, Н.П. Золотарев, В.В. Лисовский, Т.А. Коркина //Уголь. – 2012. – № 2 (февраль). – С. 47–49.

3. *Добровольский, А.И. и др.* Механизм снижения рисков травмирования в рамках работы системы производственного контроля шахты /А.И. Добровольский, Е.П. Ютяев, Е.В. Мазаник, В.Н. Шмат, В.Ю. Гришин, И.Л. Кравчук, Е.М. Неволина //Угледобыча: технологии, безопасность, переработка и обогащение: Сб. статей. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического

бюллетеня (научно-технического журнала). – М.: Горная книга, 2012. – Об № 5. – С. 283–297.

4. *Гришин, В.Ю.* Снижение добавленного риска травмирования персонала угольной шахты, обусловленного нарушениями требований безопасности /В.Ю. Гришин //Уголь. – 2014. – № 10 (октябрь). – С. 68–71.

5. *Иванов, Ю.М. и др.* О механизме устранения повторяющихся нарушений требований безопасности на шахтах ОАО «СУЭК-Кузбасс» /Ю.М. Иванов, В.Ю. Гришин, Е.Е. Китляйн, И.Л. Кравчук, Е.М. Неволина, А.В. Смолин //Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 11. – С. 29–31.

6. *Кравчук И.Л. и др.* Прогноз систем обеспечения безопасности производства при подземной разработке месторождений угля /И.Л. Кравчук, Е.М. Неволина, А.И. Добровольский, Ю.М. Иванов //Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 12. – С. 67–73.

7. *Кравчук, И.Л.* Методика подготовки персонала на примере формирования системы производственного контроля на промышленных предприятиях /И.Л. Кравчук //Безопасность труда в промышленности. – 2001. – №9. – С. 24–25.

8. *Кравчук, И.Л. и др.* Риск негативных событий, обусловленных нарушением требований безопасности, и способы его снижения /Кравчук И.Л., Гришин В.Ю., Смолин А.В. //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – Спец. выпуск № 28. – 20 с.

9. *Лисовский, В.В. и др.* Об оперативном управлении рисками травмирования персонала: удержание опасной производственной ситуации на приемлемом уровне риска /В.В. Лисовский, В.Ю. Гришин, И.Л. Кравчук, А.В. Галкин //Уголь. – 2013. – №11 (ноябрь). – С. 46–52.

10. *Debi Prasad Tripathy, Charan Kumar Ala* (2018), Identification of safety hazards in Indian underground coal mines, Journal of Sustainable Mining, Volume 17, Issue 4, Pages 175–183

11. *Longkang Wang, Baisheng Nie, Jiabin Zhang, Xiaoqiang Su, Shoutao Hu*, (March 2016) Study on coal mine macro, meso and micro safety management system, Perspectives in Science, Volume 7, Pages 266–271

12. *Quan-long Liu, Xin-chun Li*, (December 2014), Modeling and evaluation of the safety control capability of coal mine based on system safety, Journal of Cleaner Production, Volume 84, Pages 797–802. **ГИАС**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Иванов Юрий Михайлович* – кандидат технических наук, заместитель генерального директора – директор по ПК и ОТ АО «СУЭК-Кузбасс», г. Ленинск-Кузнецкий, e-mail: IvanovYM@suek.ru

**Ivanov Yu. M.**

## **Complex safety assurance at the enterprises of JSC «SUEK-Kuzbass»**

An integrated approach to ensuring the safety of production at coal enterprises is provided not only by a large set of tools used, but also by their targeted, systematic application in practice. The basis of the system of labor safety is the purpose of the enterprise and the key tasks that are reflected in the company's policy. Constant solution of tasks and achievement of goals ensures continuous improvement of the entire security system. At the present stage of development, a key element of this system is a risk management mechanism, the functioning of which allows for an integrated approach.

Key words: production safety, coal company, integrated approach, risk management, hazardous production situation

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-326-334

## **AUTHORS**

*Ivanov Yu. M.*, PhD (Engineering), Deputy General Director – Production Operations on Labor and Mining Production Safety Director, e-mail: IvanovYM@suek.ru.

## **REFERENCES**

1. Artem'ev V.B., Galkin V.A., Kravchuk I.L. *Bezopasnost' proizvodstva (organizatsionnyy aspekt)* [Safety production (organizational aspect)]. Moscow: «Gornaya kniga», 2015. 144 p.
2. Dobrovolskiy A.I., Zolotarev N.P., Lisovskiy V.V., Korkina T.A. *Vovlechenie personala v sovershenstvovanie sistemy proizvodstvennogo kontrolya v OAO «Urgalugol'»* [Involving employees in improving the production control system in OJSC «Urgalugol'». *Ugol'*. 2012. no 2 (fevral'). pp. 47–49.
3. Dobrovolskiy A.I., Yutyaev E.P., Mazanik E.V., Shmat V.N., Grishin V.Yu., Kravchuk I.L., Nevolina E.M. *Mekhanizm snizheniya riskov travmirovaniya v ramkah raboty sistemy proizvodstvennogo kontrolya shahty* [Mechanism to reduce the risks of injury within the work system of production control of mines]. *Ugledobycha: tekhnologii, bezopasnost', pererabotka i obogashchenie: Sb. statej. Otdel'nyj vypusk Gornogo informatsionno-analiticheskogo byulletenya (nauchno-tekhnicheskogo zhurnala)*. Moscow: Gornaya kniga, 2012. OV no 5. pp. 283–297.
4. Grishin, V.Yu. *Snizhenie dobavlennoogo riska travmirovaniya personala ugol'noj shahty, obuslovlennogo narusheniyami trebovanij bezopasnosti* [Decrease added risk of injury to personnel of a coal mine, due to the security breach]. *Ugol'*. 2014. no 10 (oktyabr'). pp. 68–71.
5. Ivanov Yu.M., V.Yu. Grishin, Kitlyajin E.E., Kravchuk I.L., Nevolina E.M., Smolin A.V. *O mekhanizme ustraneniya povtoryayushchihsya narushenij trebovanij bezopasnosti na shahtah OAO «SUEK-Kuzbass»* [On the mechanism to address recurring security breaches in the mines of JSC «SUEK-Kuzbass»]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2013. no 11. pp. 29–31.
6. Kravchuk I.L., Nevolina E.M., Dobrovolskiy A.I., Ivanov Yu.M. *Prognoz sistem obespecheniya bezopasnosti proizvodstva pri podzemnoj razrabotke mestorozhdenij uglja* [Forecast of safety systems for industrial production water in the underground development of coal deposits]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2013. no 12. pp. 67–73.

7. Kravchuk, I.L. *Metodika podgotovki personala na primere formirovaniya sistemy proizvodstvennogo kontrolya na promyshlennyh predpriyatiyah* [Methods of personnel training on the example of formation of production control system at industrial enterprises]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2001. no 9. pp. 24–25.

8. Kravchuk I.L., Grishin V.Yu., Smolin A.V. *Risk negativnykh sobytij, obuslovlennykh narusheniem trebovanij bezopasnosti, i sposoby ego snizheniya* [Risk of negative events caused by violation of safety requirements, and ways to reduce it]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. 2015. Spec. vypusk no 28. 20 p.

9. Lisovskij V.V., Grishin V.Yu., Kravchuk I.L., Galkin A.V. *Ob operativnom upravlenii riskami travmirovaniya personala: uderzhanie opasnoj proizvodstvennoj situacii na priemlemom urovne riska* [On operational risk management personal injury: retention of hazardous production situation at an acceptable level of risk]. *Ugol'*. 2013. no 11 (noyabr'). pp. 46–52.

10. Debi Prasad Tripathy, Charan Kumar Ala (2018), Identification of safety hazards in Indian underground coal mines, *Journal of Sustainable Mining*, Volume 17, Issue 4, pp. 175–183.

11. Longkang Wang, Baisheng Nie, Jiabin Zhang, Xiaoqiang Su, Shoutao Hu, (March 2016) Study on coal mine macro, meso and micro safety management system, *Perspectives in Science*, Volume 7, pp. 266–271

12. Quan-long Liu, Xin-chun Li, (December 2014), Modeling and evaluation of the safety control capability of coal mine based on system safety, *Journal of Cleaner Production*, Volume 84, pp. 797–802



## МЕТОДИКА АНАЛИЗА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ И ОХРАНОЙ ТРУДА В УГОЛЬНОЙ КОМПАНИИ

Представлены основные положения методики анализа функционирования системы управления промышленной безопасностью и охраной труда в угольной компании. Применение данной методики на практике позволит определять результативность системы обеспечения безопасности, выявлять дефекты ее функционирования и находить резервы внутри системы для дальнейшего совершенствования. Результаты анализа, выполненного по предложенной методике, станут основой для целенаправленной деятельности компании по повышению уровня безопасности производства в угольной компании.

Ключевые слова: система управления охраной труда и промышленной безопасностью, производственный риск, анализ функционирования, системные дефекты.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-335-342

Традиционно угледобывающее производство сопровождалось высокими рисками травм и аварий, но на современном этапе развития техники, науки и общества все больше удается эти риски минимизировать. Задача по минимизации рисков стоит перед всеми угольными компаниями, но наиболее активно ее решают крупные компании. Минимизация рисков идет путем непрерывного совершенствования системы управления охраной труда и промышленной безопасностью на основе применения цикла Деминга. При таком подходе крупные компании сталкиваются с рядом трудностей, преодолеть которые возможно, постоянно анализируя функционирование системы управления охраной труда и промышленной безопасностью.

Компания «СУЭК-Кузбасс» пошла по этому пути с 2009 года, когда уровень травматизма на предприятиях компании составил 79 несчастных случаев, при общей численности трудящихся – 14 072, коэффициент травмирования – 5,6. Основная причина травмирования – человеческий фактор – 67%, затем системные причины, провоцирующие работать опасно (организация работ, использование не по специальности) – 27%, техника и несовершенство технологии – 6%.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 335–342.

© Н.В. Куракина, 2018.

В 2009 г в АО «СУЭК-Кузбасс» впервые введена Политика по ПБ и ОТ, в которой определены 3 основные направления – работа с персоналом, инвестиции не только в техническое развитие, но и в обеспечение безопасных условий труда. С введением Стандартов Компании по ПБ и ОТ, появился единый подход управления промышленной безопасностью, а следовательно, возможность анализировать и корректировать систему, выявляя ее «дефекты». Проведенный анализ показал, что в рамках АО «СУЭК-Кузбасс» существовали отдельные производственные единицы с исторически сложившейся системой производственного контроля, не было единого подхода, каждое предприятие имело собственный набор локальных актов по промышленной безопасности.

В 2013г, согласно требованиям законодательства, разработана первая версия СК «О СУПБ», затем, согласно концепции собственного развития, на основе анализа работы системы – корректировка работы существующих и подбор новых эффективных инструментов системы, целевое устранение ее «дефектов».

Факторный анализ причин травматизма показывает изменение их долей в общем количестве с течением времени. Например, доля человеческого фактора снижается, столь значительный результат достигнут за счет повышения компетентности персонала и постоянного контроля поведения (ПАБ, жетоны). Доля причин травматизма, содержащая техническую составляющую с 2015 г. равна 0, что позволяет сделать вывод об эффективности технической политики в Компании (рис. 1).

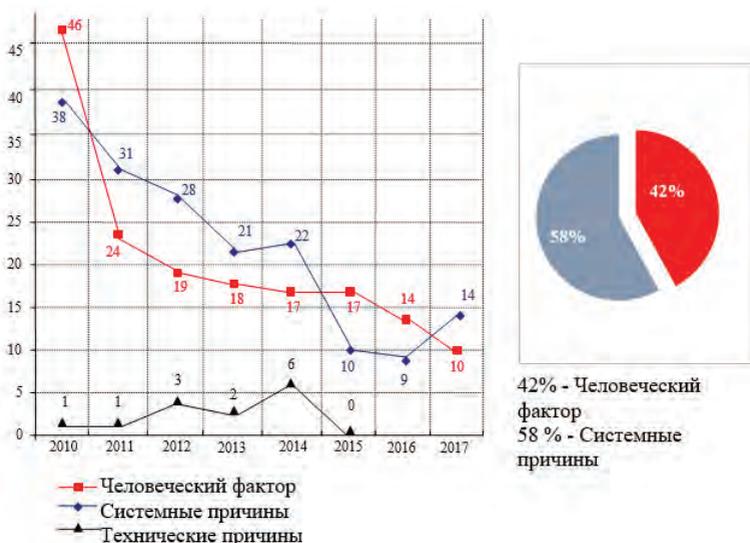


Рис. 1. Факторный анализ травматизма

Системные причины, связанные с организацией деятельности, длительное время имели тенденцию к снижению, однако в 2017г возобновился их рост. Организация деятельности – многофакторная категория и состоит из множества функций. Существуют области пересечения этих функций, постоянно меняющиеся условия. Часто недостаточный контроль за исполнением этих функций приводит к «дефектам» системы, работать с которыми нужно целенаправленно.

Для устранения «дефекта» необходимо произвести анализ причин травмирования по объекту (предприятию) вплоть до производственного участка и/или конкретного производственного/технологического процесса (использование средств индивидуальной защиты, содержание рабочих мест, организация работ, обеспеченность материалами и инструментами и т.д.).

Таблица 1

### Методика анализа СУПБ и ОТ

Анализ достижения целей политики по ПБ и ОТ		
Система	Персонал	Риск
Анализ травматизма, результатов расследования несчастных случаев, аварий, инцидентов. Анализ результатов внутренних аудитов (проверки состояния промышленной безопасности и охраны труда ИТР предприятий, специалистами и руководителями АУП АО «СУЭК-Кузбасс»).Анализ результатов внешних аудитов (проверки состояния промышленной безопасности государственными контролирующими органами).	Анализ результатов поведенческого аудита безопасности. Анализ принятых мер к нарушителям требований промышленной безопасности и охраны труда (результаты работы жетонной /талонной системы, привлечение к дисциплинарной ответственности).	Анализ работы по контролю ОПС. Анализ компетентности работников, ее динамики, принимаемых мер к работникам с низкой компетентностью.
Анализ выполнения «Комплексного плана по охране труда и промышленной безопасности»		
Анализ по виду и по объекту нарушения – виды и объекты нарушений наибольшим значением свидетельствуют о дефекте системы		
Анализ выполнения мероприятий по устранению ОПС – контроль производственного риска Анализ динамики компетентности и уровня индивидуального риска – контроль профессионального риска		

Данный анализ позволяет выявить «дефект» (слабое место) в СУПБ и ОТ и целенаправленно разработать корректирующие мероприятия по устранению этого «дефекта».

Результаты анализа состояния системы управления промышленной безопасностью и охраной труда при одинаковой организации работ, едином управлении, снабжении в рамках одной производственной единицы (предприятия) показывают, что «дефекты» системы в структурных подразделениях предприятия с однотипным видом работ разные. В связи с этим необходимо целенаправленно разрабатывать корректирующие мероприятия по каждому «дефекту» для каждого структурного подразделения предприятия.

Для устранения «дефектов» СУПБ и ОТ необходимо произвести ее корректировку путем разработки и реализации единого комплекса мер на основе следующих действий:

1. Выявить и зафиксировать «дефект системы ПБ» (дирекция по ПБ РПО).
2. Произвести анализ причин нарушений требований безопасности, обусловленных выявленным «дефектом» системы, принятых мер по их устранению на производственных единицах РПО (функциональный директор РПО по направлению деятельности).

#### А) Идея



#### Б) Развитие идеи



*Рис. 2. Конструкция легкосборного проходческого полка*

3. Сформировать отчет о допускаяемых нарушениях требований безопасности и о принятых мерах по устранению «дефекта» системы.
4. Назначить ответственных за исполнение, обеспечить контроль исполнения предыдущих решений.
5. Привлечь к ответственности виновных лиц.

### **Пример устранения «дефекта» системы ПБ и ОТ**

В 2016 году не удалось предотвратить 3 тяжелых несчастных случая из-за отсутствия либо не применения средств защиты при работе на высоте. Тщательно изучив причины неприменения рабочими средств защиты специалисты Дирекции по ПБ пришли к выводу о существенных недостатках этих средств в условиях их применения в горных выработках. Специалистами Дирекции была разработана конструкция легкосборного проходческого полка. Конструкция доработана инженерами ООО «СИБ-Дамель» и запущена в производство. Легкосборными полками оснащены все подготовительные забои. В ближайшем будущем планируем оснастить ими все очистные выработки. Конструкция легкосборного проходческого полка представлена на рис. 2.



**Рис. 3. Блок-схема анализа и корректировки системы управления ПБ и ОТ**

Данная конструкция позволяет в выработках высотой более 3–3,5 метров безопасно выполнять работы по монтажу монорельсовой подвесной дороги, по креплению и ремонту горных выработок, монтажу конструкций.

Таким образом, непрерывный анализ результативности функционирования системы управления промышленной безопасностью и охраной труда в постоянно меняющихся условиях работы предприятия позволяет достаточно быстро выявлять дефекты ее функционирования и оперативно устранять их, тем самым, предотвращая возрастание производственного риска и его реализацию в негативное событие (рис. 3).

Постоянный анализ функционирования системы управления охраной труда и промышленной безопасностью в компании «СУЭК-Кузбасс» позволил обеспечить ее непрерывное совершенствование, что положительно отразилось на динамике всех показателей безопасности и эффективности производства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемьев, В.Б.* Задачи ОАО «СУЭК» по повышению безопасности и эффективности производства в 2010 г. – М.: Изд-во «Горная книга», 2010. – 40 с. – (Сер. «Б-ка горного инженера-руководителя». Вып. 5).

2. *Воробьев, Ю.Л., и др.* Управление риском и устойчивое развитие. Человеческое измерение /Ю.Л. Воробьев, Г.Г. Малинецкий, Н.А. Махутов // *Общественные науки и современность.* – 2000. – № 6. – С. 150–162.

3. *Добровольский, А.И.* Механизм обеспечения эффективного производственного контроля в угледобывающем объединении /А.И. Добровольский // *Уголь.* – 2011. – № 4 (апрель). – С. 61–63.

4. *Иванов, Ю.М. и др.* О механизме устранения повторяющихся нарушений требований безопасности на шахтах ОАО «СУЭК-Кузбасс» /Ю.М. Иванов, В.Ю. Гришин, Е.Е. Китляйн, И.Л. Кравчук, Е.М. Неволлина, А.В. Смолин // *Безопасность труда в промышленности.* – 2013. – № 11. – С. 28–30.

5. *Каледина, Н.О. и др.* Производственный контроль на угледобывающем предприятии : роль человеческого фактора /Н.О. Каледина, О.В. Воробьева // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).* – 2014. – № S12–1. – С. 28–37.

6. *Коршунов, Г.И. и др.* Травматизм на шахтах «СУЭК-Кузбасс» и его причины /Г.И. Коршунов, Р.С. Истомин, И.В. Курта, М.А. Логинов // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).* – 2011. – № 6. – С. 18–20.

7. *Кравчук, И.Л. и др.* Возможности и потенциал системы обеспечения безопасности, способствующие экономии ресурсов /И.Л. Кравчук, А.В. Смолин // *Проблемы недروпользования: Сетевое периодическое научное издание /ИГД УрО РАН.* – Екатеринбург, 2015. – Вып. 1 (4). – С. 123–132. – Режим доступа: <http://trud.igduran.ru/edition/4> (дата обращения 02.04.2015 г.).

8. *Логинов, А.К. и др.* Метод снижения риска аварий и травм в угледобывающей компании /Логинов А.К., Артемьев В.Б., Кравчук И.Л. // *Безопасность труда в промышленности.* – 2006. – № 12. – С. 47–52.

9. Пучков, Л.А. и др. Естественнаучный анализ рисков развития кризисных процессов /Л.А. Пучков, Н.О. Каледина, С.С. Кобылкин //Горный журнал. – 2015. – № 5. – С. 4–7.

10. Ютяев, Е.П. и др. Анализ причин объемных каскадных взрывов на шахтах Кузбасса /Е.П. Ютяев, Г.И. Коршунов, В.М. Шик, А.С. Серегин //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 3. – С. 42–48.

11. John Lathrop, Barry Ezell, (November 2017) A systems approach to risk analysis validation for risk management, Safety Science, Volume 99, Part B, Pages 187–195.

12. Floris Goerlandt, Nima Khakzad, Genserik Reniers, (November 2017) Validity and validation of safety-related quantitative risk analysis: A review, Safety Science, Volume 99, Part B, Pages 127–139. **ГИАБ**

## **КОРОКТО ОБ АВТОРАХ**

*Куракина Наталья Владимировна* — главный специалист по производственному контролю Дирекции по промышленной безопасности АО «СУЭК-Кузбасс».

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

№ 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 335–342.

**Kurakina N.V.**

### **Methods of analysis of industrial safety and labor protection management system in coal company**

The article presents the main provisions of the methodology for analyzing the functioning of the industrial safety and labor protection management system in a coal company. The application of this technique in practice will allow to determine the effectiveness of the security system, to identify defects in its functioning and to find reserves within the system for further improvement. The results of the analysis performed according to the proposed methodology will become the basis for the company's targeted activities to improve the level of production safety in the coal company.

Keywords: occupational health and safety management system, production risk, analysis of functioning, system defects.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-335-342

## **AUTHORS**

*Kurakina N.V.*, Chief specialist on production control of industrial safety Directorate of JSC SUEK-Kuzbass, Russia.

## **REFERENCES**

1. Artem'ev, V.B. *Zadachi OAO «SUEK» po povysheniyu bezopasnosti i effektivnosti proizvodstva v 2010 g* [JSC «SUEK» Tasks to improve the safety and efficiency of production

in 2010]. Moscow: Izd-vo «Gornaya kniga», 2010. 40 p. (Ser. «B-ka gornogo inzhenera-rukovoditelya». Vyp. 5).

2. Vorob'ev Yu.L., Malineckij G.G., Mahutov H.A. *Upravlenie riskom i ustojchivoe razvitie. Chelovecheskoe izmerenie* [Risk management and sustainable development. Human dimension]. Obshchestvennye nauki i sovremennost'. 2000. no 6. pp. 150–162.

3. Dobrovol'skij, A.I. *Mekhanizm obespecheniya effektivnogo proizvodstvennogo kontrolya v ugledobyvayushchem ob»edinenii* [Mechanism of ensuring efficient production control in the coal mining Association]. Ugol'. 2011. no 4 (aprel'). pp. 61–63.

4. Ivanov Yu.M., Grishin V.Yu., E.E Kitlyajn, Kravchuk I.L., Nevolina E.M., Smolin A.V. *O mekhanizme ustraneniya povtoryayushchihsya narushenij trebovanij bezopasnosti na shahtah OAO «SUEK-Kuzbass»* [On the mechanism to address recurring security breaches in the mines of JSC «SUEK-Kuzbass»]. Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2013. no 11. pp. 28–30.

5. Kaledina N.O., Vorob'eva O.V. *Proizvodstvennyj kontrol' na ugledobyvayushchem predpriyatii : rol' chelovecheskogo faktora* [Production control at the coal-mining enterprise: the role of the human factor]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). 2014. no S12–1. pp. 28–37.

6. Korshunov G.I., Istomin R.S., Kurta I.V., Loginov M.A. *Travmatizm na shahtah «SUEK-Kuzbass» i ego prichiny* [Traumatism in the mines of SUEK-Kuzbass and its causes]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). 2011. no 6. pp. 18–20.

7. Kravchuk I.L., Smolin A.V. *Vozmozhnosti i potencial sistemy obespecheniya bezopasnosti, sposobstvuyushchie ekonomii resursov* [The capacity of the security system, contributing to saving resources]. Problemy nedropol'zovaniya: Setevoe periodicheskoe nauchnoe izdanie /IGD UrO RAN. Ekaterinburg, 2015. Vyp. 1 (4). pp. 123–132. Rezhim dostupa: <http://trud.igduran.ru/edition/4> (data obrashcheniya 02.04.2015).

8. Loginov A.K., Artem'ev V.B., Kravchuk I.L. *Metod snizheniya riska avarij i travm v ugledobyvayushchej kompanii* [Method of reducing the risk of accidents and injuries in ogleadala-vaudey company]. Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2006. no 12. pp. 47–52.

9. PPuchkov L.A., Kaledina N.O., Kobylkin S.S. *Estestvennonauchnyj analiz riskov razvitiya krizisnyh processov* [Scientific analysis of the risks of development of crisis processes]. Gornyj zhurnal. 2015. no 5. pp. 4–7.

10. Yutyaev E.P., Korshunov G.I., Shik V.M., Seregin A.S. *Analiz prichin ob»emnyh kaskadnyh vzryvov na shahtah Kuzbassa* [Analysis of the causes of a voluminous cascade of explosions in the Kuzbass mines]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). 2014. no 3. pp. 42–48.

11. John Lathrop, Barry Ezell, (November 2017) *A systems approach to risk analysis validation for risk management*, Safety Science, Volume 99, Part B, Pages 187–195.

12. Floris Goerlandt, Nima Khakzad, Genserik Reniers, (November 2017) *Validity and validation of safety-related quantitative risk analysis: A review*, Safety Science, Volume 99, Part B, Pages 127–139.



## ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ С УЧЕТОМ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИТУАЦИЙ В АО «СУЭК-КУЗБАСС»

Обеспечение безопасности является обязательным условием работы высокоэффективного угледобывающего производства. Стабильное достижение высоких производственных показателей, рост эффективности и безопасности производства достигается на всех этапах управления производством, но в первую очередь, на этапе соответствующего производственного планирования. Планирование должно включать в себя не только работы по выполнению производственной программы, но и весь необходимый объем работ по обеспечению безопасности. Кроме того, планирование должно осуществляться с учетом как выявленных ранее опасных производственных ситуаций (ОПС), так и ОПС, которые могут возникнуть в ходе выполнения работ.

Ключевые слова: производственное планирование, опасная производственная ситуация, производственный риск, нарушения требований безопасности.

---

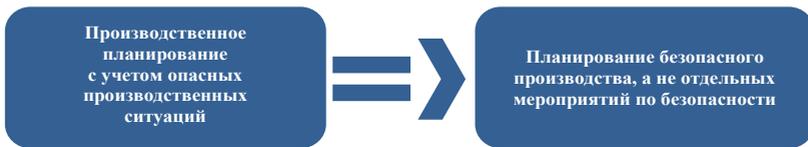
DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-343-349

Уровень безопасности и эффективности производства во многом определяется тем, насколько подготовлены условия для осуществления производственного процесса. Формирование благоприятных условий для функционирования производства – основная задача производственного планирования, однако существующая система планирования с этой задачей в полной мере не справляется. Также в системе производственного планирования имеются дефекты, которые приводят к тому, что обеспечение безопасности исключено из непосредственной производственной деятельности и выделено в отдельную категорию не всегда оплачиваемых работ. Все это обуславливает повышенные риски травмирования, возникновения нарушений требований безопасности, в том числе и повторяющихся, и является причиной многих травм и аварий. Для снижения риска необходимо, чтобы все существующие и возможные опасные факторы при планировании производства были не только выявлены и учтены, но и своевременно устранены в полной мере.

Для решения этой задачи в 2017 году в АО «СУЭК-Кузбасс» начата работа по совершенствованию механизма производственного планиро-

вания на основе выявления и анализа закономерностей зарождения, развития и реализации опасных производственных ситуаций: их природы, причин, состояния, прогноза развития и мер, позволяющих держать их под контролем.

Основная цель этой работы – не дать опасным производственным ситуациям перейти в «опасную» стадию реализации. Для этого еще на этапе планирования работ необходимо встраивать процесс обеспечения безопасных условий труда в непосредственный производственный процесс, что повысит своевременность и полноту выполнения мер безопасности (рис.1.).



**Рис. 1. Результаты интеграция контроля ОПС в производственное планирование**

Интеграция контроля ОПС в производственное планирование является наиболее действенным и, одновременно, эффективным способом снижения риска, так как позволяет обеспечивать превентивность мер по недопущению зарождения и развития опасных производственных ситуаций. Контроль ОПС в рамках производственного планирования включает в себя меры как по устранению уже существующих ОПС, так и по недопущению возникновения новых опасностей. Включение действий по устранению ОПС в производственный план, формируемый на уровне главного инженера и директора, позволит привлечь более значительные ресурсы, чем на уровне производственного участка.

Контроль опасных производственных ситуаций в рамках производственного планирования происходит ежемесячно и состоит из 5 этапов:

1. Разработка реестров ОПС: производственная служба угледобывающего предприятия составляет реестр ОПС на основании анализа повторяющихся нарушений, поведенческих аудитов безопасности, планов развития горных работ, причин несчастных случаев и инцидентов; отдел ПК и ОТ предприятия проверяет достоверность и полноту составленных реестров ОПС.

2. Планирование работ по устранению и контролю ОПС: производственная служба предприятия осуществляет планирование мероприятий по устранению ОПС, корректирует производственный план на основании разработанного реестра.

3. Процесс согласования реестра ОПС:

- утверждение реестра ОПС директором предприятия на внутреннем планировании производства;

- согласование реестра ОПС с производственной Дирекцией АО «СУЭК-Кузбасс»;
- согласование реестра ОПС и мероприятий по устранению ОПС с Дирекцией по промышленной безопасности АО «СУЭК-Кузбасс».

4. Планирование в РПО АО «СУЭК-Кузбасс»: планирование производства на месяц в АО «СУЭК-Кузбасс» с учётом разработанных мероприятий по устранению ОПС.

5. Контроль за выполнением: ежедекадно и ежемесячно осуществляется контроль за выполнением мероприятий по предупреждению (недопущению) ОПС с рассмотрением результатов на еженедельном Дне безопасности.

При реализации этих этапов реестр ОПС становится неотъемлемой частью протокола планирования производства на месяц, а контроль за выполнением мероприятий по недопущению ОПС и привязка его результатов к оплате труда руководства предприятий обеспечили высокую степень выполняемости планов – в 2017 году она составила более 92%.

Предложенный метод планирования может быть использован и для прогноза возникновения ОПС. Например, по результатам анализа реестров ОПС за 2017 г. и 1-го квартала 2018г. было выявлено значительное количество повторяющихся ОПС, связанных с неустойчивым проветриванием. Установлены системные причины повторения ОПС. Разработаны мероприятия, с выделением трудовых ресурсов, и включены в производственное планирование. В ходе работ было выделено 7 основных направлений по уровню опасности для определения приоритетных (рис. 2).

Таким образом на шахте им. В.Д. Ялевского прогноз ОПС позволил повысить уровень аэрологической безопасности: было дополнительно возведено 15 вентиляционных сооружений и 9 изоляционных сооружений, выполнен ремонт 9 вентиляционных сооружений. Увеличена подача воздуха в высокопроизводительную лаву №5004 с 2000 м<sup>3</sup>/мин до 2900 м<sup>3</sup>/мин, обеспечено устойчивое проветривание 9 подготовительных забоев. Как следствие, с августа 2018г. зафиксировано снижение повторяющихся ОПС, связанных с неустойчивым проветриванием.

Практика работы предприятий АО «СУЭК-Кузбасс», как подземного, так и открытого способов добычи угля за 8 месяцев 2018 года показывает целесообразность осуществления производственного планирования с учетом устранения/контроля опасных производственных ситуаций. Это подтверждается:

- уменьшением количества повторяющихся ОПС по приоритетным направлениям обеспечения безопасности производства;
- сокращением числа негативных событий, связанных с устраняемыми/контролируемыми ОПС.



**Рис. 2. Приоритетные направления обеспечения безопасности при подземной угледобыче**

Результативность работ по устранению/контролю ОПС обусловлена:

а) включением этих работ в план, их ресурсной обеспеченностью, мотивируемостью персонала и контролируемостью результатов;

б) улучшением условий труда после устранения ОПС – они становятся не только безопаснее, но и более пригодными для производительной и эффективной работы.

Главным фактором успеха при таком подходе к производственному планированию является то, что обеспечение безопасных условий труда путем устранения ОПС становится неотъемлемой частью производственной деятельности, а не обособленной (специальной, дополнительной), как воспринималось прежде.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемьев, В.Б. и др.* Безопасность производства (организационный аспект)/Артемьев В.Б., Галкин В.А., Кравчук И.Л. – М.: «Горная книга», 2015. – 144с.
2. *Артемьев, В.Б. и др.* Концепция опережающего контроля как средство существенного снижения травматизма /В.Б. Артемьев, А.Б. Килин, Г.Н. Шаповаленко, А.В. Ошаров, С.Н. Радионов, И.Л. Кравчук //Уголь. – 2013. – № 5 (май). – С. 82–85.
3. *Кравчук, И.Л. и др.* Прогноз систем обеспечения безопасности производства при подземной разработке месторождений угля /И.Л. Кравчук, Е.М. Неволлина, А.И. Добровольский, Ю.М. Иванов //Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 12. – С. 67–73.
4. *Лисовский В.В.* Выявление и устранение опасных производственных ситуаций как метод управления рисками травмирования на угольных шахтах / В.В. Лисовский //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 6. – С. 30–36.
5. *Лисовский, В.В. и др.* Об оперативном управлении рисками травмирования персонала: удержание опасной производственной ситуации на приемлемом уровне риска /В.В. Лисовский, В.Ю. Гришин, И.Л. Кравчук, А.В. Галкин // Уголь. – 2013. – № 11 (ноябрь). – С. 46–52.
6. *Лисовский, В.В.* Подход к формированию методики оперативного управления рисками травмирования на угольных шахтах /В.В. Лисовский // Уголь. – 2014. – № 5. – С. 84–88.
7. *Лисовский, В.В.* Управление производственными рисками посредством контроля и устранения опасных производственных ситуаций на угледобывающем предприятии /В.В. Лисовский //Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 2. – С. 67–72.
8. *Zvarivadza T.* Sustainability in the mining industry: An evaluation of the National Planning Commission's diagnostic overview Resources Policy, Volume 56, June 2018, Pages 70–77.
9. *Kudryavtsev S., Yemelin P., Yemelina N.* The Development of a Risk Management System in the Field of Industrial Safety in the Republic of Kazakhstan, Safety and Health at Work, Volume 9, Issue 1, March 2018, Pages 30–41
10. *Maria S.Q. Domingues, Adelina L.F. Baptista, Miguel Tato Diogo* Engineering complex systems applied to risk management in the mining industry International Journal of Mining Science and Technology, Volume 27, Issue 4, July 2017, Pages 611–616
11. *Иванов, Ю.М. и др.* О механизме устранения повторяющихся нарушений требований безопасности на шахтах ОАО «СУЭК-Кузбасс» /Ю.М. Иванов, В.Ю. Гришин, Е.Е. Китляйн, И.Л. Кравчук, Е.М. Неволлина, А.В. Смолин // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 11. – С. 29–31.
12. *Кравчук, И.Л. и др.* Риск негативных событий, обусловленный нарушениями требований безопасности, и способ его снижения: Отдельная статья Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала) /И.Л. Кравчук, В.Ю. Гришин, А.В. Смолин. – М.: Горная книга, 2015. – № 6 (спец. выпуск 28). – 20 с. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Мазаник Илья Евгеньевич* — заместитель директора по промышленной безопасности – начальник отдела производственного контроля АО «СУЭК-Кузбасс».

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 343–349.

**Mazanik I.E.**

### **Production planning taking into account dangerous production situations in JSC «SUEK-Kuzbass»**

safety is a prerequisite for the implementation of high-performance coal mining. Stable achievement of high production performance, increase in efficiency and safety of production is achieved at all stages of production management, but primarily through appropriate production planning. Planning of works should include not only works on implementation of the production program, but also all works on safety. In addition, planning should be carried out taking into account both previously identified hazardous production situations (OPS) and OPS that may arise during the execution of works.

Keywords: production planning, dangerous production situation, production risk, violations of safety requirements.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-343-349

## AUTHORS

*Mazanik I.E.*, Deputy Director for industrial security – head of production control Department of SUEK-Kuzbass, Russia.

## REFERENCES

1. Artem'ev V.B., Galkin V.A., Kravchuk I.L. *Bezopasnost' proizvodstva (organizacionnyj aspekt)* [Safety production (organizational aspect)]. Moscow: «Gornaya kniga», 2015. 144 P.
2. Artem'ev V.B., Kilin A.B., Shapovalenko G.N., Osharov A.V., Radionov S.N., Kravchuk I.L. *Koncepciya operezhayushchego kontrolya kak sredstvo sushchestvennogo snizheniya travmatizma* [Concept for advanced control as a means of reducing injuries]. Ugol'. 2013. no 5 (maj), pp. 82–85.
3. Kravchuk I.L., Nevolina E.M., Dobrovolskiy A.I., Ivanov Yu.M. *Prognoz sistem obespecheniya bezopasnosti proizvodstva pri podzemnoj razrabotke mestorozhdenij uglja* [Forecast of production safety systems at underground development of coal deposits]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2013. no 12. pp. 67–73.
4. Lisovskij V.V. *Vyyavlenie i ustranenie opasnykh proizvodstvennykh situacij kak metod upravleniya riskami travmirovaniya na ugol'nyh shahtah* [Identification and elimination of dangerous industrial situations as a method of risk management of injury in coal mines]. Gornyy informacionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). 2014. no 6. pp. 30–36.
5. Lisovskij V.V., Grishin V.Yu., Kravchuk I.L., Galkin A.V. *Ob operativnom upravlenii riskami travmirovaniya personala: uderzhanie opasnoj proizvodstvennoj situacii na priemlemom urovne riska* [On operational risk management, Craveration of staff: retention of dangerous industrial situation-LEM level of risk]. Ugol'. 2013. no 11 (noyabr'). pp. 46–52.

6. Lisovskij, V.V. *Podhod k formirovaniyu metodiki operativnogo upravleniya riskami travmirovaniya na ugol'nyh shahtah* [Approach to the formation of methods of operational risk management of injury in coal mines]. *Ugol'*. 2014. no 5. pp. 84–88.

7. Lisovskij, V.V. *Upravlenie proizvodstvennymi riskami posredstvom kontrolya i ustraneniya opasnyh proizvodstvennyh situacij na ugledobyvayushchem predpriyatii* [Management of production risks by means of control and elimination of dangerous production situations at the coal-mining enterprise]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2016. – no 2. pp. 67–72.

8. Zvarivadza T. *Sustainability in the mining industry: An evaluation of the National Planning Commission's diagnostic overview Resources Policy*, Volume 56, June 2018, pp. 70–77.

9. Kudryavtsev S., Yemelin P. , Yemelina N. *The Development of a Risk Management System in the Field of Industrial Safety in the Republic of Kazakhstan*, *Safety and Health at Work*, Volume 9, Issue 1, March 2018, Pages 30–41

10. Maria S.Q. Domingues, Adelina L.F. Baptista, Miguel Tato Diogo *Engineering complex systems applied to risk management in the mining industry* *International Journal of Mining Science and Technology*, Volume 27, Issue 4, July 2017, pp. 611–616

11. Ivanov Yu.M., Grishin V.Yu., Kitlyajin E.E., Kravchuk I.L., Nevolina E.M., Smolin A.V. *O mekhanizme ustraneniya povtoryayushchihsya narushe-nij trebovanij bezopasnosti na shahtah OAO «SUEK-Kuzbass»* [On the mechanism to address recurring security breaches in the mines of JSC «SUEK-Kuzbass»]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2013. no 11. pp. 29–31.

12. Kravchuk I.L., Grishin V.Yu., Smolin A.V. *Risk negativnyh sobytij, obuslovlennyj narusheniyami trebovanij bezopasnosti, i sposob ego snizheniya* [Risk of adverse events caused by violations of established security requirements, and the method of reduction]: *Otdel'naya stat'ya Gornogo informacionno-analiticheskogo byulletenya (nauchno-tehnicheskogo zhurnala)*. Moscow: Gornaya kniga, 2015. no 6 (spec. vypusk 28). 20 p.



Ю М. Иванов, Н.В. Куракина,  
А.С. Ворошилов, Ю.С. Войтенкова

## НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ И УПРАВЛЕНИЮ РИСКАМИ ТРАВМАТИЗМА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ АО «СУЭК-КУЗБАСС»

Одной из ключевых задач оценки профессиональных рисков травматизма является прогнозирование возможных потерь на производстве. В данной работе рассматриваются методы, обеспечивающие снижение рисков травматизма через управление компетентностью персонала. Так как понятие риск достаточно емкое и может рассматриваться с различных сторон, нами были выделены некоторые из его определений: риск – это численная мера опасности травматизма, риск – это поведение (опасное или безопасное) работников на производстве, риск – это мера опасности травматизма. Проведенные в последнее время исследования в теории и на практике (на крупных промышленных предприятиях) позволили сделать следующий вывод: вероятность возникновения травм и размер степени тяжести вреда здоровью связаны между собой, причем эта связь реализуется в виде экспоненциального закона распределения вреда здоровью. Необходимо отметить, что тяжесть вреда здоровью классифицировалась в соответствии с нормативными актами России, но также вполне возможно использование критериев Всемирной организации здоровья. В основе разрабатываемой методики находится комбинация общепризнанных теорий по оценке рисков травматизма («Пирамида Хенрика», «Матрица безопасности», «Галстук-Бабочка») и методика «Вероятность Вред Риск». На базе предлагаемой методики был разработан «Модуль численной оценки рисков травматизма, обусловленных некомпетентными действиями работников», который в настоящее время внедряется в АО «СУЭК-Кузбасс» как часть «Видеоинформационного комплекса непрерывного развития и контроля компетентности работника в сфере безопасности труда». Такой подход позволяет значительно усилить контроль за компетентностью и дисциплиной работников на предприятии.

Ключевые слова: компетентность, вред здоровью, численная оценка рисков, профессиональный риск, управление риском.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-350-361

Основной задачей оценки профессиональных рисков травматизма является прогнозирование будущих потерь (число травмированных работников, тяжесть вреда здоровью, количество дней нетрудоспособности и т.п.).

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 350–361.

© Ю М. Иванов, Н.В. Куракина, А.С. Ворошилов, Ю.С. Войтенкова, 2018.

Данная проблема является очень актуальной и обсуждается не только в России, но и по всему миру. Например в статье [1] говорится что для достижения более продолжительной, здоровой трудовой жизни требуется комплексный превентивный подход; также приведены 4 комбинированные модели профессиональных рисков и факторов личного риска, в которых учитываются: генетика, возраст, пол, хронические заболевания, ожирение, курение и т.д. Учитывая масштабность проблемы, в статье [2] говорится о необходимости в XXI веке решать проблемы травматизма не только на уровне предприятий, но и на национальном, а также наднациональном уровне.

Для всестороннего анализа проблемы травматизма на производстве проводится широкий анализ статей с 1930 по 2016 годы [3], на основе этой статьи можно наглядно увидеть, как эволюционировала идея оценки рисков и как все больше места в исследованиях по безопасности труда занимала оценка профессиональных рисков.

В научном исследовании [4], проведенном в США, собрана обширная статистика по смертельным случаям в зависимости от возраста, пола и расы. Показано, что на 10 основных причин смертей приходится около 75% случаев.

В работе [5] говорится о том, что за счет внедрения современного оборудования, инженерного контроля и других важных составляющих охраны труда в XXI веке удалось снизить травматизм на производстве, тем не менее появились и новые проблемы, такие как не известные ранее виды расстройств здоровья, неинфекционные заболевания и недоступность современных средств гигиены труда.

В России также ведется интенсивная разработка новых подходов к оценке рисков травматизма, и это отражено в ряде работ, опубликованных в последнее время [6, 7, 8, 9].

Как известно существует достаточно много определений понятия риск: так в работе [10] приведено несколько десятков определений этого понятия.

Поскольку в данной работе рассматриваются методы, обеспечивающие снижение рисков травматизма через управление компетентностью персонала, приведем [10,11] некоторые определения риска, на которые опираются предлагаемые методы.

Риск — это численная мера опасности травматизма.

Риск в данном случае определяется как некоторое сочетание вероятности несчастного случая и вреда здоровью, который получит работник в результате несчастного случая.

Вред здоровью, как правило, определяется следующими показателями:

- степень тяжести вреда (тяжкий, средний, легкий, без вреда здоровью и т.п.);

- процентом потери трудоспособности и другими показателями, связанными с определением группы инвалидности;

- числом дней нетрудоспособности;
- перечнем конкретных видов травм различных органов.

Риск — это поведение (опасное или безопасное) работников на производстве.

Опасное или безопасное поведение измеряется степенью компетентности работника в вопросах безопасности труда.

При этом принималось, что компетентность определяется следующими основными характеристиками: личностными данными (здоровьем, физическими и психологическими данными, возрастом и т.п.), знаниями, навыками и опытом.

### **Риск — это мера опасности травматизма**

Выполненный в последние годы комплекс теоретических и экспериментальных исследований по оценке рисков травматизма, позволил установить, что вероятность возникновения травм и размер степени тяжести вреда здоровью связаны между собою, причем эта связь реализуется в виде экспоненциального закона распределения вреда здоровью.

Заметим, что при проведении этих исследований тяжесть вреда здоровью классифицировалась в соответствии с нормативными актами России, хотя, в принципе, можно использовать и критерии Всемирной организации здоровья.

Данные исследования [12,13] послужили основой для создания методики количественной оценки рисков травматизма «Вероятность Вред Риск (ВВР)» [13].

На слайде приведена математическая формула закона распределения вреда здоровью.

Функция распределения степени вреда здоровью среди пострадавших:

$$N_{ii} = N_p e^{-\frac{V_z}{R}}, \quad (1)$$

где  $V_z$  – степень вреда здоровью;  $N_{ii}$  – число пострадавших, получивших степень вреда здоровью  $V_z$  и выше;  $N_p$  – общее число работников;  $R$  – степень риска, равная средней степени вреда здоровью.

$$V_z = K_1 \ln(K_2 D) = p_1 \ln(p_2 P), \quad (2)$$

где  $K_1, K_2, p_1, p_2$  – эмпирические коэффициенты;  $D$  – число дней нетрудоспособности;  $P$  – процент потери трудоспособности.

На рис. 1 в качестве примера представлены результаты модельных расчетов распределения степени тяжести вреда здоровью среди работников со следующими начальными условиями: общее число работников  $N_p = 64$  человека; для наглядности с очень высокой степенью риска  $R = 1.2$ ; интервал времени один год.



**Рис. 1 Основы метода ВВР (Вероятность Вред Риск)**

На графике (рис. 1) показано следующее численное распределение степени вреда здоровью среди работников: в инцидентах участвовали 33 человека; повреждения, не причинившие вред здоровью, получили 16 человек; легкую степень вреда здоровью получили 8 человек; среднюю степень вреда здоровью получили 4 человека; тяжкий вред здоровью получили 2 человека; погиб один человек.

На данное время выполнены десятки различных расчетов, подтверждающих точность оценок, сделанных с помощью методики «ВВР». При этом использовались как российские, так и зарубежные статистические данные по травматизму.

Кроме того, установлена [13] взаимосвязь методики «Вероятность Вред Риск (ВВР)» с общепринятыми методами оценки рисков травматизма: «Пирамида Хенрика», «Матрица безопасности», «Галстук-Бабочка».

Экспоненциальный закон распределения вреда здоровью среди пострадавших можно охарактеризовать как функцию последствий от реализации опасных событий в виде инцидентов и травм различной тяжести, причем «персональный» состав причин может быть разным. Таким образом можно уверенно прогнозировать, что при достаточном объеме данных по несчастным случаям распределение вреда здоровью среди пострадавших неизменно будет иметь экспоненциальный характер.

Таким образом появляется еще один достаточно надежный инструмент, позволяющий количественно оценивать риски травматизма с учетом распределения вреда здоровью среди пострадавших, а также разрабатывать новые конкретные модели оценки рисков травматизма, в том числе, модели, учитывающие влияние на риск травматизма некомпетентных действий работников.

## **Риск — это процесс (опасное или безопасное поведение работников)**

### **Оценка риска**

Поскольку «человеческий фактор» является доминирующим среди различных причин производственного травматизма к автоматизации учета этого фактора проявляется достаточно большой интерес, в частности, можно отметить работы [14,15,16], в которых рассматриваются возможности создания автоматизированных систем оценки профессиональных рисков.

В рамках этого направления «Кузбасс-ЦОТ» была разработана методика численной оценки профессиональных рисков травматизма, обусловленных некомпетентными действиями, а в целом, небезопасным поведением работников.

В основу этой методики заложена некоторая комбинация методики «Вероятность Вред Риск» с иными общепризнанными методами оценки рисков травматизма.

Основной идеей данного подхода к оценке рисков является то, что в распределении «Вероятность Вред Риск» степень риска травматизма, обусловленного некомпетентными действиями работников, определяется как обратная величина степени компетентности. Кроме того, предполагалось, что риски неправильного решения задач по безопасности труда при экспресс-обучении-тестировании и риски неправильных действий в производственных условиях близки между собой.

На базе данной идеи был разработан программный «Модуль численной оценки рисков травматизма, обусловленных некомпетентными действиями работников», который был интегрирован в «Видеоинформационный комплекс непрерывного развития и контроля компетентности работников в сфере безопасности труда» (Комплекс).

В настоящее время в АО «СУЭК-Кузбасс» утверждено Положение о «Контроле компетентности и управлении профессиональным риском травмирования в результате некомпетентных действий работника с применением «Видеоинформационного комплекса непрерывного развития и контроля компетентности работника в сфере безопасности труда» и идет полномасштабное внедрение данной методики.

### **Общие сведения об организации анализа и управления компетентностью и профессиональными рисками работников.**

Комплекс непрерывно анализирует уровень компетентности и профессиональные риски работников и ежемесячно направляет данные, характеризующие состояние компетентности и профессиональные риски работников, простым работникам и руководителям всех уровней. На основании анализа данных принимаются необходимые управленческие решения, направленные на повышение уровня компетентности работников и снижения рисков травматизма, обусловленного некомпетентными действиями работников.

## **Анализ и управление компетентностью работников, профессиональными рисками травмирования на уровне регионального производственного объединения АО «СУЭК-Кузбасс».**

Работники аппарата управления АО «СУЭК-Кузбасс», в том числе Дирекции по промышленной безопасности, управления персоналом, для контроля и анализа динамики компетентности и профессиональных рисков имеют доступ на веб-интерфейс «Компетентность и риски работников АО «СУЭК-Кузбасс», в котором отображается необходимая информация. На рис. 2 приведен пример представления этой информации.



**Рис. 2. График изменения текущего ежемесячного прогнозного числа травмированных на 2018 год**

На рис. 2 можно одним взглядом оценить текущее состояние травматизма, обусловленного некомпетентными действиями работников, и тенденции по росту или снижению прогнозного числа травмированных.

Опустив информацию, которая представляется на уровне производственной единицы и производственного участка, более подробно остановимся на информации, поставляемой на уровень работника.

### **Анализ и управление личной компетентностью работником**

На рис. 3 приведен скриншот экрана терминала, на который выводится информация для работника по рискам травматизма. Эта информация демонстрируется работнику в начале каждого месяца при проведении предсменного экспресс-обучения-тестирования. Постоянно эта информация хранится в личном кабинете.

Данная информация позволяет работнику организовать контроль рисков травматизма, обусловленных своими некомпетентными действиями.

Для этой цели:

1. Работнику представляется графическая информация, которая демонстрирует ему, какому уровню риска соответствует его компетентность.

2. В левом нижнем углу изображения экрана приведена таблица, в которой виден его относительный уровень компетентности в процентах и во сколько раз его профессиональный риск травматизма больше (меньше) целевого уровня риска, утвержденного в АО «СУЭК-Кузбасс».



**Рис. 3. График изменения профессионального риска травматизма, обусловленного некомпетентными действиями**

3. В правом нижнем углу размещено окошко, куда автоматически выводятся соответствующие рекомендации и советы, которые должны помочь работнику повысить собственную компетентность.

Например. Осознание работником таких фактов, что личный уровень компетентности (73%) соответствует высокому уровню риска травматизма, его риск травматизма в 33 раза выше, чем у многих его товарищей, приводит к тому, что его действия становятся более осмысленными и безопасными. Фактически идет самостоятельное управление рисками травматизма.

### **Управление рисками травматизма, обусловленного некомпетентными действиями работников**

Разумеется, управление компетентностью работников включает в себя массу всевозможных подходов.

В данной работе будет обсуждаться один из вариантов организации непрерывного обучения работников безопасным методам и приемам выполнения работ.

Этот подход впервые был реализован на предприятиях АО «СУЭК-Кузбасс» с участием «Кузбасс-ЦОТ» в виде внедрения «Видеоинформационного комплекса непрерывного развития и контроля компетентности работников в сфере безопасности труда».

В целом работу Комплекса можно представить в виде следующей схемы – Основные приемы обучения, обеспечивающие развитие компетентности работника в сфере безопасности труда.

– Экспресс-обучение-тестирование.

Перед работником ставится задача, которую он должен решить, выбрав правильный ответ из трех предложенных.

При неправильном ответе работнику демонстрируются последствия от ошибочных действий, в том числе возможные повреждения различных органов и подсказывается правильное решение.

Вопрос повторяется.

При правильном ответе работнику демонстрируются те опасности, которые он избежал, правильно решив задачу.

Дополнительное экспресс-обучение-тестирование автоматически назначается:

– работникам с высоким прогнозным риском травматизма (включает пять задач);

– после долгого отсутствия на работе (одна задача в виде последовательности правильных действий при выполнении трудовых операций);

– нарушителям трудовой дисциплины (включает пять задач, связанных с разбором несчастных случаев или шоковый видеоролик).

Периодические и целевые видеоинструктажи назначают для всех работников в соответствии с графиком.

Нарушителям трудовой дисциплины внеплановые видеоинструктажи назначают руководители различного уровня, установившие факт нарушения.

### **Некоторые результаты**

Как правило, внедрение изложенных выше технологий управления рисками травматизма приводит к снижению производственного травматизма за счет массового формирования у работников стереотипов безопасного поведения при выполнении работ.

На рис. 4 приведены графики распределения числа травмированных в АО «СУЭК-Кузбасс» как на предприятиях, где в начале 2015 г. произошел запуск «Комплекса», так и на предприятиях, где «Комплекс» не установлен.

По мере роста компетентности работников травматизм на предприятиях, где установлен «Комплекс», начал резко снижаться. В то время как на других предприятиях травматизм существенно не изменился, что свидетельствует о независимом и значимом влиянии «Комплекса» на травматизм.

### **Международное признание**

Специалисты Горной Секции МАСО пришли к заключению, что технология Кузбасс-ЦОТ отвечает критериям программ «Профилактика несчастных случаев на рабочих местах. Нулевое видение в области травматизма», «7 Золотых правил по безопасности труда» и присудили методике «Кузбасс-ЦОТ» Знак Качества «Превосходство Горной Секции МАСО».



**Рис. 4. Распределение травмированных за 2014—2017 гг.**

В декабре 2017 года Россия присоединилась к кампании «Нулевое видение» (Vision Zero), разработанной Международной ассоциацией социального обеспечения (МАСО).

«Кузбасс-ЦОТ» является первой и, возможно, на данное время, единственной организацией России, продукция которой уже сертифицирована на соответствие требованиям программы «Нулевое видение в области травматизма» МАСО.

В заключение можно отметить, что «Видеоинформационный комплекс непрерывного развития и контроля компетентности работника в сфере безопасности труда», «Методика количественной оценки рисков травматизма «Вероятность Вред Риск (ВВР)», «Методики оценки рисков травматизма, обусловленных опасным поведением работников» находятся в стадии совершенствования и развития. Однако уже первые вполне разумные результаты, некоторые из них приведены выше, позволяют надеяться, что идеи, заложенные в данные технологии, позволят обеспечить дальнейшее повышение безопасности труда через риск и ориентированное управление компетентностью персонала.

#### **Важное замечание**

Только совместное применение передовых безопасных технологий и оборудования, передовых методов управления безопасностью труда, передовых методов формирования стереотипов безопасного поведения дает синергетический эффект, который выражается в резком снижении травматизма.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Occupational Health and Safety and Organizational Commitment: Evidence from the Ghanaian Mining Industry, Kwesi Amponsah-Tawiah Justice Mensah, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.01.002>

2. Creating a Culture of Prevention in Occupational Safety and Health Practice Yangho Kim , Jungsun Park , Mijin Park DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.02.002>

3. Development and Validation of a Practical Instrument for Injury Prevention: The Occupational Safety and Health Monitoring and Assessment Tool (OSHMAT) Yi Sun 1, Martin Arning, Frank Bochmann, Jutta Börger, Thomas Heitmann DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2017.07.006>

4. National Vital Statistics Reports Volume 62, Number 6 December 20, 2013 Deaths: Leading Causes for 2010 by Melonie Heron, Ph.D., Division of Vital Statistics

5. Creating a Culture of Prevention in Occupational Safety and Health Practice Author links open overlay panel YanghoKim JungsunPark MijinPark <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.02.002>

6. Слово истине в защиту «охраны труда»! (Ответ на статью, полную заблуждений, выдаваемых за истину.) Г.З. Файнбург (№4, 2015),

7. Анализ и разработка критериев оценки и оценивания рисков профессионального травматизма на основе «Кодекса лучшей практики» С.П. Левашов

8. Охрана труда и техника безопасности в строительстве №1 2015 размышления о том, о чем никто ничего никогда не знает в охране труда. Файнбург. Г.З.

9. Концепции риска в жизни и деятельности человека А.Г. Федорец, № 1 (40)/2013 январь–февраль безопасность в техносфере.

10. Подходы к общей теории риска Орлов А.И., Пугач О.В. (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

11. Теория. Методология © 1999 г. В.И. Зубков Риск как предмет социологического анализа

12. Оценка рисков производственного травматизма № 6-2016 Безопасность Труда в Промышленности

13. Взаимосвязь методики «вероятность — вред-риск (ввр)» с общепринятыми методами оценки рисков травматизма А.С. Ворошилов материалы 1 международной научной-практической конференции Пермь (14-15 мая 2018 г) Актуальные проблемы охраны труда и безопасности производства, добычи и использования калийно-магниевого солей

14. Мельникова Д.А., Кривова М.А., Яговкин Г.Н. Основные принципы создания информационных систем управления профессиональными рисками стр 20-23 - по итогам XIV-й международной научной конференции «Наука в центральной России»]

15. Краткий анализ производственного травматизма с учетом человеческого фактора на производственных единицах АО «СУЭК-Кузбасс» № 2-2017 Безопасность Труда в Промышленности

16. Риск-ориентированный подход в обеспечении безопасности угольных шахт Рыков А.М. Ли Хи Ун, Филатов Ю.М. АО «НЦ ВостНИИ» номер: 1 год: 2016 страницы: 73-76 Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности издательство: ООО «ВостЭКО» (Кемерово). **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Иванов Юрий Михайлович*<sup>1</sup> — кандидат технических наук, заместитель Генерального директора — директор по производственному контролю и охране труда,

*Куракина Наталья Владимировна*<sup>1</sup> — главный специалист по производственному контролю,

<sup>1</sup>АО «СУЭК-Кузбасс»; 652507, Кемеровская обл., г. Ленинск-Кузнецкий, ул.Васильева, 1,

*Ворошилов Алексей Сергеевич*<sup>2</sup> — кандидат технических наук, заместитель директора,

*Войтенкова Юлия Сергеевна*<sup>2</sup> — Заместитель директора,

<sup>2</sup>Ассоциация «НП «Кузбасс-ЦОТ»; 650002, Кемеровская область. г. Кемерово, Сосновый бульвар, д.1, каб.402/1. Тел. 8 (3842) 341134.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

№ 11 (special'nyy vypusk 49), pp. 350–361.

**Ivanov Yu.M., Kurakina N.V., Voroshilov A.S., Voytenkova Yu.S.**

### **New approaches to injury risk assessment and management in enterprises JSC «SUEK-Kuzbass»**

One of the key tasks to assess occupational risk is the forecast of possible losses for production. The article considers methods, providing the traumatism risk decrease through the stuff competency management. As soon as risk concept is broad enough and can be considered from different sides, we have underlined some concepts, they are: risk is workers' behavior (safe or unsafe) in the working place, risk is traumatism hazard measure. Recent studies both in theory and practice (in large enterprises) let us draw conclusions that the injury probability and the harm to health extent were interrelated, and the relation was realized as exponential law of harm to health distribution. It must be noted that the severity of harm to health was classified according to Russian legislation, though it is possible to use the Criteria by World Health Organization. The methodology we develop is based on the combination of recognized theories to assess traumatism risk ("Henric Pyramid", "Safety matrix", "Bow tie") and the methodology "Probability Harm Risk (PHR)". Based on the described approaches the software package "Module of quantitative assessment of traumatism risks, caused by incompetent workers' actions", which is now being implemented in AO "SUEK-Kuzbass" as a part of "Video informational complex for continuous development and control of workers' competency in occupational safety". This approach let significantly strengthen workers' competency and discipline control.

Key words: competency, injury, quantitative risk assessment, occupational risk, risk management.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-350-361

### **AUTHORS**

*Ivanov Yu.M.*<sup>1</sup>, candidate of technical Sciences, Deputy General Director-Director for production control and labor protection,

*Kurakina N.V.*<sup>1</sup>, chief specialist in production control

<sup>1</sup> JSC «SUEK-Kuzbass»; 652507, Kemerovo region, Leninsk-Kuznetsky, Vasilyeva str., 1,

*Voroshilov A.S.*<sup>2</sup>, candidate of technical Sciences, Deputy Director,

*Voytenkova Yu.S.*<sup>2</sup>, deputy director,

<sup>2</sup>Kuzbass-COT LLC, Russia, 650002, Kemerovo, Sosnovy boulevard, 1.

## REFERENCES

1. *Occupational Health and Safety and Organizational Commitment: Evidence from the Ghanaian Mining Industry*, Kwesi Amponsah-Tawiah Justice Mensah, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.01.002>
2. *Creating a Culture of Prevention in Occupational Safety and Health Practice* Yangho Kim , Jungsun Park , Mijin Park DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.02.002>
3. *Development and Validation of a Practical Instrument for Injury Prevention: The Occupational Safety and Health Monitoring and Assessment Tool (OSH-MAT)* Yi Sun 1, Martin Arning, Frank Bochmann, Jutta Börger, Thomas Heitmann DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2017.07.006>
4. *National Vital Statistics Reports* Volume 62, Number 6 December 20, 2013 Deaths: Leading Causes for 2010 by Melonie Heron, Ph.D., Division of Vital Statistics
5. *Creating a Culture of Prevention in Occupational Safety and Health Practice* Author links open overlay panel YanghoKim JungsunPark MijinPark <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.02.002>
6. Fajnburg G.Z. *Slovo istine v zashchitu «ohrany truda»! (Otvét na stat'yu, polnuyu zabluzhdenij, vydavaemyh za istinu)* [The word of truth in defense of the «labor protection»! (The answer to an article full of misconceptions posed as truth)], no 4, 2015.
7. Levashov S.P. *Analiz i razrabotka kriteriev ocenki i ocenivaniya riskov professional'nogo travmatizma na osnove «Kodeksa luchshej praktiki»* [Analysis and development of criteria for assessment and assessment of occupational risks on the basis of the «Code of best practice)].
8. Fajnburg. G.Z. *Ohrana truda i tekhnika bezopasnosti v stroitel'stve № 1 2015 razmyshleniya o tom, o chem nikto nichego nikogda ne znaet v ohrane truda* [Health and safety in construction no 1 2015 reflections on what no one ever knows anything about health and safety].
9. Fedorec A.G. *Koncepcii riska v zhizni i deyatelnosti cheloveka* [Concepts of risk in life and activity of the person]. no 1 (40)/2013 yanvar' –fevral' bezopasnost' v tekhnosfere.
10. Orlov A.I., Pugach O.V. *Podhody k obshchej teorii riska* [Approaches to the General theory of risk]. Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet im. N.E. Baumana.
11. Zubkov V.I. *Teoriya. Metodologiya 1999 g. Risk kak predmet sociologicheskogo analiza* [Theory. Methodology 1999 Risk as a subject of sociological analysis].
12. *Ocenka riskov proizvodstvennogo travmatizma* [Risk assessment of occupational injuries]. no 6-2016 Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti.
13. Voroshilov A.S. *Vzaimosvyaz' metodiki «veroyatnost' — vred-risk (vvr)» s obshchepriyatymi metodami ocenki riskov travmatizma* [e relationship of the methodology of «probability of harm-risk (WWR)» accepted methods of risk assessment of injury]. Materialy 1 mezhdunarodnoj nauchnoj-prakticheskoy konferencii Perm' (14–15 maya 2018 g) Aktual'nye problemy ohrany truda i bezopasnosti proizvodstva, dobychi i ispol'zovaniya kalijno-magnevnyh solej.
14. Mel'nikova D.A., Krivova M.A., Yagovkin G.N. *Osnovnye principy sozdaniya informacionnyh sistem upravleniya professional'nymi riskami* [Basic principles of creation of information systems of professional risk management]. pp. 20–23. po itogam XIV-j mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Nauka v central'noj Rossii»]
15. *Kratkij analiz proizvodstvennogo travmatizma s uchetom chelovecheskogo faktora na proizvodstvennyh edinicah AO «SUEK-Kuzbass»* [A brief analysis of occupational injuries, taking into account the human factor in the production units of JSC «SUEK-Kuzbass»]. no 2-2017. Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti.
16. Rykov A.M. Li Hi Un, Filatov Yu.M. *Risk-orientirovannyj podhod v obespechenii bezopasnosti ugol'nyh shahit AO «NC VostNil»* [The risk-based approach to ensuring the safety of coal mines]. no 1, 2016, pp. 73–76 Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti izdatel'stvo: OOO «VostEKO» (Kemerovo).



**А. Н. Машнюк, В. И. Михайлов,  
Г. Е. Седельников, С. С. Голубев**

## **ФОРМИРОВАНИЕ НАВЫКОВ БЕЗОПАСНЫХ ДЕЙСТВИЙ У РАБОТНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ**

Как известно большинство несчастных случаев на производстве происходят по причине низкой компетентности работника, поэтому задача обучения работников всегда актуальна. В то же время, часто невозможно или очень дорого организовать обучение, например, правильным действиям при тушении пожара в шахте, либо, когда необходимо симитировать аварийную ситуацию с дорогостоящим оборудованием и т.д. В таких случаях на помощь приходят современные технологии виртуальной реальности, которые позволяют поместить работника или группу прямо «внутри» аварийной ситуации, симулировать любую неисправность оборудования и любые условия окружающей среды. В целях увеличения эффективности и качества обучения работников компанией АО «СУЭК-Кузбасс» совместно с АНП «Кузбасс-ЦОТ» и ООО «Виар Трейнинг системс» ведется разработка программно-методической системы «Живая шахта», предназначенной для организации процессов обучения и тренировок горнодобывающего персонала в условиях виртуальной реальности. В «Живой шахте» будет реализован функционал для отработки правильных действий в условиях опасных производственных ситуаций. Как показала практика использования технологий виртуальной реальности, на соревнованиях команд ВГК, данные технологии позволяют ставить и решать любые самые сложные, многообразные и неоднозначные задачи, формировать навыки безопасных действий у работников. Ключевые слова: виртуальная реальность, живая шахта, обучение, интерактивность, вгсч, аварийные ситуации.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-362-374

Большое количество несчастных случаев на производстве, приводящих к травмированию работников, профессиональным заболеваниям, свидетельствует о необходимости поиска эффективного средства для предотвращения этих нежелательных последствий. Важно отметить, что более 70–80% несчастных случаев на производстве происходит из-за некомпетентных действий работника. Кроме того, в настоящее время, в связи с резким развитием технологий производства, ускорением бизнес-процессов ужесточаются требования к компетентности

ISSN 0236–1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 362–374.

© А. Н. Машнюк, В. И. Михайлов, Г. Е. Седельников, С. С. Голубев, 2018.

работника. Как показывает практика, обучение работников способам и приемам безопасного выполнения производственных операций, а также правильного поведения в аварийных ситуациях с использованием современных видеоинформационных технологий, является одним из эффективных средств по снижению травматизма на производстве и сохранению жизни и здоровья работников [1,2,3].

В связи с этим существует необходимость в проектировании и внедрении специальных программных систем быстрого и качественного обучения работников для формирования у них необходимых знаний и навыков. Актуальным остается освоение методик и практик, включающих исследование и моделирование поведенческой динамики сложных объектов и многоступенчатых процессов. В тех случаях, когда моделируется поведение человека в динамических условиях, т. е. когда конечной целью является формируемый навык взаимодействия человека и специфического окружения, имеется лишь один способ быстрой и качественной выработки подобного навыка — использование технологий «виртуальной реальности» (VR-технологии).

В статье [4] проведен анализ различных способов обучения, включающих в себя элементы виртуальной реальности. На основе проведенных экспериментальных и квази-экспериментальных исследовательских проектов было показано, что виртуальная реальность является эффективным методом обучения работников. VR Тренажеры позволяют осуществить «погружение» человека в любой узнаваемый мир, предоставляя ему возможность комплексного восприятия одновременно как знакомых, так и новых в наблюдении и управлении элементов.

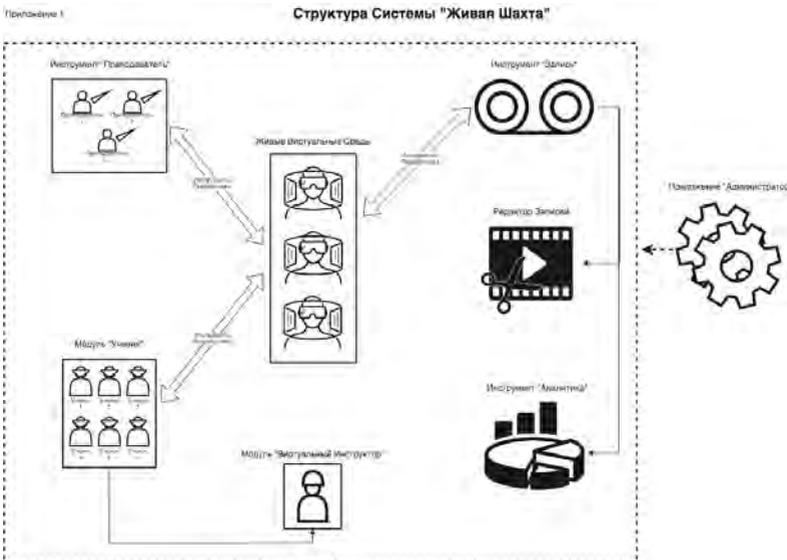
В одном из проведенных исследований [5] показано, что технология виртуальной реальности фокусируется на активных интерактивных процессах обучения учащегося и может сократить разрыв между знаниями учащегося и реальным опытом. В последнее время технологии виртуальной реальности могут быть применены для широкого круга при обучении, с другой стороны необходимы дальнейшие исследования для создания надлежащих и эффективных методов обучения.

Важно отметить, что одна из актуальных ранее проблем технологий виртуальной реальности — высокая стоимость оборудования, в последние годы теряет свою актуальность [6]. Разработка нового компьютерного оборудования и программного обеспечения сделало более доступными включение виртуальной реальности в технологии по обучению, при этом образовательные преимущества виртуальной реальности остаются на очень высоком уровне. Так, в работе [7] продемонстрировано, что большинство студентов сообщили о положительном опыте использования виртуального пространства, включая увеличение социальных взаимодействий и снижение социальной тревожности.

VR-технологии выручают там, где невозможно или очень дорого организовать обучение правильным действиям в аварийных ситуа-

циях, особенно это актуально на таких опасных производственных объектах как шахта. Можно поместить работника прямо «внутри» аварийной ситуации и обучить его правильным действиям. Причем, это будет его «настоящее» рабочее место, с идентичным окружением и оборудованием. В настоящее время тренажеры, в т.ч. VR-технологии уже широко применяются в различных отраслях: в медицине [8], космонавтике [9], спорте [10], обучении студентов [11], авиации [12], транспорте [13], военными [14] и многими другими.

В целях увеличения эффективности и качества обучения работников компанией АО «СУЭК-Кузбасс» совместно с АНП «Кузбасс-ЦОТ» и ООО «Виар Трейнинг системс» ведется разработка программно-методической системы «Живая шахта», предназначенной для организации процессов обучения и тренировок горнодобывающего персонала в условиях виртуальной реальности. Структура системы «Живая шахта» представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Структура системы «Живая шахта»**

Система состоит из следующих модулей: «Живые Виртуальные Среды», «Ученик», «Обучение базовому управлению в виртуальной среде», «Преподаватель», «Запись», «Редактор Записей», «Аналитика», «Администратор».

Модуль «Живые Виртуальные Среды» — это совокупность виртуальных объектов, которые имитируют объекты реального мира, их физические свойства, функционал и взаимодействия между собой и пользователями, с необходимой степенью детализации.

Модуль «Ученик» обеспечивает базовую функциональность VR игрока: передвижение в виртуальном пространстве, базовые интерактивные функции (взять/положить/нажать), калибровку и движение тела, а также обеспечивает возможность групповой работы по сети (мультиплеер). Сетевая логика разработана и оптимизирована с учетом специфики VR (передача большого количества пространственных координат), что позволяет видеть гладкую картинку без задержек даже на сетях 4G.

Модуль «Обучение базовому управлению в виртуальной среде» позволяет ученику изучить основы работы в системе «Живая шахта», прежде чем приступить к обучению или тестированию.

Модуль «Преподаватель» - это инструмент проведения обучения в реальном времени: преподаватель имеет возможность общаться с учениками по голосовой связи, взаимодействовать с виртуальной средой (например, активировать различные необычные ситуации или включать/выключать оборудование), указкой обращать внимание учеников на какие-нибудь объекты или события, телепортировать объекты, в том числе и учеников.

Модуль «Запись» позволяет записывать все действия и события, происходившие в виртуальной среде, причем не в формате плоской записи, а в формате «360». Далее возможно подробно просмотреть записи.

Инструмент «Редактор записей» имеет возможности базового редактирования записи (обрезка по краям), а также проставлять оценки и комментарии к действиям учеников.

Модуль «Аналитика» позволяет сохранять результаты обучения в текстовом формате, анализировать их и быстро интегрироваться в основные существующие базы данных и CRM системы и имеет функционал приема и отправки данных между VR приложением и данными системами.

Модуль «Администрирование» применяется в случае, если заказчик предпочитает не интегрироваться в имеющиеся информационные системы, хранящие данные о сотрудниках, а организовать отдельную БД для хранения результатов обучения в VR. В таком случае администратор имеет функции управления пользователями, группами и ролями, а также управления образовательными курсами и дополнительными справочниками.

На первом этапе в рамках системы «Живая шахта», в 2017–2019 гг. в среде виртуальной реальности будет «построена» модель «типовой» шахты, включающая в себя основные выработки (проходческие и добычная выработки, конвейерные и вентиляционные штреки и др.) и оборудование (проходческий и добычной комбайны, монорельсовый дизелевоз, конвейеры и др.). В «Живой виртуальной среде» будет реализован функционал для отработки правильных действий в условиях опасных производственных ситуаций (ОПС), а именно:

### 1. ОПС «Возгорание на ленточном конвейере»

- Наличие невращающихся роликов (неисправных или заштыбованных).

- Просыпание горной массы с рабочей ветви ленточного полотна на почву.

- Заштыбовка концевой станции конвейера вследствие просыпания горной массы с рабочей ветви ленточного полотна на возвратную ветвь.

- Неисправность датчика КСА.

- Отсутствие или неисправность средств пожаротушения.

- Отсутствие или неисправность установок автоматического пожаротушения.

- Неисправность устройств формирования потока горной массы на сбросах ленточных конвейеров.

- Отсутствие набрызг-бетона (негорючей крепи) в приводных и концевых камерах ленточного конвейера.

- Складирование горючих материалов у настила конвейера, их касание о ленточное полотно.

### 2. ОПС «Загазирование подготовительного забоя. Вспышка метана».

- Отставание вентиляционного става от груди забоя более допустимого по ПБ.

- Неисправность аппаратуры автоматического газового контроля, установка датчиков с нарушением ПБ.

- Рециркуляция воздуха на ВМП из-за отсутствия необходимого количества воздуха перед ВМП.

- Порыв вентиляционного става при доставочных или других работах.

- Рассоединение труб вентиляционного става вследствие неправильного монтажа (подвески) или неправильного соединения.

- Нарушение регламента по ремонту электрооборудования в забое. Отсутствие аншлага на групповом пускателе о ревизии электроаппаратуры в забое.

- Отсутствие переносного прибора контроля метана у электрослесаря.

### 3. ОПС «Аварийные ситуации при проведении доставочных работ подвесным дизельным локомотивом»

- Не протянуты гайки анкеров крепления монорельсовой балки. Отсутствует контакт опорной пластины с кровлей.

- Использование деформированной, изношенной монорельсовой балки.

- Использование не заводской шплинтовой пальцев крепления монорельсовой балки. Выпадение шплинтов.

- Нарушение паспорта доставки и руководства по эксплуатации дизелевозного локомотива в части подвески груза (контейнер, трубы).
- Неисправное техническое состояние дизелевозного локомотива. Лобовое стекло треснувшее и не обеспечивает обзор машинисту.
- Возможность зацепа груза при перевозке из-за захламленности и складирования оборудования и материалов под монорельсовой балкой.
- Отклонение трассы монорельсовой дороги в сторону ходовой стороны, отсутствие требуемого прохода.
- Неправильные действия сопровождающего, идущего в створе с локомотивом.

4. ОПС «Падение отжимов угля и породы на сопряжении очистного забоя со штреком. Травмирование отслоившимися кусками горной массы».

- Недостаточный распор секции крепи на верхнем сопряжении.
- Отставание передвижки секций крепи от очистного комбайна.
- Нарушение руководства по эксплуатации мехкомплекса в части коррекции положения перекрытия секции (секция на взлет).
- Увеличение угла наклона настила забойного конвейера и увеличение расстояния от козырька секции крепи до груди забоя. Опрокидывание комбайна на забой.
- Разгрузка нескольких рядом стоящих секций крепи.
- Неисправность или неиспользование прижимных козырьков.
- Нарушение паспорта крепления сопряжения лавы в части установки опережающего усиления крепления выработки.
- Уход механизированного комплекса вниз. Невыполнение дополнительных мероприятий по креплению кровли сопряжения.
- С нижнего борта снята крепь с опережением 10 м, нарушение паспорта крепления.
- Свободный проход по верхнему борту загроможден крепежным материалом.

«Живая шахта» представляет собой интерактивное виртуальное пространство, с которым можно взаимодействовать (брать, включать, выключать, тушить, звонить и т.д.). Окружающие объекты и оборудование (конвейеры, комбайны, датчики, перегружатели и др.) нарисованы с фотографическим качеством по соответствующим схемам. Расстановка оборудования и крепления горных выработок произведена в соответствии с «паспортом забоя». Все это позволяет «обучаемому», взаимодействуя с виртуальным миром, выполнять различные действия и производственные операции в том порядке и те действия, которые он считает правильными.

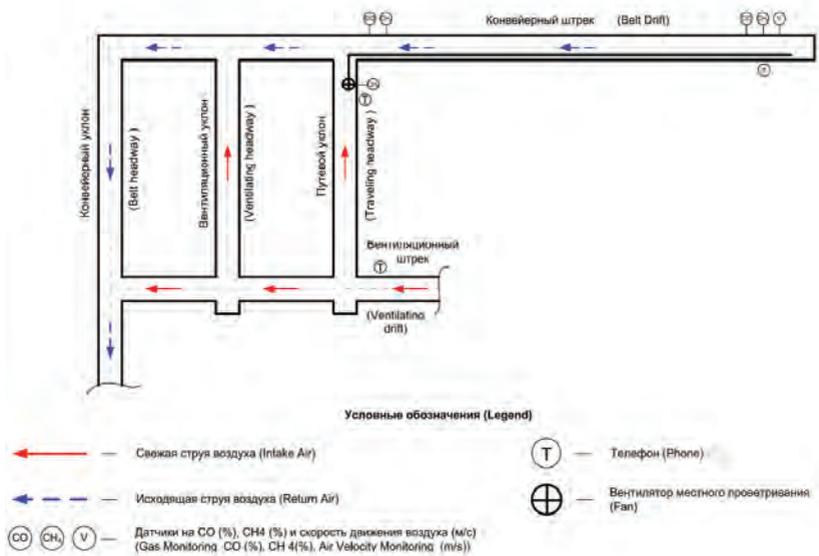
Рассмотрим использование системы «Живая шахта» на конкретном примере. 3–6 июня 2018 г. в «Центре подготовки и развития пер-

сонала «СУЭК-Кузбасс» в г. Ленинске-Кузнецком проходили соревнования команд ВГК. Для этих целей была использована часть «Живой шахты» - модель проходческого забоя, включающая в себя прилегающие выработки и необходимое оборудование. В системе реализована опасная производственная ситуация – «пожар в забое».

В отработке ситуации участвует отделение из 5 человек:

- командир ВГК,
- четыре члена ВГК.

Перед началом выступления члены команды занимают свои места VR. Номера (К, 1,2, 3...) указаны на рабочих местах. Также на столе командира лежит план-схема выработки, на которой будет проходить отработка действий и с которой командир должен ознакомиться заранее.



**Рис. 2. Схема выработок «Живая шахта» для соревнований ВГК**

Помощник администратора по порядку подключает каждого из членов ВГК, указывая их заранее выбранный номер в комплексе (из выпадающего списка); проверяет качество фиксации шлемов VR, правильность прохождения калибровки игрока в системе, работу устройства связи с членами ВГК.

По итогу подключения в виртуальной среде появляются 5 «аватаров» игроков в амуниции и с приборами (газоанализатор спутник 1M, респиратор Р-30). Над игроками отражается номер игрока и желтая галочка для удобного обнаружения игрока администратором. Расположение приборов и тело аватара максимально приближено к реальному.



*Рис. 3. Схема выработок «Живая шахта» для соревнований ВГК*

скорости движения шагом (3 км/ч.).

Основные действия, в том числе и пожар, происходят в тупиковой выработке в подготовительном забое. Данное место оборудовано комбайном, работающим ленточным конвейером Л80, перегружателем сигма 800, противопожарными ставами, вентиляционной вытяжкой, работающим вентилятором, заслонками, телефонами и средствами пожаротушения (контейнер с огнетушителями и пожарным рукавом, а также есть отводы от противопожарного трубопровода, оборудованные противопожарными кранами для подключения пожарных рукавов). Первый телефон находится у устья выработки на свежей струе.

Вся область за устьем во время пожара находится в дыму. Видимость составляет 15 метров.

Место возгорания располагается между двумя ставами с огнетушителями и пожарным рукавом. Первый пожарный кран, пожарный рукав со стволом, огнетушители находятся в дыму. В 15 метрах от очага пожара находится 2-ой телефон. Следующий пожарный кран на свежей струе за очагом пожара на расстоянии 35 метров от очага пожара.

На груди бойцов висят газоанализаторы, отображающие уровень СН<sub>4</sub>, СО, температуру, и респиратор с неограниченным сроком работы. Боец может погибнуть от удушья угарным газом, если не наденет респиратор в течение 10 сек. Время работы огнетушителя 12 сек.

Администратор (судья) запускает таймер, ведет заранее подготовленный чек-лист, следит за игроками в режиме свободной камеры на своем рабочем месте.

Далее рассмотрим примерный порядок рекомендуемых действий участников ликвидации пожара. Порядок может отличаться в зависимости от личного и командного выбора игроков.

Члены ВГСЧ, ориентируясь по направлению дыма, движению частиц (ветер) и свежей струе, подходят к устью аварийной выработки. Заметив дым, командир отделения по телефону у устья выработки докладывает диспетчеру о готовности бойцов войти в загазованную выработку. Командир отделения дает команду включиться в респира-

Команда устно сообщает о готовности начала отработки действий. Администратор (судья) запускает симуляцию пожара. Пожар разгорается; распространяется; имеет 2 стадии, отражающие сложность и время тушения. Время перехода от одной стадии к другой 4 минуты.

Члены ВГК начинают движение по выработке в сторону задымления. Скорость перемещения равна

торы. Отделение и командир отделения включаются в респираторы и начинают движение по загазованной выработке.

Через минуту движения (около 200 метров) отделение находит очаг пожара – горит уголь под роликами ленточного конвейера.

Командир отделения по 2 телефону сообщает об обнаружении пожара РГСР.

Отряд приступает к тушению пожара. В зависимости от текущей стадии пожара возможны следующие варианты его устранения:

Вариант 1. При пожаре первой стадии (горит 1 куча, время от момента возгорания до пика 1-й стадии 4 минуты) есть возможность потушить пожар огнетушителями. Поэтому возможны следующие варианты устранения пожара:

- Тушение огнетушителями. Бойцы приносят 4 огнетушителя и приступают к тушению пожара. Командир отделения по телефону докладывает РГСР обстановку. Пожар потушен.

- Тушение рукавной линией. Командир отделения отдает команду «Проложить рукавную линию». 1-й боец берет скатку пожарного рукава, 2-й боец – пожарный ствол. 3-й боец разматывает скатку пожарного рукава и подсоединяет к пожарному крану. 1-й боец подсоединяет ствол к проложенной рукавной линии. 1-й боец выполняет обязанности ствольщика. По команде командира отделения «Подать воду» 4-й боец открывает вентиль пожарного крана. 2-й боец проверяет исправность рукавной линии, поступление воды по ней и выполняет обязанности линейного. Отделение после подачи воды в рукавную линию возвращается к очагу пожара, проверяет рукавную линию и приступает к тушению пожара.

Вариант 2. При пожаре второй стадии (горит две и более куч, время от момента возгорания более 4-х минут) полное его устранение возможно только с прокладкой пожарного шланга. (см. пункт «Тушение рукавной линией» выше).

После тушения пожара командир отдает приказ пролить оставшуюся штыбу.

По факту полного устранения пожара командир отделения докладывает диспетчеру на КП о выполнении задания по форме «Пожар потушен». Далее, по команде командира, отделение возвращается на поверхность.

Таким образом, как показала практика использования технологий виртуальной реальности, применяемых в рамках работы над проектом «Живая Шахта», разрабатываемого по заказу «АО СУЭК-Кузбасс», совместно с АНП «Кузбасс-ЦОТ» и ООО «Виар Трейнинг системс», данные технологии позволяют ставить и решать любые самые сложные, многообразные и неоднозначные задачи, формировать навыки безопасных действий у работников.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Седельников Г.Е. Практическое применение видеоинформационных технологий в безопасности труда, № 1 (62), 2015, С. 13–16, Безопасность и охрана труда, издательство: Биота-плюс (Нижний Новгород).

2. Ворошилов С.П., Седельников Г.Е. Современные технологии развития и контроля компетентности работников в сфере безопасности труда, № 2 (59), 2014, С. 55–57, журнал: Безопасность и охрана труда, издательство: Биота-плюс (Нижний Новгород).

3. А.М. Ли Хи Ун , Филатов Ю.М. Риск-ориентированный подход в обеспечении безопасности угольных шахт рыков АО «НЦ ВостНИИ», № 1, 2016, С. 73–76. Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности издательство: ООО «ВостЭКО» (Кемерово);

4. Merchant, Z., Goetz, E.T., Cifuentes, L., Keeney-Kennicutt, W. & Davis, T.J. (2014). Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes in K-12 and higher education: A meta-analysis. Computers & Education, 70, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.07.033>

5. International Review of Research in Open and Distributed Learning Volume 19, Number 1 February – 2018 An Analysis of Learners' Intentions Toward Virtual Reality Learning Based on Constructivist and Technology Acceptance Approaches Hsiu-Mei Huang<sup>1</sup> and Shu-Sheng Liaw <sup>2\*</sup> <sup>1</sup> National Taichung University of Science and Technology, <sup>2</sup> China Medical University, Taichung, Taiwan

6. Virtual Reality in Engineering Education: The Future of Creative Learning <http://dx.doi.org/10.3991/ijet.v6i4.1766> A. G. Abulrub, A. Attridge and M. A. Williams The University of Warwick, Coventry, UK

7. Education Student Perceptions of Virtual Reality as a Learning Tool Jelja R. Domingo and Elizabeth Gates Bradley Journal of Educational Technology Systems 2018, Vol. 46(3) 329–342

8. Грибова В.В., Петряева М.В., Федорищев Л.А. Компьютерный обучающий тренажер с виртуальной реальностью для офтальмологии, № 6 (101), 2013, С. 45–51, журнал «Открытое образование», издательство: «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова (Москва)».

9. Михайлюк М.В., Брагин В.И. Технологии виртуальной реальности в имитационно-тренажерных комплексах подготовки космонавтов, №2(7), 2013 С. 82–93, журнал «Пилотируемые полеты в космос», издательство: «Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А. Гагарина (звездный городок)».

10. Роженцов В.В., Афоньшин В.Е. Тактическая подготовка в игровых видах спорта с использованием виртуальной реальности, № 3, 2013, С. 272–276, «Программные системы и вычислительные методы», издательство: ООО «НБ-Медиа» (Москва).

11. Ходос О.С. Формирование предметной компетентности у студентов в контексте среды виртуальной реальности, № 1–2, 2014, С. 82–86, Вестник бурятского государственного университета, издательство: Бурятский государственный университет (Улан-Удэ).

12. Роганов В.Р. Постановка задачи совершенствования эргатического оптико-аппарно-программного комплекса моделирования визуально наблюдаемой части виртуального пространства для авиационного тренажера,

2016 С. 126–138, сборник статей международной конференции, «Методы и средства измерений в системах контроля и управления», под редакцией Жашковой Т.В., издательство: Пензенский государственный технологический университет (Пенза).

13. *Сатдаров М.Р., Староверова Н.А.* Разработка виртуального тренажёра поездного состава duomatic 09–32, 2018, С. 32–34, материалы международной научно-практической конференции «Наука сегодня: факты, тенденции, прогнозы» издательство: ООО «Маркер»

14. *Чабанов В.А.* Сетевое управление боевыми действиями - инструмент повышения эффективности военной операции, № 1, 2015, С. 6–16, «Авиационные системы», издательство: Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем (Москва). **ГИАБ**

### **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Машнюк Александр Николаевич* — директор по работе с персоналом и АХД АО «СУЭК-Кузбасс»,

*Михайлов Виталий Иванович* — начальник управления информатизации АО «СУЭК-Кузбасс»,

*Седельников Геннадий Евгеньевич*, заместитель директора «Кузбасс-ЦОТ» email:video@kuzbasscot.ru, тел.: 8–923–488–77–11,

*Голубев Сергей Сергеевич*, технический директор ООО «Виар трейнинг системс».

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

No. 11 (special'nyy vypusk 49), pp. 362–374.

**Mashnyk A. N., Mikhailov V. I., Sedel'nikov G. E., Golubev S. S.**

### **Formation of skills of safe actions of employees using virtual reality technologies**

As it is known the main reason of occupational traumatism is incompetent workers' actions, that is why occupational trainings are always relevant. Meanwhile, it is often impossible or very expensive to provide trainings, for example, in extinguishing in a mine, or when there is a need to simulate any emergency situation with costly equipment etc. In such cases modern technologies of virtual reality provide help. It makes possible to place worker or group of workers right "inside" the emergency situation, simulate any fault in the equipment and any environment conditions. In order to increase the efficiency and the quality of workers' trainings АО "SUEK-Kuzbass", ANP "Kuzbass-COT" and ООО "VR Training systems" began to develop programme-methodical system "Live mine", which is intended to provide trainings for mining staff in virtual reality. In "Live mine" there will be functionality to practice safe actions in conditions of dangerous occupational situations. The described technologies of virtual reality were tested in the Mine Rescue Brigade competitions, as it turned out, those technologies let set and solve the most complicated, diverse and ambiguous tasks and develop workers' safe actions skills.

Key words: virtual reality, live mine, trainings, interactivity, Mine Rescue Brigade, emergency situations.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-362-374

## AUTHORS

Mashnyk A. N., Director of HR and administrative Department of JSC «SUEK-Kuzbass»,

Mikhailov V. I., head of Informatization Department of SUEK-Kuzbass JSC,

Sedel'nikov G. E., Deputy Director «Kuzbas-tsot» email:video@kuzbasscot.ru tel: 8–923–488–77–11,

Golubev S. S., technical Director of VIAR training systems LLC.

## REFERENCES

1. Sedel'nikov G.E. *Prakticheskoe primenenie videoinformacionnyh tekhnologij v bezopasnosti truda* [Practical application of video-information technologies in occupational safety], no 1 (62), 2015, pp. 13–16, Bezopasnost' i ohrana truda, izdatel'stvo: Biota-plyus (Nizhnij Novgorod).

2. Voroshilov S.P., Sedel'nikov G.E. *Sovremennye tekhnologii razvitiya i kontrolya kompetentnosti rabotnikov v sfere bezopasnosti truda* [Modern technologies of development and control the competence of workers in the field of labour safety], no 2 (59), 2014, pp. 55–57, Bezopasnost' i ohrana truda, izdatel'stvo: Biota-plyus (Nizhnij Novgorod).

3. A.M. Li Hi Un , Filatov Yu.M. *Risk-orientirovannyj podhod v obespechenii bezopasnosti ugol'nyh shaft rykov AO «NC VostNII»* [Risk-based approach to ensuring the safety of coal mines Rykov, JSC «NTS VostNII»], no 1, 2016, pp. 73–76. Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti izdatel'stvo: OOO «VostEKO» (Kemerovo).

4. Merchant, Z., Goetz, E.T., Cifuentes, L., Keeney-Kennicutt, W. & Davis, T.J. (2014). *Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes in K-12 and higher education: A meta-analysis*. Computers & Education, 70, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.07.033>

5. *International Review of Research in Open and Distributed Learning* Volume 19, Number 1 February 2018 An Analysis of Learners' Intentions Toward Virtual Reality Learning Based on Constructivist and Technology Acceptance Approaches Hsiu-Mei Huang<sup>1</sup> and Shu-Sheng Liaw <sup>2\*</sup> <sup>1</sup> National Taichung University of Science and Technology, <sup>2</sup> China Medical University, Taichung, Taiwan

6. *Virtual Reality in Engineering Education: The Future of Creative Learning* <http://dx.doi.org/10.3991/ijet.v6i4.1766> A. G. Abulrub, A. Attridge and M. A. Williams The University of Warwick, Coventry, UK

7. Jelja R. *Education Student Perceptions of Virtual Reality as a Learning Tool*. Domingo and Elizabeth Gates Bradley Journal of Educational Technology Systems 2018, Vol. 46(3) 329–342

8. Gribova V.V., Petryaeva M.V., Fedorishchev L.A. *Komp'yuternyj obuchayushchij trenazher s virtual'noj real'nosti'yu dlya oftal'mologii* [Computer training simulator with virtual reality for ophthalmology], no 6 (101), 2013, pp. 45–51, zhurnal «Otkrytoe obrazovanie», izdatel'stvo: «Rossijskij ekonomicheskij universitet imeni G.V. Plekhanova (Moskva)».

9. Mihajlyuk M.V., Bragin V.I. *Tekhnologii virtual'noj real'nosti v imitacionno-trenazhernyh kompleksah podgotovki kosmonavtov* [Technology of virtual reality in simulation and training complexes, the training of cosmonauts], no 2(7), 2013 pp. 82–93, zhurnal «Pilotiruemye polety v kosmos», izdatel'stvo: «Nauchno-issledovatel'skij ispytatel'nyj centr podgotovki kosmonavtov imeni Yu.A. Gagarina (zvezdnyj gorodok)».

10. Rozhencov V.V., Afon'shin V.E. *Takticheskaya podgotovka v igrovyh vidah sporta s ispol'zovaniem virtual'noj real'nosti* [Tactical training in game sports using virtual reality],

no 3, 2013, pp. 272–276, «Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody», izdatel'stvo: OOO «NB-Media» (Moskva).

11. Hodos O.S. *Formirovanie predmetnoj kompetentnosti u studentov v kontekste sredy virtual'noj real'nosti* [Formation of students' subject competence in the context of virtual reality environment], no 1–2, 2014, pp. 82–86, Vestnik buryatskogo gosudarstvennogo universiteta, izdatel'stvo: Buryatskij gosudarstvennyj universitet (Ulan-Ude).

12. Roganov V.R. *Postanovka zadachi sovershenstvovaniya ergaticheskogo-optiko-appartno-programmnogo kompleksa modelirovaniya vizual'no nablyudae-moj chasti virtual'nogo prostranstva dlya aviacionnogo trenazhyora* [Formulation of the problem of improving the ergatic-optical-hardware-software complex of modeling visually observe part of the virtual space for the aircraft simulator], 2016. pp. 126–138, sbornik statej mezhdunarodnoj konferencii, «Metody i sredstva izmerenij v sistemah kontrolya i upravleniya», pod redakciej Zhashkovej T.V., izdatel'stvo: Penzenskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet (Penza).

13. Satdarov M.R., Staroverova N.A. *Razrabotka virtual'nogo trenazhyora poezdnoogo sostava duomatic* [Development of a virtual train simulator duomatic]. 09–32, 2018, pp. 32–34, materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Nauka segodnya: fakty, tendencii, prognozy» izdatel'stvo: OOO «Marker».

14. Chabanov V.A. *Setevoe upravlenie boevymi dejstvijami instrument povysheniya effektivnosti voennoj operaci* [Network management of military operations-a tool to improve the efficiency of military operations], no 1, 2015, pp. 6–16, «Aviacionnye sistemy», izdatel'stvo: Gosudarstvennyj nauchno-issledovatel'skij institut aviacionnyh sistem (Moskva).



## ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА К СНИЖЕНИЮ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РИСКА НА УГЛЕДОБЫВАЮЩЕМ ПРЕДПРИЯТИИ

Приведен экономический аспект методического подхода к снижению производственного риска на угледобывающем предприятии, обеспечивающий приемлемый уровень производственного риска путем рационального распределения ресурсов в конкретной производственной ситуации.

Ключевые слова: экономическое обеспечение снижения риска, опасная производственная ситуация, производственный риск, рациональное распределение ресурсов, экономическая эффективность, экономика безопасности.

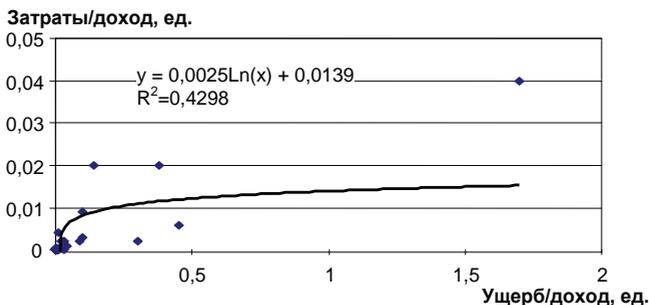
DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-375-382

Сложность задачи определения экономической эффективности затрат на обеспечение охраны труда и промышленной безопасности состоит в том, что «предотвращенный» несчастный случай нельзя увидеть. Сложность поставленной задачи возрастает в связи с особенностями сложившейся практики в области экономии затрат на охрану труда и промышленную безопасность [8]:

- существующий учет затрат на охрану труда и технику безопасности основан на определении ущерба от уже совершившихся нарушений требований безопасности и фактических травм;
- отсутствует учет средств на предотвращение нарушений требований безопасности;
- не на всех предприятиях налажен должный учет потерь времени в связи с нарушениями требований безопасности;
- отсутствует критерий экономической эффективности средств, затрачиваемых на обеспечение охраны труда и промышленной безопасности.

Такое положение приводит к тому, что предприятия экономически не заинтересованы в проведении мероприятий по предотвращению потерь, связанных с нарушениями требований безопасности. Основной упор делается на сокращение компенсационных затрат, в то время как экономически целесообразно вкладывать в предупреждение их возникновения [8].

Этот вывод подтверждается в исследовании В.А. Ковалева [1]. ретроспективный анализ экономического ущерба от происшедших в Кузбассе аварий и размера финансовых средств, необходимых для их предотвращения, выявил, что около 70% аварий сопровождается ущербом, составляющим 0,4—3,0% стоимости товарной продукции, тогда как затраты на их предотвращение равны 0,01—0,3% этой стоимости. В большинстве случаев ущерб превышает затраты от 2,5 до 43 раз, в отдельных случаях — до 1000 раз и может более чем в 1,5 раза превышать годовой доход угольной шахты (рис. 1).



**Рис. 1. Зависимость между величиной финансовых средств на предотвращение аварии и величиной ее финансовых последствий [1]**

Выявленная зависимость позволила сделать следующие выводы:

- действия по предупреждению аварий, как правило, не требуют значительных финансовых затрат и не зависят от масштабов аварии. Следовательно, недопущение аварий, с финансовой точки зрения, возможно и на экономически слабых предприятиях [8];

- наличие аварий свидетельствует о том, что своевременные необходимые и достаточные действия по их предотвращению не осуществляются. Отсюда следует, что проблема повышения безопасности функционирования угольных шахт связана не только и не столько с наличием или отсутствием финансовых средств, сколько с низкой результативностью системы работы шахты по обеспечению требуемого уровня промышленной безопасности именно в направлении предупреждения реализации аварий.

- В целом же затраты финансовых средств на предотвращение аварии и затраты на устранение ее финансовых последствий в подавляющем большинстве случаев не являются значимыми для предприятия [1]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что для увеличения эффективности работы системы обеспечения безопасности производства нет необходимости выделять дополнительные финансовые ресурсы. Тогда за счет чего можно еще увеличить ее эффективность?

Проведение анализа функционирования системы обеспечения безопасности производства во взаимосвязи с экономикой предприятия выявило важность функции управления риском для поддержания требуемого уровня экономической эффективности производства [2]. Также это актуально и для системы обеспечения безопасности на горнодобывающем предприятии [3, 4].

Если под экономикой безопасности понимать распределение ограниченных ресурсов предприятия для удовлетворения потребностей его персонала и собственников в обеспечении приемлемого уровня риска аварий и травм при выполнении производственной программы, то результативность работы системы обеспечения безопасности должна определяться эффективным и рациональным распределением ресурсов с учетом опасностей, возникающих в процессе производственной деятельности.

В работе системы обеспечения безопасности целесообразно в качестве объекта управления применять такую категорию как «производственный риск», поскольку он связан с особенностями конкретного производства, применяемой технологии, менеджмента, условий труда, то есть включает в себя множество видов риска, присущих горному производству. На современном этапе организационного развития и информационно-методического сопровождения работы угледобывающих предприятий управление производственным риском целесообразно осуществлять путем контроля (недопущения или устранения) нарушений требований безопасности и опасных производственных ситуаций [2–3, 5, 6, 7].

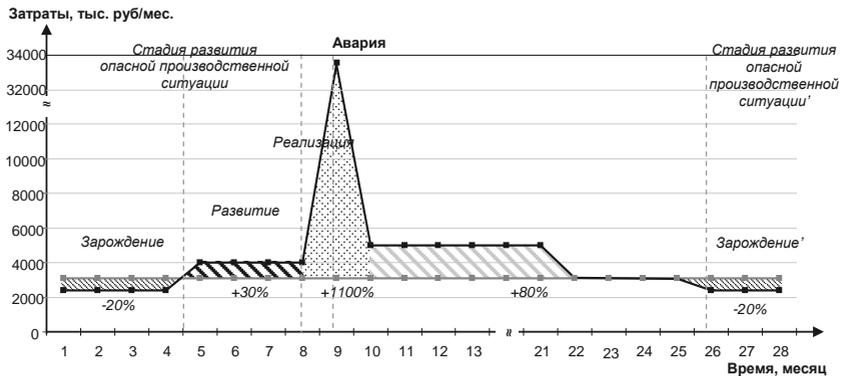
Методический подход к снижению производственного риска был опробован на предприятиях АО «СУЭК-Кузбасс». Результаты его применения стали основой для обоснования экономического аспекта обеспечения безопасности. Так, анализ результатов работы угледобывающих предприятий по сокращению количества повторов нарушений требований безопасности, по выявлению и устранению опасных производственных ситуаций позволил сформировать два основных сценария работы: когда опасная производственная ситуация ликвидируется и когда она реализуется в негативное событие (рис. 1).

На практике идея эффективного распределения ограниченных ресурсов (средства, запланированные на обеспечение безопасности в текущем году) означает следующее: при возникновении опасной производственной ситуации в процессе производственной деятельности она должна быть оперативно идентифицирована (осуществлен опережающий тип контроля) и принято решение: либо о постоянном ее контроле с целью недопущения аварии (травмы, инцидента), либо о немедленном ее устранении. На это и должны быть направлены (перераспределены) имеющиеся финансовые и иные ресурсы — во избежание перерасхода «бюджета» на обеспечение безопасности производства. То есть не допустить работу по сценарию 2 (см. рис. 1, б).

а) с учетом нарушений требований безопасности и стадий опасной производственной ситуации, не реализовавшейся в негативное событие (сценарий 1)



б) с учетом нарушений требований безопасности и стадий опасной производственной ситуации, реализовавшейся в аварию (сценарий 2)



- Плановые затраты на обеспечение безопасности дегазационных работ, тыс. руб./мес.
- Фактические затраты на обеспечение безопасности дегазационных работ, тыс. руб./мес.:
- ▨ -20% — сокращение запланированных затрат из-за единичных нарушений требований безопасности;
- ▨ +30% — увеличение запланированных затрат из-за повторов нарушений требований безопасности и их несвоевременного устранения (выплаты штрафов, затраты на устранение нарушений, упущенная выгода из-за простоев и остановок органами надзора);
- ▨ +1100% — увеличение запланированных затрат, обусловленное единовременными выплатами и ущербом от аварии;
- ▨ +80% — увеличение запланированных затрат из-за устранения последствий аварии (покупка нового оборудования, демонтаж и т.д.)

**Рис. 1. Динамика затрат на обеспечение безопасности процесса дегазации (на примере обслуживания операции бурения дегазационных скважин на шахте им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс») [9]**

Выявление и устранение опасных производственных ситуаций и соответствующее распределение ресурсов осуществляется по алгоритму (рис. 2).



**Рис. 2. Алгоритм работы с ОПС для снижения производственного риска**

Данный алгоритм предусматривает, что принятие решения по выбору окончательного варианта работы с ОПС (ее устранение или постоянный контроль с целью недопущения возникновения негативных событий) осуществляется на основе расчета стоимости необходимых мероприятий по устранению ОПС («смета»). Таким образом, учет экономического аспекта при реализации методики выявления и устранения опасных производственных ситуаций позволяет снижать производственный риск.

### **Выводы**

Поскольку действия по предупреждению аварий, как правило, не требуют значительных финансовых затрат и не зависят от масштабов аварии, недопущение аварий, инцидентов, травм связано не столько с количеством финансовых средств, сколько с рациональностью их распределения.

Рациональное распределение средств на обеспечение безопасных условий труда должно быть направлено на достижение приемлемого уровня производственного риска и базироваться на выявлении и учете опасных производственных ситуаций и определении эффективных вариантов работы с ними (недопущение, устранение, контроль).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ковалев В.А. Методология развития региональной системы управления охраной труда и промышленной безопасностью на угольных шахтах: Дис. ... докт. техн. наук. – М., 2009. – 301 с.
2. Кравчук И.Л., Пикалов В.А., Неволлина Е.М., Ютяев Е.П., Иванов Ю.М. Особенности формирования и функционирования систем обеспечения безопасности горнодобывающих предприятий в сложных условиях разработки месторождений // Уголь. – 2017. – № 5 (май). – С. 60–67.
3. Кравчук И.Л. Теоретические основы и методы формирования системы обеспечения безопасности производства горнодобывающего предприятия: Дис. докт. техн. наук. – М., 2001. – 273 с.
4. Komljenovic D., Loiselle G., Kumral M. Organization: A new focus on mine safety improvement in a complex operational and business environment // International Journal of Mining Science and Technology, Vol. 27, Issue 4, July 2017, Pages 617–625. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.05.006>.
5. Кравчук И.Л., Гришин В.Ю., Смолин А.В. Риск негативных событий, обусловленный нарушениями требований безопасности, и способ его снижения: Отдельная статья Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала).. – М.: Горная книга, 2015. – № 6 (спец. выпуск 28). – 20 с.
6. Лисовский В.В. Управление производственными рисками посредством контроля и устранения опасных производственных ситуаций на угледобывающем предприятии // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 2. – С. 67–72.
7. Лисовский В.В. Управление производственным риском путем предотвращения критической совокупности опасных факторов на угольном предприятии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Спец. 05.26.01. – М., 2016. – 26 с.
8. Латышова Т.А. Экономический анализ и оценка эффективности затрат на охрану труда в условиях угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2000. – № 9. – С. 241–243.
9. Кравчук И.Л., Денисов С.Е., Лапаева О.А., Неволлина Е.М. О разработке экономического критерия результативности функционирования системы обеспечения безопасности на горнодобывающем предприятии // Проблемы недропользования: Сетевое периодическое научное издание / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 2018. – Вып. 4. – Режим доступа: <https://trud.igduran.ru/editions>. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Кравчук Игорь Леонидович* — доктор технических наук, директор Челябинского филиала Института горного дела УрО РАН, 454048, г. Челябинск, ул. Энтузиастов, 30, 718; [kravchuk65@mail.ru](mailto:kravchuk65@mail.ru),  
*Неволлина Елена Михайловна* — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Челябинского филиала Института горного дела УрО РАН, 454048, г. Челябинск, ул. Энтузиастов, 30, 718; [nevolina-elena@yandex.ru](mailto:nevolina-elena@yandex.ru),  
*Емелин Юрий Анатольевич* – младший научный сотрудник, ООО «ТЦ «Организация и Управление», 454048, Россия, г. Челябинск, Энтузиастов, 30, оф. 717. e-mail: [goldline108@gmail.com](mailto:goldline108@gmail.com).

**Kravchuk I.L., Nevolina E.M., Emelin I.A.**

## **The economic aspect of a methodical approach to reducing the production risk at a coal mine**

The article presents the economic aspect of a methodical approach to reducing the production risk at a coal mine, ensuring an acceptable level of production risk through the rational allocation of resources in a specific production situation.

Keywords: economic provision of reducing the risk, dangerous production situation, production risk, rational allocation of resources, economic efficiency, economic of safety.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-375-382

### **AUTHORS**

*Kravchuk I.L.*, Doctor of Engineering Sciences, Director of the Chelyabinsk branch Institute of Mining UB RAS, 454048, Chelyabinsk, Entuziastov st.,30, e-mail: kravchuk65@mail.ru, Russia,

*Nevolina E.M.*, Candidate of Engineering Sciences, senior researcher of the Chelyabinsk branch Institute of Mining UB RAS, 454048, Chelyabinsk, Entuziastov st., 30, e-mail: nevolina-elena@yandex.ru, Russia,

*Emelin I.A.*, junior research scientist, «TC « Organizatsiya y Upravlenie», LLC, goldline108@gmail.com, Russia.

### **REFERENCES**

1. Kovalev V.A. *Metodologiya razvitiya regional'noj sistemy upravleniya ohranoj truda i promyshlennoj bezopasnost'yu na ugol'nyh shahtah* [Methodology of development of regional management system of labor protection and industrial safety at coal mines]: Dis. ... dokt. tekhn. nauk. Moscow, 2009. 301 p.

2. Kravchuk I.L., Pikalov V.A., Nevolina E.M., Yutyaev E.P., Ivanov Yu.M. *Osobennosti formirovaniya i funkcionirovaniya sistem obespecheniya bezopasnosti gornodobyvayushchih predpriyatij v slozhnykh usloviyakh razrabotki mestorozhdenij* [Peculiarities of formation and functioning of security systems of mining enterprises in the difficult conditions of development of deposits of Coal]. Ugol'. 2017. no 5 (maj). pp. 60–67.

3. Kravchuk I.L. *Teoreticheskie osnovy i metody formirovaniya sistemy obespecheniya bezopasnosti proizvodstva gornodobyvayushchego predpriyatiya* [Theoretical bases and methods of formation of the system of safety of production of the mining enterprise]: Dis. dokt. tekhn. nauk. Moscow, 2001. 273 p.

4. Komljenovic D., Loiselle G. , Kumral M. *Organization: A new focus on mine safety improvement in a complex operational and business environment*. International Journal of Mining Science and Technology, Vol. 27, Issue 4, July 2017, pp. 617–625. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.05.006>.

5. Kravchuk I.L., Grishin V.Yu., Smolin A.V. *Risk negativnykh sobytij, obuslovlennyj narusheniyami trebovanij bezopasnosti, i sposob ego snizheniya* [Risk of negative events caused by violations of security requirements, and the method of its reduction]: Otdel'naya stat'ya Gornogo informacionno-analiticheskogo byulletenya (nauchno-tekhnicheskogo zhurnala).. Moscow: Gornaya kniga, 2015. no 6 (spec. vypusk 28). 20 p.

6. Lisovskij V.V. *Upravlenie proizvodstvennymi riskami posredstvom kontrolya i ustraneniya opasnykh proizvodstvennykh situacij na ugledobyvayushchem predpriyatii* [Management of production risks by means of control and elimination of dangerous production situations at the coal-mining enterprise]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2016. no 2. pp. 67–72.

7. Lisovskij V.V. *Upravlenie proizvodstvennym riskom putem predotvra-shcheniya kriticheskoy sovokupnosti opasnykh faktorov na ugol'nom predpriyatii* [Management of production risk by preventing a critical set of dangerous factors at a coal enterprise]: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Spec. 05.26.01. Moscow, 2016. 26 p.

8. Latyshova T.A. *Ekonomicheskij analiz i oценка effektivnosti zat-rat na ohranu truda v usloviyah ugol'nyh shaht* [Economic analysis and assessment of the effectiveness of health and safety in coal mines]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*. 2000. no 9. pp. 241–243.

9. Kravchuk I.L., Denisov S.E., Lapaeva O.A., Nevolina E.M. *O razrabotke ekonomicheskogo kriteriya rezul'tativnosti funkcionirovaniya sistemy obespecheniya bezopasnosti na gornodobyvayushchem predpriyatii* [On the development of the economic criterion of productivity of functioning of system security for the mining company]. *Problemy nedropol'zovaniya: Setevoe periodicheskoe nauchnoe izdanie /IGD UrO RAN*. Ekaterinburg, 2018. Vyp. 4. Rezhim dostupa: <https://trud.igduran.ru/editions>.



## ПОДГОТОВКА ТРУДОВЫХ РЕСУРСОВ В ЭПОХУ ЦИФРОВОГО МИРА

Непрерывная информатизация современного общества, цифровая революция и связанные с ней автоматизация и роботизация производств неизбежно влекут за собой ряд кадровых изменений. Предприятия готовятся к новой реальности, в которой так или иначе всем сотрудникам необходимо будет вовлекаться в цифровые пространства и быть частью цифровых процессов. Большие надежды, возлагаемые на цифровую экономику вполне обоснованы и могут служить отправной точкой для развития инновационных методов и механизмов, решения сложных технологических и производственных задач и пр. Однако, проблема развития персонала с точки зрения его соответствия эпохи глобальной информатизации, должна быть решена сегодня – до наступления кризисных ситуаций, которые могут возникнуть из-за несоответствия трудовых ресурсов квалификации, требуемой текущим цифровым миром. В связи с этим, корпоративное обучение персонала в ключе цифровой революции, становится трендом современности, а работодатели стремятся к поиску и найму специалистов, готовых к непрерывному саморазвитию и совершенствованию собственных профессиональных навыков. Такие виды внутрифирменной переподготовки персонала как смешанное обучение, нативное, коллаборативное, иммерсивное обучение, омни-обучение, геймификация, диджитализация и пр. способны не только стать эффективным механизмом обучения конкретным умениям и навыкам, но и заинтересовать, вовлечь трудовые ресурсы предприятий в всеобщий процесс цифровизации общества.

Ключевые слова: информатизация, информационные технологии, цифровая экономика, электронные образовательные ресурсы, трудовые ресурсы, обучение персонала, управление персоналом, человеческий капитал.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-383-391

### Введение

На сегодняшний день, многие представители как сферы производства, так и сферы образования склонны возлагать большие надежды на цифровизацию промышленности, цифровую экономику и технологии будущего. Считается, что их внедрение сможет значительно повысить уровень производительности труда, позволит добиться экономического роста, благоприятно повлияет на конкурентоспособность предприятий и

ISSN 0236–1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 383–391.

© Н.В. Ломоносова, А.В. Алексахин, 2018.

будет способствовать формированию новых рынков. Пассивная позиция предприятий в вопросах цифровой экономики, напротив может привести к ухудшению всех ключевых показателей его деятельности.

Механизмы формирования человеческого капитала предприятий и управления персоналом так же, значительно обусловлены индустриализацией производств с точки зрения использования цифровых технологий. Рынок труда в современной экономике играет огромное значение, а подготовка высококачественных человеческих ресурсов становятся одним из основных факторов формирования положительной динамики развития корпораций.

Несмотря на то, что за последние 20 лет численность занятого населения РФ, имеющего высшее образование (а так же незаконченное высшее) значительно возросла: почти на 43,3%, а доля занятых людей со средним профессиональным образованием увеличилась более чем на 20% - наличие образования не по-прежнему не стало гарантом успешности работника или его полного соответствия квалификационным требованиям. К том же, постоянно трансформирующийся мир высоких технологий и цифровой экономики диктует необходимость постоянной поддержки профессионального уровня сотрудников предприятий. Работодатели, при осуществлении процедуры найма, порой необоснованно завышают требования к уровню образования соискателей [1], заявляя в качестве условия наличие двух дипломов о высшем образовании для должности обычного секретаря. Подобная ситуация является достаточно характерной для рынка труда РФ [2]. Однако, в эпоху цифрового мира, сознание работодателей начинает постепенно изменяться и появляется четкое понимание успешности применения модели, при которой недостающие навыки и компетенции сотрудник может получить в процессе повышения квалификации на собственном рабочем месте.

### **Описание материалов и методики**

Множество современных крупных фирм и предприятий, ориентированных на инвестиции в человеческий капитал, рассматривают в качестве одного из ключевых источников конкурентных преимуществ - корпоративное обучение персонала и стремятся к поиску и найму специалистов, готовых к непрерывному саморазвитию и совершенствованию собственных профессиональных навыков.

Все чаще, при анализе подходов к внутрифирменному обучению и развитию персонала, исследователи высказывают предположение о том, что электронные способы корпоративного обучения, тренингов, программ повышения квалификации и профессиональной переподготовки сотрудников предприятий могут считаться наиболее приемлемыми с точки зрения оптимального соотношения затрат времени на обучение и эффективности образовательного процесса [3, 4]. Аналогич-

ное утверждение справедливо и для подхода к образовательному процессу, связанному с построением системы смешанного обучения [5], при котором часть времени образовательного процесса проводится в очной форме (при личном присутствии педагога, тьютора, модератора), а часть – в дистанционном формате (при использовании синхронного и асинхронного взаимодействия обучающего и обучаемого средствами электронных образовательных ресурсов [6]).

Современный рынок электронных образовательных ресурсов, предназначенный для сферы корпоративного обучения персонала, отличается использованием широкого многообразия инновационных образовательных технологий. Например, в последнее время значительной популярностью обладает технология корпоративного обучения «виртуальная реальность», которая основана на создании техническими средствами искусственной реальности, передаваемой обучающемуся при помощи органов чувств: слух, зрение, осязание и т.д. Синтезирование подобного обучения происходит в режиме реального времени, а объекты, воспроизводимые «виртуальной реальностью» ведут себя максимально приближено у настоящему, материальному миру. Часто применимое словосочетание «дополненная реальность» отнюдь не является синонимом виртуальной реальности, потому что в первом случае речь идет о дополнении существующего мира некоторыми элементами виртуальности, а во втором случае – о поной реконструкции искусственного пространства. Обучение персонала средствами «виртуальной реальности» очень востребовано в тех сферах деятельности, где эксплуатация реальных устройств и механизмов связана с повышенным риском и/или большими финансовыми затратами (космонавтика, пилотирование летательных аппаратов, горное дело и т.д.). Кроме того, «виртуальная реальность» часто используется для снятия психологических барьеров, выработки специфических социальных навыков, самостоятельной тренировки, выработки инерционных действий при чрезвычайных ситуациях и непредвиденных стрессах, а также для поддержки коллаборации обучающихся посредством совместного выполнения заданий в виртуальном пространстве.

Иной, не менее эффективный подход к внутрифирменному обучению персонала называется «геймификация», которая представляет собой программную технологию применения игровых методов, принципов и приемов в неигровых процессах с целью наибольшего вовлечения обучающихся в процесс интерактивного взаимодействия. Подобный метод призван для того, чтобы стимулировать в обучающемся соревновательные мотивы: поведенческие принципы мотивации, вовлеченности, статуса, вознаграждения (результативности), поощрения. Для классической «геймификации» характерны такие признаки, как система баллов, игровые сюжетные элементы, проработанные сценарии, рейтингование и соревнование участников между собой и/или с

виртуальными соперниками, корректировка траектории образовательной программы в период прохождения обучения. Интересными решениями связанными с «геймификацией» сегодня становятся различные бонусные программы и программы лояльности, онлайн-конкурсы для потребителей продуктов и услуг, начисление скидок на штрафы ГИБДД, сбор наклеек в супермаркетах с целью получения приза и т.д.

«Диджитализация» образовательного процесса используется в основном, с целью достижения кумулятивного эффекта и позволяет трансформировать не только модель, но и суть корпоративного обучения. Основная особенность тренда «диджитализации» образования заключается в использовании виртуальных интерактивных технологий, так называемого «канала доставки знаний» - в любое время и в любом месте, с применением мобильных устройств и устройств быстрого доступа к электронным ресурсам.

Другой, не менее эффективный и достаточно популярный современный подход к корпоративному обучению персонала называется «коллаборативное обучение». Он построен на принципах тесного взаимодействия, общения между обучающимися либо между обучающимися и преподавателями. Участники такого процесса получают знания через динамичный совместный поиск информации, ее осмысление, обсуждение и применение в различных групповых проектах, креативных сессиях, мозговых штурмах и т.д. «Коллаборативное обучение» персонала особенно эффективно для решения слабоструктурированных задач, многофакторного анализа и других вопросах, для решения которых требуются интеллектуальные усилия группы обучающихся. В современных образовательных проектах «коллаборативное обучение» все чаще применяется не в своей традиционной (очной) форме, подразумевающей простую командную работу, а с применением цифровых технологий и смешенного обучения (например LMS) [7]. В этом смысле «коллаборативное обучение» вполне успешно сочетается с методами «диджитализации» образования.

«Нативное» обучение широко применимо в тех случаях, когда требуется снижение уровня формализации образования персонала и повышение вовлеченности недостаточно активных участников. Суть «нативного» обучения заключается в использовании естественных, привычных для пользователей неформальных каналов связи и коммуникации: мессенджеров, средств обмена быстрыми сообщениями, файлообменников, видеоконференций и пр. Наиболее эффективно такой подход применяется при решении образовательных вопросов, связанных с распространением контента среди обучающихся и дистанционными дискуссиями между пользователями.

«Иммерсивное» обучение персонала является одним из самых популярных инновационных механизмов полного погружения обучающихся в образовательный процесс, и имеет второе название «обучение

через опыт». В «иммерсивном» подходе происходит фактически расширение реальности, полный эффект присутствия, абсолютное переключение внимания обучающегося на некоторую иную реальность, расположенную в виртуальной среде. Основной целью использования таких технологий является некое погружение обучающегося в событийную среду (например, в заводской цех или в шахту), при котором создается прямое соединение между виртуальным контентом и его восприятием, вплоть до тактильных ощущений. В процессе «иммерсивного обучения» трансформируется собственная позиция учащегося по отношению к медиаобразу, и он постепенно превращается из внешнего наблюдателя – во внутреннего участника производственных событий. Среди разновидностей такого обучения выделяют такие виды инновационных подходов, как: симуляции и деловые игры, обучение на рабочем месте, обучение действием.

«Омни-обучение» является клиентоцентричной моделью сервиса в сфере образовательных услуг для корпоративного обучения персонала. Основной особенностью данного метода является стремление к охвату всех возможных каналов коммуникации преподавателя с обучающимися, а приставка «омни» переводится как «существующий повсюду» [8]. Данный тип обучения связан с известным маркетинговым термином «омникальность», который обозначает взаимную интеграцию многочисленных каналов связи и коммуникации (мультиканальность) в единую систему, позволяющую непрерывно взаимодействовать с клиентами (пользователями).

При всем многообразии современных инновационных способов обучения персонала, наиболее распространенным и применимым в большинстве корпораций методом повышения профессиональных компетенций сотрудников является обучение в режиме «смешанной реальности» (гибридная реальность, mixed reality). При таком подходе происходит некое объединение реального и виртуального образовательного пространства, преследующее цель такой комбинации условий и факторов, которая невозможна или ресурсоемка в каждом из пространств в отдельности. «Смешанная реальность» включает в себя такие элементы как смешанное обучение, дополненная реальность и дополненная виртуальность, взаимосвязь между которыми принято называть «виртуальный континуум». Яркими примерами подобного подхода к обучению персонала могут быть: 3D моделирование производственных активов предприятий, боевая реальность в военном тренинге, интерактивное экспериментальное обучение.

Инновационные технологии в системе корпоративного обучения рассматриваются исследователями [9] как один из основных факторов повышения внутрифирменной эффективности работы персонала и характеризуются следующими статистическими наблюдениями и прогнозами:

Рынок корпоративного онлайн обучения достаточно активно развивается и возрастает ежегодными темпами в 6%, поэтапно демонстрируя тенденцию к повышению;

По прогнозам аналитиков, к 2025 году стоимость мирового рынка онлайн технологий в корпоративном обучении может достигнуть 325 млрд. долл. при ежегодном росте в 7,2% [10, 11];

Около 90% крупных европейских корпораций запрашивают у соискателей наличие так называемых «микро-кредитов» (сертификаты, подтверждающие прохождение онлайн-курсов, по получению компетентностных навыков: от ведения деловой переписки и работы с электронными таблицами, до знаний в области больших данных);

Инвестиционные вложения в человеческий капитал в размере одного доллара позволяют получить компании до 30 долларов прибыли благодаря увеличению продуктивности сотрудника, результативно прошедшего онлайн обучение;

Компании, использующие технологии электронного образовательных ресурсов, повышают уровень вовлеченности сотрудников в производственный процесс в среднем на 18%.

### **Заключение**

Таким образом, цифровой мир диктует необходимость постепенной коррекции и совершенствования механизмов управления персоналом и человеческими ресурсами. По опросам [12], проведенным среди более чем 10 тыс. руководителей компаний различных отраслей и служб по работе с персоналом по всему миру были выявлены основные ориентиры кадровых служб, сформированные под влиянием информатизации и цифровых технологий:

- успешнее всего в ближайшем будущем окажутся те организации, которые смогут адаптироваться в современном мире цифровой экономики оперативнее других, согласиться с новыми требованиями рынка труда и приспособиться к быстроменяющимся условиям найма персонала и организации эффективного функционирования трудовых ресурсов;

- процедуры подбора персонала и его обучения окончательно перейдут в цифровую среду, а полная автоматизация HR и HR-аналитики превратит предприятия в «цифровые организации»;

- комплексный подход к вопросам внутрифирменной подготовки и переподготовки персонала приходит на смену разрозненным задачам по повышению квалификации и вовлеченности сотрудников;

- расширение спектра возможностей удаленной работы, дистанционного образования и повышения квалификации в режимах on-line;

- цифровые технологии становятся механизмом «социального лифта» во всех сферах жизни общества: начиная от получения государственных услуг и заканчивая финансовыми аспектами;

- сближение предприятий с другими участниками цифровой экосистемы: исследовательскими и образовательными организациями, компаниями-представителями высокотехнологичной сферы, государственными органами и т.д.

Цифровая революция, охватившая мир и затронувшая все сферы жизнедеятельности людей, в последние несколько лет впечатляет своим масштабом и темпами роста. Потенциал цифровых компетенций сотрудников предприятий занятых на производстве в настоящий момент, также, как и потенциал тех, кто придет на работу в течение ближайших лет достаточно высок и сформирован под влиянием происходящей социальной информатизации общества. Это означает, что усилия предприятий, направленные на подготовку трудовых ресурсов для цифрового мира, могут быть успешными при разумном применении современных образовательных технологий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мамедсупиев М.Д. Оценка качества трудового потенциала//Эко. 2017. – № 5. – с. 173–181

2. Ивановская Л.А. Влияние минимальной заработной платы на рынок труда / Экономика труда / Л.А. Ивановская, №4, 2016. С. 341–358

3. Осипова О.П. Основные этапы педагогического проектирования и экспертизы электронных образовательных ресурсов / О.П. Осипова // Открытое и дистанционное образование. – Томск: Издательство ТГУ, – 2015. – № 2 (58). – С. 76–82.

4. Золкина А.В. Формирование конкурентных компетентностных качеств выпускников отраслевых вузов в условиях взаимодействия с работодателями и партнерами / Д.А. Петрусевич, А.В. Золкина // Сборник материалов межвузовской научной конференции и круглого стола: Экономика отраслевых рынков: формирование, практика и развитие. Самозанятость населения: правовое и экономическое регулирование. – ИТК «Дашков и К», 2017, С. 17–20.

5. Ломоносова Н.В. К вопросу об использовании системы смешанного обучения студентами вузов / Вестник ТГПУ. – 2017. - №5 (182). – С.122–126.

6. Осипова О.П. Проектирование и экспертиза образовательных систем: учебно-методическое пособие для студентов вузов, обучающихся в магистратуре по педагогическому направлению подготовки (44.04.01) /О.П. Осипова, А.У. Анзорова, Н.В. Ломоносова и др.; науч.рук. О.П. Осипова. – М.: МПГУ, – 2016. – 118 с.

7. Алексахин А.В. Особенности применения инновационных технологий для корпоративного обучения персонала / А.В. Алексахин, Д.В. Золкин, Н.В. Ломоносова // Сб. материалов межвузовской научной конференции и круглого стола «Экономика отраслевых рынков: формирование, практика и развитие. Топливо-энергетический комплекс: правовое и экономическое регулирование», Под научной редакцией Н.А. Харитоновой. Москва, – ИТК «Дашков и К», 2018, С. 139–142.

8. Kubrický J., Částková P. Teacher's Competences for the Use of Web Pages in Teaching as a Part of Technical Education Teacher's ICT Competences. Procedia -Social and Behavioral Sciences. 2015. vol. 174. pp. 3236–3242.

9. Ломоносова Н.В. Основные принципы проектирования системы смешанного обучения в вузе / Н.В. Ломоносова // Преподаватель XXI век. – 2017. – № 2, ч.1. – С. 64–71.

10. Rogers L., Twidle J. A pedagogical framework for developing innovative science teachers with ICT//Research in Science & Technological Education. -2013. -vol. 31, Issue 3. – P. 227–251

11. De-Marcos L., Garcia-Lopez E., Garcia-Cabot A. On the effectiveness of game-like and social approaches in learning: Comparing educational gaming, gamification & social networking // Computers & Education. 2016. vol. 95. pp. 99–113

12. Новые правила игры в цифровую эпоху / Исследование «Делойта» «Международные тенденции в сфере управления персоналом» за 2017 год - 2018. – 20 с. **ИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Ломоносова Наталья Владимировна* – к.п.н., ассистент кафедры экономики, *Алексахин Александр Викторович* – к.э.н., доцент кафедры экономики, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Ленинский пр-т, д.4. 119049.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

№ 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 383–391.

**Lomonosova N.V., Alexakhin A.V.**

## **TRAINING LABOUR RESOURCES IN A DIGITAL WORLD**

Continuous Informatization of modern society, digital revolution and associated automation and robotization of production inevitably entail a number of personnel changes. Enterprises are preparing for a new reality in which, one way or another, all employees will need to be involved in digital spaces and be part of digital processes. The high expectations placed on the digital economy are well founded and can serve as a starting point for the development of innovative methods and mechanisms, solutions to complex technological and production problems, etc. However, the problem of personnel development from the point of view of its compliance with the era of global Informatization should be solved today – before the onset of crisis situations that may arise due to the mismatch of the workforce skills required by the current digital world. In this regard, corporate training in the key of the digital revolution is becoming a trend of our time, and employers are seeking to find and hire professionals who are ready for continuous self-development and improvement of their own professional skills. Such types of in-house staff retraining as blended learning, native, collaborative, immersive training, Omni-training, gamification, digitalization, etc.can not only become an effective mechanism for learning specific skills, but also to interest, involve the workforce of enterprises in the overall process of digitalization of society.

The article presents an overview of these and other approaches to the educational process, reflects statistical observations and forecasts of prospects for the use of digital tools in corporate training, formulated key guidelines for personnel services, formed under the influence of information and digital technologies.

Keyword: informatization, information technology, digital economy, learning management system, human resource, staff training, human resource management, human capital.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-383-391

## AUTHORS

Lomonosova N.V., PhD, assistant of the Department of Economics,  
Alexakhin A.V., Ph. D., associate Professor of Economics,  
National University of Science and Technology "MISIS", Leninskiy prospect, 4,  
Moscow, Russia, 119049.

## REFERENCES

1. Mamedsupiev M.D. *Ocenka kachestva trudovogo potentsiala* [Assessment of quality of labor potential]. Eko. 2017. no 5. pp. 173–181
2. Ivanovskaya L.A. *Vliyaniye minimal'noj zarabotnoj platy na rynek truda* [The impact of the minimum wage on the labor market]. Ekonomika truda, no 4, 2016. pp. 341–358.
3. Osipova O.P. *Osnovnye etapy pedagogicheskogo proektirovaniya i ekspertizy elektronnykh obrazovatel'nykh resursov* [The Main stages of pedagogical design and examination of electronic educational resources]. Otkrytoe i distantsionnoe obrazovanie. Tomsk: Izdatel'stvo TGU, 2015. no 2 (58). – S. 76–82.
4. Petrushevich D.A., Zolkina A.V. *Formirovaniye konkurentnykh kompetentnostnykh kachestv vypusknikov otraslevykh vuzov v usloviyakh vzaimodeystviya s rabotodatelayami i partnerami* [Formation of competitive qualities of the competence of graduates of the higher education institutions in interaction with employers and partners]. Sbornik materialov mezhvuzovskoy nauchnoy konferentsii i kruglogo stola: Ekonomika otraslevykh rynkov: formirovaniye, praktika i razvitiye. Samozanyatost' naseleniya: pravovoe i ekonomicheskoe regulirovaniye. ITK «Dashkov i K», 2017, pp. 17–20.
5. Lomonosova N.V. *K voprosu ob ispol'zovanii sistemy smeshannogo obucheniya studentami vuzov* [On the use of the system of blended learning by University students]. Vestnik TGPU. 2017. no 5 (182). pp. 122–126.
6. Osipova O.P., Anzorova A.U., Lomonosova N.V., Osipova O.P. *Proektirovaniye i ekspertiza obrazovatel'nykh sis-tem: uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov vuzov, obuchayushchihsiya v magistrature po pedagogicheskomu napravleniyu podgotovki (44.04.01)* [Design and examination of educational systems: teaching aid for students enrolled in master's degree in pedagogical direction of training (44.04.01)]. Moscow: MPGU, 2016. 118 p.
7. Aleksahin A.V., Zolkin D.V., Lomonosova N.V. *Osobennosti primeneniya innovatsionnykh tekhnologiy dlya korporativnogo obucheniya personala* [Peculiarities of application of innovative technologies for corporate personnel training]. Sb. materialov mezhvuzovskoy nauchnoy konferentsii i kruglogo stola «Ekonomika otraslevykh rynkov: formirovaniye, praktika i razvitiye. Toplivno-energeticheskij kompleks: pravovoe i ekonomicheskoe regulirovaniye», Pod nauchnoy redaktsiej N.A. Haritonovoj. Moscow, ITK «Dashkov i K», 2018, pp. 139–142.
8. Kubrický J., Částková P. *Teacher's Competences for the Use of Web Pages in Teaching as a Part of Technical Education Teacher's ICT Competences*. Procedia -Social and Behavioral Sciences. 2015. vol. 174. pp. 3236–3242.
9. Lomonosova N.V. *Osnovnye principy proektirovaniya sistemy smeshannogo obucheniya v vuze* [The Basic principles of designing a system of blended learning in high school]. Prepodavatel' XXI vek. 2017. no 2, ch.1. pp. 64–71.
10. Rogers L., Twidle J. *A Pedagogical framework for developing innovative science teachers with ICT*. Research in Science & Technological Education. 2013. vol. 31, Issue 3. pp. 227–251
11. De-Marcos L., Garcia-Lopez E., Garcia-Cabot A. *On the effectiveness of game-like and social approaches in learning: Comparing educational gaming, gamification & social networking*. Computers & Education. 2016. vol. 95. pp. 99–113
12. *Novye pravila igry v cifrovuyu epohu* [New rules of the game in the digital age]. Issledovanie «Delojta» «Mezhdunarodnye tendentsii v sfere upravleniya personalom» za 2017 – 2018. 20 p.



В.А. Баранов

## СПОНТАННАЯ СУБЛИМАЦИЯ УГЛЕЙ ПРИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕРМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ

Предложено одно из решений проблемы возникновения больших объемов газа при выбросах в угольных шахтах. Рассмотрены и описаны процессы сублимации и десублимации угольного вещества в подземных условиях. Показано, что квазикристаллы угля, описанные в середине 80-х годов прошлого века автором статьи, могут иметь повышенную удельную поверхность. Размеры квазикристаллов достигают микрон и нанометров. Они являются связующим звеном между кристаллической и аморфной формами вещества. Газодинамические и термические явления, при наличии нарушенных зон с достаточным количеством квазикристаллов с большой удельной поверхностью, могут приводить к процессу сублимации угля. Газодинамические явления на небольших глубинах при значительной влажности и метаноносности, могут приводить к процессу десублимации и к образованию газогидратов. Сублимация имеет экзотермический эффект и реализуется с повышением энтропии. Десублимация имеет эндотермический эффект и реализуется с понижением энтропии. Реальным доказательством сублимации можно считать резонансное выделение разных газов в процессе горения углей. Отсутствие резонансного выделения газов свидетельствует о переходе горения в процесс тления. Холодные и горячие выбросы являются следствием реализации процессов сублимации и десублимации. Холодный выброс характеризуется наличием инея на конусе выброса. Горячий выброс имеет экзогенный характер и отличается повышенной температурой. Ключевые слова: угольная шахта, скопления метана, квазикристалл, сублимация, десублимация, нарушенная зона.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-392-400

Проблема безопасности и охрана труда в горнорудной промышленности вообще и в угольной, в частности, занимает одно из ведущих мест фактически во всех странах с развитой экономикой и наличием значительной сырьевой базы. Актуальность данной проблемы вызвана существенным вкладом в себестоимость продукции затрат на ликвидацию разного рода техногенных аварий, газодинамических (ГДЯ) и термических явлений. В этом списке подземные взрывы, выбросы, пожары – занимают ведущее место не только по степени затрат на

ISSN 0236–1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 392–400.

© В.А. Баранов, 2018.

их ликвидацию, но по объемам затраченного времени на указанные мероприятия. На ликвидацию крупных аварий на угольных шахтах уходят месяцы, а порой и годы. Чтобы ликвидировать шахтные пожары, приходится закрывать участки, горизонты, а иногда и горные предприятия, что приводит к существенным материальным потерям.

Расчёты исследователей показывают, что выделяющиеся при различных газодинамических явлениях объемы метана значительно выходят за рамки сорбционных объёмов угольного вещества. Чтобы объяснить возможность формирования метана в больших объёмах, исследователи разных стран моделируют различные вариации адсорбционных и абсорбционных процессов в угольном веществе, формирование нейронной сети трещин в призабойной части массива [1–5], разрабатывают физико-химическую модель генерации метана под действием тектонических и техногенных процессов [6], концептуальную модель и численный алгоритм расчета истечения газа и выноса угля из зоны внезапного отжима с образованием полости выброса [7], формирование метана из метильных групп, образующихся при выбросе [8], разрабатывают термодинамическую модель, объясняющую механизм образования и эволюцию очагов опасности ГДЯ и метаногенерацию в угольных пластах [9,10], исследуют влияние форм связи метана с угольной матрицей на газодинамические явления [11]. Несмотря на значительные усилия учёных разных стран, комплекс проблем, снижающий безопасность работ на угольных предприятиях, является актуальной проблемой и нуждается в дальнейших исследованиях, что уже сейчас позволяет получать как теоретические, так и прикладные результаты, являющиеся, в основном, промежуточными данными, которые послужат дальнейшему прогрессу безопасности работ на горных предприятиях.

Цель работы. Несмотря на значительный объем выполняемых в данном направлении работ, некоторые аспекты формирования и последующей трансформации углей и связанных с ним газов недостаточно освещены. Целью предлагаемой публикации является краткое изложение взгляда на указанную проблему с точки зрения сублимации угольного вещества и десублимации его газовой составляющей. Первая часть данного процесса происходит с выделением тепла (экзотермическая реакция), вторая – с поглощением тепла (эндотермическая реакция). В этой связи указанные процессы обычно не протекают совместно, но такие возможности не исключаются.

Полученные результаты. Ранее была высказана идея о спонтанном переходе угля в газообразное состояние, но не хватало фактов для утверждения этого процесса [12]. Весной 2018 г обработка данных по самовозгоранию углей привела к результатам, которые позволяют однозначно утверждать наличие такого процесса как на угольных, так и на других горных предприятиях, да и не только на горных предприятиях, но вообще в экзогенных условиях.

Если отобрать штуф угля в шахте, вывезти на поверхность, положить где либо в комнате, то через несколько лет или десятилетий от штуфа останется маленькая кучка неорганической золы, поскольку сама органика перейдет в газообразное состояние – сублимируется. Угольное вещество состоит из газов – углерода (в основном), водорода, кислорода, азота, о чём сказано в Горной энциклопедии (1991). В соответствии с Химической энциклопедией (1994), сублимация или возгонка, это переход вещества из твёрдого состояния в газообразное без плавления, обратный процесс – конденсация вещества их газообразного состояния в твёрдое состояние – называется десублимацией. В угольных шахтах встречаются оба указанных процесса, но связаны они обычно с динамическими, газодинамическими и термическими процессами. Здесь речь идет о спонтанной сублимации, происходящей за очень короткое время или как сказано в Химической энциклопедии скачком.

Таким образом, в природе есть как эволюционная (медленная во времени), так и революционная (спонтанная, проявляющаяся в виде скачка) сублимация и десублимация. Спонтанная сублимация и десублимация относятся к фазовым превращениям первого рода, при которых плотность вещества, термодинамические потенциалы, энтропия меняются скачком, выделяется или поглощается теплота фазового перехода. Нужно отметить, что при спонтанном переходе угля в газ значение энтропии растёт, тогда как при переходе газообразного вещества в твёрдое – снижается.

Перейдём к описанию примеров указанных процессов в разных условиях и в разных веществах, поскольку угольное вещество не единственное с которым эти процессы происходят. Для начала следует указать, что наша Вселенная газовая и водород самый распространённый газ в ней, достаточно и других газов – углерода, кислорода, азота и др. Процессы эволюционной и революционной сублимации и десублимации происходят постоянно как в космосе, так и на нашей Земле. Хвост комет, образующийся при полёте к Солнцу или иной звезде – пример сублимации их вещества. На нашей планете есть значительные объёмы газов в твёрдом состоянии – вся органика, карбонаты, каустобиолиты, галиты, сульфиды, газогидраты и другие минералы и породы. Периодически они сублимируют или десублимируют, что зависит от термодинамических условий.

В данное время, к примеру, в атмосфере слишком мало углекислого газа – около 0,03 %, поэтому доломиты не формируются, несмотря на то, что раньше они формировались, а значит, указанного газа было больше. Объёмы растительности тоже зависят от количества углерода в атмосфере, о чём указано в Геологическом словаре (1978). На Земле процессы испарения и конденсации известны всем со школьной программы, но это не учитывается и учёные выстраивают многочисленные гипотезы «генерации метана» при выбросах угля и газа, поскольку

его количество иногда существенно превышает газоносность углей и вмещающих пород. Слово «иногда» здесь имеет решающее значение, поскольку действительно не каждое газодинамическое явление сопровождается выделением значительных дополнительных объемов газов, в основном метана, если мы рассматриваем угольные шахты.

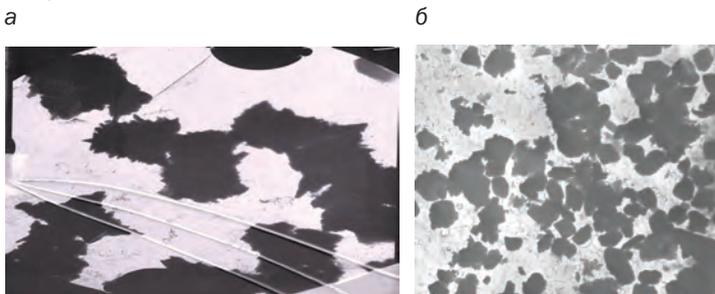
На наш взгляд, причина спонтанной сублимации угля в процессе выброса заключается в наличии нарушенных зон в месте выброса. Именно нарушенные зоны являются причиной динамических, газодинамических и термических явлений в угольных шахтах. Горные удары, выбросы, самовозгорания приурочены именно к нарушенным зонам. Общеизвестно, что в кристаллических породах крепь обычно не используют, поскольку породы там достаточно прочные и горные выработки в них сохраняются длительное время. Для осадочных пород использование крепи необходимо, поскольку породы ещё не достаточно прочные и в нарушенных зонах они по свойствам ближе к осадкам, чем к породам. При переходе из связанных, сцементированных пород в нарушенную зону происходит формирование сдвиговых деформаций, самых опасных, поскольку в них давление на крепь может увеличиваться на порядки. Все горные удары происходят в нарушенных зонах, которых на шахтах от 30 % до 70 % от всего объема углей, по результатам наших исследований. Причём крупные нарушенные зоны могут иметь подзоны, а степень напряжённого состояния в них существенно меняется [13].

Именно в нарушенных зонах часть угольного вещества сублимируется и поэтому свободного газа там существенно больше, что является основной причиной выбросов угля. При выбросе часть угольного вещества – максимально нарушенного может спонтанно (скачкообразно) сублимироваться в газ, обычно углекислый газ и метан. Почему это не происходит всегда, а только в некоторых зонах, можно объяснить с позиций степени нарушения структуры угольного вещества.

В середине 80-х годов уже прошлого века автором данной публикации были открыты и описаны квазикристаллы в веществах всех систем – породах, минералах, минералоидах, искусственных веществах. Указанные структуры являются связующим или переходным звеном между кристаллической и аморфной формами вещества. Формирование квазикристаллов, подобно кристаллизации и десублимации происходит с уменьшением энтропии. Иными словами, избыточная энергия в нарушенных зонах трансформируется в новую структуру, причём, по количеству квазикристаллов и их размерам можно судить о напряжённом состоянии в конкретной нарушенной зоне [14].

На приведенных фотографиях представлены результаты исследования микроструктуры угля под электронным микроскопом. Основной результат здесь, это разная степень сложности поверхности квазикристаллов, сформированных в разных условиях. Образующаяся

сеть микротрещин в тектонически нарушенных зонах представляет уже новую квазикристаллическую структуру угольного вещества с размерами указанных микроструктур до первых микрон и нескольких сот нанометров.



**Рис. 1: (а) Квазикристаллы угля со «сложной» поверхностью, увеличение 4000<sup>х</sup>, (б) квазикристаллы угля с «простой» поверхностью, увеличение 2000<sup>х</sup>**

Теперь абстрагируемся от высоких материй и представим, что нам нужно спичкой зажечь бревно, полено, чурку, щепку. Рассматривая данный перечень, вряд ли кто-либо допустит иную последовательность в степени лёгкости загорания. Данный пример не является уникальным, можно приводить в пример разные по размерам куски и кусочки льда и другие вещества. Смысл примера в размерах, существенно влияющих на скорость реакции. Не расписывая детально очевидные вещи, отметим, что размеры объекта прямо пропорциональны скорости реакции с ним происходящей. Частицы угля со сложной удельной поверхностью имеют повышенную активность для протекания в них физико-химических реакций с минимальным для этого временем.

Что мы имеем в итоге: формирование квазикристаллов в угольном веществе (в частности) – факт, описанный ещё в середине 80-х годов прошлого века; зависимость скорости реакции от объёмов или размера объекта – факт, известный из курсов физики и химии; наконец процесс сублимации или десублимации – факт, широко описанный и применяемый в промышленности, особенно хорошо известный под термином возгонка. Объединив эти три факта мы получаем объяснение возможной трансформации угольного вещества в газы ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ , и др.) при определённых условиях, включающих два обязательных факта – наличие достаточных объёмов квазикристаллов со значительной удельной поверхностью и резкое изменение термодинамических параметров (выброс, взрыв, загорание). Газодинамическое явление происходит там, где уже есть газ в свободной форме и в достаточном количестве. В процессе выброса (например) наиболее мелкая фракция угольных частиц с высокоразвитой удельной поверхностью сублимируется (трансформируется) в газы, более крупные частицы образуют «бешенную муку», частицы

с размером в микроны и нанометры, по удельному весу приближающиеся к атмосферному воздуху. Остальное угольное вещество разрушится до частиц разных размеров, в зависимости от расстояния до эпицентра давлений, вещественного состава, размеров нарушенной зоны, изначального давления газов, степени углефикации угля, влажности и многих других сопутствующих факторов.

Выше было сказано о подтверждении процесса сублимации при анализе самовозгорания углей весной этого года. Данный анализ показал резонансное выделение разных газов на первой стадии горения. Далее горение переходит на стадию тления, где спонтанная сублимация уже не происходит и, после определённого времени, процесс тления прекращается. Но могут быть и рецидивы, если температурный очаг достигнет нарушенной зоны. Таким образом, имея данные газового анализа, мы можем судить о том, на какой стадии находится возгорание, происходит ли сублимация или этот процесс уже завершён.

В заключение необходимо остановиться на процессе десублимации, который тоже реализуется на угольных шахтах, но обычно это происходит на небольших глубинах, где температура ещё не достигает больших значений. Возможно указанный случай где-то описан, но мне это неизвестно. Со слов В.Г. Илюшенко, работавшего главным инженером на шахте им. А.О. Засядько, почва в одной из выработок внезапно разломилась и в указанной выработке пошёл снег. Поскольку детали неизвестны, остаётся только предположить, что значительные объёмы метана, прорвавшиеся из почвы в нарушенной зоне в выработку и повышенная влажность, стали основой для формирования газогидратов. Уменьшение температуры происходит вследствие эндотермической реакции формирования газогидратов. В литературе редко описываются такие факты, но они есть. Формирование газогидратов происходит иногда в процессе выброса угля и газа, когда конус выброшенного угля покрывается инеем. В некоторых старых публикациях встречались такие термины как холодные и горячие выбросы. Здесь горячие выбросы представляли собой процесс сублимации, а холодные – процесс десублимации. В одной из старых публикаций даже предлагалось переводить метан в газогидраты и транспортировать его на гора в специальные ёмкости для последующего использования, такой вот способ экзотической дегазации рассматривался.

Выводы. Природа многообразна и приведенные выше результаты исследований показывают, что многообразие состава угля, условий, в которых он находится, различной степени его микроструктурной нарушенности, термодинамической обстановки, степени увлажнения, глубины, степени углефикации и многих других параметров, могут возникать различные сочетания факторов, приводящие к ГДЯ, динамическим и термическим процессам в угольных шахтах. Правильное понимание этих процессов позволит нам прогнозировать вероятность их возникно-

вения и своевременно реагировать, в идеале управлять этими процессами и, в первую очередь, газовой ситуацией. Да, горняки добывают уголь, а не газ, но просто отмахнуться не получится, это комплексная проблема и решать её необходимо только комплексно. Займут ли своё место в нише научных знаний процессы сублимации и десублимации – покажет время, но то, что это реальные процессы, происходящие сейчас на угольных шахтах – сомнению не подлежит. Объемы этих процессов будут уточняться, в чём и состоит принцип научных исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Booth P., Brown H., Nemcik J., Ren T. Spatial context in the calculation of gas emissions for underground coal mines // International Journal of Mining Science and Technology V. 27, Issue 5, 2017, pp. 787–794.
2. Saghafi A. Determination of the gas content of coal // In: Proceedings of 16th Coal Operators' Conference. University of Wollongong, New South Wales, Australia; 2016.
3. Burra A., Esterle J.S., Golding S.D. Coal seam gas distribution and hydrodynamics of the Sydney Basin // NSW, Australia, Austral J Earth Sci, 61 (3) (2014), pp. 427–451.
4. Mohanty M.M., Pal B.K. Sorption behavior of coal for implication in coal bed methane an overview // Int J Min Sci Technol, 27 (2) (2017), pp. 307–314.
5. Flores R.M. Coal and coalbed gas: fueling the future // Elsevier Science, Burlington (2013).
6. Лукинов В.В., Гончаренко В.В., Суворов Д.А. Генерация метана углем под влиянием техногенных и природных тектонических процессов в горном массиве // Геотехническая механика, 2010. – Вып. 88. – 130–140 с.
7. Трофимов В.А. Внезапный выброс угля и газа. Вынос угля и газа в выработанное пространство // М.: ГИАБ, 2011. №0В1. с.391–405.
8. Фейт Г.Н., Малинникова О.Н. Причины повышенного метановыделения при внезапных выбросах угля и газа в шахтах // М.: ГИАБ, 2008.
9. Булат А.Ф., Дырда В.И. Внезапные выбросы угля и газа в контексте нелинейной неравновесной термодинамики // Уголь Украины, 2013. №12. – с.24–33.
10. Метаногенерация в угольных пластах / А.Ф. Булат, С.И. Скипочка, Т.А. Паламарчук, В.А. Анциферов. – Днепропетровск: Лира ЛТД, 2010. – 328 с
11. Смирнов В.Г., Дырдин В.В., Исмагилов З.Р. и др. О влиянии форм связи метана с угольной матрицей на газодинамические явления, возникающие при подземной разработке угольных пластов // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности, Кемерово, 2017. – с.34–41.
12. Баранов В.А. Причины формирования газодинамических явлений в шахтах // 2-я Российско-Китайская науч. конф. «Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах», Новосибирск, ИГД СО РАН, 2012. – С.198–203.
13. Баранов В.А., Карамушка О.А. Основы прогноза нарушенных зон в угольных пластах // Горный журнал, 2016. №5. – С.95–103.
14. Baranov V.A. Structuring of rock and formation of quasicrystals // Науковий вісник НГУ. – 2013. - №5. – С.11–16. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Баранов В.А. — доктор геол. наук, с.н.с., зав. лаб., Институт Геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, 49005, Украина, г. Днепр, ул. Симферопольская, 2-а, E-mail: [baranov-va@rambler.ru](mailto:baranov-va@rambler.ru), тел.097-506-43-73.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 392–400.

**Baranov V.A.**

### **Fightning sublimation of coals in gas dynamics and thermal phenomena**

One of the solutions of the problem of the occurrence of large volumes of gas during emissions in coal mines was proposed. The processes of sublimation and desublimation of coal matter in underground conditions are considered and described. It is shown that the quasicrystals of coal, described in the middle of the 1980s by the author of the article, can have an increased specific surface area. The sizes of quasicrystals reach microns and nanometers. They are the link between the crystalline and amorphous forms of matter. Gas-dynamic and thermal phenomena, in the presence of disturbed zones which have a sufficient number of quasicrystals with a large specific surface area, can lead to the process of sublimation of coal. Gas-dynamic phenomena at shallow depths with considerable humidity and methane content can lead to the process of desublimation and the formation of gas hydrates. Sublimation has an exothermic effect and is realized with an increase in entropy. Desublimation has an endothermic effect and is realized with decreasing entropy. A real proof of sublimation can be considered as the resonance release of different gases in the process of burning of coals. The absence of resonant emission of gases indicates a transition of combustion to the process of decay. Cold and hot emissions are a consequence of the implementation of sublimation and desublimation processes. Cold emission is characterized by the presence of frost on the emission cone. The hot release has an exogenous character and is characterized by an elevated temperature. An example of the spontaneous formation of gas hydrates in the case of a fault in the soil of mining is given. The possibility of isolating disturbed zones and gas accumulations is the basis for controlling gas-dynamic processes.

Keywords: coal mine, methane accumulations, quasicrystal, sublimation, desublimation, disturbed zone.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-392-400

## AUTHORS

*Baranov V.A., Doctor of Geological Sciences, Senior Researcher, Head of the Laboratory, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Science of Ukraine (49005, Dnepr, Simferopolskaya st., 2a; e-mail: [igtmnanu@yandex.ru](mailto:igtmnanu@yandex.ru), [baranov-va@rambler.ru](mailto:baranov-va@rambler.ru)).*

## REFERENCES

1. Booth P., Brown H., Nemcik J., Ren T. *Spatial context in the calculation of gas emissions for underground coal mines*. International Journal of Mining Science and Technology V. 27, Issue 5, 2017, pp. 787–794.

2. Saghafi A. *Determination of the gas content of coal*. In: Proceedings of 16th Coal Operators' Conference. University of Wollongong, New South Wales, Australia; 2016.
3. Burra A., Esterle J.S., Golding S.D. *Coal seam gas distribution and hydrodynamics of the Sydney Basin*. NSW, Australia, Austral J Earth Sci, 61 (3) (2014), pp. 427–451.
4. Mohanty M.M., Pal B.K. *Sorption behavior of coal for implication in coal bed methane an overview*. Int J Min Sci Technol, 27 (2) (2017), pp. 307–314.
5. Flores R.M. *Coal and coalbed gas: fueling the future*. Elsevier Science, Burlington (2013).
6. Lukinov V.V., Goncharenko V.V., Suvorov D.A. *Generaciya metana uglem pod vliyaniem tekhnogennyh i prirodnyh tektonicheskikh processov v gornom massive*. Geotekhnicheskaya mekhanika, 2010. Vyp. 88. pp. 130–140.
7. Trofimov V.A. *Vnezapnyj vybros uglya i gaza. Vynos uglya i gaza v vyrabotannoe prostranstvo* [Sudden release of coal and gas. Removal of coal and gas in the developed space]. Moscow: GIAB, 2011. no OV1. pp.391–405.
8. Fejt G.N., Malinnikova O.N. *Prichiny povyshennogo metanovydeleniya pri vnezapnyh vybrosah uglya i gaza v shahtah* [Causes of increased methane release in case of sudden emissions of coal and gas in mines]. Moscow: GIAB, 2008.
9. Bulat A.F., Dyrda V.I. *Vnezapnye vybrosy uglya i gaza v kontekste nelinejnoj neravnovesnoj termodinamiki* [Sudden coal and gas emissions In the context of non-linear nonequilibrium thermodynamics]. Ugol' Ukrainy, 2013. no 12. pp. 24–33.
10. Bulat A.F., Skipochka S.I., Palamarchuk T.A., Anciferov V.A. *Metanogeneraciya v ugol'nyh plastah* [Methanogenesis in coal seams]. Dnepropetrovsk: Lira LTD, 2010. 328 p.
11. Smirnov V.G., Dyrdin V.V., Ismagilov Z.R. i dr. *O vliyanii form svyazi metana s ugol'noj matricej na gazodinamicheskie yavleniya, vznikayushchie pri podzemnoj razrabotke ugol'nyh plastov* [About the impact of the forms of methane in coal matrix on gas dynamic phenomena occurring in underground coal mines]. Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti, Kemerovo, 2017. pp. 34–41.
12. Baranov V.A. *Prichiny formirovaniya gazodinamicheskikh yavlenij v shahtah* [Reasons of formation of gas-dynamic phenomena in mines]. 2-ya Rossijsko-Kitajskaya nauch. konf. «Nelinejnye geomekhaniko-geodinamicheskie processy pri otrabotke mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh na bol'shih glubinah», Novosibirsk, IGD SO RAN, 2012. pp. 198–203.
13. Baranov V.A., Karamushka O.A. *Osnovy prognoza narushennyh zon v ugol'nyh plastah* [Basics of the forecast of disturbed zones in coal seams]. Gornyj zhurnal, 2016. no 5. pp. 95–103.
14. Baranov V.A. *Structuring of rock and formation of quasicrystals*. Naukovij visnik NGU. 2013. no 5. pp. 11–16



## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ У ПОДЗЕМНОГО ПЕРСОНАЛА УГОЛЬНЫХ ШАХТ УСТОЙЧИВЫХ НАВЫКОВ БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ НА ОСНОВЕ РИСК — ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

Отмечено, что устойчивая тенденция снижения травматизма и аварийности при разработке угольных месторождений может быть обеспечена за счет превентивного предупреждения причин, приводящих к их возникновению. На основании статистического анализа данных по нарушениям правил безопасности и травматизму в АО «СУЭК-Кузбасс» получены зависимости, связывающие риск травматизма и частоты нарушений правил безопасности. Получены критические значения частоты нарушений правил безопасности, приводящие к росту риска травматизма. Отмечено, что систематическое нарушение правил безопасности влияет на уровень травматизма и аварийности. Показано, что устранение выявленных нарушений правил безопасности приводит к снижению рисков легкого и тяжёлого травматизма. Получена корреляционная зависимость риска травматизма от стажа работы. Определено, что длительность годового периода производственной деятельности достаточна для приобретения необходимого уровня квалификации, гарантирующей необходимый уровень овладения профессией.

Ключевые слова: подземная разработка, угольные шахты, риск травматизма, нарушения техники безопасности, стаж работы, персонал, устойчивые навыки производственной деятельности, визуализация движения, эталонная модель.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-401-410

### 1. Введение

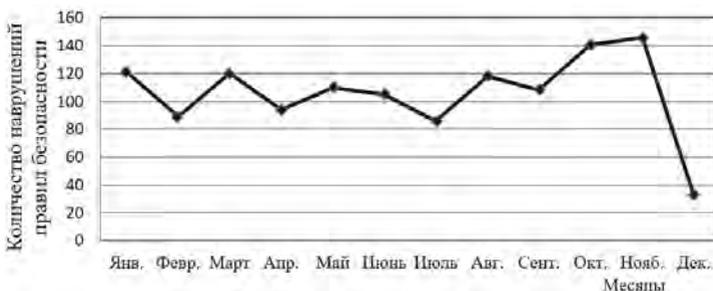
Устойчивая тенденция снижения травматизма и аварийности при разработке угольных месторождений может быть обеспечена за счет превентивного предупреждения причин, приводящих к их возникновению [8, 10, 11, 12]. Во многих случаях причины этих нарушений связаны с недостаточной эффективностью методов обучения безопасному ведению горных работ, не учитывающих связь риска травматизма с нарушениями правил безопасности, а также с несовершенством используемых в настоящее время средств для оперативного контроля трудовой деятельности горнорабочих на всех стадиях производственного процесса.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 401–410.

© С.Г. Гендлер, А.М. Гришина, 2018.

Количество нарушений правил безопасности в течение 2017 года иллюстрируется графиком на рис. 1.

Целью данной работы является исследование влияния нарушений правил безопасности на риск травматизма, разработка методов оценки этого влияния, определение критического значения величины нарушений правил безопасности, после которого увеличивается темп изменения риска травматизма, и обоснование инновационного метода формирования у горнорабочих устойчивых навыков производственной деятельности на основе использования техники визуализации движения.

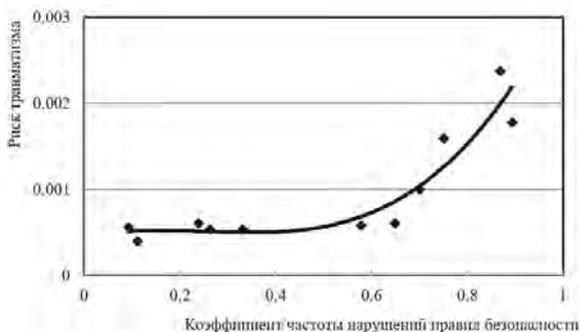


**Рис. 1. Нарушения правил безопасности на шахте С.М. Кирова открытого акционерного общества «СУЭК – Кузбасс», выявленные Ростехнадзором РФ в 2017 г.**

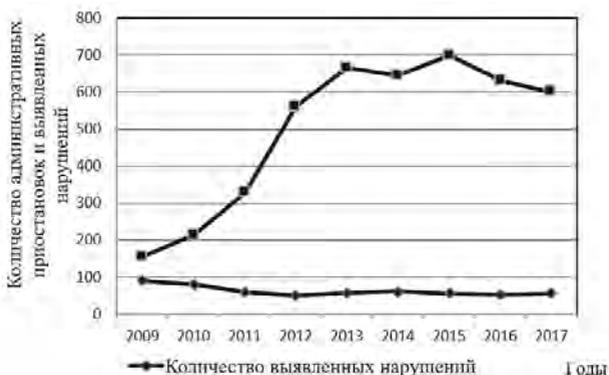
## **2. Анализ влияния нарушений правил безопасности на риск травматизма**

На основании исходных данных, приведенных в классификаторе травматизма АО «СУЭК-Кузбасс» за 2008–2017 гг. и «Единой книги предписаний», по пяти шахтам, а именно: ш. им. 7 Ноября, ш. Рубана, ш. им С.М. Кирова, ш. Польшаевская, ш. Комсомолец, были построены корреляционные зависимости между риском производственного травматизма и коэффициентом частоты нарушений правил безопасности  $K_{c.com.} = N_{c.com.}/N_{pay-roll}$  (рис. 2).

Выполненный анализ показал, что корреляционная связь между коэффициентом частоты нарушений правил безопасности и риском травматизма определяется полиномом третьего порядка при величине корреляционного соотношения 0,93. Из графика на рис. 2. Также следует, что после достижения показателя  $K_{c.com.}$  критического значения 0,5–0,6, начинается интенсивный рост риска травматизма. Предотвращение или изменение этой тенденции может быть достигнуто только при осуществлении превентивных мероприятий, в том числе внеплановых инструктажей по обучению нормам и правилам безопасности при ведении работ в подземных условиях, дополнительных учебных и психологических тренингов и т.п.



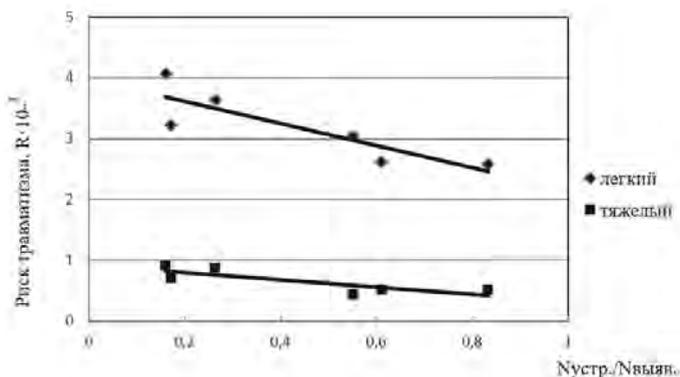
**Рис. 2. Соотношения между риском травматизма и коэффициентом частоты нарушений правил безопасности на шахте им. С.М. Кирова**



**Рис. 3. Количество выявленных нарушений, административных приостановок деятельности за период с 2009 по 2017 годы**

Целесообразность превентивного предупреждения нарушений правил безопасности подтверждается данными, характеризующими сопоставление динамики выявленных нарушений и административных приостановок ведения горных работ [1,5]. При незначительных изменениях в объемах добычи угля, увеличение административных приостановок ведения работ в 4 раза приводит почти к двукратному снижению нарушений правил безопасности (рис. 3).

Систематическое нарушение правил безопасности в конечном итоге сказывается на уровне травматизма и аварийности, а устранение нарушений, наоборот, обуславливает снижение риска производственного травматизма [2, 3, 4]. Данное положение иллюстрируется графиком на рис.4., где показана зависимость рисков легкого и тяжелого травматизма от количества устраненных нарушений ПБ [6].



**Рис. 4. Динамика рисков легкого и тяжелого травматизма от количества устраненных нарушений ПБ**

Корреляционные зависимости, связывающие риски легкого и тяжелого травматизма  $R$  с соотношением между количествами устраненных  $N_{устр.}$  и выявленных нарушений  $N_{выяв.}$  правил безопасности ( $N_{устр.}/N_{выяв.}$ ), при коэффициентах корреляции соответственно равных 0,86 и 0,81, имеют вид:

$$R_{л.тр.} \cdot 10^{-3} = -1,82 \cdot N_{устр.} / N_{выяв.} + 4, \quad (1)$$

$$R_{т.тр.} \cdot 10^{-3} = -0,602 \cdot N_{устр.} / N_{выяв.} + 1. \quad (2)$$

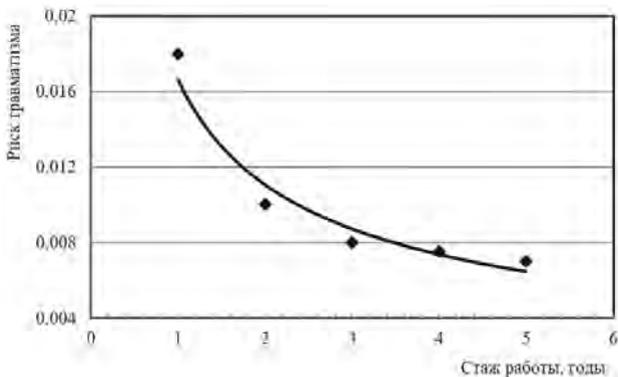
Таким образом, устранение выявленных нарушений правил безопасности приводит к снижению рисков легкого и тяжелого травматизма. При изменении соотношения между количествами устраненных и выявленных нарушений на 1% риски легкого и тяжелого травматизма сокращаются соответственно на 2,2% и 0,4%.

### **3. Оценка возможности обучения горнорабочих устойчивым навыкам выполнения технологических операций на основе техники визуализации движения**

Известно, что одним из факторов, влияющих на травматизм и аварийность, является стаж работы. Данный вывод подтверждается и данными, характеризующими производственный травматизм и аварийность на АО «СУЭК-Кузбасс» за период 2008–2017 гг. (рис. 5).

Зависимость риска травматизма от стажа работы при величине корреляционного соотношения, равного 0,97, описывается корреляционной зависимостью вида:

$$R_{i,r.} = 0,017 \cdot T^{-0,59}. \quad (3)$$



**Рис. 5. Зависимость риска травматизма горнорабочих и от стажа работы**

Из графика на рис. 5 следует, что с увеличением стажа работы от 1 года до 4 и более лет риск травматизма снижается в 2 раза. Одной из причин более высокого уровня травматизма в начальный период производственной деятельности является низкая квалификация работающего персонала, связанная с отсутствием у них устойчивых навыков и приемов осуществления технологических операций при добычных и проходческих работах. Вместе с тем, анализ данных рис.5, показывает, что длительности годового периода производственной деятельности, как правило, является достаточной для приобретения необходимого уровня квалификации, гарантирующей необходимый уровень овладения профессией [7].

Для формирования в подземных условиях устойчивых навыков выполнения технологических операций нами предложен метод обучения горнорабочих. В основе этого метода лежит техника визуализации кинематики движения обучаемого персонала при выполнении заданной технологической операции и последующее сопоставление полученных результатов с «эталонной» моделью, характеризующей работу персонала, имеющего необходимый стаж и опыт работы [9].

Проверка предложенного метода обучения была осуществлена применительно к профессии проходчика, для которой разработан комплекс двигательных действий, имитирующих элементы его профессиональной деятельности.

На основании анализа комплекса двигательных действий были определены наиболее важные с позиции биомеханики элементы профессиональной деятельности проходчика, в том числе: зачистка лунки (канавки) под установку стойки рамной крепи; установка гидростоек; усиления под верхняка; зачистка от штыба и кусков породы межштокового пространства секций механизированной крепи.

Изучение двигательных действий проходчика в условиях, приближенных к шахтным, осуществлялось в лаборатории на стенде, представляющем собой модель горной выработки в натуральную величину. Испытуемый находился в модели выработки и выполнял комплекс движений, соответствующих движениям проходчика в реальной обстановке.

Исследование проводили с привлечением 12 добровольцев мужского пола, возрастом от 25 до 41 года, которые были разделены на две одинаковых по численности группы. Добровольцы первой группы («эталонной») имели профессиональное образование и опыт практической работы в горнодобывающей промышленности. Добровольцы второй группы не имели специализированного образования и навыка работы по данной профессии.

Сущность исследования заключалась в регистрации и сравнении биомеханических характеристик двигательных актов добровольцев каждой из групп. Оцениваемой характеристикой являлась подвижность в крупных суставах верхних конечностей и позвоночника добровольцев, имитирующих выполнение элементов профессиональной деятельности проходчика. В качестве количественных показателей были приняты амплитуды движения суставов верхних конечностей и позвоночника добровольцев, которые определялись проекциями трехмерных углов, зарегистрированных в пространстве при перемещении датчиков, закрепленных на теле.

Для регистрации и анализа биомеханических характеристик двигательных актов добровольцев использовали комплекс для диагностики, лечения и реабилитации больных с двигательными патологиями «Траст-М» (ООО «Неврокор», г. Москва, Россия), включающий в себя 7 беспроводных инерциальных датчиков с системами для их крепления на сегментах тела и персональный компьютер со специализированным программным обеспечением (см. рис. 6).

Каждый доброволец 20-тикратно последовательно выполнял (имитировал) каждый из вышеописанных элементов профессиональной деятельности горного рабочего в условиях лаборатории (при нормальной освещенности и без ограничений в пространстве) и в условиях модели горной выработки.

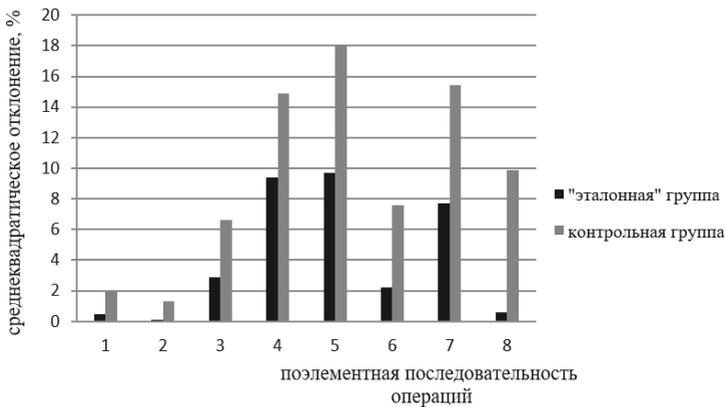
Передача информации от датчиков на персональный компьютер осуществлялась по bluetooth-интерфейсу.

Выходные параметры регистрируемой информации представляли собой усредненные в пространстве значения углов перемещения суставов конечностей и позвоночника.

Последующая обработка экспериментальных данных заключалась в определении абсолютных величин среднеквадратических отклонений усредненных значений углов перемещения суставов конечностей и позвоночника для добровольцев каждой из групп. Анализ проведенных экспериментов показал:

- для добровольцев контрольной группы характерно по сравнению с «эталонной» группой большее значение среднеквадратического отклонения, что является следствием разной степени подготовки персонала при выполнении данной технологической операции (рис. 7).

- в «эталонной» группе, напротив, независимо от антропометрических особенностей добровольцев суммарная величина среднеквадратического отклонения при поэлементной последовательности выполнения рассматриваемой технологической операции в среднем на 30% меньше, что свидетельствует о стабильности производственных навыков у горнорабочих и может быть принято в качестве показателя для оценки профессиональных качеств у обучаемого персонала (см. рис. 7).



**Рис. 6. Среднеквадратические отклонения амплитуд перемещения в «эталонной» группе и группе контрольной группе**

Таким образом, показателем для оценки степени овладения навыками профессиональной деятельности обучаемого подземного персонала может считаться суммарная величина среднеквадратического отклонения амплитуды перемещения рабочих органов, установленная для горнорабочих со значительным опытом работы в конкретных горнотехнических условиях.

**Выводы:**

1. Снижение производственного травматизма и аварийности связано с перехода от ликвидации последствий к превентивному предупреждению. В качестве одного из критериев при этом может быть выбрано число нарушений правил безопасности, в том числе повторяющихся нарушений.

2. Показателем для определения периодичности организационного вмешательства в производственную деятельность, в том числе в проведение внеплановых инструктажей по обучению нормам и пра-

вилам безопасности, может являться величина соотношения между риском производственного травматизма и частотой нарушений правил безопасности, равная 0,5–0,6, при достижении которой характерна тенденция к росту риска травматизма.

3. Связь между риском производственного травматизма и частотой возникновения нарушений правил безопасности описывается линейной корреляцией со значениями коэффициентов корреляции, превышающих 0,8, что дает возможность для прогноза риска травматизма при текущей величине нарушений.

4. Одной из причин повышенного уровня травматизма в начальный период работы подземного персонала (в течение первого года) следует считать отсутствие устойчивых навыков осуществления профессиональной деятельности, что связано с недостаточной эффективностью системы обучения безопасным приемам труда.

5. Система обучения подземного персонала устойчивым навыкам производственной деятельности, должна быть ориентирована на достижение в ходе тренировочного процесса минимальной величины отклонения показателя, характеризующего последовательность выполнения тестируемыми горнорабочими данной технологической операции, от показателя, выбранного в качестве «эталонного».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Артемьев В.Б., Галкин В.А., Макаров А.М., Кравчук И.Л.* Механизм предотвращения реализации опасной производственной ситуации// Уголь. – 2016. – №5. – С.73–77.

2. *Баскаков В.П.* Организационно-технологические средства снижения аварийности и травматизма на угольных шахтах// Горный Информационно-аналитический Бюллетень. Спецвыпуск: безопасность в угледобыче. – 2009. – С.45–49.

3. *Бородуля Е.Б., Жирнов А.В.* Проблема оценки эффективности хозяйственной деятельности предприятия// Международный технико-экономический журнал. – 2014. – №2. – С.43–49.

4. *Бухтояров В.Ф.* Проблемы и пути обеспечения безопасности и охраны труда// Международный журнал экспериментального образования. – 2015. -№5(1). – С.76–78.

5. *Гендлер С.Г.* Повышение эффективности обучения горнорабочего безопасным приемам труда – основа для снижения производственного травматизма и аварийности/ С.Г. Гендлер, А.М. Гришина// Горный информационно-аналитический бюллетень.– МГГУ. – 2017. – №4. – С. 318–325.

6. *Gendler S.G.* Optimization of expenditures for labor protection at deep mining/ S.G. Gendler, A.M. Grishina, E.A. Kochetkova// Eurasian Mining. – 2017. – № 2. – С. 35 – 39.

7. *Гендлер С.Г.* Методика оценки состояния охраны труда в вертикально-интегрированных угольных компаниях по фактору производственного

травматизма/ С.Г. Гендлер, А.М. Гришина, Л.Ю. Самаров// Известия ТулГУ. НаукиоЗемле. — 2017. -№4. — С. 97 — 108.

8. *Manikam P.* Safety Management of Small-Sized Chemical Waste Treatment Facilities in Victoria// Australia. Management. — 2012 — №2(5). — С. 221—231.

9. Патент 171718 Российская Федерация МПК G09В 9/00 Тренажер для обучения горнорабочих безопасным приемам работы/ С.Г. Гендлер, А.М. Гришина, А.М. Герегей; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский горный университет. — № 2017102068; заявл. 23.01.2017; опубл. 13.06.2017, Бюл. № 17. — 8 с.

10. *Hopkins A.* Issues in safety science//Safety Science. — 2014. — №67.- С.6—14.

11. *Wegman F., Hagenzieker M.* Editorial safety science special issue road safety management// Safety Science. — 2010. — № 48(9).- С.1081—1084.

12. *Wu S., Zhiyu S., Mingzhong G., Li Y.* Analysis of regularity and occurrence causes of coal-gas dynamic disasters accidents// Progress in MineSafety Science and Engineering. — 2014. — С. 800. **ИИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Гендлер Семен Григорьевич* — д-р техн. наук, проф., sgendler@mail.ru,  
*Гришина Анастасия Михайловна* — аспирант, grishina.anastas@yandex.ru,  
Санкт-Петербургский горный университет, Россия, Санкт-Петербург.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 401–410.

**Gendler S.G., Grishina A.M.**

### **Peculiarities of generation of coal mines underground staff of stable attainments of safe operation oriented the risk-based approach**

It was noted that a stable tendency to reduce injuries and accidents in coal mining can be ensured by prevention of the causes leading to their occurrence. Based on the statistical analysis of data on security compromises and injuries in JSC “SUEK — Kuzbass”, dependencies linking the risk of injury and the frequency of security violations were obtained. Critical values of the frequency of security compromises, leading to an increased injury risk, were obtained. It is noted that systematic violation of preventive regulations impact on accident rate. It was shown that the elimination of detected security violations leads to a reduction in the light and severe risks injuries. The correlation dependence of injury risk on length of service is established. It is defined that duration of the annual period of production activity is enough for acquisition of necessary skill level, guaranteeing the desired level of learning of trade.

An innovative method for the formation of miners' sustainable production skills, for the implementation of production operations in mining and drivage, was proposed and tested in laboratory conditions. It is noted that this method is based on the trained personnel motion visualization technique, during the execution of a given technological operation, and the subsequent comparison of the results with a “reference” model, characterizing the work of personnel who have the necessary length of service and work experience.

Key words: underground working, coal mine, injury risk, violation of safety system, length of work, personnel, stable attainments of work activity, visualization of motion, sample part.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-401-410

## AUTHORS

Gendler S.G., *doctor of technical science, professor of Industrial Safety Department, sgendler@mail.ru,*  
Grishina A.M., *postgraduate, grishina.anastas@yandex.ru,*  
Saint-Petersburg mining university, Russia.

## REFERENCES

1. Artem'ev V.B., Galkin V.A., Makarov A.M., Kravchuk I.L. *Mekhanizm predotvrashcheniya realizacii opasnoj proizvodstvennoj situacii* [Mechanism of prevention of realization of a dangerous production situation]. Ugol'. 2016. no 5. pp.73–77.
2. Baskakov V.P. *Organizacionno-tekhnologicheskie sredstva snizheniya avarijnosti i travmatizma na ugol'nyh shahtah* [Organizational and Technological Means to Decrease Accident and Injury Hazards at Coal Mines]. Gornyj Informacionno-analiticheskij Byulleten'. Specvyпуск: bezopasnost' v ugledobyche. 2009. pp. 45–49.
3. Borodulya E.B., Zhirnov A.V. *Problema ocenki effektivnosti hozyajstvennoj deyatel'nosti predpriyatiya* [The problem of assessing the effectiveness of the economic activity of the enterprise]. Mezhdunarodnyj tekhniko-ekonomicheskij zhurnal. 2014. no 2. pp. 43–49.
4. Buhtoyarov V.F. *Problemy i puti obespecheniya bezopasnosti i ohrany truda* [Problems and ways of safety and labor protection]. Mezhdunarodnyj zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya. 2015. no 5(1). pp. 76–78.
5. Gendler S.G., Grishina A.M. *Povyshenie effektivnosti obucheniya gornorabochego bezopasnym priemam truda osnova dlya snizheniya proizvodstvennogo travmatizma i avarijnosti* [Improving the effectiveness of the training of miners in safe work practices is the basis for the reduction of occupational injuries and accidents]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'. MGGU. 2017. no 4. pp. 318–325.
6. Gendler S.G., Grishina A.M., Kochetkova E.A. *Optimization of expenditures for labor protection at deep mining* [Optimization of expenditures for labor protection at deep mining]. Eurasian Mining. 2017. no 2. pp. 35–39.
7. Gendler S.G., Grishina A.M., Samarov L.Yu. *Metodika ocenki sostoyaniya ohrany truda v vertikal'no-integrirrovannyh ugol'nyh kompaniyah po faktoru proizvodstvennogo travmatizma* [Method of assessment of the state of labor protection in vertically integrated coal companies on the factor of industrial injuries]. Izvestiya TulGU. NaukioZemle. 2017. no 4. pp. 97–108.
8. Manikam P. *Safety Management of Small-Sized Chemical Waste Treatment Facilities in Victoria*. Australia. Management. 2012 no 2(5). pp. 221–231.
9. *Patent 171718 Rossijskaya Federaciya MPK G09B 9/00 Trenazher dlya obucheniya gornorabochih bezopasnym priemam raboty/ Gendler S.G., Grishina A.M., Geregej A.M.; zayavitel' i patentoobladatel' Sankt-Peterburgskij gornyj universitet. no 2017102068; zayavl. 23.01.2017; opubl. 13.06.2017, Byul. no 17. 8 p.*
10. Hopkins A. *Issues in safety science*. Safety Science. 2014. no 67. pp. 6–14.
11. Wegman F., Hagenzieker M. *Editorial safety science special issue road safety management*. Safety Science. 2010. no 48(9). pp. 1081–1084.
12. Wu S., Zhiyu S., Mingzhong G., Li Y. *Analysis of regularity and occurrence causes of coal-gas dynamic disasters accidents*. Progress in MineSafety Science and Engineering. 2014. S. 800.



## УЛУЧШЕНИЕ СВЕТОВОЙ СРЕДЫ ПЕРСОНАЛА УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ КОМПАНИЙ НА ОСНОВЕ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ

Как показывают статистические данные, большинство инцидентов на угольных предприятиях происходит в ночные смены и связано, в том числе, с недостаточным уровнем освещённости рабочих мест. Особенно сильно эта тенденция проявляется на угольных разрезах и элементах поверхностного комплекса шахт. Условия освещения влияют на зрение и состояние нервной системы рабочих, а его недостаточный уровень напрямую отражается на работоспособности и утомляемости. Существует проблема выбора подходящего источника освещения рабочих мест в шахтах и разрезах. В частности, для этих целей широко применяются люминесцентные лампы. В настоящее время, светодиодное освещение становится наиболее перспективной осветительной технологией, вследствие энергоэффективности. Ожидается, что светодиодные технологии будут доминировать на глобальном рынке освещения к 2020 г. В настоящей работе проводится сравнение текущего уровня освещённости угольного разреза со светодиодным освещением. Опыт Германии, Австралии и других развитых горнодобывающих стран показывает, что использование солнечной энергии в горной промышленности является перспективным, вследствие её экологической безопасности. Солнечные энергосистемы могут быть особо эффективны на разрезах и на поверхностных комплексах шахт, расположенных в районах с высоким уровнем солнечной радиации, например, в южной Сибири, где почти 300 дней в году ясная погода. При этом имеется вариант, когда подобные локализованные солнечные энергетические системы могут быть установлены на уровне регионального кластера, а не только на отдельных участках разрезов и поверхностного комплекса шахт. Ключевые слова: освещённость рабочих мест в угольной шахте; светодиодные технологии; возобновляемые источники энергии; солнечные энергосистемы.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-411-417

### Цель работы

Различные технологии освещения применяется в горной промышленности в настоящее время. Например, для освещения карьерных дорог используются натриевые лампы высокого давления, дающие большой световой поток и эффективность [1]. Светодиодные технологии успешно применяются, в частности, для освещения штреков и в фарах

ISSN 0236–1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 411–417.

© С.В. Ковшов, И.А. Воденников, 2018.

добывающих машин [4]. ЗАО ПО «Электроточприбор» выпускает взрывозащищённые светодиодные светильники для обеспечения освещения в потенциально взрывоопасных средах – шахтах, в нефте- и газодобыче и пр. [5] Кроме устойчивости к перепадам напряжения, светодиодные лампы имеют ещё одно преимущество перед газоразрядными лампами, лампами накаливания и флуоресцентными лампами: в отличие от перечисленных, светодиодные лампы дают направленный свет, а не рассеянный, что позволяет фокусировать свет непосредственно на рабочей зоне и снизить светопотери [11]. Светодиодное освещение способствует лучшему обнаружению опасностей в ближнем поле зрения, значительно снижая среднее время обнаружения [12]. Использование светодиодного освещения при работе анкероустановщика способствует более быстрому обнаружению опасностей и, как следствие, сохранению жизни и снижению частоты и тяжести повреждений рабочих [13].

Как показывает практика, в условиях угольных разрезов в России наружное освещение на участке открытых горных работ осуществляется преимущественно при помощи прожекторов мощностью 400, 1000, 1500 и 5000 Вт, размещённых на металлических передвижных опорах (автономные осветительные мачты) или конструктивных элементах на высоте до 15 м.

Основные недостатки систем освещения на разрезах и поверхностных комплексах шахт:

- Отсутствует осевая вращательная симметрия;
- Равноудаленное расположение автономных осветительных мачт обуславливает слабое площадное распространение света;
- Отсутствует возможность изменения телесного угла;
- Устаревшие типы прожекторов с большим потреблением энергии.
- Обеспечение только необходимого минимума уровня освещённости на расстоянии свыше 120 метров.

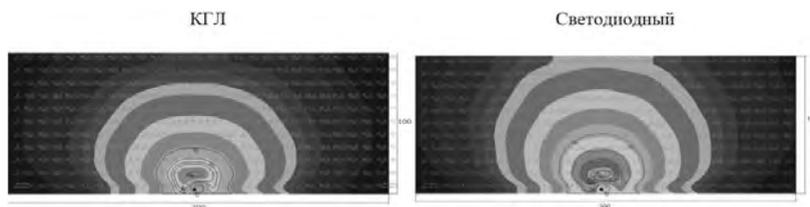
Для повышения эффективности осветительных систем предлагается заменять текущие лампы накаливания и кварцево-галогенные лампы на 20-ти передвижных мачтах на светодиодные лампы.

В настоящее время геолого-разведочные работы проводятся в широком географическом диапазоне на территории России. Возникает проблема устойчивого энергоснабжения выработок, учитывая тот факт, что более 70 % территории страны имеет децентрализованное энергоснабжение: в основном, это дизельные электростанции, либо другие источники, основанные также на сжигании углеводородного топлива [7]. При использовании таких систем возникает значительное шумовое и экологическое загрязнение. Кроме того, в особо удалённых районах стоимость произведённой таким образом электроэнергии возрастает весьма значительно, определяясь необходимостью транспортировки топлива в данный район. Поэтому использование возобновляемых источников энергии (в данной работе предлагается использование солнечных пане-

лей) является хорошей альтернативой. Территория России имеет необходимые значения инсоляции для успешного внедрения солнечных энергосистем. Стоит отметить, что в процессе эксплуатации такие системы должны регулярно очищаться от пыли [2]. Для дополнительного пылеподавления могут быть применены химические агенты [8], либо произведена биогенная обработка [9]. Преимуществами использования солнечной энергии являются её повсеместность и экологичность: выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу отсутствуют (нет парникового эффекта), а также не образуются оксиды серы и азота, как при традиционной генерации, что окажет положительный эффект на здоровье населения, снизив процент дыхательных заболеваний [10]. Вследствие вышеприведённых причин, реализация гибридной системы выработки энергии на основе солнечных панелей и дизель-генерации является перспективной.

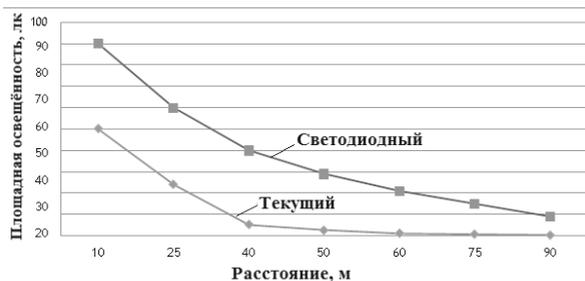
### Результаты

Оценим возможную замену существующих ламп на светодиодные лампы. С помощью программы «DIALux» проведены расчёты освещённости текущего прожектора и светодиодного прожектора (рис. 1).



**Рис. 1. Освещённость текущего прожектора КГЛ и проектируемого светодиодного**

Как видно из рис. 1, освещённость от светодиодного прожектора значительно превышает степень освещённости от текущего прожектора с кварцево-галогенными лампами. Сравнение светотехнических характеристик светодиодного прожектора и текущего прожектора приведено на рис. 2.



**Рис. 2. Зависимость освещённости от расстояния для текущего прожектора и светодиодного прожектора**

Как видно из рис. 2, использование светодиодных прожекторов позволит в несколько раз увеличить освещённость рабочих мест.

Низкая потребляемая мощность проектного светодиодного прожектора, при установке на базовый вариант осветительной мачты, создаст условия работы дизельного двигателя вхолостую и обеспечит неоправданно большое потребление дизельного топлива. Поэтому для выработки необходимой энергии взамен дизельной генерации достаточно будет установить передвижные солнечные панели средней площадью 9 м<sup>2</sup> каждая.

Климатические условия предприятия позволяют использовать сопутствующую энергию в полном объеме и обеспечивать бесперебойную работу установки со светодиодными прожекторами и солнечными панелями в ночной период на протяжении 6 месяцев в период с марта по август. Данные по дневной сумме солнечной радиации для 54<sup>0</sup> северной широты азиатской части России приведены в таблице 1.

Таблица 1

#### Дневная сумма солнечной радиации

Дневная сумма солнечной радиации, кВт·час/м <sup>2</sup>						
Город	Янв	Фев	Март	Апр	Май	Июнь
Новокузнецк	0,69	1,37	3,02	4,08	5,05	5,48

Окончание табл. 1

Дневная сумма солнечной радиации, кВт·час/м <sup>2</sup>						
Город	Июль	Авг	Сент	Окт	Нояб	Дек
Новокузнецк	5,01	4,29	2,93	1,44	0,8	0,62

Показатель эффективности использования солнечной энергии в регионе – плотность энергии солнечного света в ясный день. В Новокузнецке это показатель может достигать 1200 ватт на м<sup>2</sup>, а в Германии он не превышает 800 ватт на м<sup>2</sup>. Между тем, количество установленных солнечных панелей в Германии одно из самых больших в мире. Сибирь имеет колоссальный ресурс возобновляемых источников энергии.

В период с сентября по февраль, 6 месяцев, рекомендуется использовать маломощный дизель-генератор, расположение которого предусматривается под мачтой. На целесообразность использования такого резервного источника энергии указывают и данные работы [6], где, кроме того, сообщается о перспективности использования вакуумных солнечных коллекторов: несмотря на бóльшую материалоемкость и капиталовложения по сравнению с электросетями, эксплуатационные затраты в два раза ниже, а стоимость 1 кВтч энергии в три раза ниже, чем при питании от электрических сетей и от дизель-генераторных установок [6]. Рассчитано, что в предлагаемой гибридной энергосистеме доля возобновляемой энергии составит до 85 %.

Экономический расчет показывает, что срок окупаемости гибридной энергосистемы составляет 4,75 года, что коррелирует с данными работы [3], свидетельствующими, что суммарные затраты на устройство осветительной сети в подземных горных выработках на основе светодиодных светильников по сравнению с люминесцентными светильниками уменьшаются через 3,5 года, и затем экономический эффект становится ещё более очевиден. Внедрение гибридной системы позволит получить хороший экологический эффект и окажет положительное влияние на состояние здоровья персонала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chowdhury, O., & Tripathy, D.P. (2014). Design of haul road illumination system for an opencast coal mining project—a case study. *LEUKOS*, 10(3), 133–143.
2. Tripathi, A., Murthy, C.S., & Aruna, M. (2016). Influence of mine environmental parameters on the performance of solar energy system - a review. *Concurrent Advances in Mechanical Engineering*, 2, 1–5.
3. Истомин А.М., Петров Г.М., Кутепов А.Г. К устройству светодиодного освещения в подземных горных выработках // Горные науки и технологии. – 2013. – №. 10. – С. 25–37.
4. Дубилер Ю.С. Светодиоды: широкий шаг в шахту // Уголь. – 2011. – №. 5. – С. 60–63.
5. Кондратьева Л.А. Приборы нового поколения ЗАО «ПО «Электроточприбор» для шахтеров // Уголь. – 2017. – №. 8 (1097). – С. 117–118.
6. Степаненко В.П. Перспективы применения в горной промышленности нетрадиционных возобновляемых источников и комбинированных накопителей энергии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – №. 10. – С. 93–104.
7. Бельский А.А., Яковлева Э.В. Обоснование возможности использования возобновляемых источников энергии для энергоснабжения объектов минерально-сырьевого комплекса // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – №. 2–2. – С. 63–67.
8. Kovshov S., & Kovshov V. Chemical Technology of Dust Suppression on Open-Pit Mines // *International Journal of Ecology & Development*<sup>TM</sup>, 2015, Vol. 30, no. 3, pp. 55–67.
9. Kovshov S.V., & Kovshov V.P. Biogenic Fixation of Dusting Surfaces // *Life Science Journal*, 2014, Vol.11, no. 9, pp. 401–404.
10. Hosenuzzaman M., Rahim N.A., Selvaraj J., Hasanuzzaman M., Malek A.B. M.A., & Nahar A. Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, Vol. 41, pp. 284–297.
11. Jenkins D., Bhargava A. LED Lighting: Maximizing the reliability, safety, and efficiency of light fixtures in hazardous environments // *IEEE Industry Applications Magazine*, 2015, Vol. 21, no. 1, pp. 64–67.
12. Sammarco J.J., & Lutz T. Visual performance for incandescent and solid-state cap lamps in an underground mining environment // *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2011, Vol. 47, no. 5, pp. 2301–2306.

13. Sammarco J.J., Macdonald B.D., Demich B., Rubinstein E.N., & Martell M.J. LED lighting for improving trip object detection for a walk-thru roof bolter // Lighting Research & Technology, 2018, Vol. 0, pp. 1–17. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Ковшов Станислав Вячеславович* – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности производств, kovshovsv@mail.ru,

*Воденников Илья Александрович* – аспирант кафедры безопасности производств,

Санкт-Петербургский горный университет.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 411–417.

**Kovshov S.V., Vodennikov I.A.**

### **Improvement of mining personnel lighting conditions on the basis of autonomous power supply**

As the statistics show, most incidents in coal enterprises occur in night shifts and are associated, among other things, with insufficient level of workplace lighting. This tendency is especially strong in coal cuts and elements of the surface complex of mines. Illumination conditions affect the eyesight and condition of the nervous system of workers, and insufficient level of lighting directly affects the performance and fatigue.

There is a problem of choosing a suitable source of workplace lighting in mines and cuts. In particular, fluorescent lamps are widely used for these purposes. Currently, LED lighting is becoming the most promising lighting technology, due to energy efficiency. It is expected that LED technology will dominate the global lighting market by 2020. In this study, the current level of illumination of a coal mine with LED lighting is compared.

The experience of Germany, Australia and other developed mining countries shows that the use of solar energy in the mining industry is promising, due to its environmental safety. Solar energy systems can be particularly effective in cuts and surface complexes of mines located in regions with high solar radiation, for example in southern Siberia, where the weather is clear almost 300 days a year. In this case, there is a variant where similar localized solar energy systems can be installed at the level of a regional cluster, and not only in individual sections of cuts and surface complex of mines. In this study the use of a hybrid power system based on solar panels and a low-power diesel generator is suggested, to reduce costs and improve the environmental friendliness of power generation.

Keywords: illumination of workplaces in a coal mine; LED technology; renewable energy sources; solar power systems.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-411-417

## **AUTHORS**

*Kovshov S.V., Ph.D.*, Associate Professor, e-mail: kovshovsv@mail.ru,

*Vodennikov I.A., Postgraduate,*

Saint Petersburg Mining University, Russia.

## REFERENCES

1. Chowdhury, O., & Tripathy, D.P. (2014). *Design of haul road illumination system for an opencast coal mining project—a case study*. LEUKOS, 10(3), 133–143.
2. Tripathi, A., Murthy, C.S., & Aruna, M. (2016). *Influence of mine environmental parameters on the performance of solar energy system a review*. Concurrent Advances in Mechanical Engineering, 2, 1–5.
3. Istomin A.M., Petrov G.M., Kutepov A.G. *K ustrojstvu svetodiodnogo osveshcheniya v podzemnyh gornyh vyrabotkah* [The device led lighting in underground mining]. Gornye nauki i tekhnologii. 2013. no . 10. pp. 25–37.
4. Dubiler Yu.S. *Svetodiody: shirokij shag v shahtu* [LEDs: a very big step in mine]. Ugol'. 2011. no . 5. pp. 60–63.
5. Kondrat'eva L.A. *Pribory novogo pokoleniya ZAO «PO «Elektrotochpribor» dlya shahterov* [New generation Devices of JSC « PO «Electrotochpribor» for miners]. Ugol'. 2017. no . 8 (1097). pp. 117–118.
6. Stepanenko V.P. *Perspektivy primeneniya v gornoj promyshlennosti netradicionnyh vozobnovlyaemyh istochnikov i kombinirovannyh nakopitelej energii* [Prospects of application in the mining industry of non-traditional renewable sources and combined energy storage]. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). 2016. no 10. pp. 93–104.
7. Bel'skij A.A., Yakovleva E.V. *Obosnovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya vozobnovlyaemyh istochnikov energii dlya energosnabzheniya ob'ektov mineral'no-syr'evogo kompleksa* [Justification of the possibility of renewable energy sources for energy supply of objects of the mineral complex]. Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya. 2013. no 2–2. pp. 63–67.
8. Kovshov S., & Kovshov V. *Chemical Technology of Dust Suppression on Open-Pit Mines // International Journal of Ecology & Development™*, 2015, Vol. 30, no. 3, pp. 55–67.
9. Kovshov S.V., & Kovshov V.P. *Biogenic Fixation of Dusting Surfaces*. Life Science Journal, 2014, Vol.11, no. 9, pp. 401–404.
10. Hosenuzzaman M., Rahim N.A., Selvaraj J., Hasanuzzaman M., Malek A.B. M.A., & Nahar A. *Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, Vol. 41, pp. 284–297.
11. Jenkins D., Bhargava A. *LED Lighting: Maximizing the reliability, safety, and efficiency of light fixtures in hazardous environments*. IEEE Industry Applications Magazine, 2015, Vol. 21, no. 1, pp. 64–67.
12. Sammarco J.J., & Lutz T. *Visual performance for incandescent and solid-state cap lamps in an underground mining environment*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, Vol. 47, no. 5, pp. 2301–2306.
13. Sammarco J.J., Macdonald B.D., Demich B., Rubinstein E.N., & Martell M.J. *LED lighting for improving trip object detection for a walk-thru roof bolter*. Lighting Research & Technology, 2018, Vol. 0, pp. 1–17.



Г.И. Коршунов, А.Н. Никулин,  
А.Ф. Романов, И.С. Должиков

## ИНДИВИДУАЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ РАБОТНИКА В ТЕЧЕНИЕ РАБОЧЕЙ СМЕНЫ

Представлены результаты анализа статистики Международной организации труда по причинам смертельности под влиянием производственных условий. Установлено, что более 240 000 смертельных несчастных случаев, реализуются в результате человеческих ошибок. Представлены примеры организационно-технических решений направленных на повышение ответственности работника во время выполнения трудовых обязанностей. Произведено описание алгоритмов взаимодействия портативного многофункционального устройства с различными видами средств индивидуальной защиты работника. Сформирована универсальная структура устройства контроля применения средств индивидуальной защиты. Сформулировано 17 показателей, характеризующих возможности применения и реализации коммуникационной системы на основе портативного многофункционального устройства контроля деятельности работника. Представлены результаты проведенного опроса-анкетирования 38 работников ООО «Шахтоуправление «Садкинское» по 13 вопросам об их отношении к внедрению интеллектуальных средств индивидуальной защиты работников. Анализ данных результатов ответов показывает определенное недоверие большей части респондентов к инновационным подходам и дополнительным техническим средствам, даже если они повысят личную безопасность. При этом не наблюдается возрастного сингулярности.

Ключевые слова: безопасность, средства индивидуальной защиты, контроль работника, персональный видеорегиистратор, умные СИЗ, анкетирование.

---

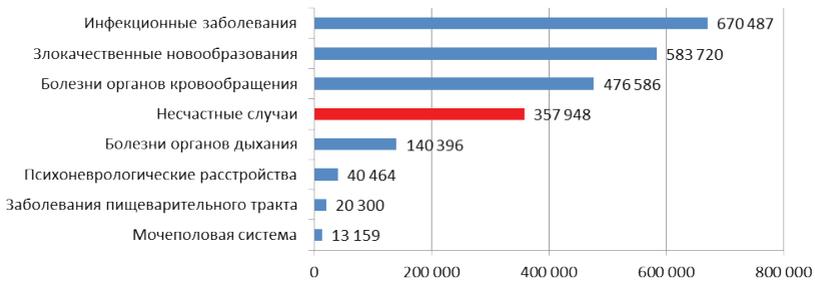
DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-418-431

### Введение

Согласно статистическим данным Международной организации труда на 3 млрд человек экономически активного населения смертность по причинам связанным с работой составляет 2,3 млн человек в год. На рис. 1 представлены основные причины смертности работников в 2017 году в результате развития профессиональных заболеваний и несчастных случаев со смертельным исходом [1].

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 418–431.

© Г.И. Коршунов, А.Н. Никулин, А.Ф. Романов, И.С. Должиков, 2018.



**Рис. 1. Смертность по причинам связанным с работой**

Основные мировые вызовы в области охраны труда:

- наибольшую смертность среди работников вызывают связанные с работой профессиональные заболевания (воздействие вредных веществ на работников являются причиной 651 279 смертей в год);
- в строительной отрасли отмечается непропорционально высокий уровень несчастных случаев.
- анализ возраста пострадавших говорит о том, что молодые и пожилые работники наиболее уязвимы.

Снижение уровня смертности от факторов производственной среды путем применения технических средств, обеспечивающих безопасность работника, является одним из наиболее популярных и эффективных подходов, что позволяет решить следующие задачи:

- создание машин, инструментов, технологий, при использовании которых, вероятность возникновения несчастного случая снижается до минимума;
- разработка и внедрение специальных средств защиты, охраняющих, информирующих человека от опасности в процессе труда.

По данным статистики Международной организации труда, около двух третей несчастных случаях (около 240 000 смертельных несчастных случаев в год) случаются по причинам не связанным с работой техники или технологических процессов, а связано с самим работающим человеком. Не соблюдение правил техники безопасности, нарушение требований безопасности трудового процесса, не применение средств индивидуальной защиты являются во много следствием плохой организации трудового процесса. Иными словами человеческим фактором [2—3].

В основном подобные случаи происходят либо по независящим от человека причинам, либо тогда, когда его побуждают к нарушению правил определенные обстоятельства. Очевидно, чтобы предупредить реализацию подобных происшествий позволит только комплекс организационно-технических мероприятий. Основные задачи подобных мероприятий [4]:

- повышение качества теоретической подготовки персонала (обучения);

- акцентирование внимания на тяжести последствий от реализации осознанных нарушение (рост цены ошибки для общества, предприятия, семьи);
- борьба с чувством привыкания человека к опасности и ощущения правильных или вынужденных нарушений правил техники безопасности, не повлекших за собой тяжелых последствий (привыкание к нарушениям).

Помимо основных причин существует целый набор индивидуальных (личностных) факторов, преимущественно психологического порядка: смелость на показ, недисциплинированность, недооценка риска, отсутствие интереса к выполняемой работе, проблемы личной жизни и т.п. [5]

Таким образом, своевременное выявление и предупреждение потенциальных ошибок (опасных действий) возможно путем повышения технического возможностей средств индивидуальной защиты (СИЗ) работника.

Необходимо также отметить, что существующие СИЗ являются пассивными устройствами, то есть не обладают управляемыми защитными свойствами. Кроме того, характеристики надёжности СИЗ, как технических средств также изменяются в процессе эксплуатации, а защитные свойства снижаются в результате неправильного применения [6—8].

### **Материалы и методы изучения**

Известны данные исследований представителей Кембриджского университета, которые отметили невероятные показатели эффективности применения персональных видеорегистраторов, размещенных на уровне груди полицейских. В результате применения таких камер количество жалоб от граждан на сотрудников полиции сократилось за год на 93%. Исследователи отмечают, что ни одна другая мера не приводила к столь радикальным изменениям [9]. Подобный опыт перенимается российскими полицейскими. Так с 2017 года индивидуальными регистраторами оснащаются сотрудники дорожно-постовой службы.

Данные устройства малогабаритны, транспарантны для пользователя и устойчивы к недобросовестному использованию, осуществляют видео и звуковую запись (рис. 2).



*Рис. 2. Переносной персональный видеорегистратор*

Использование и развития подобного опыта в производственной среде, за счёт применения индивидуальных многофункциональных устройств контроля деятельности работника, позволит эффективно предотвращать умышленные нарушения. Совершенствование подобных устройств и расширение их функциональных возможностей позволит обеспечить корректность эксплуатации выданных работнику СИЗ [10–11].

Рассмотрим обобщённую структуру взаимодействия СИЗ с человеком и окружающей средой при реализации функции защиты организма человека от влияния вредных и опасных факторов, представленную на рисунке 3. При этом под элементами окружающей среды подразумевается инфраструктура производства, средства производства, аэродинамические и тепловые характеристики, специфические факторы конкретного производства и так далее. В качестве совокупности СИЗ рассматриваются технические средства, обеспечивающие ослабление влияния негативных факторов. Свойства среды, образованной в пространстве между СИЗ и организмом работника, являются результатом взаимодействия защитных свойств СИЗ и функциональных систем организма работника. Параметры этой среды и их динамика определяют уровень комфорта и безопасности работника.



**Рис. 3. Обобщённая структура взаимодействия совокупности СИЗ с человеком и окружающей средой**

Из вышесказанного следует, что при эксплуатации пассивных СИЗ существует риск возникновения аварийных ситуаций, обусловленных отсутствием контроля:

- правильности эксплуатации СИЗ;
- динамики изменения параметров окружающей среды;
- изменений параметров среды в пространстве между СИЗ и работником;
- динамики параметров, характеризующих состояние здоровья работника.

Организация подобного контроля позволит повысить ответственность работника перед выполняемыми рабочими операциями, снизить риски неприменения СИЗ, обеспечит контроль рабочих операций, а также позволит с наибольшей вероятностью установить причины аварийной ситуации или несчастного случая с работником [12].

Техническая реализация возможна путём использования современных цифровых средств, выполненных с использованием передо-

вых нанотехнологий, обеспечивающих минимально возможные габариты разрабатываемых устройств, низкое потребление от источника питания и относительно низкую стоимость проекта при существенной вычислительной мощности.

Вышеперечисленные свойства современных технических средств позволяют осуществить проектирование устройства контроля и его эксплуатацию на основе принципа транспарентности по отношению к работнику, эксплуатирующему СИЗ, то есть обеспечивать минимально возможное влияние на работника с точки зрения удобства эксплуатации. Работник не должен быть вовлечён в процесс обслуживания устройства контроля. Взаимодействие работника и устройства контроля должно возникать только в экстремальной ситуации при оповещении работника о тревожной или опасной ситуации. На рисунке 4 представлена структура устройства контроля СИЗ, которая является универсальной и инвариантна по отношению к конкретному виду СИЗ.

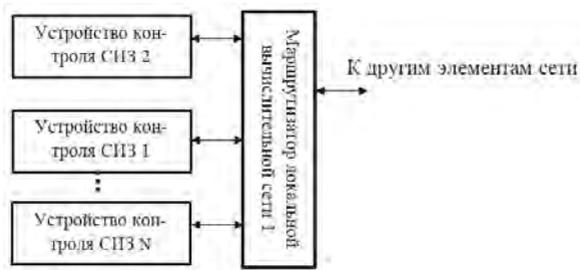


**Рис. 4. Универсальная структура устройства контроля применения СИЗ**

Состав устройства контроля, его особенности, определяются назначением СИЗ. Тип датчиков их расположение в пространстве СИЗ зависит от совокупности задач, поставленных перед устройством контроля (например, датчики газового состава атмосферы). Территориальное расположение СИЗ на работнике определяет возможности устройства контроля по регистрации активности тех или иных функциональных систем организма. Средства обработки и управления с аппаратной точки зрения являются универсальными, а с функциональной точки зрения реализуют алгоритм, связанный с контролем эксплуатации конкретного вида СИЗ и обеспечивают снижение риска неприменения СИЗ, контроль рабочих операций, а также установление причин аварийной ситуации или несчастного случая с работником. К универсальным свойствам следует отнести средства накопления и хранения результатов контроля, средства оповещения работника о нештатной ситуации, беспроводный интерфейс коммуникации с другими СИЗ и контролирующими органами.

Устройство контроля может быть дополнено средствами позиционирования работника с помощью системы типа «GPS» или «ГЛОНАСС» (в случае эксплуатации СИЗ на открытой местности), а также средствами оценки двигательной активности и пространственного расположения работника с целью получения дополнительной информации о трудозатратах работника. В структуре устройства контроля отсутствуют узкоспециализированные элементы, которые могут быть введены дополнительно (например, переговорное устройство, осуществляющее вербальную коммуникацию работников с помощью беспроводного интерфейса). Кроме того, беспроводный интерфейс параллельно со средствами оповещения работника (звуковая и/или световая сигнализация) может быть использован для формирования по радио каналу сигнала бедствия при необходимости обнаружения работника в завалах, полостях и пр. [13]

Все устройства контроля, установленные в совокупности СИЗ различного назначения в пределах одного работника, объединяются в единое аппаратное и информационное пространство с помощью средств распределённой вычислительной сети. При этом в пределах конкретного СИЗ такое объединение может осуществляться с помощью проводной связи со средствами обработки и управления с использованием стандартных протоколов типа SPI, I2C, USB, COM, а в пределах совокупности СИЗ с помощью сетевых протоколов на основе беспроводной технологии типа Zig Bee Pro (стандарт IEEE 802.15.4) [14]. Технология ZigBee позволяет создавать достаточно сложную структуру сети с большим и изменяемым числом СИЗ. На рис. 5 представлен вариант организации структуры сети, объединяющей совокупность СИЗ, размещённых на работнике, в единое информационное пространство.



**Рис. 5. Вариант организации структуры сети, объединяющей в единое информационное пространство совокупность средств индивидуальной защиты**

В качестве маршрутизатора локальной вычислительной сети (ЛВС) может выступать портативное многофункциональное устройство (ПМУ), которое выдаётся работнику перед началом рабочей смены и содержит информацию об организационных особенностях производствен-

ного процесса (начало смены, технологические перерывы, окончание смены и др.).

Идентификация работника в момент выдачи ПМУ может служить дополнительным мотивационным фактором, повышающим ответственность работника в процессе реализации рабочих операций. Кроме того, ПМУ является ведущим устройством ЛВС и обеспечивает диагностику исправного состояния СИЗ, временную синхронизацию устройств контроля всех СИЗ, накопление и оценку контролируемой информации, поступающей от совокупности СИЗ, идентификацию аварийной ситуации или несчастного случая и формирование тревожной или аварийной сигнализации. Передача совокупности функций от устройств контроля СИЗ к ПМУ может существенно упростить их структуру и оптимизировать состав необходимых элементов под конкретную задачу. В конце смены работник сдает ПМУ. Накопленная за рабочую смену информация считывается контролёром с помощью стационарного вычислительного комплекса, оценивается с помощью соответствующих алгоритмов контроля и предоставляются контролирующим органам в виде документа, определяющего результаты оценки контролируемой информации, вид нарушений и их временное распределение по завершённой рабочей смене. [15–16]

### **Статистическая обработка**

В мае 2018 года авторами проведен прямой сплошной опрос-анкетирование горнорабочих ООО «Шахтоуправление «Садкинское». Способ формирования группы обследуемых респондентов – целенаправленная выборка. Профессии работников, среди которых проведено анкетирование: проходчик – 10 чел., горнорабочий подземный – 8 чел., горнорабочий очистного забоя – 6 чел., машинист горно-выемочной машины – 3 чел., электрослесарь – 3 чел. и 9 чел. другие профессии.

В анкете было представлено 13 вопрос об отношении внедрения интеллектуальных средств индивидуальной защиты работников, а также общие сведения о работнике: профессия, стаж работы по данной профессии и общий трудовой стаж в угледобыче. По форме вопросы анкет были полузакрытыми. Респондент мог отметить на вопрос, поставив отметку напротив слов «Да», «Нет», «Промежуточно (свой вариант)». При обработке анкет осуществлялась выбраковка анкет, набравших наибольшее и наименьшее количество баллов по следующей схеме: «да» – 1 балл, «Промежуточно (свой вариант)» – 2 балла, «Нет» – 3 балла. Максимально возможное количество баллов – 39, а минимальное 13 и менее. Отсутствие ответа приравнивалось к 0 баллов. Таким образом, были установлены численные барьеры в 15 баллов и менее, а также 34 баллов и более. Анкеты не прошедшие барьеры – отбраковывались (4 анкеты).

Среднее количество набранных баллов составляет 22,8. Вопросы, набравшие наибольшее количество баллов из возможных 102 баллов (все 34 респондентов ответили «Нет» – 3 балла):

«Как бы Вы отнеслись к ношению устройства аудио/видео устройства на каске или куртке?»: 9 человек из 34 отметили как «Да», остальные отметили «Нет» (84 балла из 102);

«Есть ли необходимость дополнить систему определения местоположения работника считыванием сведений о состоянии его здоровья?»: 10 человек из 34 отметили как «Да», остальные отметили «Нет» (79 баллов из 102);

«Считаете ли Вы необходимым, для сохранения Вашего здоровья, получать дополнительные приборы контроля для оперативной оценки условий труда (например: газоанализатор, шумомер)? Если да, то какие?»: 11 человек из 34 отметили как «Да», остальные отметили «Нет» (77 баллов из 102).

Анализ данных результатов ответов показывает определенное недоверие большей части респондентов к инновационным подходам и дополнительным техническим средствам, даже если они повысят личную безопасность. Среди 9 респондентов ответивших «Да» на вопрос «Как бы Вы отнеслись к ношению устройства аудио/видео устройства на каске или куртке?» не наблюдается возрастного сингулярности. Присутствуют работники с общим стажем работы по профессии от 3 до 22 лет (средний стаж 9,9 лет). Преимущественно положительно отреагировали проходчики.

Вопросы, набравшие примерно одинаковое количество ответов «Да» и «Нет», набрали от 63 до 71 балла:

«Хотели ли бы Вы, чтобы СИЗ обладали дополнительными свойствами (контроль состояния окружающей среды, контроль состояния здоровья работника)?» (63 балла);

Была бы Вам полезна информация о текущем состоянии Вашего здоровья в процессе выполнения работ, контроль состояния вашего организма (пульс, давление, температура тела)? (64 балла);

Есть ли необходимость в обратной связи с диспетчером? (Возможность сообщать ему оперативно текущую ситуацию)? (67 баллов);

Есть ли необходимость расширения сигнальных функций фонаря, сопровождения команд звуковыми сигналами? (71 балл).

Мнения работников разделились относительно придания средствам индивидуальной защиты новых свойств, таких как контроль состояния окружающей среды и контроль состояния здоровья работника. Вероятно, некоторые работники не готовы к эффективному применению в своей трудовой деятельности новых инструментов повышения безопасности производства. Вопросы связанные с техническими средствами сигнализации и оповещения не вызвали интереса у респондентов.

тов, что означает, что данные изменения и новые свойства имеющихся технических средств в целом устраивают.

Вопросы, набравшие большее количество ответов «Да», чем «Нет», набрали от 34 до 55 балла (34 балла – 34 ответа «Да» из 34, а 55 баллов – 23 ответа «Да» из 34):

- «Обеспечивает ли Вас работодатель средствами индивидуальной защиты?» (34 балла);
- «Является ли эффективной система определения местоположения работника?» (44 балла);
- «Устраивает ли Вас качество и защитные свойства выдаваемых Вам СИЗ?» (45 баллов);
- «Есть ли необходимость оперативной связи между группами работников в процессе выполнения работ?» (52 балла);
- «Есть ли необходимость улучшения качества связи (подавление шума) между работниками одного звена в процессе выполнения работ?» (55 баллов).

Следует отметить, что существующие на предприятии традиционные элементы системы защиты работника на производстве (средства индивидуальной защиты, многофункциональные системы безопасности, шахтная система связи) удовлетворяют работников и к ней не возникает вопрос. Однако имеется потребность в оперативной связи между работниками в процессе выполнения рабочих операций, а имеющиеся каналы связи в улучшении технических характеристик.

Можно сделать общий вывод о том, что в целом работники готовы к инновациям технических средств в дополнение к имеющимся средствам, которые их вполне удовлетворяют, однако необходимо и совершенствование их свойств. Техническое совершенствование и дополнение имеющихся элементов контроля и обеспечения безопасности работников вызывает потребности у не менее 30% респондентов. При этом не наблюдается разницы во мнениях среди опытных работников с общим производственным стажем 15 лет и более.

## **Результаты**

Использование предлагаемых технических средств направлено на повышение эффективности использования СИЗ работником при реализации рабочего процесса. Рассматриваемая постановка задачи диктует достаточно жёсткие требования к организации как устройств контроля СИЗ, установленных на отдельном работнике, так и СИЗ, установленных на совокупности работников. При этом технические средства должны обеспечивать:

1. Автоматическую диагностику исправности технических средств и формирование информации об обнаруженных неисправностях перед началом рабочей смены и в процессе её реализации.

2. Формирование астрономического времени и временную синхронизацию работы с блоками локальной вычислительной сети.
3. Регистрацию заданной совокупности параметров.
4. Обработку и оценку регистрируемой информации.
5. Накопление результатов контроля в энергонезависимой памяти.
6. Формирование тревожной и аварийной сигнализации в экстремальных ситуациях.
7. Идентификацию несанкционированного доступа к элементам устройства контроля СИЗ.
8. Эффективный обмен информацией между СИЗ и ПМУ, а также между ПМУ совокупности работников в процессе контроля.
9. Оптимизацию энергопотребления и непрерывное функционирование с использованием автономных источников питания в течение длительного срока эксплуатации.
10. Блочную конструкцию, позволяющую оперативное изменение структуры технических средств.
11. Использование технологии «Plug and Play» при смене набора датчиков.
12. Оперативное перепрограммирование функций под конкретную задачу контроля.
13. Оперативное и эргономичное крепление к элементам СИЗ.
14. Взрывобезопасную и защищённую от воздействия окружающей среды конструкцию.
15. Простоту обслуживания при плановом и оперативном осмотре, при ремонте и выводе из эксплуатации.
16. Минимальные габариты и вес.
17. Спасение результатов контроля в катастрофической ситуации (взрыв, пожар, наводнение и др.).

Следует отметить, что предлагаемые средства контроля СИЗ могут модернизироваться путём совершенствования методик контроля как без изменения используемых аппаратных средств (программным путём), так и путём реконфигурации структуры используемых технических элементов и их замены в необходимых случаях.

### **Заключение**

Дополнение пассивных СИЗ техническими средствами контроля, основанными на использовании современных сенсоров характеристик окружающей среды, среды в пространстве «человек-СИЗ», а также параметров состояния различных функциональных систем организма человека, обеспечение контроля правильности применения СИЗ в различных ситуациях производственного процесса, позволяет обеспечить повышение безопасности работников в различных производственных ситуациях. Современные технические средства регистрации, обработки рассматриваемой информации и оповещения работника, обладают

техническими характеристиками, позволяющими решать поставленную задачу с соблюдением принципов прозрачности по отношению к работнику, использующему СИЗ, что делает процедуру контроля эффективной как в штатной ситуации, аварийных условиях и условиях проведения поисковых работ, необходимых при ликвидации последствий аварии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Women and men in the informal economy: a statistical picture (third edition) / International Labour Office – Geneva: ILO, 2018.

2. Parsons K.C. (2007) Protective clothing: heat exchange and physiological objectives, *Ergonomics*, 31:7,991–1007, DOI: 10.1080/00140138808966738

3. Рудаков М.Л., Степанова Л.В. Особенности использования работниками средств индивидуальной защиты от общих производственных загрязнений и механических повреждений // III Международная научно-практическая конференция «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке»: Тезисы докладов/ Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2016. С. 78

4. Stepanova L.V. Peculiarities of the use of personal protective equipment by employees as protection against industrial contamination and mechanical damage // 3rd International Scientific and Practical Conference on Industrial Safety at Mineral Resources Companies in the 21st Century: scientific conference abstracts/ St. Petersburg Mining University. St. Petersburg, 2016. p. 78.

5. Давыдов А.Ф. Российский рынок рабочей одежды // Рабочая одежда. 2010. Выпуск 4: С. 12.

6. Personal protective equipment. Textbook/Team of authors led by Yu.G. Sorokin. Moscow. 2007. 288 p.

7. Давыдов А.Ф. Российский рынок рабочей одежды // Рабочая одежда. – 2010. №4. С.12.

8. Aude Morel, Gauthier Bedek, Fabien Salaün & Daniel Dupont (2014) A review of heat transfer phenomena and the impact of moisture on firefighters' clothing and protection, *Ergonomics*, 57:7, 1078–1089, DOI: 10.1080/00140139.2014.907447

9. Ломакин Д. За гаишниками присмотрит «Дозор» / *Gazeta.ru*. URL: [https://www.gazeta.ru/auto/2016/12/08\\_a\\_10412891.shtml](https://www.gazeta.ru/auto/2016/12/08_a_10412891.shtml) (дата обращения 10.09.2018)

10. Долженков, А.Ф. Оценка износостойкости спецодежды по изменению показателей гнойничковой заболеваемости и микротравматизации кожи горнорабочих / А.Ф. Долженков, С.Л. Тарасенко // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. / МакНИИ. – Макеевка, 2013. – Вып. 2 (32). – С. 198 – 205

11. Kovshov, S., R. Istomin, A. Nikulin and A. Sotiriu, 2014. Industrial injuries appraisal in mines of JSC «SUEK Kuzbass». *Advanced Materials Research Volume 1001*: 414–420.

12. Nikulin, A., A.Yu. Nikulina, A. Yu. Assessment of occupational health and safety effectiveness at a mining company. *Eco. Env. & Cons.* 23 (1): 2017, pp. 533–537.

13. Kazakov B.P., Levin L.Yu., Shalimov A.V., Zaitsev A.V. Development of Energy-Saving Technologies Providing Comfortable Microclimate Conditions for Mining. Zapiski Gornogo instituta. 2017. Vol. 223: p. 116–124. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.116

14. Baskakov, S. Standart ZigBee и platform MeshLogic: routing efficiency in mode « Many to One » //First mile. 2008. Vol. 2–3. Pages 32–37.

15. Lobnik, A. Optical chemical sensors and personal protection / TUT Textiles a Usages Techniques. Volume 4, Issue 63, March 2007, Pages 34–3

16. Construction Program Employee Safety Manual. NYS ACCIDENT REPORTING SYSTEM (ARS). Department of transportation. URL: [https://www.dot.ny.gov/main/business-center/contractors/construction-division/construction-repository/CPE\\_Handbook\\_web.pdf](https://www.dot.ny.gov/main/business-center/contractors/construction-division/construction-repository/CPE_Handbook_web.pdf) **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Коршунов Геннадий Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности производств, br@spmi.ru,

*Никулин Андрей Николаевич* — кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности производств, nikulin-rus@yandex.ru, тел: 89216428963,

*Романов Анатолий Федорович* — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры безопасности производств, aromanov@list.ru,

*Должиков Илья Сергеевич* – аспирант кафедры безопасности производств, idolzhikov@mail.ru,

Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, д. 2.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 418–431.

**Korshunov G.I., Nikulin A.N., Romanov A.F., Dolzhikov I.S.**

### **Personal control device activities of employee during working shift**

The article presents the results of the review of a workplace-related mortality record provided by the International Labour Organisation. More than 240,000 fatalities have been found to be caused by human error. The article contains examples of managerial and engineering solutions aimed at increasing the employee's accountability in the work process and describes the algorithms of interaction between portable multifunctional equipment and various personal protective equipment types used by employees. A universal structure has been determined for the equipment designed to control the use of personal protective equipment with 17 indicators that characterise the possibility of using and implementing a communication system based on portable multifunctional equipment for control of the employees' working activity.

The article presents the results of a questionnaire survey of 38 employees of JSC Mine «Sadkinskoye» on 13 questions about their attitude to the introduction of intellectual means of individual protection of workers. An analysis of the results of the answers shows a certain distrust of the majority of respondents to innovative approaches and additional

technical means, even if they increase personal security. In this case, there is no age-specific singularity.

Adding passive PPE with technical means of control based on the use of modern sensors of environmental characteristics, environment in the space «person-PPE», as well as the parameters of the state of various functional systems of the human body, ensuring control over the correct use of PPE in various situations of the production process, increase the safety of workers in various production situations.

Keywords: safety, personal protective equipment, employee control, personal video recorder, smart PPE, questionnaire.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-418-431

## AUTHORS

*Korshunov G.I.*, Professor, head of Industrial Safety Department, bp@spmi.ru,  
*Nikulin A.N.*, Associate Professor of Industrial Safety Department, nikulin-rus@yandex.ru,  
*Romanov A.F.*, Associate Professor of Industrial Safety Department, afromanov@list.ru,  
*Dolzhiikov I.S.*, post-graduate student of Industrial Safety Department, idolzhiikov@mail.ru,  
Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation.

## REFERENCES

1. *Women and men in the informal economy: a statistical picture (third edition)*. International Labour Office, Geneva: ILO, 2018.
2. Parsons K.C. (2007) *Protective clothing: heat exchange and physiological objectives*, *Ergonomics*, 31:7,991–1007, DOI: 10.1080/00140138808966738.
3. Rudakov M.L., Stepanova L.V. *Osobennosti ispol'zovaniya rabotnikami sredstv individual'noj zashchity ot obshchih proizvodstvennyh zagryaznenij i mekhanicheskikh povrezhdenij* [About heat and moisture exchange with between humans wearing special clothes and the environment]. III Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Promyshlennaya bezopasnost' predpriyatij mineral'nosyr'evogo kompleksa v XXI veke»: Tezisy dokladov/ Sankt-Peterburgskij gornyj universitet. SPb, 2016. p. 78.
4. Stepanova L.V. *Peculiarities of the use of personal protective equipment by employees as protection against industrial contamination and mechanical damage*. 3rd International Scientific and Practical Conference on Industrial Safety at Mineral Resources Companies in the 21st Century: scientific conference abstracts/St. Petersburg Mining University. St. Petersburg, 2016. p. 78.
5. Davydov A.F. *Rossijskij rynek rabochej odezhdy* [Russian working clothes market]. *Rabochaya odezhda*. 2010. Vypusk 4: p. 12.
6. *Personal protective equipment*. Textbook. Team of authors led by Yu.G. Sorokin. Moscow. 2007. 288 p.
7. Davydov A.F. *Rossijskij rynek rabochej odezhdy* [Russian market of work clothes]. *Rabochaya odezhda*. 2010. no 4. p. 12.
8. Aude Morel, Gauthier Bedek, Fabien Salaün & Daniel Dupont (2014) *A review of heat transfer phenomena and the impact of moisture on firefighters' clothing and protection*, *Ergonomics*, 57:7, 1078–1089, DOI: 10.1080/00140139.2014.907447
9. Lomakin D. *Za gaischnikami prismotrit «Dozor»* [For COP watch «Patrol»]. *Gazeta.ru*. URL: [https://www.gazeta.ru/auto/2016/12/08\\_a\\_10412891.shtml](https://www.gazeta.ru/auto/2016/12/08_a_10412891.shtml) (data obrashcheniya 10.09.2018).
10. Dolzhenkov A.F., Tarasenko S.L. *Ocenka iznosostojkosti specodezhdy po izmeneniyu pokazatelej gnojnichkovoj zabelevaemosti i mikrotravmatizacii kozhi gornorabochih*

[Assessment of the durability of workwear regarding indicators of change in the incidence of pustular and mikrotravmatizatsii leather miners]. Sposoby i sredstva sozdaniya bezopasnyh i zdorovyh uslovij truda v ugol'nyh shahtah: sb. nauch. tr. MakNII. Makeevka, 2013. Vyp. 2 (32). pp. 198–205.

11. Kovshov, S., R. Istomin, A. Nikulin and A. Sotiriu, 2014. *Industrial injuries appraisal in mines of JSC «SUEK Kuzbass»*. Advanced Materials Research Volume 1001: 414–420.

12. Nikulin, A., A.Yu. Nikulina, A. Yu. *Assessment of occupational health and safety effectiveness at a mining company*. Eco. Env. & Cons. 23 (1): 2017, pp. 533–537.

13. Kazakov B.P., Levin L.Yu., Shalimov A.V., Zaitsev A.V. *Development of Energy-Saving Technologies Providing Comfortable Microclimate Conditions for Mining*. Zapiski Gornogo instituta. 2017. Vol. 223: p. 116–124. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.116

14. Baskakov, S. *Standart ZigBee i platform MeshLogic: routing efficiency in mode «Many to One»*. First mile. 2008. Vol. 2–3. pp. 32–37.

15. Lobnik, A. *Optical chemical sensors and personal protection*. TUT Textiles a Usages Techniques. Volume 4, Issue 63, March 2007, pp. 34–3

16. *Construction Program Employee Safety Manual*. NYS ACCIDENT REPORTING SYSTEM (ARS). Department of transportation. URL: [https://www.dot.ny.gov/main/business-center/contractors/construction-division/construction-repository/CPE\\_Handbook\\_web.pdf](https://www.dot.ny.gov/main/business-center/contractors/construction-division/construction-repository/CPE_Handbook_web.pdf)



Г.И. Пефтибай, Н.А. Галухин, И.Ф. Марийчук

## ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕМЕНТНО-ШЛАКОВОГО МАТЕРИАЛА ВЗРЫВОУСТОЙЧИВОЙ ПЕРЕМЫЧКИ

Целью работы является экспериментальное определение механических характеристик (предел прочности на сжатие, модуль упругости, коэффициент Пуассона), разработанного быстротвердеющего материала на основе цементного вяжущего с заполнителями из отходов промышленного производства (доменного шлака) для их использования при моделировании напряженно-деформированного состояния (НДС) взрывоустойчивой перемычки.

В работе использовался экспериментальный метод исследований НДС одноосных и объемных образцов, изготовленных из цементно-шлаковой смеси, при испытаниях на сжатие, растяжение при изгибе с использованием современного оборудования с контрольно-измерительной аппаратурой для статических кратковременных и длительных нагрузок.

Получены зависимости напряжений от относительных деформаций материала на основе цементно-шлаковой смеси, определены модуль упругости первого рода, коэффициент Пуассона, пределы прочности на сжатие и растяжение.

Впервые установлена линейная зависимость напряжений цементно-шлакового материала взрывоустойчивой перемычки в ранний период набора прочности от деформаций как упругого тела, модуль упругости которого в десять раз меньше, чем его значение для используемого в настоящее время строительного гипса, при практически одинаковом пределе прочности на сжатие и коэффициенте Пуассона и в пять раз большим пределом прочности на растяжение.

Ключевые слова: взрывоустойчивая перемычка; цементно-шлаковая смесь; образец; испытание; механические характеристики; деформация; напряжения.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-432-442

### Введение

В настоящее время для тушения подземных пожаров, локализации взрывов метана и угольной пыли в горных выработках угольных шахт используют взрывоустойчивые перемычки, возводимые из строительного или высокопрочного гипсов гидромеханическим способом с проемными металлическими трубами [1].

В силу определенных недостатков, присущих гипсовому вяжущему (потеря прочности и повышение ползучести при увлажнении), в послед-

нее время интенсивно разрабатываются и внедряются материалы на основе цементного вяжущего [2, 3, 4].

Разрабатываются критерии эффективности [5] конструкции перемычек с оценкой затрат на техническое обслуживание и ремонт, совершенствуются и уточняются математические модели взрывов газов в экспериментальных условиях и шахтах [6, 7, 8, 9] .

Основной технической характеристикой взрывоустойчивой перемычки, от которой зависит безопасность горноспасателей и трудоемкость возведения при ликвидации аварий, является толщина.

Для математического моделирования НДС взрывоустойчивого сооружения, выполненного из новых материалов на основе цементного вяжущего, необходимо экспериментальное определение основных механических прочностных характеристик. В связи с этим целью работы является экспериментальное определение механических характеристик (предел прочности на сжатие, модуль упругости, коэффициент Пуассона), разработанного быстротвердеющего материала на основе цементного вяжущего с заполнителями из отходов промышленного производства (доменного шлака) для их использования при моделировании НДС взрывоустойчивой перемычки.

Теория вопроса. В работе [10] дан анализ преимуществ и недостатков применения гипсового вяжущего, сделан вывод о необходимости использования для сооружения взрывоустойчивой перемычки материала на основе цементно-шлаковой и цементно-зольной смесей. Определен вещественный состав цементных смесей и предельные напряжения на сжатие при одноосном напряженном состоянии образцов размером 40x40x160 мм.

Однако во взрывоустойчивой перемычке возникает объемное НДС, то есть шесть компонентов напряжений, поэтому необходимо определить механические характеристики для стандартного образца кубика, например, размером 55x55x55 мм.

В работе [11] приведена расчетная схема взрывоустойчивой перемычки с проемными металлическими трубами в виде плиты с радиусом, меняющимся по параболической зависимости или полуокружности, с защемленными краями по основному контуру и свободным краем в верхней ее части, под воздействием нормальной нагрузки от действия воздушных ударных волн и сжимающей массы разрушенных пород кровли.

Решение задачи приводится в виде трех функций: перемещений от изгиба и сдвига, усилий с использованием вариационного метода теории упругости, в результате чего получена номограмма для оперативного определения толщины взрывоустойчивой перемычки, изготовленной из строительного или высокопрочного гипсов, в зависимости от глубины возведения и площади сечения выработки.

В работе [12] на основании физического моделирования методом эквивалентных материалов установлено, что при теоретических иссле-

дованиях влиянием проемных металлических труб на НДС перемычки можно пренебречь.

В работе [13] приведены математические модели НДС взрывоустойчивой перемычки под действием горного давления, взрывной ударной волны и ее температуры, в которые входят механические характеристики материала: модуль упругости, коэффициент Пуассона. При этом решение задачи значительно упрощается за счет отыскания двух функций, а прочность перемычки обеспечивается, если максимальные нормальные напряжения на растяжение, сжатие и касательные напряжения не превышают предельных их значений с учетом запаса прочности, которые необходимо определить.

### **Методика проведения опытов**

Для исследования НДС взрывоустойчивой перемычки, определения ее прочности необходимо знать механические характеристики материала (модуль упругости, коэффициент Пуассона, предельные значения на прочность при растяжении и сжатии, сдвиге).

Испытываемые растворы тщательно перемешивали и уплотняли в специальных формах для изготовления образцов квадратного поперечного сечения. Специальные быстроразъемные формы ФБС позволяют получить образцы с размерами 40х40х160 мм, которые после хранения в закрытой емкости с влажностью не менее 90 % подвергали испытаниям.

Поскольку критерием при разработке быстротвердеющих составов является набор прочности, равной 3 МПа, в течение минимально возможного времени, основной объем испытаний составили образцы с односуточным сроком твердения.

Отбор проб и изготовление образцов смеси, размеры образцов, предел прочности на одноосное сжатие определяли согласно ГОСТ 310.4–81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии».

Испытания образцов при одноосном НДС для определения предельных значений на сжатие проводили на гидравлическом прессе ПСУ-10 НИИГД «Респиратор» (рис. 1), при объемном - на установке неравнокомпонентного трехосного нагружения УНТН (рис. 2), которая предназначена для статических кратковременных и длительных испытаний на сжатие (растяжение) при изгибе в ГУ «Институт физики горных процессов» при определении механических характеристик кубиков размерами 55х55х55 мм.



**Рис. 1. Пресс ПСУ-10**



**Рис. 2. Установка УНТН**

Для определения модуля упругости и коэффициента Пуассона шкалу для измерения нагрузки пресса выбрали из условия, что ожидаемое значение разрушающей нагрузки  $P$  должно быть от 70 % до 80 % от максимального значения.

Начальное усилие обжатия образца, которое в последующем принимали за условный ноль, равно 2 % ожидаемой разрушающей нагрузки.

При центрировании образцов в начале испытания от условного нуля до нагрузки, равной  $(40 \pm 5 \%) P$ , отклонения деформаций по каждой грани не превышали 15 % их среднего арифметического значения.

При определении модуля упругости и коэффициента Пуассона цементного состава нагрузки на образцы до уровня, равного  $(40 \pm 5 \%) P_p$ , осуществляли ступенями, равными 10 % от ожидаемой разрушающей нагрузки, сохраняя в пределах каждой ступени скорость нагружения  $(0,6 \pm 0,2)$  МПа/с. При этом уровне нагрузки приборы снимали с образца, после чего дальнейшее ее воздействие проводили непрерывно с постоянной скоростью.

На каждой ступени проводили выдержку нагрузки от 240 до 300 с и записывали отсчеты по приборам в начале и в конце выдержки ступени нагрузки в журнал.

При проведении кратковременных испытаний диапазон нагрузок составлял от 0 до 500 кН, длительных – до 250 кН. Для обеспечения равномерности передачи нагрузки на торец образца (ввиду возможной незначительной непараллельности противоположных граней) данная установка была дополнительно оборудована шарниром, устанавливаемым на образец сверху. Размер штампов шарнира соответствовал размерам торцевых граней образцов.

Для измерения продольных деформаций образцов при сжатии использовали индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм. Индикаторы устанавливали на металлическую рамку, фиксируемую на образце прижимными винтами. С противоположной грани образца также была закреплена аналогичная рамка с упорами. Для осуществ-

вления передачи перемещения верхней рамки относительно нижней на измерительные приборы использовали алюминиевые шпильки изогнутой формы, которые обеспечивали сохранность приборов в момент разрушения образца.

Для измерения поперечных деформаций использовали индикаторы часового типа МИГ с ценой деления 0,001 мм. Рамки для крепления приборов устанавливали на расстоянии 20 мм от середины призмы в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Нагрузку на образцы осуществляли поэтапно. Величина приращения нагрузки на каждом этапе составляла 10% от предполагаемой прочности. Центровку образцов осуществляли путем создания нагрузки до уровня 0,3 от предела прочности с последующей разгрузкой. При этом на каждом этапе фиксировали показания индикаторов. По приращениям вертикальных деформаций по каждой из граней определяли направление требуемого смещения образца, что позволяло обеспечить его центральное сжатие. После выполнения центровки выполняли поэтапное создание нагрузки (с выдержкой при постоянной нагрузке) вплоть до разрушения образца. Картина разрушения всех образцов характеризовалась появлением диагональных трещин.

Модуль упругости  $E$ , МПа, определяли для каждого образца при нагрузке, составляющей 30 % от разрушающей, по формулам

$$E = \sigma_1 / \varepsilon_1; \quad \sigma_1 = P_1 / F,$$

где  $\sigma_1$  – напряжение, МПа;  $\varepsilon_1$  – приращение мгновенной относительной продольной деформации образца, соответствующее уровню нагрузки  $P_1 \sim 0,3P$  и измеренное в начале каждой ступени ее приложения, 1;  $P_1$  – приращение внешней нагрузки, Н;  $F$  – площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>.

В пределах ступени нагружения деформации определяли по линейной интерполяции.

Коэффициент Пуассона для каждого образца  $\nu$  вычисляли при уровне нагрузки, составляющей 30 % разрушающей, по формуле

$$\nu = \varepsilon_2 / \varepsilon_1,$$

где  $\varepsilon_2$  – приращение мгновенной относительной поперечной деформации образца, 1.

Приращения относительных продольных и поперечных деформаций определяем как среднее арифметическое показаний приборов по четырем граням образца по формулам

$$\varepsilon_1 = \Delta l_1 / l_0, \quad \varepsilon_2 = \Delta b_1 / b_0,$$

где  $\Delta l_1$ ,  $\Delta b_1$  – абсолютные приращения продольной и поперечной деформаций образца, вызванные соответствующим приращением

напряжений, мм;  $\Delta l_0$ ,  $\Delta b_0$  – фиксированные базы измерения продольной и поперечной деформации образца, мм.

Предел прочности  $\sigma_{п(сж)}$ , МПа, вычисляли для каждого образца по формуле

$$\sigma_{п(сж)} = P_p / F,$$

где  $P_p$  – разрушающая нагрузка, измеренная по шкале измерителя прессы, Н;

Шкалы индикаторов проградуированы в относительных единицах деформаций, поэтому величины  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  определили непосредственно по шкалам измерительных приборов.

При определении механических характеристик вышеприведенных материалов в журнале отсчетов по приборам фиксировали следующие данные: номер ступени нагрузки; время ее приложения, мин; нагрузка на образец, показание приборов при измерении продольных и поперечных деформаций (отсчет, приращение); среднее их приращение.

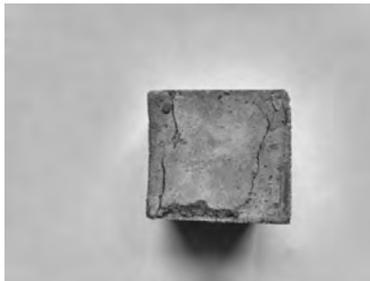
Кроме этого, в журнале результатов испытаний предусмотрены дополнительные сведения:

- температура и относительная влажность воздуха помещения, в котором производили испытания;
- состав смеси;
- база измерения деформаций, мм;
- тип тензометра, примененный для измерения линейных деформаций образца (цена его деления);
- значения модуля упругости отдельных образцов и его среднее значение, МПа;
- значение коэффициента Пуассона отдельных образцов и его среднее значение.

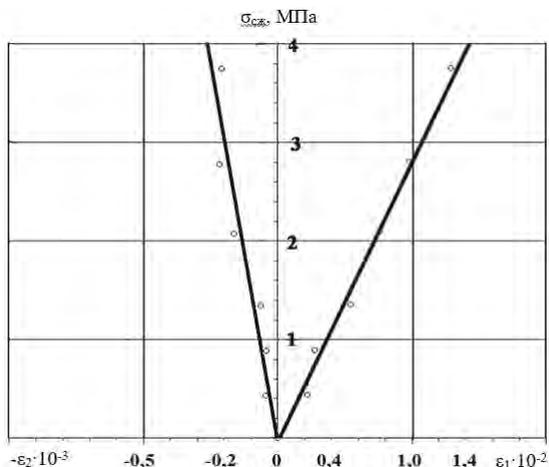
Материалы и результаты исследований. Результаты испытаний образцов-кубиков на сжатие и образцов-балочек на растяжение приведены на рис. 3, 4 соответственно.



**Рис. 3. Результаты испытания образца-кубика на сжатие**



**Рис. 4. Общий вид образца-балочки при испытании на растяжение при изгибе**



**Рис. 5. Зависимость напряжений цементно-шлакового состава от деформаций при сжатии образца-кубика размером 55х55х55 мм при 7,0 ч твердении**

В результате проделанной серии экспериментальных работ установлено, что предел кубиковой прочности на сжатие разработанного цементно-шлакового материала увеличивается на 40 % по сравнению с призмной прочностью (для обычных бетонов на 25 % [14]).

Зависимость напряжений от деформаций цементно-шлакового материала с массовым отношением компонентов 7:3 приведена на рис. 5.

Испытания проведены на 50-ти образцах, а результаты получены при средних значениях деформаций.

Обработка массива эмпирических данных показала, что модуль упругости равен  $E = 280$  МПа, а коэффициент Пуассона  $\nu = 0,24$ .

### **Заключение**

1. На основании результатов проведенных экспериментальных исследований образцов – кубиков, изготовленных из цементно-шлаковой смеси, установлена линейная зависимость напряжений нового материала взрывоустойчивой перемычки от деформаций как упругого тела, модуль упругости которого в десять раз меньше, чем его значение для используемого в настоящее время строительного гипса, при практически одинаковом пределе прочности на сжатие и коэффициенте Пуассона и в пять раз большим пределом прочности на растяжение.

2. Приведенные результаты будут использованы в дальнейшем для теоретических исследований напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки, возводимой из материалов на основе цементно-шлаковых смесей, находящейся под действием гор-

ного давления, воздушных ударных волн и температуры, что обеспечит ее прочность и повысит безопасность горноспасателей при тушении пожаров и взрывах метано-воздушных смесей в горных выработках угольных шахт.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смоланов С.Н., Голинько В.И., Мартиненко М.С. Изоляционные, вентиляционные и взрывоустойчивые перемычки. – Днепропетровск: Наука и образование, 2002. – 261 с.

2. Технология возведения изолирующих, водоупорных и взрывоустойчивых перемычек на шахтах ОАО «Южный Кузбасс» / И.А. Шундулиди, А.В. Чубриков, В.А. Пухтов и др. // Уголь. – 2005. – № 6. – С. 33–35.

3. Нурғалиев Е.И., Майоров А.Е., Роут Т.Н. Технология скоростного возведении высокопрочных безврубных перемычек с использованием специализированных цементных смесей // Уголь. – 2014. – № 6. – С. 20–23.

4. Булат А.Ф., Усаченко Б.М., Левченко Л.В. К выбору строительных смесей для горных технологий // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ им. Н.С. Полякова. – Днепропетровск, 2005. – Вып. 61. – С. 27–41.

5. Gallagher R. Research needs in regard to design, performance criteria, construction, maintenance assessment and repair of coal mine seals: Proceedings of the 31st International Conference of Safety in Mines Research Institutes (Brisbane, Queensland, Australia, October 2–5, 2005). – Brisbane, Queensland, Australia: Safety in Mines Testing and Research Station (Simtars), 2005, pp. 236–242.

6. Mutton I.V., Remennikov A. Designing explosion rated ventilation seals for coal mines using high-fidelity physics-based computer modelling / Aziz (ed.) // 10th Underground Coal Operator's Conference. University of Wollongong & the Australian Institute of Mining and Metallurgy, 2010, pp. 312–325.

7. Brake D.J. Fire modeling in underground mines using Ventsim Visual Vent-fire Software // The Australian Mine Ventilation Conference. Adelaide, SA, 1–3 July, 2013, pp. 265–276.

8. Zipf R.K., Jr. Methane-air detonation experiments at NIOSH Lake Lynn Laboratory. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/userfiles/.../madea.pdf> (дата обращения 14.08.2018).

9. Zipf R.K., Jr., Sapko M.J., Brune J.F. Explosion pressure design criteria for new seals in U.S. coal mines. Pittsburgh: PA, U.S. Dept. HHS, NIOSH, IC 9500; 2007. 76 p.

10. Пефтибай Г.И. Малокомпонентные быстротвердеющие цементные смеси для возведения взрывоустойчивых перемычек // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли. – 2018. – № 1. – С. 47–52.

11. Агеев В.Г. Взрывозащита при изоляции пожаров в угольных шахтах. – Донецк: Арпи, 2014. – 338 с.

12. Агеев В.Г., Пефтибай Г.И., Марийчук И.Ф. Моделирование воздействия горного давления на взрывоустойчивую перемычку // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2018. – № 2 (55). – С. 44–52.

13. Агеев В.Г., Пештибай Г.И. Математическая модель напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки под действием горного давления без учета действия воздушной ударной волны // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли. – 2017. – № 4. – С. 68–74.

14. ГОСТ 24452–80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. – М: Стандартинформ, 2005. – 13 с. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Пештибай Г.И.*<sup>1</sup> — начальник отдела, e-mail: [niigd.osmas@mail.ru](mailto:niigd.osmas@mail.ru),

*Галухин Н.А.*<sup>1</sup> — научный сотрудник, e-mail: [niigd.osmas@mail.ru](mailto:niigd.osmas@mail.ru),

<sup>1</sup> Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики, 283048, Донецк, ул. Артема, 157;

*Маричук И.Ф.* — кандидат технических наук, доцент, e-mail: [rpm2000avanek@mail.ru](mailto:rpm2000avanek@mail.ru), Донецкий национальный технический университет, 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58;

*Василенко Н.И.* — научный сотрудник, e-mail: [ifgpdnr@mail.ru](mailto:ifgpdnr@mail.ru), Государственное учреждение «Институт физики горных процессов», 83114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

No. 11 (special'nyy vypusk 49), pp. 432–442.

**Pestibay G.I., Galukhin N.A., Mariychuk I.F., Vasilenko N.I.**

### **Strength characteristics of a cement-slag material of a blasting proof stopping**

The purpose of this work is the experimental determination of mechanical characteristics (ultimate compression strength, modulus of elasticity, Poisson's ratio) of a developed quick-hardening material based on a cement binding with fillers made of industrial waste (blast-furnace slag) for their further use for modeling of the deflected mode of the blasting proof stopping.

The work used the experimental method for researches on the deflected mode of uniaxial and triaxial samples made from the cement-slag mix during compression tests and bending tension tests with the use of the modern equipment with instrumentation for the static instantaneous and continuous loads.

The dependences of strains from relative deformations of the cement-slag mix based material have been obtained, the modulus of elongation, Poisson's ratio, ultimate compression strength and ultimate tensile strength have been determined.

The following was discovered for the first time: that is the linear dependence of the cement-slag material strains of the blasting proof stopping in the early period of the strength

generation on the deformations as an elastic solid which modulus of elasticity is ten times lower than its value for the currently used gypsum plaster with the ultimate compression strength limit and the Poisson's ratio being practically identical and with its ultimate tensile strength being five times higher.

The obtained results will be used for further theoretical studies of the deflected mode of the blasting proof stopping being erected from the cement-slag mix materials under the influence of rock pressure, air shock waves and temperature in order to provide its strength and to improve the safety of mine rescuers during fighting the fires and methane-air explosions.

Key words: blasting proof stopping; cement-slag mix; sample; test; mechanical characteristics; deformation; strains.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-432-442

## AUTHORS

*Peftibay G.I.*<sup>1</sup>, head of department, e-mail: niigd.osmas@mail.ru,

*Galukhin N.A.*<sup>1</sup>, scientific associate, e-mail: niigd.osmas@mail.ru,

<sup>1</sup> The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Donetsk People's Republic, 283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma;

*Mariychuk I.F.*, Cand. Sci. Tech., associate professor, The Donetsk National Technical University (DonNTU), 283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma;

*Vasilenko N.I.*, scientific associate, The Governmental Institution "Institute of Physics of Mining Processes", 283114, Donetsk, 72, ulitsa Rosy Luxemburg.

## REFERENCES

1. Smolanov S.N., Golin'ko V.I., Martinenko M.S. *Izolyacionnye, ventilyacionnye i vzryvoustojchivye peremychki* [Insulation, ventilation and explosion-proof jumpers]. Dnepropetrovsk: Nauka i obrazovanie, 2002. 261 p.

2. Shundulidi I.A., Chubrikov A.V., Puhtov V.A. i dr. *Tekhnologiya vozvedeniya izoliruyushchih, vodoupornyh i vzryvoustojchivyyh peremychek na shahtah OAO «Yuzhnyj Kuzbass»* [Technology of construction insulating, waterproof and blast-proof bridges in the mines of OJSC «southern Kuzbass»]. *Ugol'*. 2005. no 6. pp. 33–35.

3. Nurgaliev E.I., Majorov A.E., Rout T.N. *Tekhnologiya skorostnogo vozvedeniya vysokoprochnyyh bezvrubovyyh peremychek s ispol'zovaniem specializirovannyh cementnyh smesey* [The technology of fast construction high strength bezrobotnyh jumpers with the use of specialized cement mixtures]. *Ugol'*. 2014. no 6. pp. 20–23.

4. Bulat A.F., Usachenko B.M., Levchenko L.V. *K vyboru stroitel'nyh smesey dlya gornyyh tekhnologij* [The choice of construction mixtures for mining technologies]. *Geotekhnicheskaya mekhanika: mezhdved. sb. nauch. tr. IGTM im. N.S. Polyakova. Dnepropetrovsk, 2005. Vyp. 61. pp. 27–41.*

5. Gallagher R. *Research needs in regard to design, performance criteria, construction, maintenance assessment and repair of coal mine seals*: Proceedings of the 31st International Conference of Safety in Mines Research Institutes (Brisbane, Queensland, Australia, October 2–5, 2005). Brisbane, Queensland, Australia: Safety in Mines Testing and Research Station (Simtars), 2005, pp. 236–242.

6. Mutton I.V., Remennikov A. *Designing explosion rated ventilation seals for coal mines using high-fidelity physics-based computer modelling*. Aziz (ed.). 10th Underground Coal Operator's Conference. University of Wollongong & the Australian Institute of Mining and Metallurgy, 2010, pp. 312–325.

7. Brake D.J. *Fire modeling in underground mines using Ventsim Visual Ventfire Software*. The Australian Mine Ventilation Conference. Adelaide, SA, 1–3 July, 2013, pp. 265–276.

8. Zipf R.K., Jr. *Methane-air detonation experiments at NIOSH Lake Lynn Laboratory*. URL: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/userfiles/.../madea.pdf> (data obrashcheniya 14.08.2018).

9. Zipf R.K., Jr., Sapko M.J., Brune J.F. *Explosion pressure design criteria for new seals in U.S. coal mines*. Pittsburgh: PA, U.S. Dept. HHS, NIOSH, IC 9500; 2007. 76 p.

10. Peftibaj G.I. *Malokomponentnye bystrotverdeyushchie cementnye smesi dlya vozvedeniya vzryvoustojchivyyh peremychek*. Vestnik Nauchnogo centra VostNII po promyshlennoj i ekologicheskoj bezopasnosti v gornoj otrasli. 2018. no 1. pp. 47–52.

11. Ageev V.G. *Vzryvozashchita pri izolyacii pozharov v ugol'nyh shahtah* [Explosion protection at isolation of fires in coal mines]. Doneck: Arpi, 2014. 338 p.

12. Ageev V.G., Peftibaj G.I., Marijchuk I.F. *Modelirovanie vozdejstviya gornogo davleniya na vzryvoustojchivuyu peremychku* [Modeling of rock pressure influence on explosion protection a girt]. Nauchnyj vestnik NIIGD «Respirator». 2018. no 2 (55). pp. 44–52.

13. Ageev V.G., Peftibaj G.I. *Matematicheskaya model' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya vzryvoustojchivoj peremychki pod dejstviem gornogo davleniya bez ucheta dejstviya vozdushnoj udarnoj volny* [Mathematical model of the stress-strain state of a shatter-resistant jumper under the action of rock pressure without taking into account the action of the air shock wave]. Vestnik Nauchnogo centra VostNII po promyshlennoj i ekologicheskoj bezopasnosti v gornoj otrasli. 2017. no 4. pp. 68–74.

14. GOST 24452–80. *Betony. Metody opredeleniya prizmennoj prochnosti, modulya uprugosti i koefficienta Puassona*. M: Standartinform, 2005. 13 p.



В.В. Мамаев, Р.С. Плетенецкий, Л.А. Зборщик, В.И. Францев

## АВАРИЙНОЕ ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЕ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ БОКСА-БАЗЫ ГОРНОСПАСАТЕЛЬНОЙ

Цель работы – обоснование минимально необходимого количества воздуха, подаваемого в систему жизнеобеспечения от транспортного баллона, для увеличения времени защитного действия бокса-базы в аварийном режиме. Проведены теоретические исследования факторов, влияющих на жизнеобеспечение, и экспериментальные исследования образца аварийного воздухообеспечения бокса-базы горноспасательной.

Результаты позволили определить необходимый расход воздуха для жизнеобеспечения отделения горноспасателей, а также разработать экспериментальный образец аварийного воздухообеспечения системы жизнеобеспечения бокса-базы горноспасательной.

Установлен необходимый расход воздуха для жизнеобеспечения горноспасателей в боксе-базе, отличающийся тем, что учитываются парциальное давление компонентов атмосферы, газовый состав и воздушное давление, зависящее от глубины выработки.

Результаты исследований позволяют повысить точность расчета минимально необходимого количества воздуха для жизнеобеспечения горноспасателей в боксе-базе, безопасность ведения горноспасательных работ в случае аварийного прекращения воздухоподачи.

Ключевые слова: коллективные средства защиты, бокс-база горноспасательная, система жизнеобеспечения, воздухообеспечение, угольное предприятие, ликвидация, авария, шахта.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-443-450

**Обзор проблемы.** При авариях температура воздуха в горных выработках, непосредственно примыкающих к месту аварии, значительно возрастает.

Для повышения эффективности ведения аварийно-спасательных работ и безопасности труда горноспасателей разработаны, испытаны и внедрены камеры-убежища [1–4] и передвижные подземные боксы-базы [5–8]. Такие боксы-базы предназначены для отдыха горноспасательных отделений, хранения оборудования и дыхательной аппаратуры, развертывания пункта оказания первой медицинской

помощи пострадавшим, организации телефонной связи и др. Боксы-базы обеспечивают горноспасателям комфортные условия отдыха как на маршрутах их следования в загазованной среде, так и в непосредственной близости от места ведения аварийно-спасательных работ, проводимых на значительном удалении от выработок с нормальными условиями.

Заполнение бокса-базы воздухом происходит от шахтного пневмопровода или передвижного компрессора через систему жизнеобеспечения, которая очищает подаваемый воздух от вредных газовых примесей и избыточной влаги.

В случае аварийного прекращения подачи сжатого воздуха НИИГД «Респиратор» была рассмотрена возможность применения системы аварийного воздухообеспечения от транспортных баллонов. При разработке данного воздухообеспечения возникла необходимость расчета и обоснования минимального необходимого количества воздуха для жизнеобеспечения горноспасателей в боксе-базе.

Цель работы. Обоснование минимально необходимого количества воздуха, подаваемого в систему жизнеобеспечения, для увеличения времени защитного действия бокса-базы в аварийном режиме от транспортного баллона.

Теория вопроса. При анализе современных средств спасения рассмотрены существующие подходы к расчету необходимого количества воздуха. Согласно [9] расход воздуха определяется по формуле:

$$Q = \frac{60 \cdot N \cdot M_{CO_2}}{1000 \cdot \eta \cdot C_{CO_2}}, \quad (1)$$

где  $Q$  – расход воздуха, м<sup>3</sup>/ч;  $N$  – количество людей;  $M_{CO_2}$  – удельное выделение диоксида углерода человеком, дм<sup>3</sup>/мин;  $\eta$  – коэффициент проветривания;  $C_{CO_2}$  – концентрация CO<sub>2</sub>.

Согласно [10] расход воздуха определяется только количеством людей в выработке:

$$Q = 6 \cdot N_{\text{чел.}}$$

где  $N_{\text{чел}}$  – наибольшее количество людей, одновременно работающих в очистной выработке,  $6$  – норма расхода воздуха на человека, м<sup>3</sup>/мин.

Поскольку бокс-база – относительно замкнутый объем, расход воздуха, рассчитанный по данной формуле, избыточен. Для жизнеобеспечения бокса-базы регламентируется расход воздуха от 1 до 3 м<sup>3</sup>/ч, согласно [11] объемный расход воздуха для дыхания одного человека – не менее 100 дм<sup>3</sup>/мин. Такое количество воздуха в основном определяется потребностями турбохолодильника для его работы.

В случае применения системы аварийного воздухообеспечения для эвакуации горноспасателей из бокс-базы, понижение темпера-

туры турбохолодильником становится неактуальным, более важно добиться максимального времени защитного действия бокса-базы при минимальном количестве применяемых баллонов.

Результаты теоретических исследований. Согласно [12] необходимая подача свежего воздуха в замкнутую систему по допустимой величине парциального давления диоксида углерода определяется по формуле:

$$W = \frac{T_{\text{СК}} \cdot R_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}_2 \text{ доп}}} (g_{\text{CO}_2 \text{ чел}} + g_{\text{CO}_2 \text{ под}}) \cdot \rho_{\text{CO}_2}, \quad (2)$$

где  $W$  – необходимое поступление воздуха в замкнутую систему, м<sup>3</sup>/мин;  $R_{\text{CO}_2}$  – газовая постоянная диоксида углерода, Н·м/кг·К;  $T_{\text{СК}}$  – температура воздуха в скафандре, К;  $P_{\text{CO}_2 \text{ доп}}$  – допустимое парциальное давление диоксида углерода в скафандре, Н/м<sup>2</sup>;  $g_{\text{CO}_2 \text{ чел}}$  – количество диоксида углерода, выделяемое человеком, м<sup>3</sup>/мин;  $g_{\text{CO}_2 \text{ под}}$  – количество диоксида углерода, содержащееся в подаваемом в систему воздухе, м<sup>3</sup>/мин;  $\rho_{\text{CO}_2}$  – плотность диоксида углерода, кг/м<sup>3</sup>.

Однако данная формула не позволяет учитывать фактическую величину атмосферного давления, и как следствие – глубину выработки, а также физиологически допустимый уровень диоксида углерода.

Из закона Авогадро соотношение между количеством вещества и объемами диоксида углерода и воздуха имеет следующий вид:

$$\frac{n_{\text{CO}_2}}{n_{\text{Возд}}} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{Возд}}}, \quad (3)$$

где  $n_{\text{CO}_2}$  – количество диоксида углерода, моль;  $n_{\text{Возд}}$  – количество других компонентов воздуха, моль;  $V_{\text{CO}_2}$  – объем, занимаемый диоксидом углерода, дм<sup>3</sup>;  $V_{\text{Возд}}$  – объем, занимаемый другими компонентами воздуха, дм<sup>3</sup>.

Отсюда имеем:

$$V_{\text{Возд}} = \frac{V_{\text{CO}_2} \cdot n_{\text{Возд}}}{n_{\text{CO}_2}}. \quad (4)$$

Тогда количество вещества (число киломолей) диоксида углерода (5) и воздуха (6) определяют по формуле:

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{P_{\text{CO}_2}}{R \cdot \mu_{\text{CO}_2}^{-1} \cdot T_{\text{CO}_2}}, \quad (5)$$

$$n_{\text{Возд}} = \frac{P_{\text{Возд}}}{R \cdot \mu_{\text{Возд}}^{-1} \cdot T_{\text{Возд}}}, \quad (6)$$

где  $P_{\text{CO}_2}$  – парциальное давление диоксида углерода, кПа;  $\mu_{\text{CO}_2}$ ,  $\mu_{\text{Возд}}$  – молекулярные массы диоксида углерода и воздуха соответственно;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К);  $T_{\text{CO}_2}$  – температура

диоксида углерода, К;  $T_{\text{возд}}$  – температура воздуха, К;  $P_{\text{возд}}$  – парциальное давление остальных компонентов воздуха,

$$P_{\text{возд}} = P - P_{\text{CO}_2}, \text{ кПа};$$

где  $P$  – атмосферное давление, равное сумме парциальных давлений всех компонентов воздуха, кПа.

Подставляя (5) и (6) в (4) и принимая, что  $T_{\text{CO}_2} = T_{\text{возд}} = T = \text{const}$ , получаем:

$$V_{\text{возд}} = \frac{V_{\text{CO}_2} \cdot (P - P_{\text{CO}_2}) \cdot \mu_{\text{возд}}}{\mu_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{CO}_2}}. \quad (7)$$

Объём диоксида углерода, выделяемого при дыхании людей в боксе-базе, равен:

$$V_{\text{CO}_2} = W_{\text{CO}_2} \cdot N, \quad (8)$$

где  $W_{\text{CO}_2}$  – объём диоксида углерода, выделяемый одним человеком в единицу времени при дыхании,  $\text{дм}^3/\text{мин}$ ;  $N$  – количество человек в боксе-базе.

Учитывая потери воздуха из-за возможных негерметичностей, получаем необходимый расход воздуха при проветривании:

$$V_{\text{возд}} = \frac{W_{\text{CO}_2} \cdot N \cdot (P - P_{\text{CO}_2}) \cdot \mu_{\text{возд}}}{\mu_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{CO}_2} \cdot \eta_{\text{пров}}}, \quad (9)$$

где  $P$  – атмосферное давление в выработке шахты, кПа;  $P_{\text{CO}_2}$  – допустимое парциальное давление диоксида углерода, кПа;  $\mu_{\text{возд}}$  – молекулярная масса воздуха;  $\mu_{\text{CO}_2}$  – молекулярная масса диоксида углерода;  $\eta_{\text{пров}}$  – коэффициент проветривания.

Полученные результаты. Формула (9) позволяет учитывать допустимый уровень диоксида углерода, сумму парциальных давлений компонентов воздуха (т. е. атмосферное давление и глубину выработки) и потери из-за негерметичностей.

Принимаем следующие исходные данные: скорость выделения диоксида углерода одним человеком в состоянии покоя  $W_{\text{CO}_2} = 0,3 \text{ дм}^3/\text{мин}$  [12],  $\mu_{\text{CO}_2} = 44$ ,  $\mu_{\text{возд}} = 29$ ; атмосферное давление в шахтной выработке  $P = 120 \text{ кПа}$ , допустимое парциальное давление диоксида углерода  $P_{\text{CO}_2} = 1,33 \text{ кПа}$ , коэффициент проветривания  $\eta_{\text{пров}} = 0,5$ ; количество людей, находящихся в боксе-базе  $N = 12 \text{ чел}$ .

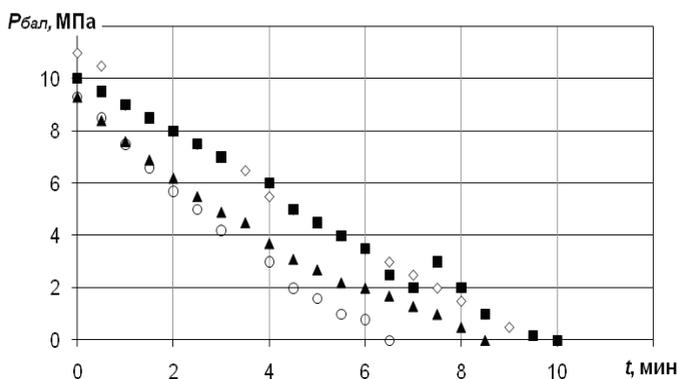
Подставив исходные данные в формулу (9) минимальное количество воздуха для вентиляции бокса-базы составит:

$$V_{\text{возд}} = \frac{0,3 \cdot 12 \cdot (120,00 - 1,33) \cdot 29}{44 \cdot 1,33 \cdot 0,5} = 423,4 \text{ дм}^3/\text{мин}.$$

Полученные результаты были использованы для обоснования параметров разработанной системы аварийного воздухообеспечения бокса-базы от транспортного баллона (рис. 1). Редуктор воздушного баллона настраивался на редуцированное давление, равное 0,2, 0,3 и 0,4 МПа, после чего определялись время защитного действия (рис. 2) и расход воздуха.



**Рис. 1. Система аварийного воздухообеспечения бокса-базы от транспортного баллона:**  
 1 – рассекатель; 2 – соединительный рукав; 3 – блок охлаждения; 4 – блок подготовки воздуха; 5 – баллон со сжатым воздухом



**Рис. 2. График зависимости изменения давления сжатого воздуха ( $P_{бал}$ ), поступающего из транспортного баллона, во времени ( $t$ ) при различных настройках редуктора:**  
 ◊, ■ – редуцированное давление, равное 0,2 МПа, ▲ – 0,3 МПа, ○ – 0,4 МПа

Поскольку динамика давления сжатого воздуха в транспортном баллоне имела линейный характер, определены следующие средние показатели расхода воздуха при различных настройках редуктора:

400 дм<sup>3</sup>/мин (при редуцированном давлении 0,2 МПа), 437 дм<sup>3</sup>/мин (0,3 МПа) и 584 дм<sup>3</sup>/мин (0,4 МПа).

Учитывая полученное расчетным путём минимально необходимое количество воздуха для жизнеобеспечения бокса-базы горноспасательной  $V_{\text{возд}} = 423,4$  дм<sup>3</sup>/мин, при настройке экспериментального образца системы аварийного воздушноснабжения была принята величина редуцированного давления, равная 0,3 МПа.

**Заключение.** Проведенные исследования позволили установить зависимость минимально необходимого количества воздуха для жизнеобеспечения бокса-базы горноспасательной от физиологически допустимого уровня диоксида углерода и глубины выработки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент Германии № DE102013018307/30.04.2015. S. Wagner. Personenschutzvorrichtung.

2. Патент Китая № CN106924903/07.07.2017. Guo Jinchang. Closed cabin life support system.

3. Патент РФ № 2619577/16.05.2017. Трубицын А.А., Ярош А.С., Дружинин А.А., Черепов А.А., Ерусланов А.П., Кузнецов Д.А., Сергеев О.А., Мусинов С.Н. Пункт коллективного спасения персонала. 2017. Бюл. № 14.

4. *Коряга М.Г., Домрачев А.Н.* Перспективы применения скважин для обеспечения аварийных режимов проветривания и спасения застигнутых аварийей людей в условиях угольной шахты // Известия Уральского государственного горного университета. – 2017. – Вып. № 1 (45). – С. 55–58.

5. *Голик А.С., Зубарева В.А., Апальков А.С., Журавлев Р.П.* Средства коллективной защиты шахтеров и горноспасателей в аварийных условиях шахт // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 1. – С. 16–19.

6. *Путин С.Б., Гудков С.В., Усов В.Н., Потапочкин В.В.* Перспективы развития средств индивидуальной и коллективной защиты при возникновении и ликвидации чрезвычайных ситуаций в угольных шахтах, // Технологии обеспечения комплексной безопасности, защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций – Проблемы, перспективы, инновации: сб. тр. XVI международной научно-практической конференции. – М., 2011. – С 326.

7. *Апальков А.С., Голик А.С. Зубарева В.А.* Безопасность шахтеров в аварийных условиях угольных шахт // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2011. – № 2. – С. 81–83

8. *Пашковский П.С., Плетенецкий Р.С., Говжеев В.В., Зборщик Л.А.* Современные средства жизнеобеспечения подземного персонала шахт в аварийных условиях // Вестник научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2017. - № 2. – С 57–64

9. Men Yongsheng, Jin Longzhe , Yang Zhe Research on key technology of waterproof refuge chamber for non-coal mine disaster // Metallurgical and Mining Industry. – 2016. – № 4. -p.100–111.

10. *Голинько В.И., Лебедев Я.Я., Муха О.А.* Вентиляция шахт и рудников. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2012. – 266 с.

11. Бурего Н.Н., Ковалевская М.М., Говжеев В.В. Система жизнеобеспечения для стационарной камеры-убежища // Горноспасательное дело. – 2011. - № 1. – С. 182–187.

12. Акопов М.Г., Дудник М.Н. Расчеты и проектирование авиационных систем индивидуального жизнеобеспечения. – М.: Машиностроение, 1985. – 231 с. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Мамаев Валерий Владимирович* – доктор технических наук, замдиректора по научной работ; e-mail:respirator@mail.dnmchs.ru;

*Плетенецкий Руслан Сергеевич* – научный сотрудник; e-mail: zoloto-russland@yandex.ru;

*Зборщик Любовь Алексеевна* – старший научный сотрудник; e-mail: oszd\_niigd\_1@mail.ru;

*Францев Виктор Иванович* – вед. инженер;

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР; Донецкая Народная Республика, 283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38062) 332-78-45.

---

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 443-450.

**Mamayev V.V., Pletenetskiy R.S., Zborshchik L.A., Frantsev V.I.**

### **Accidental air supply of a life-support system of a mine-rescue refuge chamber**

The purpose of the paper is substantiation of the minimally necessary air quantity being fed into the life-support system from a transport cylinder to increase the duration of the refuge chamber by emergency operation.

Theoretical investigations of factors influencing on the life-support and experimental studies of the specimen of the accidental air supply of the mine-rescue refuge chamber have been carried out.

The results allowed determining the necessary air consumption for the life-support of a section of the mine rescuers as well as working-out the experimental specimen of the accidental air supply of the life-support system of the mine-rescue refuge chamber.

The necessary air consumption is ascertained for the life-support of the mine rescuers in the refuge chamber that distinguishes itself by that fact that partial pressure of the atmosphere components, gas composition and air pressure depending on the depth of the mine working are taken into account.

The results of the investigations will permit to increase the computational accuracy of the minimally necessary air quantity for the life-support of the mine rescuers in the refuge chamber and will improve the safety of carrying-out the mine-rescue operations in the case of the accidental stopping of the air feed.

Key words: collective protection means, mine-rescue refuge chamber, life-support system, air supply, coal enterprise, elimination, accident, mine.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-443-450

## AUTHORS

Mamayev V.V., Dr. Sci. (Tech.), deputy director of science; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru,

Pletenetskiy R.S., scientific associate; e-mail: zoloto-russland@yandex.ru;

Zborshchik L.A., senior scientific associate; e-mail: oszd\_niigd\_1@mail.ru;

Frantsev V.I., advanced engineer,

The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-Rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defense Affairs, Emergencies, and Liquidation of Consequences of Natural Disasters; Donetsk People’s Republic, 283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma.

## REFERENCES

1. Patent Germanii no DE102013018307/30.04.2015. S. Wagner. Personenschutzvorrichtung.  
2. Patent Kitaya no CN106924903/07.07.2017. Guo Jinchang. Closed cabin life support system.

3. Patent RF no 2619577/16.05.2017. Trubicyn A.A., Yarosh A.S., Druzhinin A.A., Cherepov A.A., Eruslanov A.P., Kuznecov D.A., Sergeev O.A., Musinov S.N. Punkt kolektivnogo spaseniya personala. 2017. Byul. no 14.

4. Koryaga M.G., Domrachev A.N. *Perspektivy primeneniya skvazhin dlya obespecheniya avarijnyh rezhimov provetrivaniya i spaseniya zastignutyyh avariej lyudej v usloviyah ugol'noj shahty* [Prospects for the use of wells to provide emergency modes of ventilation and rescue caught up in the accident, persons in coal mines]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2017. Vyp. no 1 (45), pp. 55–58.

5. Golik A.S., Zubareva V.A., Apal'kov A.S., Zhuravlev R.P. *Sredstva kolektivnoj zashchity shahterov i gornospasatelej v avarijnyh usloviyah shaht* [Means of collective protection of miners and mine rescuers in emergency conditions of mines]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2013. no 1. pp. 16–19.

6. Putin S.B., Gudkov S.V., Usov V.N., Potapochkin V.V. *Perspektivy razvitiya sredstv individual'noj i kolektivnoj zashchity pri vozniknovenii i likvidacii chrezvychajnyh situacij v ugol'nyh shahtah* [Prospects of development of means of individual and collective protection at occurrence and liquidation of emergency situations in coal mines]. *Tekhnologii obespecheniya kompleksnoj bezopasnosti, zashchity naseleniya i territorij ot chrezvychajnyh situacij Problemy, perspektivy, innovacii: sb. tr. XVI mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Moscow: 2011. p. 326.

7. Apal'kov A.S., Golik A.S. Zubareva V.A. *Bezopasnost' shahterov v avarijnyh usloviyah ugol'nyh shaht* [Safety of coal miners in emergency conditions of coal mines]. *Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti*. 2011. no 2. S. 81–83

8. Pashkovskij P.S., Pleteneckij R.S., Govzheev V.V., Zborshchik L.A. *Sovremennyye sredstva zhizneobespecheniya podzemnogo personala shaht v avarijnyh usloviyah* [Modern means of life-support of underground personnel in mines under emergency conditions]. *Vestnik nauchnogo centra VostNII po promyshlennoj i ekologicheskoy bezopasnosti*. 2017. no 2. pp. 57–64

9. Men Yongsheng, Jin Longzhe, Yang Zhe *Research on key technology of waterproof refuge chamber for non-coal mine disaster*. Metallurgical and Mining Industry. 2016. no 4. pp. 100–111.

10. Golin'ko V.I., Lebedev Ya.Ya., Muha O.A. *Ventilyaciya shaht i rudnikov* [Ventilation of mines]. – Dnepropetrovsk: Nacional'nyj gornyj universitet, 2012. 266 p.

11. Burego N.N., Kovalevskaya M. Moscow: Govzheev V.V. *Sistema zhizneobespecheniya dlya stacionarnoj kamery-ubezhishcha* [System for a stationary camera-the shelter]. *Gornospasatel'noe delo*. 2011. no 1. S. 182–187.

12. Akopov M.G., Dudnik M.N. *Raschety i proektirovanie aviacionnyh sistem individual'nogo zhizneobespecheniya* [Calculations and design of aviation systems of individual life support]. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 231 p.

**И.Л. Харитонов, А.В. Корнев,  
Г.И. Коршунов, М.В. Корнева**

## **К ВОПРОСУ УЛУЧШЕНИЯ САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ТРУДА ПО ПЫЛЕВОМУ ФАКТОРУ РАБОЧИХ ОЧИСТНЫХ ЗАБОЕВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

В настоящее время уголь является одним из наиболее распространенных и востребованных полезных ископаемых. Доказанные мировые запасы угля согласно отчету компании ВР составляют свыше 891,5 млрд т. В недрах Российской Федерации сосредоточена пятая часть разведанных мировых запасов – 193,3 млрд т. Более 60 % мировой добычи угля добывается подземным способом. Общий объем добычи угля в 2017 году на территории РФ составил 408,9 млн тонн, в т.ч. подземным способом – 104,5 млн т. и открытым способом – 304,4 млн т. Российский уголь отличается высокой калорийностью и низким содержанием вредных примесей, что обуславливает его высокий спрос на мировом рынке. Для сохранения и увеличения достигнутых объемов угледобычи при ухудшении горно-геологических условий особое внимание необходимо уделять вопросам безопасности и состояния условий труда работников шахт. Среди прочих вредных и опасных факторов особое место занимает пылевой фактор, представляющий серьезную опасность как для здоровья, так и для жизни рабочих очистных забоев.

Рассмотрены различные аспекты улучшения санитарно-гигиенических условий труда по пылевому фактору рабочих очистных забоев угольных шахт на примере АО «СУЭК-Кузбасс». Проведен анализ условий труда и профзаболеваемости пылевой этиологии среди работников угольных шахт. Рассмотрены основные факторы, негативно влияющие на эффективность мероприятий по борьбе с угольной пылью.

Ключевые слова: угольные шахты, очистной забой, санитарно-гигиенические условия труда, пылевой фактор, шахтный смачиватель, запыленность, дисперсный состав, пылевая нагрузка

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-451-463

В условиях повышения интенсивности угледобычи (в России только за 2017 г. выдано на-гора 104,5 млн т) пылевой фактор на угольных шахтах требует особого внимания как с точки зрения обеспечения промышленной безопасности, так и охраны труда.

ISSN 0236–1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 451–463.

© И.Л. Харитонов, А.В. Корнев, Г.И. Коршунов, М.В. Корнева, 2018.

Только в период с 2007 по 2015 г. на российских угольных шахтах зафиксировано 30 случаев взрывов (горение, вспышки) газа и угольной пыли [1].

Доля пневмокониозов в группе профессиональных заболеваний, вызванных воздействием на организм работников промышленных аэрозолей, по данным Роспотребнадзора за 2017 г. выросла на 4,09 % по сравнению с 2014 г. и составила 25,87 % [2]. Наибольшее всего трудящихся под воздействием аэрозолей преимущественно фиброгенного действия (АПФД) насчитывается в угледобывающей отрасли – 36,4 %, что при среднесписочной численности работающих 135 181 человек весьма значительно [3].

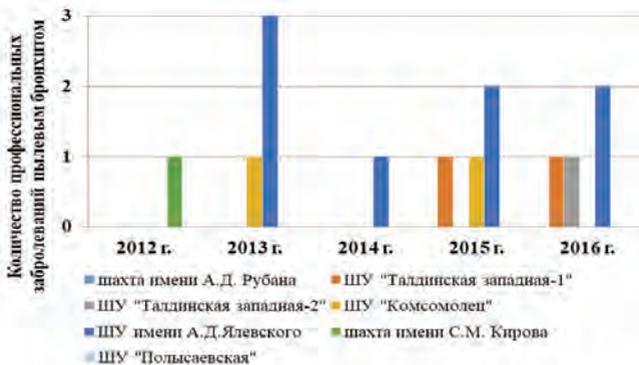
На шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» заболевания пылевой этиологии (пылевые бронхиты и пневмокониозы) занимают третье-четвертое место по распространенности среди других форм профзаболеваний после вибрационной болезни, нейросенсорной тугоухости и радикулопатии (рис. 1, на примере ШУ им. В.Д. Ялевского).



**Рис. 1. Статистика профзаболеваний на ШУ им. В.Д. Ялевского за период 2011—2017 гг.**

За период с 2012 по 2016 гг. на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» было выявлено не менее 8 случаев заболеваний пылевым бронхитом (рис. 2).

Пылевой бронхит и пневмокониоз чаще всего развиваются у горнорабочих очистного забоя, горнорабочих подземных, машинистов горных выемочных машин и проходчиков. Пневмокониозы, как правило, фиксируются среди работников с условиями труда класса 3.2—3.3, пылевой бронхит – с условиями труда класса 3.1. Согласно данным специальной оценки условий труда (СОУТ) наиболее вредные условия труда, как по пылевому фактору, так и с учетом негативного воздействия других вредных факторов среди работников очистного участка у машиниста горных выемочных машин (класс 3.3) и ГРОЗА (общий класс 3.3, по АПФД – класс 3.2).



**Рис. 2. Динамика профессиональных заболеваний пылевым бронхитом АО «СУЭК-Кузбасс» за период 2012—2016 гг.**

Аналогичная ситуация отмечается и на других предприятиях по добыче угля подземным способом как на территории РФ, так и за рубежом. Согласно официальной статистике ВОЗ, только в Соединенных Штатах Америки в период с 1970 по 2004 г. от пневмокониоза умерло более 69 тысяч работников угольных шахт [4].

Неблагоприятная пылевая обстановка в очистных забоях обусловлена, прежде всего, физико-химическими свойствами обрабатываемых пластов и значительной интенсивностью ведения горных работ, связанной с внедрением высокопроизводительных комбайнов, например, фирм «Joy» и «Eickhoff», и увеличением длины лавы на ряде шахт. Угленосные отложения на большинстве шахт АО «СУЭК-Кузбасс» содержат более 10 % свободной двуокиси кремния и горные породы относятся к силикозоопасным, что повышает риск развития пневмокониозов у работников. По пылеобразующей способности, составляющей 521,8—1369 г/т и более, обрабатываемые угольные пласты относятся к категории «пыльных» и «весьма пыльных». Это, в свою очередь, требует более тщательного контроля за состоянием пылевой обстановки на рабочих местах, оценки ее динамики и более детального изучения влияющих на нее факторов.

В настоящее время руководством и специалистами АО «СУЭК-Кузбасс» большое внимание уделяется вопросам улучшения санитарно-гигиенических условий труда по пылевому фактору рабочих очистных забоев угольных шахт. К числу основных проводимых мероприятий следует отнести использование различных средств гидрообеспыливания, применение различных смачивателей (растворов поверхностно-активных веществ) для повышения эффективности пылеподавления, применение современных средств контроля запыленности (приборов «ПКА-01», «ИЗСТ-01», «PL-3», «СIP-10»), производится оценка пылеобразующей способности добываемых углей и др.

Снижение риска развития профзаболеваемости пылевой этиологии возможно только при комплексном подходе, предусматривающем:

- применение рациональных средств и параметров гидрообеспыливания на основе учета петрографического, химического состава добываемых углей, а также их физико-химических свойств;

- оперативная корректировка режима и параметров обеспыливания при изменении вышеуказанных свойств углей и режима ведения очистных работ;

- повышение качества контроля запыленности;

- оценка динамики запыленности;

- оценка динамики дисперсного состава пылевого аэрозоля;

- учет мощности пласта и характера его разрушения при выборе средств обеспыливания;

- комплексное применение различных средств по борьбе с пылью с учетом интенсивности пылеобразования;

- внесение корректировок в нормативно-правовые документы касательно оценки влияния АПФД на человека.

В настоящее время в АО «СУЭК-Кузбасс» добыча угля ведется на 7 шахтах: «имени С.М. Кирова», «имени А.Д. Рубана», «имени В.Д. Ялевского», «Комсомолец», «Полысаевская», «Талдинская-Западная-1» и «Талдинская-западная-2» проектной мощностью от 2,2 до 10 млн т. угля в год.

Отрабатываемые пласты относятся к мощным пластам и пластам средней мощности. Вынимаемая мощность изменяется в пределах от 1,6 до 5,8 м. Максимальная среднесуточная добыча в 2016 г. была на шахте «имени В.Д. Ялевского» (13155 т/сут.) и шахте «имени С.М. Кирова» (12786 т/сут.), минимальная нагрузка на забой (3635 т/сут.) – на шахте «Талдинская-западная-2».

Угли рассматриваемых шахт относятся к маркам Г, ГЖ, Д, ДГ. Выход летучих веществ ( $V^{daf}$ ) варьируется от 36,6 % до 43,6 %. Содержание  $SiO_2$  колеблется от 20 до 45 % и более. Влажность изменяется в пределах от 1,68 до 11,5 %. Пластовая зольность в основном не превышает 10 %, однако эксплуатационная зольность для некоторых шахт многократно выше. Так, например, если при отработке пласта 52 на шахте «имени В.Д. Ялевского» (лава 5211)  $A^d_3=11–22$  %, то для условий шахты «имени С.М. Кирова» при отработке пласта «Поленовский» в 2016–2017 гг.  $A^d_3$  изменялась от 26,2 % до 48 %.

По некоторым пластам в течение года эксплуатационная зольность угля в отдельные месяцы изменяется более чем на 10 %. Например, при ведении горных работ на ш. «Полысаевская» в декабре 2015 г.  $A^d_3$  была 28,2 %, в мае 2016 г. –  $A^d_3=39,0$  %, а июне  $A^d_3=48,1$  % (рис. 3).

Колебания зольности угля отражались и на запыленности в забое. С целью оценки определения влияния зольности, влажности, химического и петрографического состава пыли различных марок углей на их

смачиваемость на базе Санкт-Петербургского горного университета были проведены исследования. Основные сведения по результатам проведенных экспериментов и анализов приведены в табл. 1.

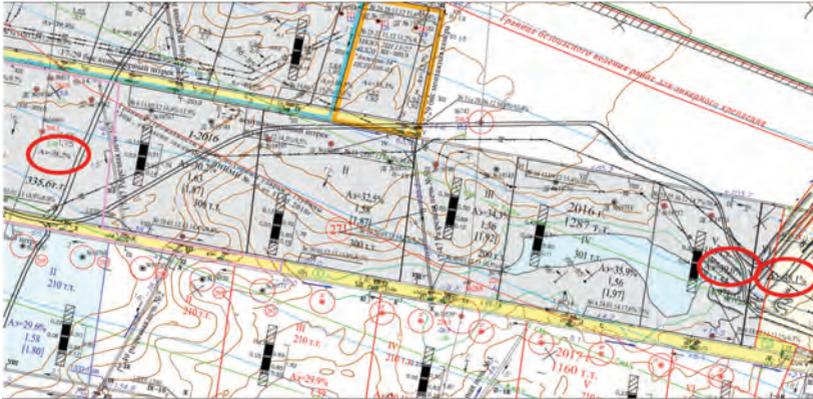


Рис. 3. Выкопировка из плана горных работ по пласту Бреевскому ш. «Польсаевская»

Таблица 1

**Результаты опытов по исследованию смачиваемости измельченных проб углей**

Наименование показателя	Значение показателя для угля, отобранного с шахты / пласта			
	Польсаевская пл. Бреевский	им. А.Д Рубана пл. Надбайкаимский	Талдинская-Западная-1 пл. 67	им. С.М. Кирова пл. Поленовский
Марка	Г	Д	ДГ	Г
Влажность, $W_t^r, \%$	4,7	7,5	11,5	3,4
Зольность, $A^d, \%$	14,5	6,0	11,0	24,2
Выход летучих веществ, $V^{daf}, \%$	41,4	40,5	38,5	43,6
Содержание общей серы $S_t^d, \%$	0,6	0,7	0,3	0,3
Микрокомпоненты				
$V_{tr}, \%$	92,7	89,7	85,0	84,3
$S_v, \%$	-	2,3	2,0	1,2
$L, \%$	2,6	2,4	2,0	6,2
$I, \%$	4,7	5,6	11,0	8,3
$\Sigma OK, \%$	4,7	7,3	12,0	9,2

Наименование показателя	Значение показателя для угля, отобранного с шахты / пласта			
	Польсаевская пл. Бреевский	им. А.Д Рубана пл. Надбайкаимский	Талдинская-Западная-1 пл. 67	им. С.М. Кирова пл. Поленовский
Химсостав проб углей, %				
SiO <sub>2</sub>	54,32	57,62	41,58	54,04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,40	21,51	31,61	20,85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,43	7,05	9,73	6,33
CaO	5,61	3,91	7,55	3,51
MgO	2,68	2,10	1,40	5,56
Другие оксиды суммарно	5,47	3,87	7,48	9,48
Относительная влагоемкость, %	36,24	33,89	34,40	35,16

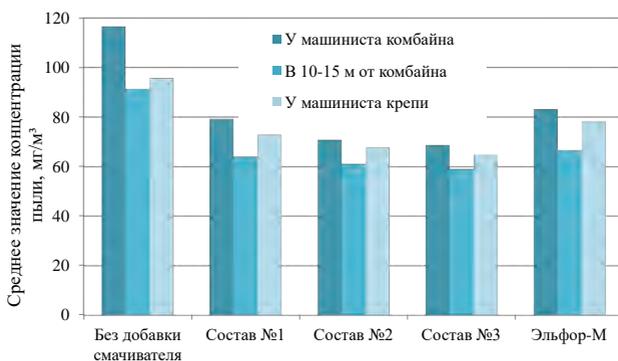
Пробы углей с ш. «им. С.М. Кирова» и ш. «Польсаевская» относятся к одной марке «Г», но отличаются по смачиваемости. В данном случае это связано с различием в зольности угля, которая составляет соответственно  $A^d = 14,5\%$  и  $A^d = 24,2\%$ . При этом, весьма важно учитывать вид и процентное соотношение минеральных включений, входящих в состав золы. Уголь марки «Д» характеризуется более высоким показателем относительной влагоемкости по сравнению с углями «ДГ» и «Г», что объясняется минимальным значением зольности  $A^d = 6\%$  и невысокой исходной влажностью. Уголь марки «ДГ» занимает промежуточное положение в метаморфическом ряду, но является наиболее гидрофобным из-за содержания золы глиноземного типа.

Опираясь на полученные результаты, необходимо отметить, что смачиваемость частиц угля зависит и от петрографического состава ввиду различной плотности микрокомпонентов. Например, плотность компонентов группы липтинита равна 1,15–1,20 г/см<sup>3</sup>, витринита 1,33 г/см<sup>3</sup>, фюзинита – более 1,40 г/см<sup>3</sup>.

Установлено, что во всех углях содержится в подавляющем количестве витринит от 84,3 до 92,7 %. В угле марки «ДГ» обнаружено также наибольшее по сравнению с другими содержание наиболее плотного инетринита (фюзенита) – 11 %, чем дополнительно объясняется его недостаточно хорошая смачиваемость [5].

С целью повышения эффективности пылеподавления в очистных забоях угольных шахт были проведены лабораторные и шахтные исследования, предложена рецептура нового состава шахтного смачивателя и определены рациональные параметры его распыления. Для пылеподавления при добыче среднеметаморфизованных углей рекомендуется

использовать 0,03 %-ный раствор 30 %-ного смачивателя, который включает 75 %  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ , 23 % Na-КМЦ и 2 % соснового масла. Результаты шахтных исследований и расположение основных замерных точек представлены на рис. 4 и 5.



**Рис. 4. Результаты шахтных исследований в лаве «24—56» пласта «Болдыревский» ш. «им. С.М. Кирова»**

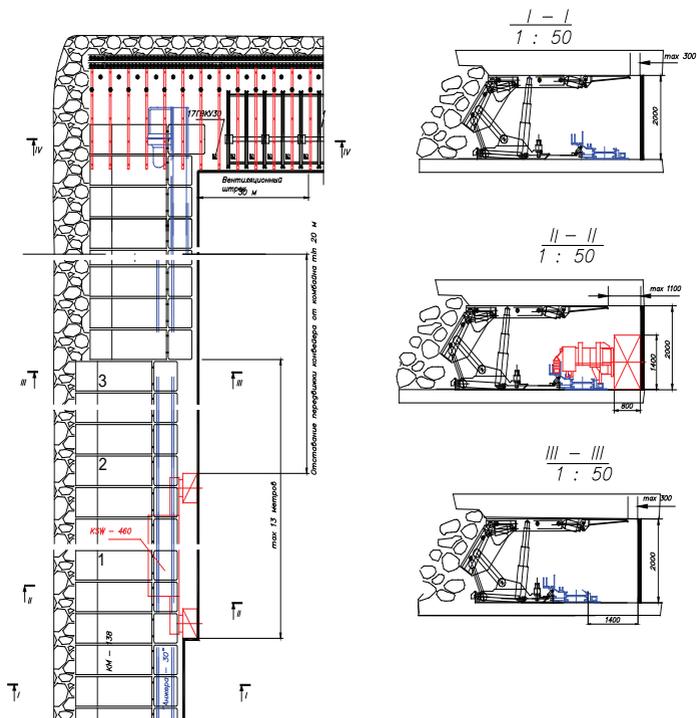
Применяемые составы №1—3 имели следующее соотношение компонентов:

- состав №1: 25 % КМЦ и 75%  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ ;
- состав №2: 23 % КМЦ + 75 %  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$  + 2 % соснового масла;
- состав №3: 20 % КМЦ + 75 %  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$  + 5 % соснового масла.

Эффективность пылеподавления на 3,0—16,6 % выше по сравнению с аналогами. позволяет снизить пылевую нагрузку на органы дыхания горнорабочих за 25-летний трудовой стаж на 340—770 г и получить экономический эффект свыше 1,6 млн руб. в год [6,7].

В условиях роста числа профзаболеваний пылевой этиологии требуется и изменение подхода к оценке пылевой обстановки и степени влияния АПФД на работников.

В связи с этим авторами предлагается помимо измерений фактической концентрации пыли проводить также анализ дисперсного состава аэрозоля с целью определения содержания респираторных и торакальных фракций, играющих ключевую роль в развитии профзаболеваний. Оценка эффективности проводимых противопылевых мероприятий и применяемых средств с этой точки зрения станет более корректной. С целью своевременного проведения превентивных мероприятий по снижению риска развития пневмокозиозов при расчете фактической пылевой нагрузки необходимо введение дополнительных коэффициентов, учитывающих долю респираторных фракций в общем объеме витающей пыли.



**Рис. 5. Расположение замерных точек запыленности в лаве «24—56»: 1 – рабочее место машиниста комбайна, 2 – рабочее место машиниста крепи, 3 – на удалении 10—15 метров от комбайна**

В частности, как один из вариантов возможно использование предлагаемой авторами формулы для расчета пылевой нагрузки (ПН):

$$\text{ПН} = (C - C_r) \cdot N \cdot T \cdot Q \cdot D, \quad (1)$$

где  $C_r$  – фактическая концентрация респираторной пыли в зоне дыхания работника, мг/м<sup>3</sup>;  $D$  – коэффициент, учитывающий содержание респираторной фракции (1–10 мкм) в аэрозоле.

При этом, если содержание респираторной фракции  $\gamma_{1-10}$  составляет от 1 до 5 %, то  $D = 1,1$ , если  $\gamma_{1-10} = 6-10$  %, то  $D = 1,2$ , если  $\gamma_{1-10} = 11-15$  %, то  $D = 1,3$ , при  $\gamma_{1-10} = 16-20$  %  $D = 1,4$ , при  $\gamma_{1-10} = 21-25$  %  $D = 1,5$ , при  $\gamma_{1-10} = 26-30$  %  $D = 1,6$ , при  $\gamma_{1-10} = 31-35$  %  $D = 1,7$ , при  $\gamma_{1-10} = 36-40$  %  $D = 1,8$ , при  $\gamma_{1-10} = 41-50$  %  $D = 1,9$ , при  $\gamma_{1-10} > 50$  %  $D = 2,0$ .

Проведенные исследования дисперсного состава витающей пыли из очистных забоев шахт АО «СУЭК-Кузбасс» показали, что подавля-

ющее количество частиц в аэрозоле (свыше 90 %) имеют размер не более 35 мкм, т.е. относятся к торакальной и респирательной фракциям (табл. 2).

Таблица 2

**Результаты анализа дисперсного состава пылевого аэрозоля на месте машиниста комбайна в очистном забое**

Шахта	Доля фракции в аэрозоле, %	
	Респирательной (0,0001–0,01 мм)	Торакальной (0,0001–0,035) мм
Талдинская-Западная-2	74,3	91,8
Имени В.Д. Ялевского	90,0	97,4
Имени С.М. Кирова	83,4	96,6

При прочих равных условиях содержание данных фракций наибольшее в пыли, отобранной на шахте им. В.Д. Ялевского. Также в этих пробах наибольшая доля частиц с эквивалентным диаметром до 2,5 мкм, которые являются наиболее опасными с точки зрения развития пневмокониозов. Таким образом, при одинаковой запыленности риск развития пневмокониоза у машиниста комбайна в лаве на «им. В.Д. Ялевского» выше по сравнению с другими. Аналогичные исследования были проведены в отношении других замерных точек (на рабочем месте машиниста крепи, на удалении 10–15 м от комбайна).

Следующим важным моментом на пути улучшения санитарно-гигиенических условий труда по пылевому фактору в очистных забоях является комплексное применение различных средств для противопылевой защиты.

Так, например, опираясь на опыт борьбы с пылью шахтах США, необходимо рассмотреть возможность применения пассивных барьеров (разделяющих консолей) с форсунками, расположенными по направлению воздушного потока и дополнительными форсунками, установленными на верхней и нижней части консоли со стороны машиниста комбайна. За счет установки дополнительной консоли с подвешенными конвейерными лентами происходит разделение вентиляционного потока на более чистый и загрязненный, а при использовании форсунок с большим расходом воды при низком давлении под соответствующим углом предотвращается дальнейшее распространение пыли [3,9].

Также для предотвращения переноса пыли из области разрушения угля в момент резки возможно использование дополнительных пластин

дефлектора с гидравлической регулировкой положения и дополнительными струйными вентиляторами [3,9,10].

В очистных забоях шахт Австралии и Южной Африки применяются новые и усовершенствованные конструкции систем Вентури для создания водяного тумана, параметры и направление установки которых подбираются с учетом распределения пылевых частиц в воздухе забоя [11, 12].

Как одно из средств минимизации воздействия на работников очистного забоя пылевого аэрозоля, может являться установка на элементах механизированной крепи гибких экранов, параметры которых зависят от вынимаемой мощности пласта и типа крепи.

Использование средств гидрообеспыливания должно быть по возможности всесторонним, предусматривающем не только работающие форсунки на комбайне, но и элементах секций крепи, направленные как в сторону завала, так и сторону забоя.

Нормализация пылевой обстановки невозможна и без соответствующего контроля за исправностью средств по борьбе с пылью и принятия оперативных мероприятий по устранению замеченных отклонений. Это касается, в том числе и работоспособности форсунок, которые могут быть забиты мелкодисперсным углем или засохшим раствором смачивателя.

Таким образом, мероприятия по улучшению санитарно-гигиенических условий труда по пылевому фактору рабочих очистных забоев угольных шахт должны быть комплексными, всесторонними и учитывать всю специфику:

- горно-геологических условий (мощность пласта),
- свойств и состава добываемых углей (влажность, крепость, петрографический состав, зольность);
- аэро- и пылединамических процессов;
- технологического процесса (конструктивные особенности используемого комбайна, интенсивность ведения работ);
- использования различных смачивателей.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Мясников С.В. Состояние промышленной безопасности и организация контроля в угольной промышленности // - Безопасность труда в промышленности. – 2015. - № 6. - С. 9—16.

2. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2017 году: Государственный доклад. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2018. – 268 с.

3. Бюллетень «Состояние условий труда работников, осуществляющих деятельность по сельскому хозяйству, охоте, лесному хозяйству, добыче полез-

ных ископаемых, в обрабатывающих производствах, по производству и распределению электроэнергии, газа и воды, в строительстве, на транспорте и в связи Российской Федерации в 2015 году». Том 1. – М.: Федеральная служба государственной статистики (Росстат), Главный межрегиональный центр (ГМЦ), опубликовано 25.04.2016. – 106 с.

4. Jay F. Colinet Best Practices for Dust Control in Coal Mining / Jay F. Colinet, James P. Rider, Jeffrey M. Listak, John A. Organiscak, Anita L. Wolfe - DHHS (NIOSH) Publication, No. 2010-110, - 70 p.

5. Коршунов Г.И. Исследование влияния степени метаморфизма и физико-химических свойств добываемых углей на смачиваемость образующейся пыли / Г.И. Коршунов, А.В. Корнев, А.Х. Ерзин, А.М. Сафина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №1 (специальный выпуск 6) – С. 3–10.

6. Коршунов Г.И. Исследование особенностей взаимодействия растворов поверхностно-активных веществ с угольной пылью / Г.И. Коршунов, А.В. Корнев, А.Х. Ерзин, А.М. Сафина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 1 (специальный выпуск 6) С. 11–17.

7. Ерзин А.Х. Повышение эффективности пылеподавления при подземной разработке угольных месторождений с использованием поверхностно-активных веществ: Диссертация канд. техн. наук / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб.: 2015. – 148 с.

8. Steve Fiscor U.S.U.S. Longwall Operations: How Slow Can We Go? / Coal Age January-February 2017, P.26–32.

9. Syd S. Peng Longwall Mining. – West Virginia University, 2006. – 621 p.

10. Steve Fiscor U.S. Longwall Operators Scale Back Production / Coal Age, February 2016, P. 18–22.

11. Chen, X., Hu, H., Xu, Y., Zhang, Y., and Yang, G., 2015, “Experimental investigation of foam dedusting agent in underground coal mine,” Materials Research Innovations, Vol. 19, No. S8, pp. 508–51.

12. Barone, T.L., Patts, J.R., Janisko, S.J., Colinet, J.F., Patts, L.D., Beck, T.W, and Mischler, S.E., 2016, “Sampling and analysis method for measuring airborne coal dust mass in mixtures with limestone (rock) dust,” Journal of Occupational and Environmental Hygiene, Vol. 12, No. 4, pp. 288–296. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

Харитонов И.Л. – заместитель технического директора АО «СУЭК-Кузбасс», e-mail: KharitonovIL@suek.ru,

Корнев А.В.<sup>1</sup> – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, доцент кафедры безопасности производств, e-mail: kornev\_ori@mail.ru,

Коршунов Г.И. <sup>1</sup> – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности производств, e-mail: Korshunov\_gi@spmi.ru,

Корнева М.В. <sup>1</sup> – аспирант кафедры безопасности производств, e-mail: mariya\_ori@mail.ru,

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».

**Kharitonov I.L., Kornev A.V., Korshunov G.I., Korneva M.V.**

## **To the improvement of sanitary-hygienic conditions of work on the dust factor of coal mines stopers**

Currently, coal is one of the most common and sought-after minerals. Proved world coal reserves according to BP's report are over 891.5 billion tons. In the bowels of the Russian Federation, a fifth of the world's explored reserves are concentrated - 193.3 billion tons. More than 60% of the world's coal production is extracted underground. The total volume of coal production in 2017 in the territory of the Russian Federation amounted to 408.9 million tons, included underground - 104.5 million tons and open method - 304.4 million tons. Russian coal is highly caloric and low in harmful impurities, which causes its high demand in the world market. To maintain and increase the achieved volumes of coal mining with deterioration of mining and geological conditions, special attention should be paid to safety issues and the state of working conditions of mine worker. Among other harmful and dangerous factors, a special place is occupied by the dust factor, which poses a serious danger both for health and for the life of the workers.

The authors consider various aspects of improving the sanitary and hygienic working conditions for the dust factor of coal mine workers on the example of JSC «SUEK-Kuzbass». The analysis of working conditions and occupational morbidity of dust etiology among employees of coal mines was carried out. The main factors negatively affecting the effectiveness of measures to coal dust control are considered. The results of laboratory studies on the dependence of the wettability of coal dust on its composition and physicochemical properties are given. The results of mine researches of the developed wetting agent, allowing to reduce the dust load on the breathing organs of workers, are given. Solutions are offered and recommendations are given on normalization of working conditions in the coal mines' cleaning faces by the dust factor.

Keywords: coal mine, stope, sanitary and hygienic working conditions, dust factor, mine wetting, dust, particulate composition, dust load.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-451-463

## **AUTHORS**

*Kharitonov I.L., Deputy Technical Director of JSC "SUEK-Kuzbass", e-mail: KharitonovIL@suek.ru, JSC "SUEK-Kuzbass",*

*Kornev A.V.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory, Associate Professor of Industrial Safety Department, kornev\_opi@mail.ru,*

*Korshunov G.I.<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences. Professor, Head of Industrial Safety Department, e-mail: Korshunov\_gi@spmi.ru,*

*Korneva M.V.<sup>1</sup>, Post-graduate Student of Industrial Safety Department, e-mail: mariya\_opi@mail.ru,*

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

## **REFERENCES**

1. Mjasnikov S.V. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [State of industrial safety and organization of control in the coal industry], 2015, no. 6, pp. 9–16.

2. Chebotarjov A.G. *O sostojanii sanitarno-jepidemiologicheskogo blagopoluchija naselenija v Rossijskoj Federacii v 2017 godu* [On the state of sanitary and epidemiological welfare of the population in the Russian Federation in 2017]: Gosudarstvennyj doklad. Moscow: Federal'naja sluzhba po nadzoru v sfere zashhity prav potrebitelej i blagopoluchija cheloveka, 2018. 268 p.

3. Bjulleten' «Sostojanie uslovij truda rabotnikov, osushhestvljajushhijh dejatel'nost' po sel'skomu hozjajstvu, ohte, lesnomu hozjajstvu, dobyche poleznyh iskopaemyh, v obrabatyvajushhijh proizvodstvah, po proizvodstvu i raspredeleniju jelektroenergii, gaza i vody, v stroitel'stve, na transporte i v svjazi Rossijskoj Federacii v 2015 godu». Tom 1. Moscow: Federal'naja sluzhba gosudarstvennoj statistiki (Rosstat), Glavnyj mezhhregional'nyj centr (GMC), opublikovano 25.04.2016. 106 p.

4. Jay F. *Colinet Best Practices for Dust Control in Coal Mining*. Jay F. Colinet, James P. Rider, Jeffrey M. Listak, John A. Organiscak, Anita L. Wolfe DHHS (NIOSH) Publication, No. 2010-110, 70 p.

5. Korshunov G.I., Kornev A.V., Erzin A.H., Safina A.M. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, 2015, no. 1, special vol. 6, pp. 3–10.

6. Korshunov G.I., Kornev A.V., Erzin A.H., Safina A.M. *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, 2015, no. 1, special vol. 6, pp. 11–17.

7. Erzin A.H. *Povyshenie jeffektivnosti pylepodavlenija pri podzemnoj razrabotke ugol'nyh mestorozhdenij s ispol'zovaniem poverhnostno-aktivnyh veshhestv (Improving efficiency of dust control of underground coal mining using surfactants)* [Improving the efficiency of dust extraction in underground mining of coal deposits using surfactants]: Dissertacija kand. tehn. nauk. Nacional'nyj mineral'no-syr'evoj universitet «Gornyj». SPb.: 2015. 148 p.

8. Steve Fiscor U.S.U.S. *Longwall Operations: How Slow Can We Go?* / Coal Age January-February 2017, P.26–32.

9. Syd S. *Peng Longwall Mining*. West Virginia University, 2006. 621 p.

10. Steve Fiscor U.S. *Longwall Operators Scale Back Production* / Coal Age, February 2016, P. 18–22.

11. Chen, X., Hu, H., Xu, Y., Zhang, Y., and Yang, G., 2015, “*Experimental investigation of foam dedusting agent in underground coal mine,*” *Materials Research Innovations*, Vol. 19, No. S8, pp. 508–51.



## МЕТОД СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МОДЕЛИРОВАНИИ РАЗРУШЕНИЯ И ОБРУШЕНИЯ КРОВЛИ ВЫРАБОТКИ

Описание разрушения хрупких и квазихрупких твердых тел и горных пород является одной из актуальных задач геомеханики. Аналитическое решение задачи об устойчивости массива горной породы, подверженного техногенному воздействию, затруднено ввиду сложности и разнообразия процессов, происходящих при этом. Вопросам компьютерного моделирования процессов разрушения твердых деформируемых тел и анализу происходящих при этом явлений уделено внимание во многих исследованиях и в ряде из них [1-7] достигнут значительный прогресс в этой области. В статье с помощью компьютерного моделирования методом сглаженных частиц SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) исследуется поведение массива с выработкой в поле сил тяжести. Кратко изложена методология применения выбранного метода и приведены основные соотношения. Разработана и реализована вычислительная технология для решения рассматриваемого класса задач. Определяются основные параметры: распределение напряжений, возникающих при продвижении выработки, а также трещинообразование и фрагментация массива. Получены картины развития разрушения горной породы, вызванного увеличением выработанного пространства. Результаты показывают влияние протяженности выработки на характер разрушения. Использование метода сглаженных частиц позволяет достаточно точно рассчитывать задачи деформирования и разрушения горных пород при техногенном воздействии.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, разрушение кровли, трещинообразование, массив горной породы, выработка, метод сглаженных частиц.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-464-475

### Введение.

#### Теоретические соотношения метода SPH

Для решения задачи используются уравнения механики деформируемого твердого тела, включающие законы сохранения массы и импульса [8]:

$$\frac{\dot{V}}{V} - U_{i,i} = 0,$$

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. по 11 (специальный выпуск 49). С. 464–475.

© О.Н. Малинникова, В.А. Трофимов, И.Е. Шиповский, 2018.

$$\rho \dot{U}_i = \sigma_{ij,j} + \rho F_j \quad (1)$$

Уравнение движения записано с учетом массовой силы тяжести, вызванной гравитацией.

Тензор напряжения может быть записан как:

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + S_{ij}, \quad (2)$$

где  $P$  – давление,  $\delta_{ij}$  – дельта функция Кронекера ( $\delta_{ij} = 1$  при  $i = j$ , иначе  $\delta_{ij} = 0$ ),  $S_{ij}$  – девиатор тензора напряжения.

Система (1) замыкается уравнением состояния для определения давления:

$$P = K(\rho_0 / \rho - 1), \quad (3)$$

где  $K$  – модуль объемного сжатия, и определяющими соотношениями для девиатора  $S_{ij}$  (закон Гука):

$$\dot{S}_{ij} + \lambda S_{ij} = 2\mu \left( \dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \dot{\epsilon}_{kk} \right). \quad (4)$$

Дифференцирование по времени в (4) компонентов девиатора тензора напряжений проводится в смысле Яумана

$$\dot{S}_{ij} = \dot{S}_{ij} - S_{ik}\omega_{jk} - S_{jk}\omega_{ik}, \quad (5)$$

где  $\omega_{ij} = \frac{1}{2}(U_{i,j} - U_{j,i})$  – мощность энергии формоизменения  $\lambda$  и  $\infty$  – коэффициенты Ляме; точка над символом означает материальную производную по времени. Величина  $\dot{S}_{ij}$  вводится для того, чтобы обеспечить нулевую скорость изменения напряжённого состояния среды при вращении её отдельных элементов как жёсткого целого.

Множитель  $\lambda$  положителен при пластических деформациях сдвига и тождественно равен нулю при упругом сдвиге. При  $\lambda = 0$  получаются уравнения Гука в дифференциальной форме. Параметр  $\lambda$  можно определить, используя условие пластичности:

$$\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} = \frac{1}{3} Y_0, \quad (6)$$

где  $Y_0$  – предел текучести. В численных расчетах применялась процедура приведения напряжений к кругу текучести [8], что эквивалентно решению полных уравнений Прандтля-Рейса.

В расчетах среда считается изотропной, а релаксация – мгновенной.

Представленная модель (1)...(6) позволяет описать незначительную неупругую деформацию, предвещающую разрушение хрупких тел и геосред. Эта неупругая деформация отражает макроскопический

отклик среды на нагружение за счет дилатантных процессов — накопления в среде мелких повреждений и трещин.

В условиях плоской деформации рассматривается изменение состояния горного массива при расширении выборочного пространства в поле сил тяжести. Начальная геометрия задачи представлена на рис. 1.

Для замкнутой системы уравнений (1)–(6) ставится краевая задача с начальными и граничными условиями, состоящими в том, что на свободных поверхностях полагается отсутствие напряжений, а на боковых границах реализуется граничное условие бесконечности.

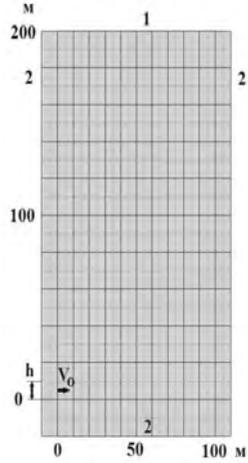
При решении задачи требуется определить компоненты тензора напряжений  $\sigma_x, \sigma_y$  и  $S_{xy}$  во всех точках массива и компоненты упругих перемещений  $u_x$  и  $u_y$  произвольной точки.

Для решения поставленной задачи был выбран положительно зарекомендовавший себя для задач разрушения метод сглаженных частиц (SPH) [9].

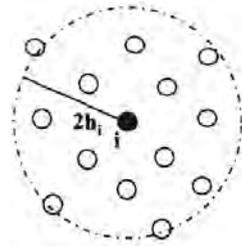
Достоинством метода SPH является возможность расчета смещений с произвольными деформациями при сохранении преимуществ лагранжевого подхода. Метод SPH – лагранжевый метод, в котором материал разбивается на частицы (рис. 1), для каждой из которых в любой момент времени известны масса, плотность, положение, скорость и напряжения.

Производные, входящие в уравнения (1), вычисляются с помощью сплайн – интерполяции, в соответствие с чем каждая частица является точкой интерполяции, в которой известны параметры деформируемой среды. Численное решение во всей области интегрирования получается с помощью интерполяционных функций, для которых эти частицы являются интерполяционными узлами. Таким образом, вычисление градиентов сводится к аналитическому дифференцированию гладких функций. Пусть есть частица  $x_i$  с массой  $m_i$  и некоторым свойством  $A_i$ . Основная суть метода заключается в приближении формулы

$$A(x) = \int_R A(x_j) \delta(x - x_j) dx \quad (7)$$



**Рис. 1. Начальная геометрия задачи:**  
**1 – свободная граница;**  
**2 – граничное условие бесконечности; h – высота выработки;  $V_0$  – скорость продвижения забоя**



**Рис. 2. Окрестность SPH-частицы**

цепочкой преобразований. Обобщенную функцию  $\delta$  заменяем аналитической функцией  $W(x - x_j, h)$  - ядром сглаживания с радиусом сглаживания  $h$ :

$$A(x) = \int_R A(x_j) W(x - x_j, h) dx. \quad (8)$$

Значение  $h$  приблизительно равно характерному расстоянию между частицами, выбранному в расчетах для решаемой задачи.

Тогда, если известны значения этого свойства для частиц, находящихся в некоторой окрестности  $x_i$  (в пределах двух сглаживающих радиусов (рис. 2)), то  $A_i$  будет вычисляться как

$$A(x) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} W(x - x_j, h), \quad (9)$$

где  $\rho_j$  — плотность частицы.

В формуле (9) предполагается, что суммирование ведется по всем частицам, находящимся в пределах двух сглаженных радиусов. Сглаживающая функция такова, что

$$\int_{x-x_i} W(x - x_i) dx = 1, \quad (10)$$

$$W(x - x_i, h) = 0, \quad |x - x_i| > 2h. \quad (11)$$

В расчетах используется функция  $W(x, h) = e^{-(x/h)^2}$ , которая удовлетворяет указанным условиям.

Использование такой аппроксимации существенно упрощает вычисление градиента функции, так как достаточно аналитически продифференцировать ядро сглаживания, что даст

$$\nabla A(x) = \sum_j \frac{m_j A_j}{\rho_j} \nabla W_j. \quad (12)$$

Численные аппроксимации уравнений механики деформируемого тела (1), построенные с помощью метода SPH, выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_i}{dt} &= \rho_i \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} (U_j - U_i) \cdot \nabla W_{ij}, \\ \frac{dU_i}{dt} &= - \sum_j m_j \left( \frac{\sigma_i}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j}{\rho_j^2} \right) \cdot \nabla W_{ij}. \end{aligned} \quad (13)$$

Интегрирование уравнений для  $i$ -й частицы производится по следующей схеме:

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \Delta t \left( u_i^n + \frac{1}{2} \Delta t \frac{du_i^n}{dt} \right), \quad \rho_i^{n+1} = \rho_i^n + \Delta t \frac{d\rho_i^n}{dt}, \quad u_i^{n+1} = u_i^n + \Delta t \frac{du_i^n}{dt},$$

$$S_i^{n+1} = S_i^n + \Delta t \frac{dS_i^n}{dt}, \quad (14)$$

причем значения компонентов тензора напряжений  $\sigma_i^{n+1}$  вычисляется с помощью уравнения состояния (3) по вычисленным значениям плотности  $\rho_i^{n+1}$  и девиатора  $S_i^{n+1}$ .

Для потребностей геотехнической механики полезным качеством метода сглаженных частиц является способность представлять разрушение горных пород в реалистической форме без дополнительных условий и, не ставя при этом под угрозу способность проведения дальнейших вычислений. Как только под действием растягивающих напряжений выполняется условие выхода частицы за пределы окрестности, определенной радиусом сглаживания, — исчезает взаимодействие между соседними частицами. Таким образом, численно моделируется разрушение материала. В последнее время для более реалистичного описания разрушения материала в методе сглаженных частиц трактовка разрушения за счет его бессеточной основы была объединена с алгоритмом накопления повреждений. Для хрупких материалов используется статистическая теория разрушения Грэди и Киппа [9, 10]. Эта теория постулирует уравнение накопления повреждений за счет хрупкого микро - растрескивания, которое задает скорость накопления повреждений пропорционально текущему числу повреждений в единице объема и в соответствие с окружающим напряженно — деформированным состоянием.

Уравнение эволюции повреждений включает пороговый член, равный статическому пределу прочности и временной параметр, управляющий нормой накопления повреждений. Представление материала в виде лагранжевых частиц позволяет без затруднений определять разрушение как предельный результат накопления повреждения по простым правилам для кинематических ограничений взаимосвязи между соседними частицами. Повреждение рассматривается как рост необычайной переменной  $D$ , которая отвечает текущему напряженному состоянию и состоянию поврежденности. Повреждение меняет некоторые свойства материала. В динамических условиях это дает возможность пространственной локализации областей быстро возрастающего повреждения, сопровождающегося размягчением, которое изменяет картину напряженно — деформированного состояния окружающей горной породы. Это интерпретируется как начало трещинообразования. Поскольку метод сглаженных частиц — интерполяционный бессеточный метод, рассматривающий взаимодействие только в окрестности близлежащих соседних частиц, трактовка разрушения значительно упрощена за счет ослабления связей между поврежденными частицами. Нарушение кинематического ограничения взаимосвязи между частицами ведет к образованию новых границ. Таким образом, меняется

краевая задача и требуется введение новых граничных условий. Изменение границ влияет на движение материала и на соответствующее напряженно — деформированное состояние.

Моделирование повреждений за счет растяжения в методе сглаженных частиц состоит изопределения скалярной переменной поля повреждений и эволюционной модели отслеживания достижения максимальным главным напряжением порогового значения. Для сдвиговых повреждений используется идеология Джонсона — Кука [7]. Параметр накопления сдвиговых повреждений — также скалярная переменная, определяемая нормализованным интегрированием по времени эквивалентной скорости пластической деформации.

Модель повреждения Джонсона — Кука для сдвиговых повреждений определяется оценочным уравнением, зависящим от эквивалентной скорости пластической деформации

$$\dot{D}_S = \dot{\epsilon}_P / \epsilon_f, \quad (15)$$

где  $\epsilon_f$  — предельная деформация разрушения определяется как

$$\epsilon_f = [d_1 + d_2 \text{Exp}(d_3 \sigma^*)] [1 + d_4 \ln(\dot{\epsilon}_P / \dot{\epsilon}_0)] [1 + d_5 T^*]. \quad (16)$$

Здесь  $\sigma^*$  — отношение главного напряжения ( $-P$ ) к эквивалентному напряжению  $\sqrt{3J_2}$ , где  $J_2$  — второй инвариант девиатора тензора напряжений. Температура  $T^*$  - константа материала [9].

Эволюционное уравнение для повреждений, вызванных растягивающими напряжениями постулируется как

$$\dot{D}_t = [(\sigma_{\max} - \sigma_{th}) / \sigma_{th}^0]^2 / [t_d(1 - D_t^2)], \quad (17)$$

где полагается что  $\dot{D}_t = 0$  для  $\sigma_{\max} \leq \sigma_{th}^0$ . Накопление повреждений происходит когда максимальное главное напряжение  $\sigma_{\max}$  превышает заданное пороговое значение напряжения растяжения  $\sigma_{th}^0$ . Параметры модели  $t_d$  — временная константа, которая управляет нормой накопления повреждения и  $\sigma_{th}^0$  -пороговая поврежденность материала, которая обычно берется равной статическому пределу прочности материала при растяжении. Член  $1 / (1 - D_t^2)$  в (17) несет свойство уменьшения эффективной временной константы, по мере накопления повреждений и увеличивает локализацию. Как в модели разрушения за счет сдвига, так и в модели разрушения за счет растягивающих напряжений значения соответствующих параметров поврежденности лежат в диапазоне  $0 < D < 1$ , где 0 соответствует неповрежденному материалу, а 1 — полностью поврежденному материалу.

Важным свойством этих параметров повреждения является их взаимодействие и обратная связь с другими параметрами напряженно-деформированного состояния.

Полагается, что ослабление, размягчение и расщепление, как следствие поврежденности, функционально задается через модули:

$$\begin{aligned} \sigma_{th} &= (1 - D_S^2)(1 - D_t^2)\sigma_{th}^0, \quad K = (1 - D_t^2)K_0, \\ \mu &= (1 - D_t^2)\mu_0, \quad Y = (1 - D_t^2)Y_0, \\ h &= \text{Max} [(1 - D_t^2)h_0, 0.3h_0]. \end{aligned} \quad (18)$$

Считается, что размягчение материала от повреждения, вызванного растяжением, уменьшает модуль объемного сжатия  $K$ , модуль сдвига  $\mu$  и предел текучести  $Y$  от их базовых значений для неповрежденного материала  $K_0$ ,  $\mu_0$  и предела текучести  $Y_0$  в (18), соответственно. Последнее выражение в (18) уменьшает радиус сглаживания  $h$  от его значения  $h_0$  для неповрежденного материала с ограничением 30% от изначального значения. Это простой способ представить действие разрушения на взаимосвязь между частицами через радиус сглаживания. Компоненты сжимающих напряжений не уменьшаются по мере разрушения, так как материал в области разрушения остается способным к передаче сжимающих усилий.

### Результаты расчетов

Проведившееся сопоставление результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными и расчетами другими методами [11, 12] показало, что использование метода сглаженных частиц (SPH) позволяет достаточно точно рассчитывать задачи деформирования и разрушения геосреды и получать достоверные результаты.

На рис. 3 представлено сравнение расчетов нарушения целостности кровли выработки методом сглаженных частиц с расчетом методом [8], выполненным авторами работы [2].

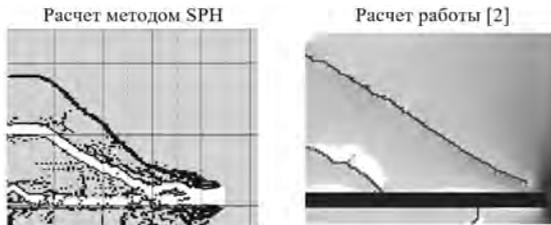
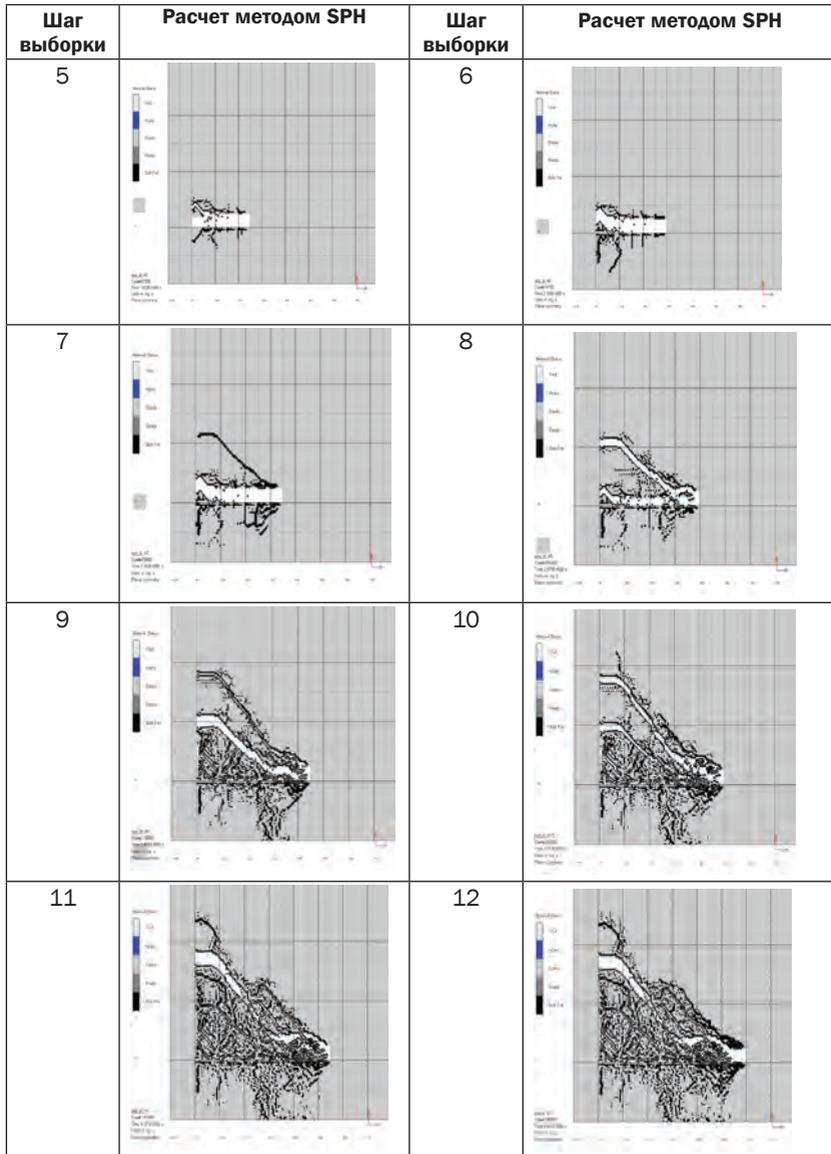


Рис. 3. Сравнение расчетов состояния кровли при продвижении выработки

Наблюдается согласованность картин образования магистральных трещин, определяющих процесс посадки кровли. Известные величины реальных посадок и их времена, а также соответствующие скорости подвигания забоя, позволяют подобрать соответствующие параметры расчета для моделирования состояния посадок кровли конкретной выработки.

На рис. 4 показана хронограмма трещинообразования и обрушения кровли в массиве горной породы при увеличении выборочного пространства.



*Рис. 4. Результаты расчета состояния и обрушения кровли при продвижении выработки*

Полученные в результате расчетов картины разрушения и фрагментации массива горной породы показывают возможности предлагаемой вычислительной технологии решать задачи горного производства.

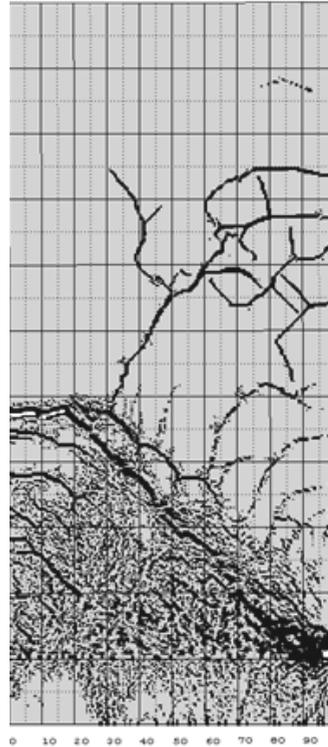
### **Выводы и перспективы развития направления**

Используемая модель динамического разрушения наглядно воспроизводит рост трещин в горной породе путем ослабления взаимосвязей между частицами материала и формирования новых свободных поверхностей. При превышении предела прочности происходит рост трещин с ослаблением поля напряжений за счет образования новых поверхностей на берегах трещин. Растягивающие напряжения и напряжения сдвига за счет возникшей фрагментации ведут к снижению прочностных параметров напряженно-деформированного состояния, т.е. к накоплению повреждений в массиве горной породы. Такого рода разрушения актуальны при напряжениях, наблюдаемых в горных массивах, ослабленных выработками.

Поскольку микротрещины в пределах каждой частицы растут по той же идеологии, что и явные макротрещины, используемая модель представляет независимую от масштаба физику разрушения.

Возможности предложенного подхода к моделированию разрушения проиллюстрированы на исследовании развития трещин в поле действия сил тяжести в массиве горной породы с подвигаемой выемкой в сравнении с расчетом другим методом. Полученные путем изложенного подхода моделирования результаты достаточно близко качественно согласуются.

Численное моделирование методом сглаженных частиц с использованием комбинированной модели накопления геосредой повреждений в ходе ее нагружения, учитывающей различие величин предельной прочности материала на растяжение и на сжатие, в совокупности с трактовкой разрушения за счет бессеточной основы метода, способствует более качественному изучению и лучшему пониманию физиче-



*Рис. 5. Развитие фрагментации массива при обрушении кровли*

ских процессов, происходящих при деформирования и разрушении горных пород.

Полученные результаты исследования являются базовыми для разработки перспективных направлений методологических и научных исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хозяйкина Н.В. Обрушение пород кровли в лавах пологопадающих угольных пластов: Монография // Днепропетровск: Национальный горный университет. – 2012. – 127 с.

2. Макаров П.В., Евтушенко Е.П., Еремин М.О. Эволюция напряженно-деформированного состояния горного массива с выработками. Математическое моделирование: Монография. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2016. – 184 с.

3. Фрянов В.Н., Цветков А.Б., Павлова Л.Д. Выявление закономерностей изменения геомеханического состояния массива горных пород при многоштрековой подготовке и отработке выемочного участка // ФПВГН. – 4. – no 2. – 2017. – С.182–186.

4. Makarov P.V., Eremin M.O. Rock mass as a nonlinear dynamic system. Mathematical modeling of stress-strain state evolution in the rock mass around a mine opening // Physical Mesomechanics, vol. 21, no 4, 2018, pp. 293–296.

5. Zhou, J. Micromechanics Damage Modeling of Brittle Rock failure Processes under Compression // Int. J. Comput. Meth., 2013. vol. 10, no 6, pp 1350034–1–1350034–18.

6. Трофимов В.А., Малинникова О.Н., Филиппов Ю.А. Оценка расслоения пород кровли при отработке угольного пласта// ГИАБ. – 2016. – no 2.-С.119–126.

7. Trubetskoi K.N., Iofis M.A., Kuznetsov S.V., Trofimov V.A. Basic regularities governing the subsidence of undermined rock strata and deflection of hanging roof at shallow and great depths//Journal of mining science, Consultants Bureau, New York. – 1999. – vol. 35. – no 3. – С.209–215.

8. Wilkins, Mark L. Computer simulation of dynamic phenomena, Berlin-Heidelberg: Springer -Verlag, 1999, 246 p.

9. Libersky L.D., Randles P.W. Smoothed Particle Hydrodynamics: Some recent implements and applications // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., vol. 139, 1996, pp. 375–408.

10. Graya J.P. Monaghan J.J. Numerical modelling of stress fields and fracture around magma chambers // Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol. 135, 2004, pp. 259–283.

11. Шиповский И.Е. Трехмерный расчет разрушения образцов с трещиной // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов. – Ин-т геотехнической механики НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 20(1). – 2014. – С. 191–198.

12. Шиповский И.Е. Расчет хрупкого разрушения горной породы с использованием бессеточного метода // Научный вестник НГУ – НГУ. – Днепропетровск, – Вып. 1(145). – 2015. – С. 76–82. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Малинникова Ольга Николаевна* — доктор технических наук, заведующий лабораторией,

*Трофимов Виталий Александрович* — доктор технических наук, заведующий лабораторией,

*Шиповский Иван Евгеньевич* — кандидат технических наук, старший научный сотрудник,

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук 111020, Москва, Крюковский тупик, д.4. iv\_ev@mail.ru.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 464–475.

**Malinnikova O.N., Trofimov V.A., Shipovskii I.E.**

### **Method of smooth particle hydrodynamics for simulation the failure and relief of the roof of mine working**

Description of the failure of brittle and quasi-brittle solids and rocks is one of the urgent problems of geomechanics. An analytical solution to the problem of the stability of an massif of rocks subject to man-made doing is hampered by the complexity and variety of processes occurring in this process. The problems of computer modeling of the processes of failure and fracture of solid deformable bodies and analysis of the phenomena taking place in this regard have been given attention in many studies and in a number of them [1–7] significant progress has been made in this area. In this paper, using computer simulation based on the SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) method, the behavior of the rock massif is studied with the generation of gravitational forces in the field. The methodology of application of the chosen method is briefly described and the main relations are given. The computational technology for the solution of the considered class of problems was developed and implemented. The main parameters are determined: the distribution of stresses arising during the advancement of the working, as well as the cracking and fragmentation of the massif. Patterns of the development of rock failure caused by an increase in the working space are obtained. The results show the influence of the length of the development on the nature of the fracture. Using the SPH makes it possible to accurately calculate the problems of deformation and fracture of rocks under technogenic doing.

The scientific and practical value of the work lies in the possibility of describing the behavior of a rock massif under anthropogenic doing, studying the dynamics of its state, wave processes and mechanisms of failure and fracture, and in determining the influence of the parameters of working face movement.

The proposed approach of computer modeling gives for researchers a tool that allows to make scientifically grounded solutions for predicting the consequences of technological processes in mining and assessing the critical value of the working space.

Keywords: computer simulation, failure of the working roof, cracking, rock massif, working, SPH code.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-464-475

## AUTHORS

Malinnikova O.N., Doctor of Technical Science (D.Sc), Head of Laboratory,  
Trofimov V.A., Doctor of Technical Science (D.Sc), Head of Laboratory,  
Shipovskij I.E., Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher,  
Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of  
Sciences, 111020, Moscow, Kryukovskiy tupik 4, iv\_ev@mail.ru.

## REFERENCES

1. Hozyajkina N.V. *Obrushenie porod krovli v lavah pologopadayushchih ugol'nyh plastov* [The collapse of the roof rocks in the lows of gently falling coal seams]: Monografiya. Dnepropetrovsk: Nacional'nyj gornyj universitet. 2012. 127 p.
2. Makarov P.V., Evtushenko E.P., Eremin M.O. *Evolyuciya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gornogo massiva s vyrabotkami. Matematicheskoe modelirovanie* [The evolution of the stress-strain state of rock massif with the workings. Mathematical simulation]: Monografiya. Tomsk: Izdatel'skij Dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2016. 184 p.
3. Fryanov V.N., Cvetkov A.B., Pavlova L.D. *Vyyavlenie zakonomernostej izmeneniya geomekhanicheskogo sostoyaniya massiva gornyh porod pri mnogoshtrekovej podgotovke i otrabotke vyemochного uchastka* [Detection of regularities of geomechanical state change in rock mass during multi-entry preparation and mining of an extraction block]. FPGN. 4. no 2. 2017. pp. 182–186.
4. Makarov P.V., Eremin M.O. *Rock mass as a nonlinear dynamic system. Mathematical modeling of stress-strain state evolution in the rock mass around a mine opening*. Physical Mesomechanics, vol. 21, no 4, 2018, pp. 293–296.
5. Zhou, J. *Micromechanics Damage Modeling of Brittle Rock failure Processes under Compression*. Int. J. Comput. Meth., 2013. vol. 10, no 6, pp 1350034–1–1350034–18.
6. Trofimov V.A., Malinnikova O.N., Filippov Yu.A. *Ocenka rassloeniya porod krovli pri otrabotke ugol'nogo plasta* [Оценка расслоения пород кровли при отработке угольного пласта]. GIAB. 2016. no 2. pp. 119–126.
7. Trubetskoi K.N., Iofis M.A., Kuznetsov S.V., Trofimov V.A. *Basic regularities governing the subsidence of undermined rock strata and deflection of hanging roof at shallow and great depths*. Journal of mining science, Consultants Bureau, New York.- 1999.- vol. 35.- no 3.- S.209–215.
8. Wilkins, Mark L. *Computer simulation of dynamic phenomena*, Berlin-Heidelberg: Springer -Verlag, 1999, 246 r.
9. Libersky L.D., Randles P.W. *Smoothed Particle Hydrodynamics: Some recent implements and applications*. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., vol. 139, 1996, pp. 375–408.
10. Graya J.P. Monaghan J.J. *Numerical modelling of stress fields and fracture around magma chambers*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol. 135, 2004, pp. 259–283.
11. Shipovskij I.E. *Trekhmernyj raschet razrusheniya obrazcov s treshhchinoj* [Three-dimensional simulation of the cracked samples fracturing]. Geotekhnicheskaya mekhanika: Mezhd. sb. nauch. trudov. In-t geotekhnicheskoy mekhaniki NAN Ukrainy. Dnepropetrovsk, 2014. Vyp. 20(1). 2014. pp. 191–198.
12. Shipovskij I.E. *Raschet hrupkogo razrusheniya gornoj porody s ispol'zovaniem bessetochnogo metoda* [Simulation for fracture by smooth particle hydrodynamics code]. Nauchnyj vestnik NGU. NGU. Dnepropetrovsk, Vyp. 1(145). 2015. pp. 76–82 .



**К.Н. Копцев, С.С. Кубрин, З.М. Хусяйнов,  
А.И. Гарамян, С.В. Журавлев**

## **УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЗАНЯТИЕМ СПОРТОМ И ФИЗИЧЕСКИМИ УПРАЖНЕНИЯМИ ГОРНЯКОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ОХРАНЫ ТРУДА**

К здоровью шахтеров предъявляются повышенные требования. Регулярные занятия физическими упражнениями, независимо от их формы и содержания, содействуют укреплению здоровья горнорабочих. Значение физкультуры и спорта в жизни горняков в последние годы возрастает потому что на современных угольных шахтах требуется повышенная концентрация внимания и хорошая спортивная подготовка. Бесконтрольное занятие физическими упражнениями с неконтролируемой физической нагрузкой вызывают риск получить травму, поэтому при выборе режима тренировочного процесса необходим индивидуальный подход и контроль со стороны тренера. В статье приводятся данные влияния результатов различных физических упражнений на уровень мастерства. Приводятся результаты статистических исследований, регрессионного анализа и значения коэффициентов регрессии. На основе полученных результатов определены основные подходы к росту мастерства спортсменов различных возрастных групп.

Ключевые слова: физическая культура, здоровье, шахтер, угледобывающее предприятие, спорт.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-476-484

Общеизвестно, что к здоровью шахтеров предъявляются повышенные требования, так как любые происшествия в шахте, под землей по причине недомогания и не возможность оказания оперативной помощи повышают риски несчастных случаев. Регулярные занятия физическими упражнениями, независимо от их формы и содержания, содействуют укреплению здоровья горнорабочих. Поэтому, организация и привлечения горняков к систематическому занятию физической культурой и спортом важнейшая задача угледобывающих предприятий. На сегодняшний день физической культурой и спортом на регулярной основе в Российской Федерации занимаются не более 10 % населения, в АО «СУЭК-Кузбасс» этот показатель как минимум в два раза выше. Но

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 476—484.

© К.Н. Копцев, С.С. Кубрин, З.М. Хусяйнов, А.И. Гарамян, С.В. Журавлев, 2018.

этого недостаточно, потому, что в экономически развитых странах мира число «активных физкультурников» достигает 60 %.

Значение физкультуры и спорта в жизни горняков в последние годы возрастает и их влияние на состояние организма, психику и статус горняков очень велико. На современных угольных шахтах с внедрением новой высокопроизводительной техники, цифровых технологий требуется от шахтеров повышенная концентрация внимания и хорошая спортивная подготовка. Здоровое состояние организма, двигательная активность позволяет противостоять влиянию на организм неблагоприятных факторов, присущие подземным горным работам. Следует отметить, что персонал, активно занимающийся физической культурой и спортом менее подвержен профессиональным заболеваниям, что очень важно для угледобывающих предприятий.

Физическая культура и спорт является важнейшим условием укрепления, поддержания и сохранения здоровья для шахтеров. Постоянное занятие физической культурой и спортом помогают горнякам всех возрастов наиболее продуктивно использовать своё свободное время, способствуют ведению здорового образа жизни отказу от вредных привычек (употребление спиртных напитков, курение). Однако, бесконтрольное занятие физическими упражнениями с неконтролируемой физической нагрузкой может принести немалый вред или даже травму [1, 2], поэтому при выборе режима тренировочного процесса необходим индивидуальный подход и контроль со стороны тренера.

Одним из любимым видом спорта среди шахтеров является бокс. Следует отметить, что занятие кулачными боями на Руси было повсеместно распространено. На поединки выходили и стар, и млад, в боях участвовали простые крестьяне, бояре, купцы, мастеровитые люди и князья. Однако, на современном этапе важным является организационная и методическая составляющая при активном занятии спортом [3–8]. При занятии боксом требуется развитие уровня мастерства, общефизической, силовой и скоростно-силовой подготовки [5, 8–12]. На современном этапе наиболее важной стороной подготовки боксеров является специальная скоростно-силовая [13]. Она постоянно развивается и совершенствуется в процессе подготовки к соревнованиям. В связи с этим, тренеров и специалистов по боксу интересуют эффективные средства и методы скоростно-силовой подготовки [3–8]. В работе исследовалась основная задача — изучение различия в уровне общей и специальной скоростно-силовой подготовленности боксеров разных возрастных групп. Для определения объективных показателей [14] спортивного мастерства был проведен эксперимент-тест, в котором участвовали 158 спортсменов разных возрастных групп (юноши — 54 чел., juniors — 51 чел., взрослые — 53 чел.). Лабораторный эксперимент проходил в течении 4–5 лет, с фиксацией спортивных показателей:

1. Спортивной деятельности (стаж, количество боев и побед).
2. Специальный скоростно-силовой подготовленности.
3. Общей физической подготовленности.
4. Уровня спортивного мастерства.

Корреляционному анализу подвергались зарегистрированные показатели в зависимости от возрастных групп (юноши, juniоры, взрослые). Результаты корреляционного анализа, представленные в таблице 1 свидетельствуют о следующем.

1. В группе боксеров юношеской возрастной группы по отношению к уровню спортивного мастерства наиболее информативными оказались следующие показатели: стаж занятий боксом ( $P < 0,01$ ), количество боев ( $P < 0,01$ ) и побед ( $p < 0,01$ ), максимальная сила удара без сигнала ( $p < 0,01$ ), на сигнал ( $p < 0,01$ ), на сигнал после отскока ( $p < 0,05$ ), суммарная сила ударов нанесенных в 3-х ударной серии ( $p < 0,01$ ), в пятисекундном тесте ( $p < 0,01$ ), количество ударов нанесенных за 5 сек ( $p < 0,01$ ), подтягивания ( $p < 0,01$ ), отжимания ( $p < 0,01$ ), результат прыжка в длину с места ( $p < 0,01$ ), результат выталкивания ядра сильнейшей ( $p < 0,01$ ) и слабейшей ( $p < 0,05$ ) рукой.

Помимо этого, обнаружена отрицательная взаимосвязь показателя уровня мастерства с результатами сенсомоторной реакции при ударах на сигнал с места ( $r = -0,648$ ,  $p < 0,01$ ) и на сигнал после отскока ( $r = -0,533$ ,  $p < 0,01$ ) и с результатами бега на 100 м ( $r = -0,605$ ,  $p < 0,01$ ) и на 3000 м ( $r = -0,364$ ,  $p < 0,01$ ).

2. У боксеров-юниоров показатель уровня мастерства достоверно взаимосвязан со следующими характеристиками: количество боев ( $p < 0,01$ ) и побед ( $p < 0,01$ ), максимальная сила удара на сигнал ( $p < 0,01$ ), максимальная сила удара на сигнал после отскока ( $p < 0,01$ ), суммарная сила ударов показанная в трех-ударной серии ( $p < 0,05$ ), в пятисекундном тесте ( $p < 0,01$ ), в трехминутном тесте ( $p < 0,01$ ), количество ударов нанесенных за 1 раунд ( $p < 0,01$ ), отжимания ( $p < 0,01$ ), результатом выталкивания ядра сильнейшей рукой ( $p < 0,01$ ) и слабейшей рукой ( $p < 0,01$ ).

Вместе с этим установлена отрицательная взаимосвязь показателя уровня мастерства с характеристиками сенсомоторной реакции при нанесении удара после отскока ( $r = -0,394$ ,  $p < 0,01$ ) и результата в беге на 3000 м ( $r = -0,504$ ,  $p < 0,01$ ).

3. В группе боксеров взрослой возрастной группы были выявлены достоверные взаимосвязи характеристики уровня мастерства со следующими показателями: количество боев ( $p < 0,01$ ) и побед ( $p < 0,01$ ), максимальная сила удара на сигнал после отскока ( $p < 0,01$ ), суммарная сила ударов, проявленная в пятисекундном тесте ( $p < 0,01$ ) и за 1 раунд ( $p < 0,01$ ), количество ударов, нанесенных за 1 раунд ( $p < 0,01$ ), отжимания ( $p < 0,01$ ), результата выталкивания ядра сильнейшей рукой ( $p < 0,01$ ).

Кроме этого, выявлены отрицательные взаимосвязи характеристики уровня мастерства у боксеров взрослой возрастной группы с показателями времени сенсомоторной реакции при выполнении удара после отскока ( $r = -0,288$ ,  $p < 0,05$ ), времени бега на 3000 м ( $r = -0,693$ ,  $p < 0,01$ ).

Таблица 1

**Взаимосвязь (коэффициенты регрессии —  $r$ ) уровня мастерства с показателями специальной скоростно-силовой подготовленности у боксеров разных возрастных групп (юноши, юниоры, взрослые)**

Показатели	Уровень спортивного мастерства		
	Юноши (общее число 54)	Юниоры (общее число 51)	Взрослые (общее число 53)
Стаж занятий боксом	0,752		
Количество боев	0,724	0,648	0,645
Количество побед	0,739	0,605	0,731
$F_{max1}$ , без сигнала (кгс)	0,775		
$F_{max2}$ , на сигнал (кгс)	0,368	0,576	
$F_{max3}$ , на сигнал после отскока (кгс)	0,356	0,441	0,554
$t_{сенси.2}$ (м, сек)	-0,648		
$t_{сенси.3}$ (м, сек)	-0,533	-0,394	-0,288
$\Sigma F_{max}$ 3 уд. (кгс)	0,791	0,295	
$\Sigma F_{max}$ 5 сек* (кгс)	0,847	0,429	0,623
$\Sigma F_{max1}$ (кгс)		0,467	0,898
п уд. 5 сек.	0,603		
п уд. 1 р.		0,715	0,852
Подтягивания (раз)	0,614		
Отжимания (раз)	0,662	0,691	0,461
Прыжок в длину с места (см)	0,571		
Бег на 100 м (сек.)	-0,605		
Бег на 3000 м (сек.)	-0,364	-0,504	-0,693
Толкание ядра сильной рукой (см)	0,793	0,472	0,651
Толкание ядра слабой рукой (см)	0,292	0,391	

Граничные значения коэффициентов регрессии ( $r$ ): для группы спортсменов, относящихся к юношам (54 спортсмена обследовано) при вероятности 0,05, составляет  $P_{0,05} = 0,270$ ; для группы спортсменов, относящихся к юниорам (51 спортсмен обследовано) при вероятности 0,01, составляет  $P_{0,01} = 0,350$  и для группы спортсменов, относящихся к взрослым (53 спортсмена обследовано) при вероятности 0,05, составляет  $P_{0,05} = 0,360$ . Явно прослеживается взаимосвязь уровня мастерства (коэффициенты регрессии –  $r$ , значимы) с показателями специальной скоростно-силовой подготовленности. При этом эта связь для активно развивающихся спортсменов в группе юниоры более жесткая по сравнению с группой юношей и более обеспеченная (значения вероятности соответственно 0,01 и 0,05) по сравнению с группой, где занимаются взрослые спортсмены. Полученные результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Спортивное мастерство боксеров юношеской возрастной группы во многом определяется стажем занятий боксом и боевым опытом, который в основном приобретается в процессе соревновательной деятельности. Мастерство боксеров-юношей зависит от специальной скоростно-силовой подготовленности, которая во многом определяет способности наносить удары в движении, на месте, в трех-ударной серии, а также от умения наносить много ударов с максимальной силой в течении пяти секунд. Высокий уровень развития общей физической подготовленности боксеров-юношей оказывает существенное влияние на их спортивные достижения. Таким образом, для достижения высоких спортивных результатов необходимо обладать значительной степенью развития общей физической подготовленности.

2. Показатель спортивного мастерства боксеров-юниоров в значительной мере обусловлен боевым опытом (количество боев и побед), способностью быстро отвечать быстрыми ударами в движении и на месте, а также умением наносить много ударов с максимальной силой в сериях и за весь бой. Для достижения высоких спортивных результатов боксерам-юниорам необходимо обладать хорошей общей выносливостью и высоким уровнем развития взрывных способностей мышц, обеспечивающих выполнение ударных движений.

3. Уровень мастерства боксеров взрослой возрастной группы зависит от боевого опыта, умения быстро наносить сильные удары после выполнения защитных действий, а также от способности наносить много сильных ударов, как в сериях, так и за каждый раунд. Кроме этого, взрослые боксеры, добившиеся высоких спортивных результатов, обладают значительным уровнем развития общей выносливости и мышц разгибателей руки, участвующих в выполнении ударных движений.

Подводя общий результат проведенного исследования следует сделать следующие обобщения:

- Уровень мастерства боксеров независимо от возраста в значительной мере определяется боевым опытом (количество боев и побед), который в основном приобретается в процессе соревновательной деятельности.

- Уровень мастерства взрослых боксеров и юниоров в большей степени зависит от таких способностей, как умение наносить много быстрых и сильных ударов в течение раунда, а также от навыка наносить быстрые и сильные удары, как в движении, так и на месте. В то же время мастерство юных боксеров зависит от таких способностей, как умение наносить быстрые и сильные удары в движении, на месте, в коротких сериях.

- Независимо от возраста боксеры должны обладать высоким уровнем развития общей выносливости и взрывных способностей мышц обеспечивающих выполнение ударных движений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jacopo A. Vitale, Tito Bassani, Fabio Galbusera, Alberto Bianchi, Nicolò Martinelli.* injury rates in martial arts athletes and predictive risk factors for lower limb injuries. The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness 2018 September;58(9):1296–303

2. *Maziah Mat Rosly, Hadi Mat Rosly, Nazirah Hasnan, Glen M. Davis, Ruby Husain.* Exergaming boxing versus heavy-bag boxing: are these equipotent for individuals with spinal cord injury? European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine 2017 August;53(4):527–34

3. *Гаськов А.В.* Теоретико-методические основы управления соревновательной и тренировочной деятельностью квалифицированных боксеров, автореф. дис. канд. пед. наук, А.В.Гаськов. – М.,1999. – 41 с.

4. *Калмыков Е.В.* Теория и методика бокса, учебник под общей редакцией Е.В.Калмыкова. – М. Физическая культура, 2009. – 272 с.

5. *Копцев К.Н.* Повышение эффективности специальной скоростно-силовой подготовленности боксеров высокой квалификации на предсоревновательном этапе, автореф. дис. канд. пед. наук, К.Н.Копцев. – С-Петербург.,2012. – 25 с.

6. *Меньшиков О.В.* Специальная физическая подготовка боксеров-юниоров атакующего и контратакующего стиля на предсоревновательном этапе, дис. канд. пед. наук, О.В.Меньшиков. – М., 2008. – 124 с.

7. *Филимонов В.И.* Бокс и кикбоксинг, Обучение и тренировка, учебно-методическое пособие для тренеров-преподавателей по боксе и кикбоксингу. -М.,АНО НИЦ «ИНСАН»,2012. – 528 с.

8. *Хусяйнов З.М. и др.* Тактика атакующих и контратакующих действий боксеров: обучение и совершенствование, учебно-методическое пособие, З.М.Хусяйнов, А.И.Гаракян, К.Н.Копцев, О.В.Меньшиков, — М., Изд.Дом МИСиС.,2017. – 72 с.

9. Pavol Hlavačka, Ľuboslav Šiška, Jaroslav Broďáni. Influence of periodization in long-term sports preparation on dynamics of changes in punch force of a boxer. *Gazzetta Medica Italiana Archivio per le Scienze Mediche* 2018 January-February;177(1–2):20–5

10. Manteufel, U. Kognition in der sportlichen Tätigkeit / U. Manteufel; Ed. Kunath P., Schelleberger H // *Tätigkeitsorientierte Sportpsychologie – Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, 1991. – P. 83–105.*

11. Petschnig, R. Assessment of quadriceps strength and functional limitations determined by hop tests for distance and a newly designed vertical jump test after anterior cruciate ligament reconstruction / R.Petschnig, R.Baron // *Eur. J. Phys. Med. Rehabil. – 1996. – no 7. – P. 81 – 86.*

13. Sale, D. G. Testing Strength and Power / D. G.Sale; Ed. MacDougall, J. D., Wenger, H. A. Green, H. J. // *The Physiological Testing of the High-Performance Athlete. – Champaign, IL: Human Kinetics Publishers, 1991. – no 12. – P. 36–39.*

14. Tossavainen, M. Comparison of Two Maximal Anaerobic Cycling Tests M.Tossavainen, A.Nummela, L.Paavolainen, A.Mero, & H.Rusko // *Int. J. Sports Med. Vol. – 1996. – no 17. – P. 120–124.*

15. Журавлев С.В., Хусяйнов З.М., Гаракян А.И., Кубрин С.С. Разработка и использование аппаратно-программного комплекса контроля ударов боксера. Горный информационно-аналитический бюллетень. — М.: Горная книга. — 2015. Выпуск по 8. С. 118–128. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Копцев Константин Николаевич* — кандидат педагогических наук, заслуженный тренер РФ,

*Кубрин Сергей Сергеевич* – профессор, докт. техн. наук, заведующий лабораторией Геотехнологических рисков освоения недр, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г, Москва, Россия, 8–495–360–07–35, E-mail: s\_kibrin@mail.ru,

*Хусяйнов Зуфер Мустафович* — кандидат педагогических наук, заслуженный тренер РФ,

*Гаракян Ашот Иванович* — кандидат педагогических наук, заслуженный тренер РФ,

*Журавлев Сергей Владимирович* — старший тренер.

---

ISSN 0236–1493. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2018.

No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 476–484.

**Kopcev K.N., Kubrin S.S., Husayajnov Z.M., Garakyan A.I., Zhuravlev S.V.**

## **Managing the process of sports and physical exercises of miners for improving the level of labor protection**

The health of miners is subject to increased requirements. Regular exercise, regardless of its form and content, contributes to the health of miners. The importance of physical culture and sports in the life of miners in recent years has increased because modern

coalmines require increased concentration and good sports training. Uncontrolled exercise with uncontrolled physical activity cause the risk of injury, so when choosing the training process requires an individual approach and control by the coach. The article presents data on the impact of the results of various physical exercises on the level of skill. The results of statistical studies, regression analysis and regression coefficients presented. Based on the results the main approaches to the growth of skills of athletes of different age groups.

Key words: physical culture, health, miner, coal mining enterprise, sport.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-476-484

## AUTHORS

*Kopcev K.N.*, candidate of pedagogical Sciences, honored coach of Russia, *Kubrin S.S.*, IPKON RAN, PhD, Head library of Geo technological risks of subsurface exploration, Moscow, Russia, *s\_kibrin@mail.ru*, *Husyajnov Z.M.*, candidate of pedagogical Sciences, honored coach of Russia, *Garakyan A.I.*, candidate of pedagogical Sciences, honored coach of Russia, *Zhuravlev S.V.*, head coach.

## REFERENCES

1. Jacopo A. Vitale, Tito Bassani, Fabio Galbusera, Alberto Bianchi, Nicolò Martinelli. *Injury rates in martial arts athletes and predictive risk factors for lower limb injuries*. The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness 2018 September;58(9):1296–303
2. Maziah Mat Rosly, Hadi Mat Rosly, Nazirah Hasnan, Glen M. Davis, Ruby Husain. *Exergaming boxing versus heavy-bag boxing: are these equipotent for individuals with spinal cord injury?* European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine 2017 August;53(4):527–34
3. Gas'kov A.V. *Teoretiko-metodicheskie osnovy upravleniya sorevnovatel'noj i trenirovochnoj deyatel'nost'yu kvalificirovannyh bokserov* [Theoretical and methodical bases of management of competitive and training activity of qualified boxers]: avtoref. dis. kand. ped. nauk, A.V. Gas'kov. Moscow: 1999. 41 p.
4. Kalmykov E.V. *Teoriya i metodika boksa* [Theory and methods of Boxing]: uchebnik pod obshchej redakciej. E.V.Kalmykova. Moscow, Fizicheskaya kul'tura, 2009. 272 p.
5. Kopcev K.N. *Povyshenie effektivnosti special'noj skorostno-silovoj podgotovlennosti bokserov vysokoj kvalifikacii na predsorevnovatel'nom etape* [Improving the effectiveness of the special speed-power preparedness of boxers of high qualification in the precompetitive stage]: avtoref. dis. kand. ped. nauk, K.N.Kopcev. S-Peterburg., 2012. 25 s.
6. Men'shikov O.V. *Special'naya fizicheskaya podgotovka bokserov-yuniorov atakuyushchego i kontratakuyushchego stilya na predsorevnovatel'nom etape* [Special physical training of Junior boxers attacking and counterattacking style at the pre-competition stage]: dis. kand. ped. nauk, O.V. Men'shikov. Moscow: 2008. 124 p.
7. Filimonov V.I. *Boks i kikboksing, Obuchenie i trenirovka, uchebno-metodicheskoe posobie dlya trenerov-prepodavatelej po bokse i kikboksingu* [Boxing and kickboxing, Training and training, training manual for trainers and teachers in Boxing and kickboxing]. Moscow: ANO NIC «INSAN», 2012. 528 p.
8. Husyajnov Z.M. i dr. *Taktika atakuyushchih i kontratakuyushchih dejstvij bokserov: obuchenie i sovershenstvovanie* [Tactics of attacking and counterattacking actions of the boxers: training and improvement]: uchebno-metodicheskoe posobie, Z.M.Husyajnov, A.I.Garakyan, K.N.Kopcev, O.V.Men'shikov, Moscow: Izd.Dom MISis., 2017. 72 p.
9. Pavol Hlavačka, Luboslav Šiška, Jaroslav Broďáni. *Influence of periodization in long-term sports preparation on dynamics of changes in punch force of a boxer*. Gazzetta Medica Italiana Archivio per le Scienze Mediche 2018 January-February;177(1–2):20–5

10. Manteufel, U. Kognition in der sportlichen Tätigkeit / U. Manteufel; Ed. Kunath P., Schelleberger H. *Tätigkeitsorientierte Sportpsychologie Frankfurt am Main*: Verlag Harri Deutsch, 1991. P. 83–105.

11. Petscnig, R. *Assessment of quadriceps strength and functional limitations determined by hop tests for distance and a newly designed vertical jump test after anterior cruciate ligament reconstruction* / R.Petscnig, R.Baron // *Eur. J. Phys. Med. Rehabil.* 1996. no 7. P. 81–86.

13. Sale, D. G. *Testing Strength and Power* / D. G.Sale; Ed. MacDougall, J. D., Wenger, H. A. Green, H. J. *The Physiological Testing of the High-Performance Athlete*. Champaign, IL: Human Kinetics Publishers, 1991. no 12. P. 36–39.

14. Tossavainen M., Nummela A., Paavolainen L., Mero A., Rusko H. *Comparison of Two Maximal Anaerobic Cycling Tests*. *Int. J. Sports Med.* Vol. 1996. no 17. P. 120–124.

15. Zhuravlev S.V., Husyajnov Z. Moscow: Garakyan A.I., Kubrin C.S. *Razrabotka i ispol'zovanie apparatno-programmnogo kompleksa kontrolya udarov boksera* [Development and use of hardware and software control beats boxer. Mountain information and analytical Bulletin]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*. Moscow: Gornaya kniga. 2015. Vypusk no 8. S. 118–128.



---

**Секция 5**  
**ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

---



## БАЧАТСКОЕ ТЕХНОГЕННОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ КАК РАЗРЯДКА ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ УЧАСТКА ЗЕМНОЙ КОРЫ

С точки зрения достижения предельного состояния в верхней части земной коры рассматриваются условия возникновения Бачатского техногенного землетрясения, произошедшего в июне 2013 г. юго-западной части Кузбасса. Оценки показывают, что размеры зоны предельно напряженного состояния, сформированной, по-видимому, взаимодействием крупных (более 100 км) блоков земной коры, составляют не менее 10 км. Поскольку зона предельно напряженного состояния располагается в верхней части земной коры, то ведение горных работ на карьере с проведением крупных взрывов оказывало непосредственное влияние на эту зону. Расположением зоны предельно напряженного состояния массива вблизи земной поверхности и ее размерами объясняется провоцирование горными работами землетрясения с гипоцентром на глубине в несколько километров. Делается вывод, что региональные участки предельно напряженного состояния массива, формируемые в результате взаимодействия блоков земной коры, создают среду для возникновения опасных геодинамических явлений в горнопромышленных районах.

Ключевые слова: горный удар, техногенное землетрясение, очаг землетрясения, предельно напряженное состояние, блоки земной коры, Бачатское землетрясение, реактивация нарушений

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-487-495

### 1. Введение

Проблема геодинамической безопасности продолжает оставаться одной из актуальных в различных горнопромышленных районах мира [1–5]. В России сформировалось несколько горно-промышленных районов с техногенной сейсмичностью, одним из которых является Кузбасс [6–9 Бат, Петух, Яковлев, Еманов, Адушкин]. Ряд из произошедших в последнее время крупных геодинамических событий не находит объяснения с позиций установившихся представлений о геомеханических процессах в массиве горных пород и формировании его напряженно-деформированного состояния [10]. В качестве примера можно назвать Бачатское землетрясение, произошедшее в июне 2013 г., гипоцентр

которого по данным [9] находился под карьерной выемкой на глубине около 4 км.

В то же время геодинамике недр, сейсмологии, геомеханике развиваются идеи о предельном состоянии не только локальных, но и крупных сегментов земной коры [11]. В данной работе обосновывается предположение, что механизм и проявление Бачатского землетрясения были связаны с разгрузкой зоны предельного напряженного состояния в земной коре при техногенном воздействии на нее.

## **2. Теоретическая часть**

В геомеханике теория предельного состояния нашла применение при объяснении механизма горных ударов, поведения массива в зонах опорного давления, устойчивости бортов карьеров и др. Исследования горняков показывают, что воздействие на краевую часть пласта, например, внедрение в нее бара машины, взрыва, другого воздействия, вызывают немедленные изменения в зоне предельно напряженного состояния, перераспределение в ней нагрузок, передачу их вглубь массива [11, с. 27).

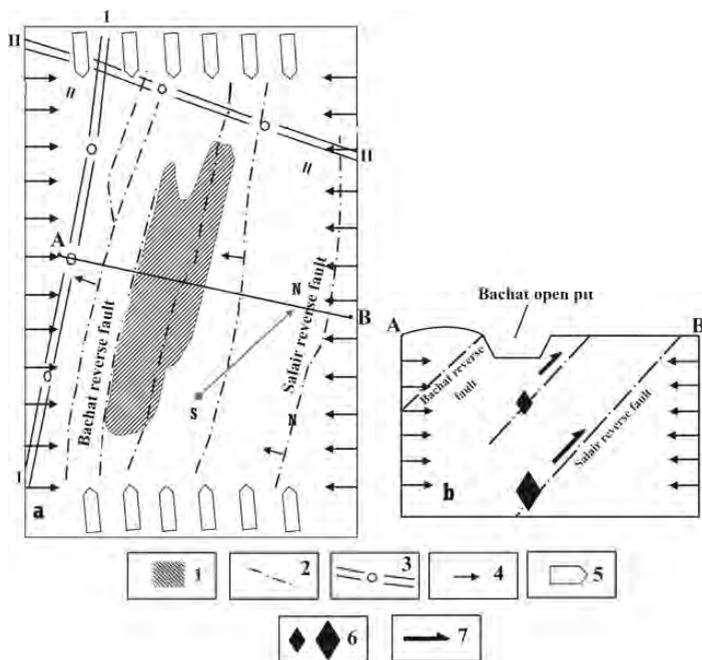
Проводя аналогию между процессами в угольном пласте, развивая положения геодинамики недр, проф. Петухов И.М. высказал идею о предельном напряженном состоянии земной коры в целом [11]. Поскольку в земной коре предельно напряженное состояние формируется под действием горизонтальных сил сжатия, то в первую очередь оно достигается в приповерхностном слое. Если горизонтальные напряжения достаточно велики, то в предельное состояние постепенно переходят все более глубокие слои земной коры. Как отражение проявления иерархии свойств и состояний возникает ситуация, когда внутри этого слоя, на более низком иерархическом уровне, сохраняются участки, находящиеся в упругом состоянии.

В сейсмологии основные концепции, объясняющие механизмы коровых землетрясений, так или иначе используют представление о разрушении пород в очаговой зоне, то есть достижении в ней предельного состояния. В ряде работ, например, [12, 13] прямо указывается на то, что в земной коре существуют участки массива, с состоянием, близким к предельному.

## **3. Геодинамическая позиция Бачатского угольного карьера.**

Бачатское угольное месторождение расположено у юго-западной границы Кузбасса вблизи места пересечения двух региональных современных тектонических зон, обозначенных на рис. 1, а как I—I и II—II и выявленных при выполнении работ по геодинамическому районированию. Разломная зона I—I имеет северо-западное простираение и совпадает с крупнейшим пограничным надвигом, отделяющим Кузбасс от расположенного к юго-западу Салаирского кряжа. Разломная зона II—II занимает секущее положение к основным структурам Кузбасса

и имеет северо-восточное простирание. Геологи отмечают высокую сложность строения Бачатского месторождения, вытянутого вдоль границы I—I и находящегося в одной из тектонических пластин, ограниченной взбросами северо-западного простирания, рис. 1.



**Рис. 1. Упрощенная тектонофизическая схема района Бачатского угольного разреза:**  
**1 – Бачатский разрез; 2 – тектонические нарушения; 3- границы блоков земной коры**  
**2-го ранга; 4, 5 – направление максимального сжатия поля напряжений 2-го и 3-го рангов**  
**соответственно; 6 – условно гипоцентры афтершоков и главного толчка; 7 – направление**  
**смещения крыла взброса при землетрясении**

Полагают, что серия из нескольких крупных взбросов сформировалась в одну из фаз складчатости под давлением со стороны Салаира на угленосные отложения Кузбасса. Это Тырганский, Бачатский, Салаирский взбросы, имеющие падение на юго-запад под углами 50–70 градусов. Глубинное строение этой части Кузбасса подробно не исследовано, но по региональным геологическим материалам можно предполагать, что взбросы уходят на большую глубину и пересекают Бачатский карьер на отметке в несколько километров, рис. 1-6.

Современное поле тектонических напряжений в Кемеровской области изучалось инструментальными и тектонофизическими методами [14–16]. В западной части Кузбасса современное поле напряже-

ний частично наследует одно из палеотектонических полей напряжений. Существующие взбросы выражены в рельефе земной поверхности и в современном поле напряжений Салаирский взброс испытывает тенденцию к взбросовому смещению всяческого крыла, что соответствует фокальному механизму главного толчка землетрясения и свидетельствует о его реактивации, рис. 1.б. Одновременно развиваются поперечные к взбросам сдвиги северо-восточного простираения. Развитие современных тектонических деформаций в районе Бачатского карьера и процессы сейсмической активизации позволяют сделать вывод о достижении предельно напряженного состояния в верхней части земной коры в данном регионе.

#### 4. Обсуждение результатов

По данным работы [17, рис. 3], в которой обобщены эмпирические формулы ряда авторов по оценке зависимости размеров очага землетрясения  $L$  от его магнитуды  $M$ , можем принять, что размеры  $L$  очага Бачатского землетрясения, имевшего магнитуду  $M_L = 6.1$ , составляют не менее 10 км. Эта оценка соответствует размерам афтершоковой зоны, которая по данным [9], не только занимает площадь карьера, но и выходит за его границы. Примем во внимание, что гипоцентр главного толчка землетрясения находился на глубине 4 км. При размерах очаговой зоны более 10 км это означает, что земная кора в районе карьера находилась в предельном состоянии непосредственно от земной поверхности до глубины в несколько километров. В этом случае ведение горных работ на карьере с производством взрывов до 350 т. взрывчатки можно рассматривать как фактор постоянного воздействия на эту региональную зону предельного состояния. Как установлено, регулярное циклическое воздействие способно оказывать влияние на характер смещений в зонах сейсмоактивных разломов [18], т.е. в зонах предельного состояния.

Из-за ведения горных работ и появления выработанного пространства больших размеров равновесие в части этой зоны, расположенной вблизи земной поверхности, постоянно нарушается, а потому перераспределение напряжений может распространяться значительно глубже мест ведения горных работ. В связи с этим тот факт, что гипоцентр землетрясения находился на большой глубине под карьером, можно объяснить тем, что горные работы фактически велись в региональной зоне предельно напряженного состояния.

Далее, из соотношений между размерами очага горно-тектонического удара  $r$  и размерами области подготовки этого события  $R$ ,  $r/R = 10-30$  [19, 20] можем оценить размеры блоков земной коры, участвующих в подготовке техногенного землетрясения. При размере очага в 10 км область его подготовки составит 100–300 км, что соизмеримо

с размерами блоков земной коры 2-го ранга в этом регионе. В этом случае можно представить, что взаимодействие крупных блоков земной коры формирует зоны предельно напряженного состояния внутри них или на их границах. Поскольку скорость геологических процессов достаточно низкая, то энергия зон предельного состояния успевает перераспределяться в массиве и условия для его разрушения в динамической форме не создаются. При ведении горных работ, высокой скорости подвигания забоя на шахтах, проведении массовых взрывов на карьерах, скорость приложения нагрузки может превышать скорость ее релаксации, что создает среду для возникновения опасных геодинамических явлений. Принимая во внимание, что зоны предельно напряженного состояния, возникающие под влиянием геодинамических процессов, охватывают в первую очередь приповерхностные слои земной коры, необходимо планировать их мониторинг при освоении недр и земной поверхности.

## **5. Выводы**

1. На основе представления о предельно напряженном состоянии земной коры может быть объяснен феномен влияния горных работ на крупные сейсмические активизации с гипоцентрами на большой глубине, такие, например, как Бачатское землетрясение.

2. Анализ условий проявления Бачатского землетрясения показывает, что при размерах очаговой зоны более 10 км и глубине гипоцентра в 4 км, земная кора в районе карьера находилась в предельно напряженном состоянии непосредственно от земной поверхности до глубины в несколько километров. Фактически горные работы велись в пределах крупной зоны предельно напряженного состояния, из-за чего равновесие в части этой зоны, расположенной вблизи земной поверхности, постоянно нарушалось. В конечном итоге это спровоцировало разгрузку всей зоны предельного состояния в динамической форме с подвижкой блоков пород по крупному тектоническому нарушению.

3. Размеры области подготовки Бачатского землетрясения могли превышать сотню километров, что соизмеримо с блоками земной коры II ранга, участвующих в самостоятельных тектонических движениях. В современном поле напряжений крупные взбросы и поперечные сдвиги попадают в плоскости высоких сдвигающих напряжений, что объясняет направление смещения по ним при их реактивации во время землетрясения.

4. Поскольку при определенных условиях, вызванных как тектоническими процессами, так и техногенным воздействием, в первую очередь в предельное состояние переходит верхняя часть земной коры, то это создает среду для проявления опасных геодинамических явлений при интенсивном воздействии на недра в этих местах, что необходимо учитывать при планировании освоения недр.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Marcaк H., Mutke G.* Seismic activation of tectonic stresses by mining // *J. Seismol.*, 2013. Vol. 17, No 4, pp. 1139–1148.
2. *Van Aswegen G.* Seismic sources and rockburst damage in South Africa and Chile. In: *Proceedings of the Ninth International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines (15–17 of November, Santiago Chile, 2017)*, pp.72–86.
3. *Jun Han, Hongwei Zhang, Bin Liang, Hai Rong, Tianwei Lan, Yuanzhong Liu, Ting Ren.* Influence of large syncline on in situ stress field: a case study of the Kaiping coalfield, China // *Rock Mech Rock Eng.* 2016. Vol. 49, pp. 4423–4440. DOI: 10.1007/s00603–016–1039–4.
4. *Rasskazov I. Yu., Saksin B.G., Usikov V.I., Potapchuk M.I.* Rock mass geodynamics and mining-induced rockbursting at Nikolaev complex deposit // *Gornyi Zhurnal.* 2016. No12, pp. 13–19, DOI: 10.17580/gzh.2016.12.03 (2016).
5. *Batugin A., Odintsev V., Yu Lijiang, Kolikov K., Khotchenkov Ev.* Displacement and mine seismicity processes during undermining of a tectonically active fault area at the Sinvay deposit. In: *Proceedings of the 18th International Multi-disciplinary Scientific GeoConference (SGEM-2018), Albena (Bulgaria) 02–08 July 2018, Vol.18, Issue 1.3, pp. 319–326, doi.org/10.5593/sgem2018/1.3*
6. *Batugina I.M. Petukhov I.M.* Geodynamic zoning of mineral deposits for planning and exploitation of mines. New Delhi: Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd.,1990.
7. *Яковлев Д.В., Лазаревич Т.И., Цирель С.В.* Природно-техногенная сейсмичность Кузбасса // *ФТПРПИ.* – 2013. – № 6. С. 20–34.
8. *Адушкин В.В.* Развитие техногенно-тектонической сейсмичности в Кузбассе // *Геология и геофизика.* – 2018. Т. 59. – № 5. – С. 709–724, DOI: 10.15372/GiG20180510.
9. *Еманов А.Ф., Еманов А.А. Фатеев А.В., Лескова Е.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Т.* Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013) // *ФТПРПИ.* 2014. – № 2. – С. 41–46.
10. *Ловчиков А.В.* Некоторые закономерности проявления горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений на рудниках России. Материалы Первого Международного симпозиума «Прогноз и предупреждение тектонических горных ударов и землетрясений», г. Бишкек, 21–23 сентября 2016 г. Бишкек: НАН КР, 2016. – С. 39–49.
11. *Петухов И.М. Батугина И.М.* Геодинамика недр. М.: Недра коммуникайшэнс. 1999. – 287 с.
12. *Соболев Г.А., Пономарев А.В.* Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. – 282 с.
13. *Ellsworth W.L.* Injection-Induced Earthquakes // *Science*, 2013, Vol. 341, Issue 6142, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1225942>.
14. *Батугин С.А., Шаманская А.Т.* Исследование напряженного состояния массива горных пород методом разгрузки в условиях Таштагольского железорудного месторождения // *ФТПРПИ.* – 1965. – № 2. – С. 28–33.
15. *Егоров П.В., Шаманская А.Т., Аман И.П.* Результаты исследования напряженного состояния Горной Шории и южной части Кузбасса // *Проблемы механики горных пород.* – Новосибирск, 1971. – С. 246–249.
16. *Батугин А.С., Лазаревич Т.И.* Напряженно-деформированное состояние и особенности блочного строения некоторых шахтных полей Кузбасса.

Сб. науч. трудов «Совершенствование способов разработки удароопасных месторождений». Л.: ВНИМИ. — 1986. — С. 34–38.

17. Бугаев Е.Г. О структурированной и рассеянной сейсмичности, жесткости очагов землетрясений и нелинейности графиков повторяемости магнитуд // Геодинамика и тектонофизика. – 2011. Том 2. – №3. – С. 244–265. DOI 10.5800/GT-2011–2-3–0045.

18. Кочарян Г.Г., Костюченко В.Н., Павлов Д.В. Иницирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями // Физическая мезомеханика. 2004. – Том 7. – № 1. – С. 5–22.

19. Смирнов В.А. Физические процессы в очагах горных ударов и региональный прогноз их по геофизическим полям: Автореф. дисс. д-ра техн. наук. – С.-Петербург: ВНИМИ. — 1991. – 51 с.

20. Batugin A.S., Batugina I.M., Lan Tianwei. Tectonophysical model of fault tectonic rock burst with wing sliding // Journal of Liaoning Technical University (Natural Science). – 2016. Vol. 35, No 6, pp. 561–565, doi: 10.11956/j\_issn.1008–0562.2016.06.001. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

*Батугин Андриан Сергеевич* — доктор технических наук, профессор НИТУ МИСиС, Горный институт, as-bat@mail.ru, Ленинский проспект, 4, 119049 Москва, Россия.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 487–495.

**Batugin A.S.**

### **Bachat technogenic earthquake as the reaction of the critically stressed state of the site of the earth crust**

The conditions that induced earthquake in 2013 at Bachat coal field in south west Kuzbass are considered in terms of critical stress developed in the top layer of the Earth crust. Estimates show that the size of the critical stress zone, produced presumably by interaction of huge (over 100 km) crustal blocks is at least 10km. Whereas critical stress zone is located in the top part of Earth's crust, mining operations in the pit including blast operations was making a direct impact on this area. Shallow occurrence of critical stress area and its size can provide insight into why mining works brought about induced earthquake with hypocenter at the depth of several kilometers. The conclusion has been made that regional areas of critical stress within rock massif developed as a result of crustal blocks interaction create hazard medium for mining.

Key words: rock burst, induced earthquake, earthquake source, critical stress state, crustal blocks, Bachat earthquake, reactivation of faults.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-487-495

## AUTHORS

*Batugin Andrian S.*-doctor of technical Sciences, Professor nust MISIS, Mining Institute, as-bat@mail.ru, Leninsky prospect, 4, 119049 Moscow, Russia

## REFERENCES

1. Marcak H., Mutke G. *Seismic activation of tectonic stresses by mining*. J. Seismol., 2013. Vol. 17, No 4, pp. 1139–1148.
2. van Aswegen G. *Seismic sources and rockburst damage in South Africa and Chile*. In: Proceedings of the Ninth International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines (15–17 of November, Santiago Chile, 2017), pp.72–86.
3. Jun Han, Hongwei Zhang, Bin Liang, Hai Rong, Tianwei Lan, Yuanzhrng Liu, Ting Ren. *Influence of large syncline on in situ stress field: a case study of the Kaiping coalfield, China*. Rock Mech Rock Eng. 2016. Vol. 49, pp. 4423–4440. DOI: 10.1007/s00603-016-1039-4.
4. Rasskazov I. Yu., Saksin B. G., Usikov V. I., Potapchuk M. I. *Rock mass geodynamics and mining-induced rockbursting at Nikolaev complex deposit*. Gornyi Zhurnal. 2016. No12, pp. 13–19, DOI: 10.17580/gzh.2016.12.03 (2016).
5. Batugin A., Odintsev V., Yu Lijiang, Kolikov K., Khotchenkov Ev. *Displacement and mine seismicity processes during undermining of a tectonically active fault area at the Sinvya deposit*. In: Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM-2018), Albena (Bulgaria) 02–08 July 2018, Vol.18, Issue 1.3, pp. 319–326, doi. org/10.5593/sgem2018/1.3
6. Batugin A. M., Petukhov I. M. *Geodynamic zoning of mineral deposits for planning and exploitation of mines*. New Delhi: Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd.,1990.
7. Yakovlev D. V., Lazarevich T. I., Cirel' S. V. *Prirodno-tekhnogennaya sejsmichnost' Kuzbassa* [Natural and mining-induced seismicity in Kuzbass]. FTPRPI. 2013. no 6. pp. 20–34.
8. Adushkin V. V. *Razvitie tekhnogenno-tektonicheskoy sejsmichnosti v Kuzbasse* [Technogenic tectonic seismicity in Kuzbass]. Geologiya i geofizika. 2018. T. 59. no 5. pp. 709–724, DOI: 10.15372/GiG20180510.
9. Emanov A. F., Emanov A. A. Fateev A. V., Leskova E. V., Shevkunova E. V., Podkorytova V. T. *Tekhnogennaya sejsmichnost' razrezov Kuzbassa (Bachatskoe zemletryasenie 18 iyunya 2013)* [Mining-induced seismicity at open pit mines in Kuzbass (Bachatsky earthquake on June 18, 2013)]. FTPRPI. 2014. no 2. pp. 41–46.
10. Lovchikov A. V. *Nekotorye zakonomernosti proyavleniya gorno- tektonicheskikh udarov i tekhnogennykh zemletryaseniy na rudnikah Rossii* [Forecast and prevention of tectonic rock bursts and earthquakes: measurement of deformations, residual and actual stresses in rocks]. Materialy Pervogo Mezhdunarodnogo simpoziuma «Prognoz i preduprezhdenie tektonicheskikh gornyh udarov i zemletryaseniy», g. Bishkek, 21–23 sentyabrya 2016. Bishkek: NAN KR, 2016. pp. 39–49.
11. Petuhov I. M., Batugin A. M. *Geodinamika nedr* [Geodynamics of the Earth's Interior]. Moscow: Nedra kommunikeshens. 1999. 287 p.
12. Sobolev G. A., Ponomarev A. V. *Fizika zemletryaseniy i predvestniki* [Physic of Earthquake and precursor]. Moscow: Nauka. 2003. 282 p.
13. Ellsworth W. L. *Injection-Induced Earthquakes*. Science, 2013, Vol. 341, Issue 6142, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1225942>.
14. Batugin S. A., Shamanskaya A. T. *Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya massiva gornyh porod metodom razgruzki v usloviyah Tashtagol'skogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya* [Investigation of the stress state of the rock massif by the unloading method in the conditions of the Tashtagol iron ore deposit]. FTPRPI. 1965. no 2. pp. 28–33.
15. Egorov P. V., Shamanskaya A. T., Aman I. P. *Rezul'taty issledovaniya napryazhennogo sostoyaniya Gornoj Shorii i yuzhnoj chasti Kuzbassa* [Results of investigation of the stressed state of the Mining Shoria and the southern part of the Kuznetsk Basin In]. Problemy mekhaniki gornyh porod. Novosibirsk, 1971. pp. 246–249.
16. Batugin A. S., Lazarevich T. I. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie i osobennosti blochnogo stroeniya nekotorykh shahtnykh polej Kuzbassa* [Stress-strain state and features of the block structure of some mine fields of Kuzbass]. Sb. nauch. trudov

«Sovershenstvovanie sposobov razrabotki udaroopasnyh mestorozhdenij». Leningrad: VNIMI. 1986. pp. 34–38.

17. Bugaev E. G. *O strukturirovannoj i rasseyannoj sejsmichnosti, zhestkosti ochagov zemletryasenij i nelinejnosti grafikov povtoryaemosti magnitud* [On structured and diffuse seismicity, stiffness of earthquake foci, and nonlinearity of magnitude recurrence graphs]. *Geodinamika i tektonofizika*. 2011. Tom 2. no 3. pp. 244–265. DOI 10.5800/GT-2011–2-3–0045.

18. Kocharyan G. G., Kostyuchenko V. N., Pavlov D. V. *Iniciirovanie deformacionnyh processov v zemnoj kore slabymi vozmushcheniyami* [Initiation of deformation processes in the Earth's crust by small perturbations]. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2004. Tom 7. no 1. pp. 5–22.

19. Smirnov V. A. *Fizicheskie processy v ochagah gornyh udarov i regional'nyj prognoz ih po geofizicheskim polyam* [Physical processes in the gypocenters of rock bursts and regional prediction of them by geophysical methods]: Avtoref. diss. d-ra tekhn. nauk. S.-Peterburg: VNIMI. 1991. 51 p.

20. Batugin A. S., Batugina I. Moscow: Lan Tianwei. *Tectonophysical model of fault tectonic rock burst with wing sliding*. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*. 2016. Vol. 35, No 6, pp. 561–565, doi: 10.11956/j\_issn. 1008-0562.2016.06.001.



**А.Н. Шабаров, Ю.В. Заморкина,  
А.Л. Попов, И.И. Багаутдинов**

## **КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД ПРИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ РАЙОНИРОВАНИИ ШАХТНЫХ ПОЛЕЙ**

Раскрыта тема комплексного подхода при геодинамическом районировании на примере шахт АО «СУЭК-КУЗБАСС», который заключается в применении морфоструктурного анализа поверхности, анализа геологической информации, создание трехмерной геолого-структурной модели массива в интересующих пределах, измерение амплитуды естественного электромагнитного излучения (ЕЭМИ), испытания образцов на определение физико-механических свойств вмещающего массива и фазово-физических свойств углей, а также оценка рисков с использованием искусственных нейронных сетей на основании информации об опасных явлениях за прошедшие годы.

Итогом работы является увязка и сопоставление полученных ранее результатов исследований, выделение тектонически-нагруженных и тектонически-разгруженных зон (ТНЗ и ТРЗ), а также обоснование целесообразности применения комплексного подхода при выполнении работ по их локализации в пределах шахтных полей.

Ключевые слова: геодинамика, геомеханика, тектонически-разгруженные зоны, тектонически-напряженные зоны, уголь, геодинамическое районирование, напряженно-деформированное состояние массива, численное моделирование.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-496-506

### **Введение**

Изучение геодинамически активных зон имеет огромное значение для решения различных практических задач в сфере безопасного ведения горных работ. В частности, геодинамическое районирование решает важнейшую задачу инженерно-экологических исследований — оценку территорий ведения горных работ по степени опасности возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Геодинамическое районирование – метод изучения блочного строения, напряженного и газогидродинамического состояния массива горных пород, выявления, оценки и мониторинга активных в настоящее время разрывных тектонических нарушений, геодинамически опасных

зон в целях повышения геодинамической и экологической безопасности промышленных и гражданских объектов при освоении недр и земной поверхности.

Рассматриваемый в настоящей работе, комплексный подход включает в себя:

1. Сбор и изучение фондовых геологических, геофизических, геохимических и картографических материалов по району работ.

2. Предварительное построение карты тектонических нарушений по результатам предоставленной документации.

3. Геодинамическое районирование территории и выделение блочной структуры на основе линеаментного и морфоструктурного анализа земной поверхности по космоснимкам и топографическим картам различного масштаба.

4. Выделение потенциально активных разломов и ТНЗ.

5. Построение структурно-геологической 3D модели шахтного поля.

5.1. Подготовка каркаса структурно-геологической 3D модели шахтного поля.

5.2. Подготовка каркаса гидро-геологической модели шахтного поля.

5.3. Построение блочной 3D модели шахтного поля.

6. Построение геодинамической модели шахтного поля шахты.

6.1. Составление региональной конечно-элементной математической модели. Проведение расчетов НДС горного массива для шахты.

6.2. Составление локальной конечно-элементной математической модели подготавливаемого к выемке участка шахтного поля.

7. Прогноз геодинамической и геомеханической ситуации на подготавливаемых к выемке участках шахтного поля в ходе отработки.

7.1. Локализация зон ТНЗ и ТРЗ, формирование ГОЗ (геодинамически опасных зон).

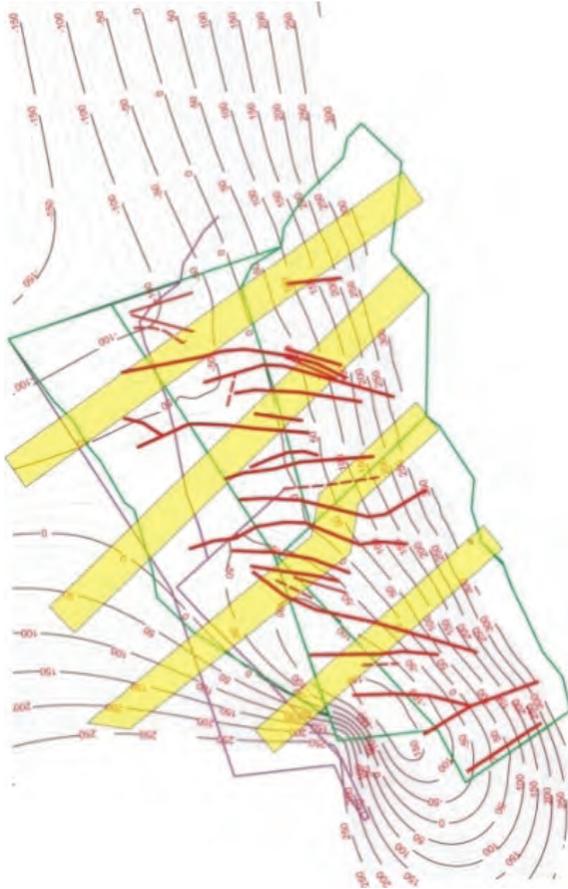
7.2. Экспериментальная оценка удароопасности угольных пластов в пределах выемочных блоков.

7.3. Оценка геодинамических рисков комплексным методом с использованием возможностей нейронных сетей. Получение схем расположения зон, где с некоторой вероятностью возможны опасные явления (зон повышенной газоотдачи, вывалов, прорывов воды и т.д.).

7.4. Вынесение зон риска на планы горных работ.

Данный методический прием был использован в рамках выполнения научно-исследовательской работы совместно с АО «СУЭК Кузбасс» и показал высокую эффективность и достоверность при геодинамическом районировании на шахте им. В.Д. Ялевского и шахте им. Кирова. Так при первичном определении ТНЗ и ТРЗ, зон влияния активных разломов, корректно определено их местоположение (рис. 1, рис. 2), уточненное в дальнейшем расчетными и экспериментальными методами (в частности были произведены замеры амплитуды ЕЭМИ в выработках).

Первым шагом в работе было выполнение линеаментного и морфоструктурного анализа массива по имеющимся данным – это топографические карты разных масштабов и гипсометрия пластов, космоснимки территории (рис. 1).

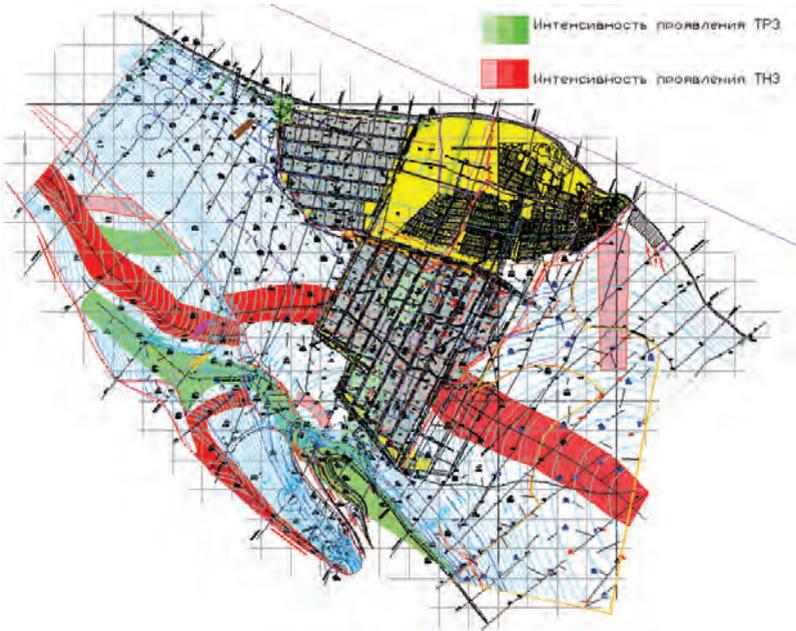


**Рис. 1. Схема совмещения разломов V ранга, зон влияния активных разломов III–IV ранга, установленных по результатам морфоструктурного анализа, и линеаментов с гипсометрией кровли. Красным цветом показаны разломы. Жёлтым цветом – зоны влияния активных разломов III–IV ранга и линеаментов. Зелёным и фиолетовым – границы лицензионных участков.**

По морфоструктурному анализу предварительно выявлено расположение ТНЗ и ТРЗ. Как следует из рис. 2, в области ведения горных работ основные зоны, вызывающие особое внимание с точки зрения

геодинамики, тяготеют к осевым частям высокоранговых складчатых структур. Здесь локализованы напряженные зоны, находящиеся под действием сжимающих напряжений. Зоны локальной разгрузки пластов угля тяготеют к лежащим блокам картируемых на площади взбросов.

Для уточнения границ ТНЗ и ТРЗ произведены замеры амплитуды ЕЭМИ в выработках, результат данного этапа представлен ниже на рисунке.

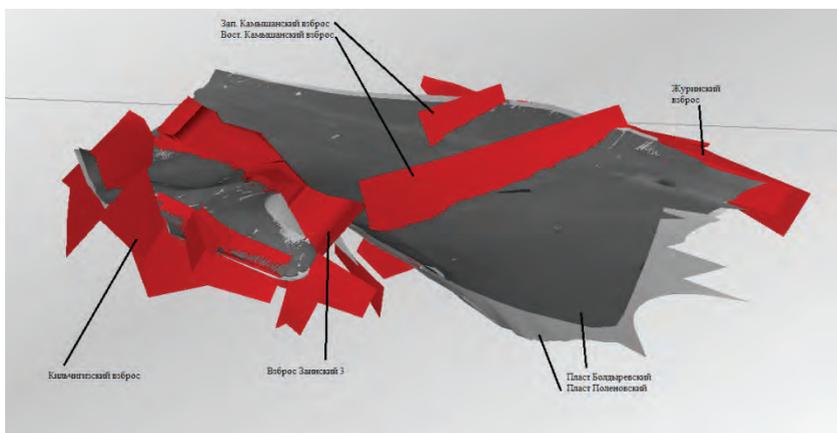


**Рис. 2. Расположение прогнозируемых зон ТНЗ и ТРЗ в пределах рабочего угольного пласта Поленовский**

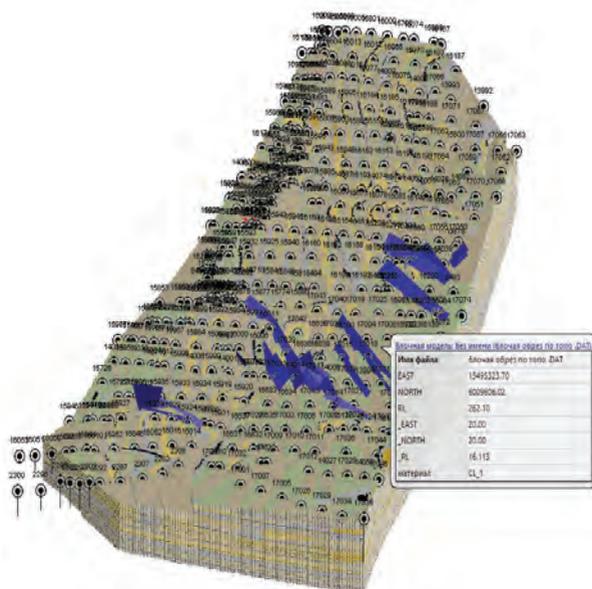
Следующими этапами было создание геологической базы данных по данным бурения, трехмерное моделирование в ПО Micromine породной и угольной толщи в границах с разрывными нарушениями лицензионных участков. Пример полученных результатов представлен на рис. 3 и рис. 4.

Геолого-структурные геологические модели положены в основу численных конечноэлементных моделей, создаваемых в целях оценки начального поля напряжений и прогноза НДС в процессе развития горных работ, а также анализа рисков с использованием методов нейронных сетей.

Полученные трехмерные модели позволяют осуществлять прогноз изменения гипсометрии угольных пластов, и отследить изменение мощностей ложной и основной кровли, что позволит корректировать график отработки рабочего пласта.

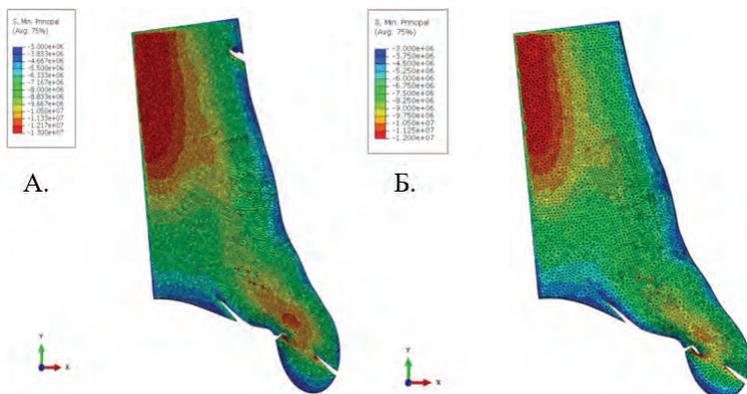


**Рис. 3. Каркас геолого-структурной модели шахтного поля им. С.М. Кирова**

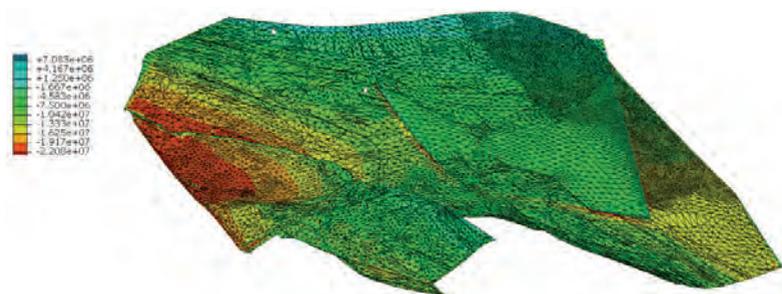


**Рис. 4. Общий вид блочной модели шахты им. В.Д. Ялевского**

В соответствии с рисунком 5, где представлены изохроммы распределения максимальных главных напряжений непосредственно по угольному пласту №52 без привязки к планам горных работ, естественное напряженное поле повышено в зоне Соколовской синклинали.



**Рис. 5. Изохоры распределения максимальных главных напряжений в угольных пластах, Па: А. Пласт №50; Б. Пласт №52**



**Рис. 6. Фрагмент модели с распределением главных максимальных напряжений по угольному пласту Болдыревскому, Па**

Согласно рис. 6 максимальные главные напряжения концентрируются в осевых частях пликативных структур и тяготеют к осям Ленинской синклинали.

По результатам численного моделирования главных максимальных напряжений в углепородном массиве с учетом естественных геологических и тектонических особенностей участка, сформированных до начала ведения горных работ, выявлено, что их значения с глубиной увеличиваются.

Компилируя все проведенные исследования, можно выявить самые опасные места на пласте, где вероятнее всего возможно проявление негативного влияния от перераспределения напряжений в массиве. На приведенном ниже рис. 7 показан пример результата выявления в результате риск-анализа, включающего описанные выше методические подходы, выявлена локализация зон возможного возник-

новения опасных явлений в выработках. Результаты предварительного выделения ТНЗ и ТРЗ в пределах шахтного поля также подтверждаются данными численного конечно-элементного моделирования.



*Рис. 7. Вынесение зон риска по данным математического моделирования и комплексного анализа с использованием нейросетей на прогнозный участок пласта № 52*

### **Заключение**

Результаты выполненного геодинамического моделирования на основании комплексного подхода, включающего в том числе численное моделирование и представленные изохромы распределения максимальных главных напряжений природного напряженного состояния массива, с учетом сформированных геолог-структурных особенностей месторождения, позволяют обосновать основные особенности региона и локализованных в его пределах шахтных полей:

1. В ходе выполненного исследования предварительное выделение местоположения геодинамически опасных зон подтверждено результатами математического моделирования, а также экспериментальными измерениями ЕЭМИ.

2. По результатам геодинамического районирования выявлено, что локализация зон ТНЗ и ТРЗ для тектонических нарушений имеет закономерный характер и напрямую зависит от кинематики разрывного нарушения, вскрываемого в пределах шахтного поля. Данный факт позволяет дать прогноз формирования ГОЗ, при условии качественных геологоразведочных данных.

3. Крупные тектонические нарушения, в районе двух шахт, оказывают значительное влияние на распределение главных напряжений в породном массиве, а также область массива, расположенная внутри

разломов более разгружена от напряжений, чем внешняя область массива.

4. Наличие крупных тектонических нарушений в непосредственной близости от шахтного поля свидетельствует, в контексте п.1, относительно благоприятном прогнозе состояния выработок и целиков с точки зрения устойчивости.

5. Морфологические особенности угольных пластов непосредственно влияют на их напряженное состояние. На рисунке 5 явно выражена область повышенных сжимающих напряжений, достигающих 9–10МПа, проходящая по выделенным при геодинамическом районировании синклиналям.

6. Краевые участки контактного взаимодействия угольных пластов с вмещающими породами также имеют тенденцию к снижению сжимающих напряжений, что обусловлено резким изменением прочностных и деформационных свойств массива при переходе от угля к вмещающим породам.

7. Размеры зон влияния разломов вдоль их залегания имеют переменный характер и изменяются от нескольких десятков до сотен метров, в зависимости от их морфологических особенностей.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Методические рекомендации по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам. — М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2016. — 52 с.

2. *Bieniawski, Z.T.* (2007), Evaluation of the deformation modulus of rock masses using RMR. Comparison with dilatometer tests. Workshop: Underground Works under Special Conditions.

3. *Казанин О.И., Коршунов Г.И., Розенбаум М.А., Шабаров А.Н. Демура В.Н., Артемьев В.Б., Ясюченя С.В., Копылов К.Н., Ютяев Е.П., Мешков А.А., Лупий М.Г., Феофанов Г.Л.* Технологические схемы подготовки и отработки выемочных участков на шахтах ОАО «СУЭК-Кузбасс». Том 3. Подземные горные работы. Книга двенадцатая. Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр». 2014.

4. *Сазонов М.С.* Исследование физико-механических характеристик каменных углей при различных влажностях воздуха // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. Номер 1—2011 – Кемерово: ООО «ВостЭко», 2011. С 41–48.

5. *Черкасов О.В.* Морфоструктурное районирование Кузнецкой впадины как основа при создании прикладных карт, Новосибирск, 2015 г.

6. Техничко-экономическое обоснование постоянных кондиций для подсчета запасов каменных углей по участкам недр «Поле шахты им. С.М. Кирова» и «Кировский-глубокий», Том 1, Книга 1, ОАО «Кузбасский головной институт по проектированию угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий», г. Кемерово, 2014 г.

7. Положение о государственном надзоре за безопасным ведением работ, связанных с пользованием недрами. ( Утв. постановлением Правительства российской федерации от 2 февраля 2010 г. № 39).

8. Положение о порядке и контроле безопасного ведения горных работ в опасных зонах (Утв. Минтопэнерго РФ 23.07.1993) Приложение 1. стр 18.

9. Рубан А.Д. Подготовка и разработка высокогазоносных угольных пластов Рубан А.Д., Артемьев В.Б., Забурдяев В.С., Захаров В.Н., Логинов А.К., Ютяев Е.П. справочное пособие / под общей редакцией А.Д. Рубана, М.И. Щадова; Сибирская угольная энергетическая компания. Москва, 2010. Сер. Библиотека горного инженера.

10. Разрывные нарушения угольных пластов (по материалам шахтной геологии) / И.С. Гарбер [и др.]. – Л.: Недра, 1979. – 190 с.; 7. Единая методика прогнозирования горно-геологических условий разработки угольных пластов. – Л.: ВНИМИ, 1982. – 30 с.

11. Положение о геологическом и маркшейдерском обеспечении промышленной безопасности и охраны недр. РД 07–408–01. (Утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 6 июня 2003 г. №71).

12. Bieniawski, Z.T. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. Wiley-Interscience. pp. 40–47, 1989.

13. Cai Y. Pore structure and its impact on CH<sub>4</sub> adsorption capacity and flow capability of bituminous and subbituminous coals from Northeast China / YidongCai, Dameng Liu, Zhejun Pan, Yanbin Yao, Junqian Li, YongkaiQiu // Fuel 103. – 2013. –P. 258–268. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРЕ**

*Шабаров Аркадий Николаевич* — доктор технических наук, директор научного центра геомеханики и проблем горного производства, shabarov\_an@spmi.ru

*Заморкина Юлия Владимировна* — инженер лаборатории геодинамики, Попов Антон Леонидович — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики,

*Багаутдинов Илья Ильдарович* — кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геомеханики.

*Санкт-Петербургский горный университет*, Научный центр геомеханики и проблем горного производства.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

№. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 496–506.

**Shabarov A.N., Zamorkina Yu. V., Popov A.L., Bagautdinov I.I.**

### **Integrated approach at geodynamic zoning of mine fields**

The article deals with the theme of an integrated approach to geodynamic zoning on the example of mines of JSC «SUEK-KUZBASS», which consists in the application of

morphostructural analysis of the surface, analysis of geological information, the creation of three-dimensional geological-structural model of the array within the limits of interest, the measurement of the amplitude of natural electromagnetic radiation (EMR), testing samples to determine the physical and mechanical properties of the host array and the phase-physical properties of coal, as well as risk assessment using artificial neural networks based on information about dangerous phenomena over the years.

The result of the work is the linkage and comparison of previous research results, the allocation of tectonically-loaded and tectonically-unloaded zones (tnz and TRZ), as well as the rationale for the use of an integrated approach in the performance of work on their localization within the mine fields.

Key words: geodynamics, geomechanics, tectonically unloaded zones, tectonically stressed zones, coal, geodynamic zoning, stress-strain state of the massif, numerical modeling.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-496-506

## AUTHORS

*Shabarov A.N.*, doctor of technical Sciences, Director of the scientific center of geomechanics and problems of mining, shabarov\_an@spm.ru,  
*Zamorkina Yu. V.*, engineer of the laboratory of geodynamics,  
*Popov A.L.*, candidate of geological and mineralogical Sciences, senior researcher of the geodynamics laboratory,  
*Bagautdinov I.I.* candidate of technical Sciences, senior researcher of the laboratory of geomechanics?  
St. Petersburg mining University, scientific center of geomechanics and mining problems.

## REFERENCES

1. *Metodicheskie rekomendacii po ocenke sklonnosti rudnyh i nerudnyh mestorozhdenij k gornym udaram* [Methodological recommendations for assessing the propensity of ore and non-metallic deposits to mining impacts]. Moscow: Zakrytoe akcionerное obshchestvo «Nauchno-tehnicheskij centr issledovanij problem promyshlennoj bezopasnosti», 2016. 52 p.
2. Bieniawski, Z.T. (2007), *Evaluation of the deformation modulus of rock masses using RMR. Comparison with dilatometer tests*. Workshop: Underground Works under Special Conditions.
3. Kazanin O.I., Korshunov G.I., Rozenbaum M.A., Shabarov A.N. Demura V.N., Artem'ev V.B., Yasyuchenya S.V., Kopylov K.N., Yutyaev E.P., Meshkov A.A., Lupij M.G., Feofanov G.L. *Tekhnologicheskie skhemy podgotovki i otrabotki vyemochnyh uchastkov na shahtah OAO «SUEK-Kuzbass»* [Technological scheme of preparation and mining sections in the mines of JSC «SUEK-Kuzbass»]. Tom 3. Podzemnye gornye raboty. Kniga dvenadcataya. Izd-vo «Gornoe delo» OOO «Kimmerijskij centr». 2014.
4. Sazonov M.S. *Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh harakteristik kamennyh uglej pri razlichnyh vlazhnostyah vozduha* [Investigation of physical and mechanical characteristics of coal at different air humidity]. Vestnik nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti. Nomer 1—2011 Kemerovo: OOO «VostEko», 2011. pp. 41—48.
5. Cherkasov O.V. *Morfostrukturnoe rajonirovanie Kuzneckoj vpadiny kak osnova pri sozdanii prikladnyh kart* [Morphostructural zoning of the Kuznetsk basin as a basis for the creation of applied maps], Novosibirsk, 2015.
6. *Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie postoyannyh kondicij dlya podscheta zapasov kamennyh uglej po uchastkam neдр «Pole shahty im. S.M. Kirova» i «Kirovskij-*

*glubokij*] [A feasibility study of permanent conditions for calculation of reserves of stone coal on the subsurface «Field of the mine named. S.M. Kirova» and «Kirovsky-Glubokiy», Tom 1, Kniga 1, OAO «Kuzbasskij golovnoj institut po proektirovaniyu ugledobyvayushchih i uglepererabatyvayushchih predpriyatij», g. Kemerovo, 2014.

7. *Polozhenie o gosudarstvennom nadzore za bezopasnym vedeniem robot, svyazannyh s pol'zovaniem nedrami (Utv. postanovleniem Pravitel'stva rossijskoj federacii ot 2 fevralya 2010 g. no 39)* [Regulation on state supervision over the safe conduct of works related to the use of subsoil. ( App. resolution of the Government of the Russian Federation of February 2, 2010 № 39)].

8. *Polozhenie o poryadke i kontrole bezopasnogo vedeniya gornyh robot v opasnyh zonah (Utv. Mintopenergo RF 23.07.1993)* [Regulations on the procedure and control of safe mining operations in hazardous areas (Approved. Mintopenergo RF 23.07.1993)]. Prilozhenie 1. str 18.

9. Ruban A.D., Artem'ev V.B., Ziburdyayev V.S., Zaharov V.N., Loginov A.K., Yutyaev E.P. *Podgotovka i razrabotka vysokogazonosnyh ugol'nyh plastov* [Training and development vysokorazvityh coal seams]: spravochnoe posobie / pod obshchej redakciej A.D. Rubana, M.I. Shchadova; Sibirskaya ugol'naya energeticheskaya kompaniya. Moscow, 2010. Ser. Biblioteka gornogo inzhenera.

10. Garber I.S. i dr. *Razryvnye narusheniya ugol'nyh plastov (po materialam shahtnoj geologii)* [Faults coal seam (materials mining Geology)]. Leningrad: Nedra, 1979. 190 p.; Edinaya metodika prognozirovaniya gorno-geologicheskikh uslovij razrabotki ugol'nyh plastov. Leningrad: VNIMI, 1982. 30 p.

11. *Polozhenie o geologicheskom i markshejderskom obespechenii promyshlennoj bezopasnosti i ohrany nedr. RD 07–408–01. (Utv. postanovleniem Gosgortekhnadzora RF ot 6 iyunya 2003 g. no 71)* [Regulations on geological and surveying ensuring industrial safety and subsoil protection. RD 07-408-01. (App. resolution of Gosgortekhnadzor of the Russian Federation of June 6, 2003 no 71)].

12. Bieniawski, Z.T. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. Wiley-Interscience. pp. 40–47, 1989.

13. Cai Y. *Pore structure and its impact on CH<sub>4</sub> adsorption capacity and flow capability of bituminous and subbituminous coals from Northeast China*. YidongCai, Dameng Liu, Zhejun Pan, Yanbin Yao, Junqian Li, YongkaiQiu. Fuel 103. 2013. pp. 258–268.



**О.В. Тайлаков, Д.Н. Застрелов,  
А.И. Смыслов, В.Л. Самусь**

## **КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ НА УГОЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

Рассмотрены характерные категории источников выбросов парниковых газов, подлежащие обязательному учету для угольных предприятий. Представлены особенности учета фугитивных выбросов для угольных шахт на основе оценки газоносности угля в пределах разрабатываемого участка. Приведена типичная структура выбросов парниковых газов для угольных разрезов и шахт. Даны рекомендации по снижению объемов этих выбросов.

Ключевые слова: изменение климата, парниковые газы, источники выбросов, инвентаризация выбросов парниковых газов в атмосферу на угольных предприятиях, категории источников выбросов.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-507-515

Изменение климата за счет увеличения концентрации парниковых газов (ПГ) в атмосфере потенциально представляет собой экологическую угрозу окружающей среде и экономическому развитию в глобальном масштабе. Этот процесс может привести к значительным изменениям и негативным последствиям в использовании ресурсов, производстве и экономической деятельности [1, 2]. Для решения этой проблемы необходимо стабилизировать концентрацию парниковых газов в атмосфере на таком уровне, который не допускал бы опасного антропогенного воздействия на климатическую систему. В связи с этим в июне 1992 г. в Рио-Де-Жанейро почти 150 странами была подписана рамочная Конвенция Организации Объединённых Наций об изменении климата [3]. Список парниковых газов, подлежащих ограничению в рамках Рамочной Конвенции ООН об изменении климата, определен в приложении к Киотскому протоколу (подписан в г. Киото, Япония в декабре 1997 г. 159 государствами) и включает: двуокись углерода (CO<sub>2</sub>), метан (CH<sub>4</sub>), закись азота (N<sub>2</sub>O), перфторуглероды (ПФУ), гидрофторуглероды (ГФУ) и гексафторид серы (SF<sub>6</sub>) [3].

В основе разрабатываемых, реализуемых и уже действующих способов ограничения содержания парниковых газов в атмосфере Земли

лежит количественное определение, мониторинг, отчётность и верификация выбросов парниковых газов. В соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 30 сентября 2013 г. № 752 «О сокращении выбросов парниковых газов» к 2020 году, с Распоряжением Правительства Российской Федерации от 2 апреля 2014 г. N 504-р и Распоряжением Правительства Российской Федерации от 6 мая 2015 г. N 807-р объемы выбросов парниковых газов (ПГ) в РФ должны быть снижены до уровня менее 75% объема указанных выбросов в 1990 г. по секторам экономики.

Всем угледобывающим предприятиям необходимо выполнить инвентаризацию выбросов парниковых газов в атмосферу и их источников в процессе своей деятельности в соответствии с «Методическими указаниями и руководству по количественному определению объёма выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации» (далее Методика), утверждёнными приказом Минприроды России от 30.06.2015 года № 300 и Методологией Межправительственной группы экспертов по изменению климата МГЭИК (IPCC, 2006) и на основе Руководства ЕМЕР/ЕЕА по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ.

Источниками выбросов парниковых газов для угледобывающих предприятий являются объекты или производственные процессы, осуществляемые организацией, в результате деятельности от которых происходят выбросы парниковых газов в атмосферу. Каждый производственный объект или производственный процесс организации должен быть отнесен к одной из выделенных категорий источников или исключен из количественного определения объемов выбросов парниковых газов на основании установленных критериев.

Категории источников выбросов и парниковые газы, подлежащие обязательному учёту согласно приложению № 1 к Методике [4], представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Категории источников выбросов и парниковые газы, подлежащие обязательному учёту в организациях**

№ п/п	Категория источников выбросов парниковых газов	Парниковый газ
1	Стационарное сжигание топлива	CO <sub>2</sub>
2.	Фугитивные выбросы, в том числе:	
2.1	при осуществлении деятельности	CH <sub>4</sub>
2.2	при транспортировке, складировании и обогащении угля	CH <sub>4</sub>
3	Выбросы от транспорта	CH <sub>4</sub>

Стационарное сжигание топлива – категория источников выбросов ПГ, включает выбросы  $\text{CO}_2$  в атмосферу, возникающие в результате сжигания всех видов топлива для выработки тепловой и/или электрической энергии в котельных агрегатах.

Фугитивные выбросы – выбросы угледобывающих предприятий от источников выбросов ПГ, включающих выбросы  $\text{CH}_4$  в атмосферу, возникающие в процессе ведения горных работ из вентиляционных и дегазационных установок. Категория фугитивных выбросов также включает организованные и неорганизованные выбросы  $\text{CH}_4$  в атмосферу, возникающие в процессе транспортировки, складирования и обогащения угля, добытого подземным способом.

Выбросы от транспорта – категория источников выбросов ПГ, включает выбросы  $\text{CO}_2$  от сжигания бензина и дизельного топлива для осуществления внутрироссийских пассажирских и грузовых перевозок автотранспортом и другими видами транспорта.

Для количественного определения объемов выбросов парниковых газов на угольных предприятиях составляется реестр источников выбросов. Для угольных предприятий типичными источниками выбросов ПГ являются:

- выбросы углекислого газа, образующиеся при сжигании угля в котельных агрегатах;
- выбросы углекислого газа, образующиеся при сжигании топлива (бензин, дизель) транспортом;
- выбросы метана на угледобывающих предприятиях из систем вентиляции и дегазации;
- выбросы метана, возникающие на предприятии в процессе транспортировки, складирования и обогащения угля.

Если категории источников выбросов «стационарное сжигание топлива», «фугитивные выбросы при осуществлении деятельности» и «выбросы от транспорта» достаточно просто можно рассчитать в соответствии с «Методическими указаниями и руководством по количественному определению объёма выбросов ...», то при определении фугитивных выбросов возникающих во время транспортировки, складирования и обогащения угля могут возникнуть трудности. В процессе добычи наблюдается интенсивное выделение метана, которое продолжается при транспортировке и переработке угля. Учет объемов эмиссии метана в процессе добычи, транспортировки и переработки угля имеет важное значение для оценки общих и фугитивных выбросов метана на угольных предприятиях. Доступные для этих целей методы, в основном, представлены в ряде отраслевых методик, ориентированных на прогноз метанообильности участков угольных шахт в зависимости от горно-геологических условий и показателей добычи угля. Также для оценки эмиссии метана в угольной промышленности России применяются и методику МГЭИК (IPCC, 2000; IPCC, 2006) [5, 6], в соответствии

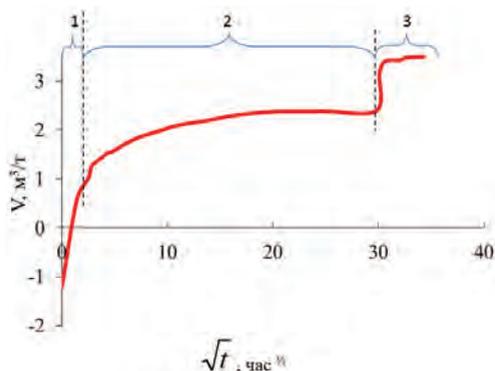
с которой для определения общей эмиссии метана учитываются его выбросы при добыче угля подземным способом, добыче угля открытым способом и последующей деятельности. При этом из общей эмиссии метана вычитается объем извлеченного и использованного газа. Вместе с тем, анализ горно-геологических показателей угледобывающих компаний показывает, что десорбционные свойства угольных пластов, отрабатываемых шахтами, исследованы недостаточно. Кроме этого, остаточная газоносность угля на проектируемых и разрабатываемых участках угольных пластов может отличаться от метаноносности, полученной на этапе геологической разведки, так как оконтуривание горных выработок, подработка и надработка, приводит к разупрочнению рабочих пластов, инициируя миграцию метана.

Для определения метаноносности угля применяют прямые и косвенные методы [7]. Прямые методы основаны на отборе угольных кернов при бурении с поверхности вертикальных геологоразведочных скважин и определении объема газа, выделяющегося из угольных проб в лабораторных условиях. Определение газоносности угля косвенными методами основывается на анализе фактической метанообильности действующих выработок и установлении газового баланса выемочных участков по источникам газовыделения. Аналитический обзор существующих методов определения газоносности угольных пластов показал, что одним из наиболее распространенных является прямой метод, основанный на отборе угольных образцов при проведении геологоразведочных работ с последующим измерением содержания в них метана. При этом из-за низкой надежности срабатывания специальных герметичных керногазонаборников применяют обычные устройства для отбора проб, а расчет газоносности проводится с учетом поправочных коэффициентов от 1,1 до 1,25 в зависимости от угольного бассейна, что приводит к снижению достоверности оценки объемов выделившегося газа. Также при бурении геологоразведочных скважин применяют метод, основанный на использовании непрерывного газового каротажа выходящей из скважины промывочной жидкости. В шахтных исследованиях газоносность изучают по газовыделению при бурении скважин и по газовым съемкам в очистных и подготовительных выработках расчетными методами. При этом не учитываются закономерности изменения фильтрационных свойств в углепородном массиве в результате ведения горных работ, обусловленные разгрузкой от горного давления вмещающих пород.

Для оценки газоносности угля в пределах разрабатываемого участка, можно использовать прямой метод, основанный на отборе угольных кернов из скважин, пробуренных в горных выработках шахты и измерениях десорбции метана в лабораторных условиях. При этом расчет объема выделившегося газа  $V_{\text{выд}}$  из угольных проб определяется по формуле

$$V_{\text{Выд}} = \sum_{i=1}^N V_i, \quad (1)$$

где  $N$  – количество измерений выделившегося объема газа,  $\text{см}^3$ ;  $V_i$  – объем газа, измеренный за каждый  $i$ -ый интервал времени,  $\text{м}^3$ .



**Рис. 1.** Газ, выделившийся при: 1 – отбойке и транспортировке по горным выработкам угля; 2 – транспортировке по дневной поверхности, хранении и обогащению угля; 3 – сжигании угля

На рис. 1 приведена десорбционная кривая, показывающая объем выделенного метана, с учетом основных технологических операций и времени их выполнения. Согласно десорбционной кривой объем выделившегося метана, приходящийся на период транспортировки, хранения и обогащения угля составляет  $1,3 \text{ м}^3/\text{т}$ . Расчет объемов фугитивных выбросов на угледобывающих предприятиях в процессе ведения горных работ на угольных предприятиях выполняется по формуле

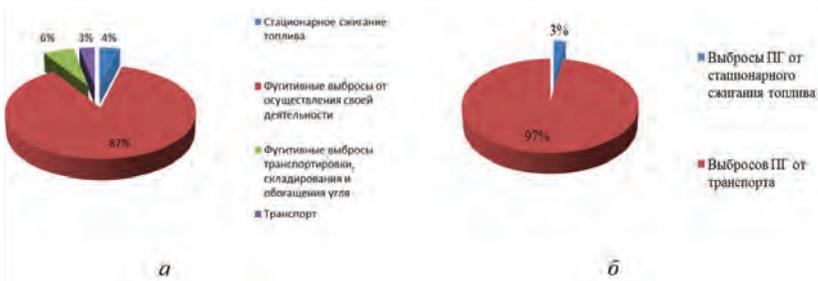
$$EF_{\text{CO}_2} = FC \cdot V_f \cdot \rho, \quad (2)$$

где  $EF_{\text{CO}_2}$  – фугитивные выбросы  $\text{CO}_2$  при транспортировке, хранении и обогащении угля,  $\text{тCO}_2/\text{э}$ ;  $FC$  – объем добычи угля,  $\text{т}/\text{год}$ ;  $V_f$  – объем выделившегося метана, приходящийся на период транспортировки, хранения и обогащения угля составляет  $1,3, \text{ м}^3/\text{т}$ ;  $\rho$  – плотность  $\text{CH}_4 = 0,67 \text{ кг}/\text{м}^3$  (при  $20^\circ\text{C}$ ,  $101,3 \text{ кПа}$ ).

Количественное определение объемов выбросов парниковых газов на угольных предприятиях ведется, начиная с 2014 года на 20 угольных разрезах и шахтах. В таблице 2 приведены типичные структуры выбросов для угледобывающих предприятий. Основной объем выбросов для угольных шахт приходится на выбросы метана из систем вентиляции и дегазации, а для угольных разрезов на выбросы углекислого газа от сжигания моторного топлива.

**Объемы выбросов парниковых газов по категориям для угледобывающих предприятий, тСО<sub>2</sub>э**

Угледобывающее предприятие	Разрез	Шахта
Стационарное сжигание топлива	156	10 888
Фугитивные выбросы	0	1 204 353
Выбросы от транспорта	24 890	6,4
Объем добычи угля, тыс. т	3 000	3 000



**Рис. 2. Типичная структура выбросов ПГ: а – угольной шахты, б – угольного разреза**

Для угольной шахты с объемом добычи более 3 млн т в год выбросы метана в процессе добычи угля составят более 45 тыс. т в год, при этом фугитивные выбросы составят 2,68 тыс. т, остальное транспорт и котельные (рис. 2, а). Можно сделать вывод, что для угольных шахт дегазационный метан обладает наибольшим потенциалом для сокращения парниковых газов путем его использования, например, в энергетических установках [8–13]. Для этого необходимо:

- повысить эффективность дегазации;
- планировать расположение вакуумных насосных станций как можно ближе к возможному потребителю тепло- и/или электроэнергии;
- увеличивать количество энергетических установок, вырабатывающих на шахтном метане тепло- и/или электроэнергию;
- использовать шахтный метан как возможный источник топлива для автотранспорта.

Для угольного разреза с объемом добычи более 3 млн т в год выбросы метана в процессе добычи угля отсутствуют, при этом выбросы от стационарного сжигания топлива составят 156 тСО<sub>2</sub>э, а от транспорта 24 890 тСО<sub>2</sub>э (рис. 2, б). Таким образом, для снижения выбросов парниковых газов на угледобывающих предприятиях с открытым способом разработки наиболее эффективным вариантом сокращения выбросов ПГ является снижение выбросов при сжигании топлива транспортом. В первую очередь это мероприятия направленные на увеличение энер-

гоэффективности, что приводит к снижению расхода топлива, а также перевод транспорта на использование шахтного метана в качестве моторного топлива.

Развитие и тиражирование проектов по переработке шахтного метана, а также направленных на повышение энергоэффективности угледобычи подземным и открытым способами позволит снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду. При этом утилизация шахтного метана может обеспечить выработку до 10–20 МВт электрической энергии для угольной шахты со средней метанообильностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виды, источники парниковых газов и их влияние на климат Земли. [Электронный ресурс]: Проект по выводу ГХФУ в Российской Федерации URL: [http://www.ozoneprogram.ru/biblioteka/slovar/parnikovye\\_gazy/](http://www.ozoneprogram.ru/biblioteka/slovar/parnikovye_gazy/) (дата обращения: 04.08.2015).

2. Постановление Правительства Российской Федерации от 16 февраля 2008 г. № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию».

3. Рамочная Конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата. UNFCCC // Рио-де-Жанейро, июнь 1992 г.

4. Проект Методических указаний и руководству по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность на территории Российской Федерации. [Электронный ресурс]: «Единый портал». URL: [http://regulation.gov.ru/project/22710.html?point=view\\_project&stage=2&stage\\_id=17341](http://regulation.gov.ru/project/22710.html?point=view_project&stage=2&stage_id=17341) (дата обращения 03.08.2015)

5. Irving W., Tailakov O. Fugitive Emissions from Coal Mining and Handling// IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. – Accepted by 16<sup>th</sup> session of IPCC, Montreal, 1–8 May, 2000.- pp. 2.70–2.78.

6. Azhari F.M. Ahmed, Branca B. at al. Fugitive Emissions//2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. — IGES, Japan, 2006, Volume 2: Energy, pp. 4.1–4.78.

7. Газоносность угольных бассейнов и месторождений СССР. Гл. редактор А.И. Кравцов. Том. II. Угольные бассейны и месторождения Сибири, Казахстана и Дальнего Востока. М., «Недра», 1979. 454 с.

8. Müller-Syring G. Critical evaluation of default values for the GHG emissions of the natural gas supply chain / G. Müller-Syring, C. Große. – Leipzig: DBI Gas- und Umwelttechnik mbH, 2016.

9. Тайлаков В.О., Застрелов Д.Н. Оценка экономической эффективности и рисков угольных предприятий при реализации проектов использования шахтного метана // Горный Информационно-аналитический бюллетень, Безопасность, Москва: Издательство «ГОРНАЯ КНИГА», 2009. – № 12 – С. 94–105.

10. Застрелов Д.Н., Уткаев Е.А., Смыслов А.И., Кормин А.Н. Разработка сетевой модели процесса утилизации шахтного метана // Горный Информационно-

аналитический бюллетень, Москва: Издательство «ГОРНАЯ КНИГА», 2013. – Отдельный выпуск № 6 – С. 151–154.

11. Тайлаков О.В., Застрелов Д.Н., Смыслов А.И., Уткаев Е.А. Переработка дегазационного метана в энергетических установках на угледобывающих предприятиях // Горный Информационно-аналитический бюллетень, Москва: Издательство «ГОРНАЯ КНИГА», 2013. – Отдельный выпуск № 6 – С. 170–176.

12. Садов А.П., Костеренко В.Н., Тайлаков О.В., Уткаев Е.А., Застрелов Д.Н., Смыслов А.И. Опыт использования вентиляционного метана в качестве дополнительного топлива для двигателей внутреннего сгорания // Уголь, 2015. – № 12 – С. 61–68.

13. Тайлаков О.В., Застрелов Д.Н., Уткаев Е.А., Соколов С.В., Кормин А.Н., Смыслов А.И. Направления утилизации шахтного метана // Вестник КузГТУ, Кемерово, 2015. – №6. – С. 62–67. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

*Тайлаков Олег Владимирович* — доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе,

*Застрелов Денис Николаевич* — кандидат технических наук, старший научный работник,

*Смыслов Алексей Игоревич* — ведущий инженер,

*Самусь Валентина Леонидовна* — старший инженер,

*Институт угля Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН, Россия, г. Кемерово.*

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.

No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 507–515.

**Tailakov O.V., Zastrelov D.N., Smyslov A.I., Samus V.L.**

## **Quantitative determination of emissions greenhouse gases at coal enterprises**

specific categories of sources of greenhouse gas emissions – subject to compulsory accounting for coal enterprises – are considered. Features of the account of fugitive emissions for coal mines on the basis of an estimation of gas content of coal within the developed site are considered. Typical emission structures for underground and surface coal mines are given. The recommendations reducing these emissions are provided.

Keywords: climate change, greenhouse gases, emission sources, inventory of greenhouse gas emissions into the atmosphere at coal enterprises, source category.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-507-515

## AUTHORS

*Tailakov O.V., doctor of technical science, professor, deputy director for science,*

*Zastrelov D.N., candidat of technical Sciences, senior researcher,*

*Smyslov A.I., principal engineer,*

Samus V.L., senior engineer,

Coal Institute Federal research center for coal and coal chemistry Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, 650065, Kemerovo, Leningrad Avenue, 10.

## REFERENCES

1. *Vidy, istochniki parnikovoyh gazov i ih vliyaniye na klimat Zemli* [Types, sources of greenhouse gases and their impact on the earth's climate]. [Elektronnyj resurs]: Proekt po vyvodu GHFU v Rossijskoj Federacii URL: [http://www.ozoneprogram.ru/biblioteka/slovar/parnikovoye\\_gazy/](http://www.ozoneprogram.ru/biblioteka/slovar/parnikovoye_gazy/) (data obrashcheniya: 04.08.2015).
2. *Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 16 fevralya 2008 g. № 87 «O sostave razdelov proektnoj dokumentacii i trebovaniyah k ih sodержaniyu»* [Resolution of the Government of the Russian Federation of February 16, 2008 № 87 « on the composition of sections of project documentation and requirements for their content»].
3. *Ramochnaya Konvenciya Organizacii Ob»edinennyh Nacij ob izmenenii klimata* [United Nations framework Convention on climate change]. UNFCCC. Rio-de-Zhaneiro, iyun' 1992.
4. *Proekt Metodicheskikh ukazanij i rukovodstvu po kolichestvennomu opredeleniyu ob»ema vybrosov parnikovoyh gazov organizaciyami, osushchestvlyayushchimi hozyajstvennyuyu i inuyu deyatel'nost' na territorii Rossijskoj Federacii* [Draft Guidelines and guidelines for the quantification of greenhouse gas emissions by organizations engaged in economic and other activities in the territory of the Russian Federation]. [Elektronnyj resurs]: «Edinyj portal». URL: [http://regulation.gov.ru/project/22710.html?point=view\\_project&stage=2&stage\\_id=17341](http://regulation.gov.ru/project/22710.html?point=view_project&stage=2&stage_id=17341) (data obrashcheniya 03.08.2015)
5. Irving W., Tailakov O. *Fugitive Emissions from Coal Mining and Handling*. IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Accepted by 16th session of IPCC, Montreal, 1–8 May, 2000. pp. 2.70–2.78.
6. Azhari F.M. Ahmed, Branca B. et al. *Fugitive Emissions*. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japan, 2006, Volume 2: Energy, pp. 4.1–4.78.
7. *Gazonosnost' ugol'nyh bassejnov i mestorozhdenij SSSR* [The gas content of coal basins and deposits of the USSR]. Gl. redaktor A.I. Kravcov. Tom. II. Ugol'nye bassejny i mestorozhdeniya Sibiri, Kazahstana i Dal'nego Vostoka. Moscow: «Nedra», 1979. 454 p.
8. Müller-Syring G. *Critical evaluation of default values for the GHG emissions of the natural gas supply chain*. G. Müller-Syring, C. Große. Leipzig: DBI Gas- und Umwelttechnik mbH, 2016.
9. Tajlakov V.O., Zastrelov D.N. *Ocenka ekonomicheskoy effektivnosti i riskov ugol'nyh predpriyatij pri realizacii proektov ispol'zovaniya shahtnogo metana* [Assessment of economic efficiency and risks of coal enterprises in the implementation of projects using coal mine methane]. Gornyj Informacionno-analiticheskij byulleten', Bezopasnost', Moskva: Izdatel'stvo «GORNAYA KNIGA», 2009. no 12. p. 94–105.
10. Zastrelov D.N., Utkaev E.A., Smyslov A.I., Kormin A.N. *Razrabotka setevoj modeli processa utilizacii shahtnogo metana* [Development of network model of the process of CMM]. Gornyj Informacionno-analiticheskij byulleten', Moskva: Izdatel'stvo «GORNAYA KNIGA», 2013. Otdel'nyj vypusk no 6. pp. 151–154.
11. Tajlakov O.V., Zastrelov D.N., Smyslov A.I., Utkaev E.A. *Pererabotka degazacionnogo metana v energeticheskikh ustanovkah na ugledobyvayushchih predpriyatiyah* [Processing degasification of methane in power plants at coal mines]. Gornyj Informacionno-analiticheskij byulleten', Moskva: Izdatel'stvo «Gornaya kniga», 2013. Otdel'nyj vypusk no 6. pp. 170–176.
12. Sadov A.P., Kosterenko V.N., Tajlakov O.V., Utkaev E.A., Zastrelov D.N., Smyslov A.I. *Opyt ispol'zovaniya ventilyacionnogo metana v kachestve dopolnitel'nogo topliva dlya dvigatelej vnutrennego sgoraniya* [Experience in the use of ventilation air methane as a supplementary fuel for internal combustion engines]. Ugol', 2015. no 12. pp. 61–68.
13. Tajlakov O.V., Zastrelov D.N., Utkaev E.A., Sokolov S.V., Kormin A.N. Smyslov A.I. *Napravleniya utilizacii shahtnogo metana* [Areas of CMM]. Vestnik KuzGTU, Kemerovo, 2015. №6. C. 62–67.

**С.В. Цирель, М.В. Шванкин,  
Т.А. Василенко, А.В. Бондарев**

## **КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ РИСКОВ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ОТРАБОТКЕ МОЩНЫХ ПОЛОГИХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ**

Освещен подход, который применен авторами для анализа эффективности используемых наборов инструментов контроля, прогноза и оценки степени рисков и их последствий. Оценка включает как свойства и структуру углепородного массива (тектоническую нарушенность, исследования коллекторских свойств угля, НДС, газонасыщенность, обводненность и др.), так и данные текущих наблюдений (от сейсмических событий в регионе и жалоб жителей на сотрясения и скопления метана до наблюдений в выработках). В качестве комплексной оценки широко используются данные геофизических методов, реализуемых на шахтах с помощью систем САКСМ, GITS, портативного прибора ANGEL-M. Положительно оценивается использование геодинамического районирования, что позволяет своевременно выявить участки пластов, которые могут быть нарушены разломами, ориентированными как вдоль, так и вкрест простирания мелкой вторичной складчатости.

Реализуемая в настоящее время на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» комплексная оценка рисков, учитывающая геодинамические и газодинамические риски является результатом многолетних исследований и апробаций.

Проводится анализ результатов использования различных методов мониторинга, составление оптимальных схем ведения мониторинга и обработки данных, анализ геодинамических рисков, оценка применимости различных технических средств с учетом горно-геологических и горнотехнических особенностей. Конечным результатом станет разработка комплексной методики регионального и локального мониторинга для оценки текущего геодинамического состояния массива горных пород с использованием ЕДАЦ АО «СУЭК-Кузбасс».

Ключевые слова: геодинамическое районирование, тектонически-напряженная зона, тектонически разгруженная зона, горные удары, горно-тектонические удары.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-516-524

### **Введение**

Переход современных угледобывающих предприятий на высокоскоростные технологии добычи угля и проходки горных выработок приводит к более динамичным формам проявления горного давления, т.к. массив горных пород принимает вид динамически развивающейся структуры. Эти технологии в сочетании с используемыми при этом

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11 (специальный выпуск 49). С. 516–524.

© С.В. Цирель, М.В. Шванкин, Т.А. Василенко, А.В. Бондарев, 2018.

схемами отработки (длинные выемочные столбы, увеличенная длина очистных забоев, большое сечение подготовительных горных выработок, анкерные методы крепления) привели к изменению подходов в современных исследованиях геомеханики и газодинамики горного массива для обеспечения геодинамической безопасности. Объектом исследования становятся риски отсутствия релаксация интенсивно нагруженного массива при его отработке. Большие протяженные участки горного массива с накопленной потенциальной энергией, которая может привести к динамическому её выделению, не позволяют провести мониторинг «базовыми» средствами прогноза удароопасности (с помощью бурения шпуров). Решением этой проблемы становится текущая оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) массива, реализуемая с помощью программных комплексов в режиме реального времени, которая контролируется в рамках МФСБ [1]. Выбору оптимальных параметров регистрации напряженных участков массива, мест расположения приемников для её регистрации предшествует правильное заложение выемочных полей, направлений отработки и параметров подготовительных выработок, проведенное на основании геодинамического районирования, как основы для оценки возможных форм проявления актуальных для исследуемой области рисков и конструирования системы мониторинга.

### **Задачи и методы реализации комплексной оценки геодинамических рисков**

Первой и важнейшей проблемой становится контроль состояния углепородного массива. Напряженно-деформированное состояние, интенсивное газовыделения, наличие не вскрытых при геологической разведке зон малых тектонических нарушений, пучения почвы, повышение риска образования суфляров или резких прорывов метана – это лишь часть рисков горного производства, которые проявляются с началом ведения интенсивной отработки угольного месторождения. Высокая интенсивность ведения горных работ, как при проходке выработок различного назначения, так и при очистной выемке угля не позволяет проводить необходимые измерения НДС массива или, наоборот, необходимые измерения мешают использовать горнодобывающее оборудование на полную мощность.

Второй проблемой является обеспечения скорости анализа данных мониторинга со скоростью изменения геомеханических и газодинамических процессов в динамично нагружаемом массиве угля и пород. Скорость принятия решений и оповещения работников (на основании оперативной обработки данных анализа) должны быть не ниже диспетчерской, позволяющей своевременно принимать решения по обеспечению безопасности при ведения горных работ.

На шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» широко внедряют современные средства мониторинга горных ударов и внезапных выбросов. К при-

меру, на основе анализа и оценки применимости различных систем контроля геодинамических рисков, используемых в условиях шахты им. С.М. Кирова, с учётом уникальности горно-геологических и горнотехнических условий, авторами намечены наиболее перспективные направления контроля состояния горного массива и выполнен подбор средств его осуществления. Предложены рекомендации по улучшению качества обработки конечной информации для средств мониторинга, используемых на шахте.

Архитектура многофакторного подхода оценки геодинамических рисков с учетом средств и способов контроля проявлений ДЯ и прогноза рисков их проявлений, применяемых на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» представляют следующее. Информацию, используемую при комплексной оценке, делим на две группы.

Первая группа — Информация о структуре, свойствах и состоянии угольного пласта и всего углепородного массива, включая содержащиеся в нем флюиды (прежде всего – метан и воду).

Вторая группа — Данные наблюдений и мониторинга, характеризующие текущее состояние обрабатываемого угольного пласта и всего углепородного массива, включая зарегистрированные сейсмически активные зоны в пределах горного отвода шахты.

Первая группа по информативности и способах её получения включает известные из геологоразведочных данных характеристики месторождения, на основе которой составлялся проект (в нее входят геологическое строение, свойства угля и вмещающих пород, морфология пласта, данные о тектоническом строении, данные о газонасыщенности и гидрогеологии, сведения о проявлениях геодинамической и сейсмической активности). К этой же группе можно отнести информацию об ранее проведенной обработке пластов в свите, оставленных целиках, зонах повышенного газовыделения и водопритоков.

Вторую подгруппу составляют дополнительные данные, выявляемые при вскрытии пласта и в процессе его отработки, включая малые дизъюнктивные нарушения, выделяемые с помощью различных систем, например САКСМ [2], МГСК [3] или GITS [4].

Объединяет все эти сведения геолого-структурная и построенная на ее основе пополняемая геодинамическая (включающая расчеты НДС) модель месторождения. С помощью этой модели мы можем выделить участки риска:

– ТНЗ (тектонически-напряженные зоны), основные риски в которых связаны с динамическими проявлениями горного давления;

– зоны возможных зависаний тяжелой кровли (прогнозные карты устойчивости непосредственной кровли и обрушаемости основной кровли);

– ТРЗ (тектонически разгруженные зоны), в которых велики риски неустойчивости кровли, вывалов, повышенных водопритоков, скопления свободного метана и т.д.;

– зоны с повышенной газонасыщенностью разных типов, как с повышенным горным и газовым давлением и преобладанием закрытой пористости, так и с вероятными скоплениями свободного метана.

Основную роль в оценке рисков играет шахтный мониторинг, который проводится рядом методов с различными масштабами их применения.

1. Наземный сейсмический мониторинг.
2. Шахтный (подземный) сейсмический мониторинг.
3. Сейсмоакустический мониторинг.
4. Активный электромагнитный мониторинг (искусственное электромагнитное излучение).
5. Деформационный мониторинг.
6. Локальный и текущий мониторинг (штыб, вращающаяся трубка, электромагнитный мониторинг ЕЭМИ).

Совместный анализ данных, как первой, так и второй группы и прогноз опасных явлений представляет собой самую сложную часть мониторинга. В качестве стартового положительного примера использования многофакторного подхода, рассматривается многофакторный анализ сейсмических активизаций по шахте Польшаевская [2]. Этот анализ позволил выделить основные направления и условия, которые влияют на развитие ДЯ.

При анализе рассматривается достаточно высокая природная сейсмическая активность Кузбасса, перераспределение напряжений и активизация геодинамически активных структур, которая усиливается при увеличении темпов отработки пластов, возросшая глубина ведения горных работ, сейсмическое воздействие крупных промышленных взрывов на объектах открытых горных работ, наличие вблизи участков сейсмических активизаций крупных тектонических нарушений и активных геологических нарушений на участках ведения горных работ, близость к замыканию разрывных нарушений, наличие затопленных выработанных пространств и оставленных на вышележащих пластах предохранительных целиков при малой мощности междупластья, присутствие в основной кровле мощных слоев крепких песчаников, способных накапливать упругую энергию, участки резкого изменения мощности основной кровли. Предложенные инструменты многофакторного анализа, в свою очередь, можно разделить на два вида, используемые и перспективные.

Рассмотрим рекомендуемую иерархию технических средств и получаемых ими результатов для контроля геодинамических процессов, применяемых в настоящее время на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс».

1. Регионально-сейсмический мониторинг. С помощью данных Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН обнаружены сейсмические активизации меньшего энергетического уровня в районах ведения горных работ, требующие подтверждения их расположения с использованием локальных сетей.

2. Автоматизированный контроль по показаниям шахтных систем мониторинга геодинамической активности (сейсмических, сейсмоакустических). Использование системы [2], МГСК [3] и GITS [4], соответственно для локального и регионального мониторинга удароопасности [5].

3. Методы локального и текущего контроля в горных выработках. Эти методы включают в себя:

а) «Базовый» метод оценки удароопасности по количеству буровой мелочи, который является основным [1, 6]. Учитывая трудозатраты, данный метод применяется при выявлении категории ОПАСНО и на глубинах отнесения пластов к опасным по ДЯ.

б) Геофизический метод естественной электромагнитной эмиссии (ЕЭМИ) с помощью прибора ANGEL-M [7]. Один из перспективных методов, при условии наработки качественных критериев удароопасности.

4. Газовый контроль.

5. Перспективные методы мониторинга (контроля и прогноза). Перспективными являются применение метода электроразведки, различных методов деформационного контроля состояния выработок, а также метода вращающейся трубки, применение наземной сейсмостанции в пределах горного отвода шахты.

Говоря о промежуточных результатах можно отметить следующее. Например, в условиях шахты им. С.М. Кирова в настоящее время используется широкий спектр современных подходов к оценке текущего состояния горного массива. Многофакторность обеспечивается, во-первых, оценкой горно-геологических и горнотехнических параметров отработки, результатов геодинамического районирования. Во-вторых, в рамках текущего контроля геодинамической обстановки посредством автоматизированной сейсмоакустической системы САКСМ и системы контроля и прогноза МГСК (контроль наиболее ответственных участков шахтного поля – непосредственные места очистной выемки и проведения подготовительных выработок), применения локального геофизического метода ЕЭМИ (естественная электромагнитная эмиссия) с помощью прибора ANGEL-M, текущий контроль газовой обстановки в выработках шахты [8].

### **Заключение**

При разработке комплексной методики многофакторного мониторинга для оценки текущего геодинамического состояния массива горных пород с использованием ЕДАЦ АО «СУЭК-Кузбасс» планируется учесть основные типовые ситуации максимального риска:

1) Выделение зоны (зон) повышенной геодинамической активности на основании анализа данных сейсмического и сейсмоакустического мониторинга, включая как ТНЗ, так и ТРЗ.

2) Обнаружение признаков опасных явлений в вышеуказанных зонах при локальном и текущем мониторинге.

3) Обнаружение зависаний тяжелой кровли (при наличии таковой).  
4) Опасные изменения водопритоков (резкое усиление, полное прекращение водопритока).

5) Обнаружение признаков опасных газовых явлений, в том числе локальный рост газообильности, появление суфляров и т.д.

Системная обработка входящей информации от различных систем разных уровней многофакторной иерархии оценки геодинамических рисков позволяет разделить информационный поток на следующие условные части:

– нормальный (рабочий) характер развития геомеханических и геодинамических процессов;

– нестабильного состояния горной среды (повышенный контроль);

– критическое состояние массива и риск кризисной/аварийной ситуации (принятие срочных мероприятий технологического или профилактического характера).

Авторы выражают благодарность Артемовой Надежде Антоновне за помощь в работе и обсуждении результатов.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Правила безопасности в угольных шахтах, утвержденные приказом Ростехнадзора от 19 ноября 2013 г. № 550 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах», зарегистрированные Минюстом России 31 декабря 2013 г., регистрационный № 30961.

2. Копылов К.Н., Смирнов О.В., Кулик А.И., Потапов П.В. Испытания автоматизированной системы акустического контроля состояния массива горных пород. Уголь. 2015. № 7 (1072). С. 44–47.

3. Кубрин С.С., Журавлев Е.И. Контроль геодинамического и газодинамического состояния массива горных пород. В сборнике: Безопасность труда и эффективность производства горнодобывающих предприятий с подземным способом разработки 2016. С. 19–25.

4. Яковлев Д.В., Исаев Ю.С., Мулев С.Н., Яковлев В.А., Лопатков Д.Г, Максимов А.С. Аппаратно-программный комплекс «GeoInfo TransSystem» (GITS) в системах геодинамического и экологического мониторинга». Горная геофизика-98: Сб. науч. трудов / ВНИМИ. СПб, 1998. С.4–8.

5. Бондарев А.В., Шванкин М.В., Панова Л.М. Анализ интенсивности сейсмических явлений при ведении профилактических и добычных работ на Баренцбургском месторождении. Маркшейдерия и недропользование. 2017. Т. 1. № 4 (90). С. 30–36.

6. Руководство по безопасности «Рекомендации по безопасному ведению горных работ на склонах к динамическим явлениям угольных пластах» (Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ от 21 августа 2017 г. № 327).

7. Патент на изобретение №2535329. Способ определения удароопасности массива горных пород по электромагнитной эмиссии и устройство для его осуществления, 2013 г.

8. Артемова Н.А., Цирель С.В., Пальцев А.И. Исследование условий возникновения сейсмических активизаций на шахте Полысаевская АО «СУЭК-Кузбасс» Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. № 4. С. 29–35. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

*Цирель Сергей Вадимович*<sup>1</sup> — доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории геодинамики, tsirel58@mail.ru, 8-911-229-73-51,

*Шванкин Михаил Васильевич*<sup>1</sup> — кандидат технических наук, заведующий лабораторией горных ударов, vnimi-sgu@yandex.ru,

*Василенко Татьяна Анатольевна*<sup>1</sup> — доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник Лаборатории горных ударов, tvasilenko@mail.ru,

<sup>1</sup>Научный центр геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета, (199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д. 2),

*Бондарев Алексей Владимирович* — ведущий инженер лаборатории горной геофизики ООО «Институт горной геомеханики и геофизики – Межотраслевой научный центр ГЕОМEX» (199106, Россия, г. Санкт-Петербург, В.О., 21-я линия, д.6, литера А). E-mail: alex\_bondarev78@mail.ru, тел. +7(911)019-75-39.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 516–524.

**Tsirel S.V., Shvankin M.V., Vasilenko T.A., Bondarev A.V.**

### **A comprehensive assessment of geodynamic risks in the intensive mining of thick flat coal seams**

The article highlights the approach used by the authors to analyze the effectiveness of the used sets of tools for control, forecasting and assessing the degree of risks and their consequences. The assessment includes how the properties and structure of coal-rock mass (tectonic disturbances, the study of reservoir properties of coal, VAT, gas saturation, water cut, etc.), and the data of current observations (from seismic events in the region and complaints from residents on concussions and the accumulation of methane to the observations in the workings). As comprehensive assessment data are widely used geophysical methods implemented in the mines through systems SAXM, GITS, portable device ANGEL-M. Positively evaluated the use of geodynamic zoning that allows to identify the parts of layers can be broken by faults, oriented both along and across the stretch of small secondary folding.

Which is being implemented now in the mines of JSC “SUEK-Kuzbass” comprehensive risk assessment that takes into account the gas-dynamic and geodynamic risks is the result of years of research and testing.

The analysis of the results of the use of various monitoring methods, the optimal schemes of monitoring and data processing, analysis of geodynamic risks. Assessment of applicability of various technical means taking into account mining-geological and mining engineering features. Along with the use of archival data, the current analysis of the data of

a series of observations by geophysical method (EEMR), this GITS seismic station, seismic system of SAXM is carried out.

The final result will be the development of a comprehensive regional and local monitoring methodology for assessing the current geodynamic state of the rock mass using UDC JSC SUEK-Kuzbass.

Keywords: geodynamic zoning, tectonically tense zone, tectonically unloaded zone, mountain impacts, mining-tectonic impacts, monitoring.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-516-524

## AUTHORS

*Tsirel S.V.*<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the Laboratory of Geodynamics,

*Shvankin M.V.*<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Head of the of the Laboratory of Mining Impacts,

*Vasilenko T.A.*<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Chief Researcher of the Laboratory,

<sup>1</sup>Scientific Center of Geomechanics and Mining Problems of the St.-Petersburg Mining University, 199106, Russia, Saint-Petersburg,

*Bondarev A.V.*, Leading engineer of the laboratory of mining geophysics the Limited Liability Company «Institute of mining geomechanics and geophysics scientific center GEOMEH» (199106, Russia, Saint-Petersburg). E-mail: alex\_bondarev78@mail.ru, tel: +7(911)019-75-39.

## REFERENCES

1. *Pravila bezopasnosti v ugol'nyh shahtah, utverzhdennye prikazom Rostekhnadzora ot 19 noyabrya 2013 g. № 550 «Ob utverzhdenii Federal'nyh norm i pravil v oblasti promyshlennoj bezopasnosti «Pravila bezopasnosti v ugol'nyh shahtah», zaregistrirrovannyye Minyustom Rossii 31 dekabrya 2013 g., registracionnyj no 30961* [Safety rules in coal mines, approved by the order of Rostekhnadzor of November 19, 2013 no 550 "on approval of Federal regulations and rules in the field of industrial safety "safety Rules in coal mines", registered by the Ministry of justice of Russia on December 31, 2013, registration number 30961].

2. Kopylov K.N., Smirnov O.V., Kulik A.I., Potapov P.V. *Ispytaniya avtomatizirovannoy sistemy akusticheskogo kontrolya sostoyaniya massiva gornyh porod* [Tests of the automated system of acoustic control of a condition of the massif of rocks]. *Ugol'*. 2015. no 7 (1072). pp. 44–47.

3. Kubrin S.S., Zhuravlev E.I. *Kontrol' geodinamicheskogo i gazodinamicheskogo sostoyaniya massiva gornyh porod* [Control of geodynamic and gas-dynamic state of rock mass]. V sbornike: *Bezopasnost' truda i effektivnost' proizvodstva gornodobyvayushchih predpriyatij s podzemnym sposobom razrabotki* 2016. pp. 19–25.

4. Yakovlev D.V., Isaev Yu.S., Mulev S.N., Yakovlev V.A., Lopatkov D.G., Maksimov A.S. *Apparatno-programmnyj kompleks «GeoInfo TransSystem» (GITS) v sistemah geodinamicheskogo i ekologicheskogo monitoringa* [Hardware-software complex «GeoInfoTransSystem» (GITS) in the system of geodynamic and ecological monitoring"]. *Gornaya geofizika-98: Sb. nauch. trudov. VNIMI. Saint-Petersburg*, 1998. pp. 4–8.

5. Bondarev A.V., Shvankin M.V., Panova L.M. *Analiz intensivnosti sejsmicheskikh yavlenij pri vedenii profilakticheskikh i dobychnyh rabot na Barenburgskom mestorozhdenii* [Analysis of the intensity of seismic events in the conduct of preventive and mining on Barentsburg field]. *Markshejderiya i nedropol'zovanie*. 2017. T. 1. no 4 (90). pp. 30–36.

6. Rukovodstvo po bezopasnosti «Rekomendacii po bezopasnomu vedeniyu gornyh rabot na sklonnyh k dinamicheskim yavleniyam ugol'nyh plastah» (Prikaz Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskemu i atomnomu nadzoru RF ot 21 avgusta 2017 g. no 327) [Safety guide "Recommendations for safe mining operations on coal seams prone to dynamic phenomena" (Order of the Federal service for environmental, technological and nuclear supervision of the Russian Federation of August 21, 2017 no 327)].

7. Patent na izobretenie №2535329. Sposob opredeleniya udaroopasnosti massiva gornyh porod po elektromagnitnoj emissii i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya, 2013 g.

8. Artemova N.A., Cirel' S.V., Pal'cev A.I. *Issledovanie uslovij vozniknoveniya seismicheskikh aktivizacij na shahte Polysaevskaya AO «SUEK-Kuzbass»* [Investigation of conditions of emergence of seismic activations at the mine Polysaevskaya JSC "SUEK-Kuzbass"]. Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugol'noj promyshlennosti. 2016. no 4. pp. 29–35.



## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ, ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОГЕННЫХ ПОРОДНЫХ МАССИВОВ

Физические свойства техногенных несвязных породных массивов – закладочных массивов и массивов обрушенных пород и отвалов, образующихся при ведении горных работ, в значительной степени определяются геометрией структуры порового пространства и минеральной фазы, т.е. крупностью частиц, их формой и способом упаковки. При этом условия расположения частиц друг относительно друга (расстояния между центрами частиц, ориентация, координационное число, углы между отрезками, соединяющими центры частиц и др.) оказывают решающее влияние на макроскопические характеристики среды (удельную поверхность, насыпную плотность, несущую способность, фильтрационные характеристики и пр.). Таким образом, с целью управления состоянием несвязных техногенных массивов коренных пород вскрыши является вопрос применения современных методов моделирования сыпучих сред для определения указанных параметров.

Ключевые слова: структурное моделирование, несвязная среда, техногенный массив.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-525-534

### Введение

Исследование механических, физических и структурных параметров насыпных породных массивов в общем случае может проводиться в натуре либо с применением физического и численного моделирования последних.

Численное моделирование имеет одно важное преимущество перед физическим: этот метод без значительных материальных и временных затрат позволяет гибко менять условия проведения эксперимента, оптимизировать параметры изучаемого объекта и проводить обработку полученных данных. Математическое моделирование насыпного массива заключается в его представлении или изучаемых процессов, происходящих в нем, в виде математических уравнений и массивов данных.

## Материалы и методы

К самым ранним моделям зернистых сред можно отнести гранулярную модель Слихтера [1]. Она представляет собой среду, состоящую из элементарных ячеек. Каждая такая ячейка состоит из геометрически правильно упакованных в ромбоэдр сферических частиц (рис. 1).

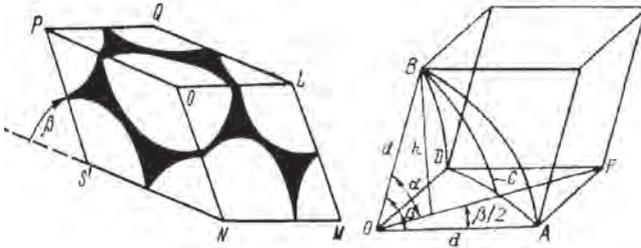


Рис. 1. Схема элементарной ячейки Слихтера

Пористость  $n$  данной модели рассчитывается как

$$n = 1 - \frac{\pi}{6 \cdot (1 - \cos^2) \cdot \sqrt{1 + 2 \cos^2}}, \quad (1)$$

где  $\beta$  – угол между отрезком, соединяющим центры частиц, и его проекцией на горизонтальную плоскость.

С уменьшением угла  $\beta$  от максимального ( $90^\circ$ ) до минимального ( $60^\circ$ ) значение пористости элементарной ячейки будет уменьшаться с 0,476 до 0,26.

Удельная поверхность такой упаковки на единицу объема пор:

$$s_m = \frac{6 \cdot (1 - n)}{d \cdot n}. \quad (2)$$

Удельная поверхность на единицу объема твердой фазы:

$$s_T = \frac{6}{d}. \quad (3)$$

Основной недостаток такой модели – упорядоченно упакованные частицы равных размеров. Таким образом, относительно просто рассчитываемые на данной модели структурные и физические параметры среды имеют лишь приближенные значения относительно реальных величин.

В модели Терцаги [2] используется модель хаотичной упаковки равных сферических частиц. Данная модель применима, в основном, для расчета фильтрационных параметров зернистой среды. В ней для характеристики сопротивления течению вязкой жидкости вводится понятие гидравлического радиуса  $r_0$  (как отношение площади попереч-

ного сечения канала к его периметру). Скорость течения в призматическом канале между частицами может быть приближенно рассчитана по формуле:

$$v = \frac{r_0^2}{\gamma \mu} \cdot \frac{\Delta p}{l}, \quad (4)$$

где  $\Delta p$  – перепад давления на концах канала длиной  $l$ ;  $\gamma$  – коэффициент, зависящий от формы канала: для кругового сечения  $\gamma = 2$ , для равнобедренного треугольника  $\gamma = 5/3$ .

Через соотношение Дюпюи-Форхгеймера скорость фильтрации будет равна

$$v_\phi = n \cdot v. \quad (5)$$

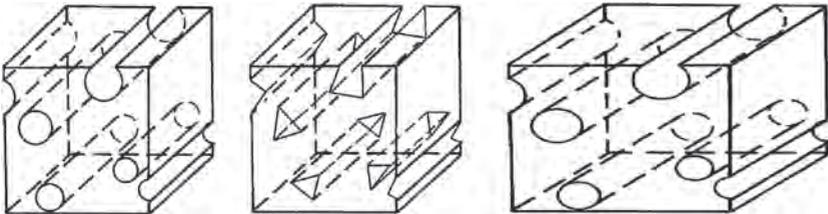
По закону Дарси скорость фильтрации

$$v_\phi = \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{l} \quad (6)$$

И. Козени также пытался установить количественную связь между диаметром сферических частиц модели, пористостью и проницаемостью [3]. Его модель предусматривает случайную упаковку одинаковых сфер. Средняя скорость течения жидкости рассчитывается по формуле (6). И. Козени полагает, что в единице объема существует один треугольный поровый канал длиной  $l$  и гидравлическим радиусом  $r_0 = n / s_v$  (отношение объема порового пространства в единице объема к удельной поверхности). При этом скорость фильтрации в модели:

$$v_\phi = \frac{d^2 n^3}{36(1-n)^2 \gamma \mu} \cdot \frac{\Delta p}{l} \quad (7)$$

Капиллярная модель Козени-Кармана [3] представляет поры в массиве в виде каналов различного поперечного сечения – круга, квадрата, треугольника (рис. 2).



**Рис. 2. Капиллярная модель Козени-Кармана (разные формы поровых каналов)**

Проницаемость данной модели рассчитывается как

$$k = \frac{n^3}{\gamma s_f^2 (1-n)^2 \phi^2}, \quad (8)$$

где  $\phi$  – извилистость канала (отношение длины канала к длине пути фильтрации).

Среднее значение коэффициента  $\gamma$ , известное из приближенных и точных решений уравнений Навье-Стокса [4], равно 2,5; а П. Карман считает  $\phi^2 = 2$ , отсюда проницаемость

$$k = \frac{n^3}{c \cdot s_T^2 (1-n)^2} = \frac{n^3}{c \cdot s_V^2}, \quad (9)$$

где  $c = 5$  – постоянная Кармана;  $s_T$  – общая удельная поверхность среды,

$$s_T = \sum_{i=1}^n f_i s_i, \quad (10)$$

где  $f_i$  – содержание каналов с удельной поверхностью  $s_i$ .

Модель Козени-Кармана удовлетворительно описывает связь между пористостью, проницаемостью и удельной поверхностью неконсолидированной пористой среды с формами пор, приведенными в таблице, а также с узким диапазоном размеров пор. При этом размеры пор не должны отличаться друг от друга более чем в 5 раз. Эта модель относится к капиллярным, т.к. в ней рассматриваются поры, а не минеральный скелет и именно через параметры пор (форму сечения канала) рассчитывается проницаемость среды. Влияние же размеров частиц, их формы и координационного числа (числа контактов) на структуру среды не рассматривается.

При изучении фильтрации газа в горных породах, подвергающихся воздействию горного давления, С.В. Кузнецовым [5] предложена модель в виде деформирующихся сфер с неизменным объемом (рис. 3).

Пористость такого массива зависит как от угла  $\beta$ , так и от относительной деформации  $\Delta V / V$ :

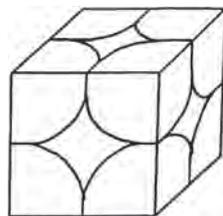
$$n = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos \beta) \sqrt{1 + 2 \cdot \cos \beta}} \cdot \frac{1}{1 + \Delta V / V} \quad (11)$$

Для трещиноватых горных пород (массивы вмещающих пород и угля в нетронутном состоянии) наиболее адекватны модели с блоками, близкими по форме к образующимся в результате развития трещин естественным отдельностям, например, модель [6] в виде кубов с шероховатыми гранями (рис. 4).

Применяемые модели ограничены, прежде всего, либо упорядоченной структурой среды, либо одинаковыми размерами частиц (блоков) минеральной фазы среды.

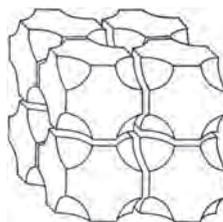
Первые работы по численному моделированию плотных структур на основе имитации случайного заполнения гипотетического контейнера сферическими частицами появились в 1976–1977 гг. [7–9]. Исследования Р.И. Аюкаева, В.А. Воробьева, В.К. Киврана, В.П. Коря-

кина были направлены, в основном, на изучение свойств бетона и композиционных материалов. Для качественного решения некоторых задач ими было предложено использование тетраэдных моделей. При построении модели центры четырех соприкасающихся сфер принимаются в качестве вершин некоторого тетраэдра, плоскости которого отсекают от сфер треугольные сектора.



**Рис. 3. Модель  
С.В. Кузнецова**

Ю.В. Лесин и В.А. Гоголин применили метод статистического моделирования в исследовании структурных параметров закладочных массивов и фильтрующих сооружений из кусковых материалов [10]. Авторами разработан алгоритм, позволяющий создавать устойчивые упаковки сферических частиц с дискретным или непрерывным гранулометрическим составом (отношение максимального размера частиц к минимальному находится в пределах 5–7). Дальнейшее развитие данного метода рассматривается в работе [11], учитывающей технологию возведения насыпного массива, а также нашло подтверждение в работах [12–25].



**Рис. 4. Модель Б.Г.  
Тарасова и И.Д. Мащенко**

### Результаты и обсуждение

С помощью математических методов моделирования структуры насыпных массивов разрушенных скальных пород в работе [11] выявлено, что на коэффициент фильтрации значимое влияние оказывают фракции с размерами кусков менее 0,1 м, 0,25–0,5 м и 0,7–1,0 м. Изменение процентного содержания других фракций в отвальном массиве существенного влияния на коэффициент фильтрации не оказывает. Обозначив дифференциальное процентное содержание фракции менее 0,1 м во фракционированном отвальном массиве как  $W_1$ , фракции 0,25–0,5 м как  $W_2$  и фракции 0,7–1,0 м как  $W_3$ , была получена нелинейная многофакторная регрессионная модель коэффициента фильтрации  $K_\phi = f(W_1, W_2, W_3)$ :

$$\begin{aligned}
 K_D = & 0,011 \cdot W_1 \cdot W_3^2 + 0,062 \cdot W_2 \cdot W_3^2 + 4,786 \cdot 10^{-3} \cdot W_3^3 - 0,056 \cdot W_3^2 - \\
 & - 0,025 \cdot W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 + 0,071 \cdot W_2^2 \cdot W_3 - 0,21 \cdot W_2 \cdot W_3 + 0,127 \cdot W_3 + \\
 & + 3,624 \cdot 10^{-3} \cdot W_1 \cdot W_3 - 0,012 \cdot W_1^2 \cdot W_3 - 0,072 \cdot W_1 \cdot W_2^2 + 0,054 \cdot W_2^3 - \\
 & - 0,172 \cdot W_2^2 + 0,202 \cdot W_2 + 0,079 \cdot W_1 \cdot W_2 - 0,022 \cdot W_1^2 \cdot W_2 - 0,071 - \\
 & - 0,052 \cdot W_1 + 0,056 \cdot W_1^2 - 0,014 \cdot W_1^3.
 \end{aligned} \quad (12)$$

Адекватность модели (12) средним значениям коэффициента фильтрации реального отвала подтверждается следующими статистическими данными: коэффициент корреляции 0,9761; отсутствие тренда в остатках между экспериментальными и расчетными значениями  $K_f$ ; сумма остатков незначима ( $-2,045 \cdot 10^{-3}$ ).

### Выводы

Применение современных методов математического моделирования структуры насыпных массивов разрушенных скальных и полускальных пород и методов математической статистики позволяет оперативно оценивать физические и структурные характеристики таких массивов. Также, структурные модели насыпных массивов могут быть использованы для расчета их несущей способности с учетом физико-механических свойств раздробленных пород. Математическое моделирование структуры насыпных кусковых массивов скальных пород также применяется для оценки их водо- и газопроницаемости.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Займан Дж.* Модели беспорядка. Теоретическая физика неупорядоченных систем. – М.: Мир, 1982. – 592 с.
2. *Радовский Б.С.* Плотность беспорядочной упаковки частиц сферической формы // Изв. АН СССР. МТТ. – 1972. – № 4. – С. 195–198.
3. *Kozeny J.* Uber Kapillare Leitung des Wassers im Boden. – Sitzung Berichte Akad. Wiss., Wien, Nat. Kl. – 1927. – Bd. 136. – Abt. 11a. – S. 271.
4. *Holliday L.* Heterogeneity in Complex Materials and the Concept of the Representative Cell// L. Holliday, G. Trackray// Nature. – 1961. Vol. 201.
5. *Кузнецов С.В.* Об одной модели пористого грунта. (Геометрические параметры и коэффициент фильтрации грунта) // Прикл. математика и техн. физика. – 1961. – №1.
6. *Тарасов Б.Г., Колмаков Б.Г.* Газовый барьер угольных шахт. – М.: Недра, 1978. – 200 с.
7. *Аюкаев Р.И., Воробьев В.А., Кивран В.К., Корякин В.П.* Применение ЭВМ в исследовании физико-структурных свойств пористых материалов. – Куйбышев: Куйбышевский инж. строит. ин т им А.И. Микояна, 1976. – 155 с.
8. *Воробьев В.А.* Математическое моделирование в исследовании структурно-чувствительных свойств бетона// II Всесоюзная конференция “Перспективы развития и применения легких бетонов и конструкций из них”: сб. науч. тр. – Куйбышев, 1975.
9. *Воробьев В.А., Кивран В.К., Корякин В.П.* Применение физико-математических методов в исследовании свойств бетона. – М.: Высшая школа, 1977. – 271 с.
10. *Лесин Ю.В., Гоголин В.А.* Математическое моделирование упаковки частиц массивов разрушенных горных пород // Изв. вузов. Горный журнал. – 1987. – № 3.
11. *Марков С.О.* Структурное моделирование насыпных отвальных массивов разрезов Кузбасса: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Кемерово, КузГТУ, 2003. – 22 с.

12. Tkachenko A.V., Witten T.A. Stress Propagation through Frictionless Granular Material. URL: <http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/9811171> (дата обращения 29.06.2018).

13. Bagi K. Stress and strain in granular assemblies // *Mechanics of Materials*, 1996, no 22, pp. 165–177.

14. Bagi K. Microstructural stress tensor of granular assemblies with volume forces // *Journal of App. Mechanics*, 1999, vol. 66, pp. 1–3.

15. Буренин В.В. Очистка производственных сточных вод от загрязняющих примесей // *Безопасность жизнедеятельности*. – 2010. № 2. – С. 15–20.

16. Saâdi Z. Comparison Between Equivalent Continuum and Discrete Crack Models of Transient Radon Transport at the Soil–Building Foundation Crack Interface Using TOUGH2/EOSRn // *Transport in Porous Media*, 2018, vol. 123, iss. 3, pp. 477–500.

17. Кащенко Н.М., Малаховский В.С., Семёнов В.И., Гриценко В.А. Математическое моделирование процессов фильтрации влаги в тяжелых грунтах процессах фильтрации влаги в тяжелых грунтах // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки*. – 2012. № 10. – С. 50–53.

18. Алгазин О.Д., Копаев А.В. Фильтрация жидкости в неоднородном слое с коэффициентом фильтрации, меняющимся по квадратичному закону // *Инженерный журнал: наука и инновации*. – 2017. № 6 (66). – С. 11.

19. Barbu V., Da Prato G., Röckner M. *Stochastic Porous Media Equations*. - Springer International Publishing, 2016. – 202 p.

20. Ермакова И.А. Установление параметров потока при выпуске руды в системах разработки с обрушением // *Техника и технология горного дела*. – 2018, №1. – С. 4–10.

21. Ferreira J.A., Barbeiro S., Pena G., Wheeler M.F. *Modelling and Simulation in Fluid Dynamics in Porous Media*. – Springer-Verlag New York, 2013. – 210 p.

22. Оффрихтер В.Г., Оффрихтер Я.В. Прогноз напряженно-деформированного состояния твердых бытовых отходов с использованием модели слабого грунта // *Вестник МГСУ*. – 2014. № 9. – С. 82–92.

23. Nield D.A., Bejan A. *Convection in Porous Media*. – Springer International Publishing, 2017. – 988 p.

24. Пимоненко Л.И., Безручко К.А., Макеев С.Ю., Каргаполов А.А., Гуня Д.П. Результаты мониторинга напряженно-деформированного состояния горного массива методами теории фрактальной геометрии // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. – 2014. № 3 (20). – С. 147–159.

25. Аксенов В.В., Садовец В.Ю., Пашков Д.А. Обоснование величины прикладываемых к забою нагрузок при моделировании взаимодействия инструмента и породы // *Техника и технология горного дела*. – 2018., №1. – С. 11–18. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Марков С.О. — кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела и геологии e-mail: [markovso@kuzstu.ru](mailto:markovso@kuzstu.ru), тел. +7 951-18-1923,

Тюленев М.А. — кандидат технических наук, профессор кафедры открытых горных работ,  
Мурко Е.В. — кандидат технических наук, доцент, начальник отдела аспирантуры, докторантуры,  
Литвин О.И. — кандидат технических наук, заведующий кафедрой открытых горных работ,  
Кузбасский государственный университет им. Т.Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

---

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 525-534.

**Markov S.O., Tulenev M.A., Murko E.V., Litvin O.I.**

### **Structural study, physical-technical and mechanical parameters of technogenic rock massifs**

Physical properties of technogenic incoherent rock masses and backfilling arrays and arrays of collapsed rock and tailings produced during the mining operations, to a large extent determined by the geometry of the pore space structure and mineral phases, i.e. the particle size, their shape and method of packaging. At the same time, the conditions for the location of particles relative to each other (distances between the centers of particles, orientation, coordination number, angles between the segments connecting the centers of particles, etc.) have a decisive influence on the macroscopic characteristics of the medium (specific surface area, bulk density, bearing capacity, filtration characteristics, etc.). Thus, in order to control the state of unrelated man-made rock massifs of overburden is the issue of application of modern methods of modeling of granular media to determine these parameters.

Key words: structural modeling, disconnected environment, technogenic massif.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-525-534

### **AUTHORS**

*Markov S.O.*, candidate of technical Sciences, associate Professor of surveying and Geology Department e-mail: markovso@kuzstu.ru, tel. +7 951-18-1923,  
*Tulenev M.A.*, candidate of technical Sciences, Professor of the Department of open mining,  
*Murko E.V.*, candidate of technical Sciences, associate Professor, head of postgraduate and doctoral studies,  
*Litvin O.I.*, candidate of technical Sciences, head of the Department of open-pit mining, Kuzbass state University Named after T.F. Gorbachev, 650000, Kemerovo, street Spring, 28.

### **REFERENCES**

1. Zajman Dzh. Modeli besporyadka. *Teoreticheskaya fizika neuporyadochennyh sistem* [Models of disorder. Theoretical physics of disordered systems]. Moscow: Mir, 1982. 592 p.
2. Radovskij B.S. *Plotnost' besporyadochnoj upakovki chastic sfericheskoy formy* [The density of the disordered packing of spherical particles]. Izv. AN SSSR. MTT. 1972. no 4. pp. 195-198.

3. Kozeny J. *Über Kapillare Leitung des Wassers im Boden*. Sitzung Berichte Akad. Wiss., Wien, Nat. Kl. 1927. Bd. 136. Abt. 11a. S. 271.
4. Holliday L. *Heterogeneity in Complex Materials and the Concept of the Representative Cell*. L. Holliday, G. Trackray. Nature. 1961. Vol. 201.
5. Kuznecov S.V. *Ob odnoj modeli poristogo grunta. (Geometricheskie parametry i koeffitsient fil'tracii grunta)* [A model for the porous soil. (Geometric parameters and the permeability coefficient of the soil)]. Prikl. matematika i tekhn. fizika. 1961. no 1.
6. Tarasov B.G., Kolmakov B.G. *Gazovyj bar'er ugol'nyh shaht* [The coal mines gas barrier]. Moscow: Nedra, 1978. 200 p.
7. Ayukaev R.I., Vorob'ev V.A., Kivran V.K., Koryakin V.P. *Primenenie EVM v issledovanii fiziko-strukturnyh svoystv poristykh materialov* [The use of computers in the study of physical and structural properties of porous materials]. Kujbyshev: Kujbyshevskij inzh. stroit. in t im A.I. Mikoyana, 1976. 155 p.
8. Vorob'ev V.A. *Matematicheskoe modelirovanie v issledovanii strukturno-chuvstvitel'nykh svoystv betona* [Mathematical modeling in the study of structure-sensitive properties of concrete]. II Vsesoyuznaya konferenciya "Perspektivy razvitiya i primeneniya legkih betonov i konstrukcij iz nih": sb. nauch. tr. Kujbyshev, 1975.
9. Vorob'ev V.A., Kivran V.K., Koryakin V.P. *Primenenie fiziko-matematicheskikh metodov v issledovanii svoystv betona* [Application of physical and mathematical methods in the study of the properties of concrete]. Moscow: Vysshaya shkola, 1977. 271 p.
10. Lesin Yu. V., Gogolin V.A. *Matematicheskoe modelirovanie upakovki chastic massivov razrushennykh gornyh porod* [Mathematical modeling of the packing of the particles of the arrays of broken rocks]. Izv. vuzov. Gornyj zhurnal. 1987. no 3.
11. Markov S.O. *Strukturnoe modelirovanie nasypnykh otval'nykh massivov razrezov Kuzbassa: Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk. Kemerovo, KuzGTU, 2003. 22 s.*
12. Tkachenko A.V., Witten T.A. *Stress Propagation through Frictionless Granular Material* [Stress Propagation through Frictionless Granular Material]. URL: <http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/9811171> (data obrashcheniya 29.06.2018).
13. Bagi K. *Stress and strain in granular assemblies*. Mechanics of Materials, 1996, no 22, pp. 165–177.
14. Bagi K. *Microstructural stress tensor of granular assemblies with volume forces*. Journal of App. Mechanics, 1999, vol. 66, pp. 1–3.
15. Bupenin V.V. *Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod ot zagryaznyayushchih primesej* [Purification of industrial wastewater from contaminants]. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2010. no 2. pp. 15–20.
16. Saâdi Z. *Comparison Between Equivalent Continuum and Discrete Crack Models of Transient Radon Transport at the Soil–Building Foundation Crack Interface Using TOUGH2*. EOS7Rn. Transport in Porous Media, 2018, vol. 123, iss. 3, pp. 477–500.
17. Kashchenko N.M. Malahovskij V.S., Semyonov V.I., Gricenko V.A. *Matematicheskoe modelirovanie processov fil'tracii vlagi v tyazhelykh gruntah* [Mathematical modeling of filtration processes of moisture in a heavy prontaprint filtration of moisture in heavy soils]. Vestnik Baltijskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki. 2012. no 10. pp. 50–53.
18. Algazin O.D., Kopaev A.V. *Fil'traciya zhidkosti v neodnorodnom sloe s koeffitsientom fil'tracii, menyayushchimsya po kvadraticnomu zakonu* [Filtration fluid in an inhomogeneous layer with a filtration coefficient varying by a quadratic law]. Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii. 2017. no 6 (66). p. 11.
19. Barbu V., Da Prato G., Röckner M. *Stochastic Porous Media Equations*. Springer International Publishing, 2016. 202 p.
20. Ermakova I.A. *Ustanovlenie parametrov potoka pri vypuske rudy v sistemah razrabotki s obrusheniem* [Determination of flow parameters in ore production in systems of development with collapse. Technique and technology of mining]. Tekhnika i tekhnologiya gornogo dela. 2018, no 1. pp. 4–10.

21. Ferreira J.A., Barbeiro S., Pena G., Wheeler M.F. *Modelling and Simulation in Fluid Dynamics in Porous Media*. Springer-Verlag New York, 2013. 210 p.
22. Ofrihter V.G., Ofrihter Ya. V. *Prognoz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya tverdyh bytovykh othodov s ispol'zovaniem modeli slabogo grunta* [Prediction of stress-strain state of municipal solid waste using the soft soil creep model]. Vestnik MGSU. 2014. no 9. pp. 82–92.
23. Nield D.A., Bejan A. *Convection in Porous Media*. Springer International Publishing, 2017. 988 p.
24. Pimonenko L.I., Bezruchko K.A., Makeev S. Yu., Kargapolov A.A., Gunya D.P. *Rezultaty monitoringa napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gornogo massiva metodami teorii fraktal'noj geometrii* [Gunya Results of monitoring of stress-strain state of rock mass by methods of the theory of fractal geometry]. Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. 2014. no 3 (20). pp. 147–159.
25. Aksenov V.V., Sadovec V. Yu., Pashkov D.A. *Obosnovanie velichiny prikladyvaemyh k zaboyu nagruzok pri modelirovanii vzaimodejstviya instrumenta i porody* [The study of the value of applied to the face of the loads in the modeling of the interaction of the tool and the rock. Technology of mining]. Tekhnika i tekhnologiya gornogo dela. 2018., no 1. pp. 11–18.



## ОПЕРАТИВНАЯ ЭКОЛОГО-РАДИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАЙОНОВ УГЛЕДОБЫЧИ УКРАИНЫ НА ПРИМЕРЕ ЗАПАДНОГО ДОНБАССА

На примере угледобывающих предприятий на территории Западного Донбасса показана эффективность использования комплекса экологических литогеохимических и радиологических исследований для их оперативной эколого-радиогеохимической оценки. Для системы экологического мониторинга на территории г. Павлограда по данным комплексных эколого-радиогеохимических исследований выделены участки с различным уровнем экологического состояния, комфортности проживания населения и безопасности эксплуатации подземных коммуникаций.

Ключевые слова: эколого-радиогеохимическая оценка, загрязнение окружающей среды, литогеохимические исследования, радиоактивное загрязнение, районы угледобычи, Западный Донбасс.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-535-543

В промышленно нагруженных регионах Украины актуальным становится разработка методологии их устойчивого развития с целью определения баланса между природопользованием и возможностями среды обитания. Для успешного достижения этой цели проводятся комплексные научные исследования взаимосвязи и взаимодействия природных и техногенных факторов развития горнодобывающей промышленности с уже сложившимся хозяйственным комплексом и характеристиками окружающей среды [1,2,3].

Такие комплексные исследования в Украине проводятся на основе методических положений эколого-геологического картирования, разработанных ГПП «Геопрогноз» в 1994 г, методических рекомендаций по геохимической оценке загрязнения территорий городов, разработанных ИМГРЭ в 1982 г, и других документов.

Институтом проблем природопользования и экологии НАНУ, по результатам проведенных исследований применительно к промышленно развитым регионам Украины [3, 4], были усовершенствованы методы обработки и представления информации, позволившие создать новую методику геoinформационного районирования и мониторинга.

Разработанная методика апробирована на участках с различной техногенной нагрузкой в Промышленном Приднепровье и взята нами за основу при оценке масштаба и степени нарушенности геологической среды в углепромышленных районах Западного Донбасса [5, 6].

На территории Западного Донбасса выделяются Петриковский, Новомосковский, Павлоградско-Петропавловский и Лозовской угленосные районы, отличающиеся особенностями геологического строения и различной угленосностью, качеством углей и степенью освоенности месторождений. Промышленно угленосным районом Западного Донбасса является Павлоградско-Петропавловский, где ведется разработка каменного угля. Добыча осуществляется шахтами, входящими в состав ЧАО ДТЭК «Павлоградуголь».

Кризисное экологическое состояние окружающей среды углепромышленных регионов Украины определяется тем, что каждая третья шахта эксплуатируется свыше 50 лет. Горнодобывающие работы ведутся на глубинах до 1400 м. На протяжении десятилетий экстенсивный путь развития этих регионов, без учета экологических последствий, привел к тому, что они перенасыщены ресурсоемкими и экологически опасными производствами. В условиях рыночных преобразований и структурной перестройки хозяйственного комплекса страны, кризисное состояние окружающей среды становится препятствием на пути перехода регионов к стратегии устойчивого эколого-экономического развития [7, 8].

Отсутствие надежной объективной информации о загрязнении воздуха, почвогрунтов, подземных и поверхностных вод не позволяет создавать современную систему экологического мониторинга углепромышленных регионов и может вызвать социальную напряженность [9]. Важнейшим шагом в этом направлении является создание геоинформационной системы оперативного и долгосрочного прогнозирования опасных экологических процессов на территории Западного Донбасса.

Целью проведенных нами исследований было получение достоверной информации, на основе комплексных эколого-радиохимических исследований городских территорий угледобывающих районов Западного Донбасса, для осуществления районирования территории по экологическому состоянию, комфортности проживания населения и надежности эксплуатации подземных коммуникаций.

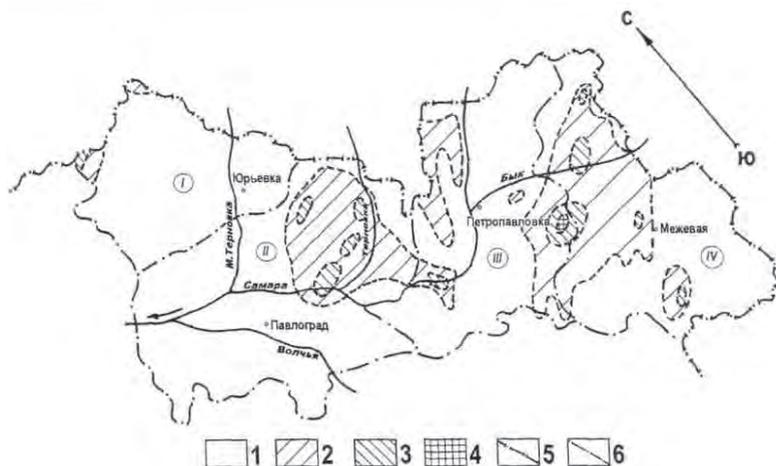
Оценка радиологической обстановки. В региональном плане Западный Донбасс почти целиком покрывает зона повышенного радиационного фона (до 30 мкР/ч) [4,10]. Здесь поверхностное загрязнение местности техногенными радионуклидами достигает: Cs<sup>137</sup> — до 3 Ки/км<sup>2</sup> и Sr<sup>90</sup> — до 0,2 Ки/км<sup>2</sup>, а объемная активность поверхностных водотоков, которая не коррелирует со значениями  $\gamma$ -фона, максимальная для территории области —  $5 \times 10^{-13}$  Ки/м<sup>3</sup> и более [ 5].

При более детальном рассмотрении (рис. 1) указанная региональная зона распадается на отдельные аномальные зоны, наибольшие из которых фиксируются на северо-востоке Павлоградского района и на западе Межевского района Днепропетровской области. Первоисточником этих аномалий, вероятно, являются результаты местного сжигания добываемого в Западном Донбассе каменного угля [5].

На территории г. Павлограда удельная активность почвенного покрова составляет 62—1589 Бк/кг, что в пересчете на поверхностное загрязнение по  $Cs^{137}$  не превышает 0,4 Ки/км<sup>2</sup>. Одним из основных источников радиоактивного загрязнения почвенного покрова на территории города являются зольно-пылевые выбросы многочисленных предприятий теплоснабжения, работающих на углях Западного Донбасса.

Комплексные геохимические и радиологические исследования почв позволили выявить слабую положительную связь радиологических параметров с аддитивным показателем концентрации химических элементов. Однако для конкретных химических элементов среди изучаемой их совокупности фиксируется отсутствие связи.

Приведенную информацию можно использовать как основу для установления взаимосвязи радиоактивного загрязнения почвы с «природными» тяжелыми металлами (например, Mn и Ni), отсутствия этой связи с «техногенными» элементами (например, Pb) или «природными органического происхождения» (например, P).

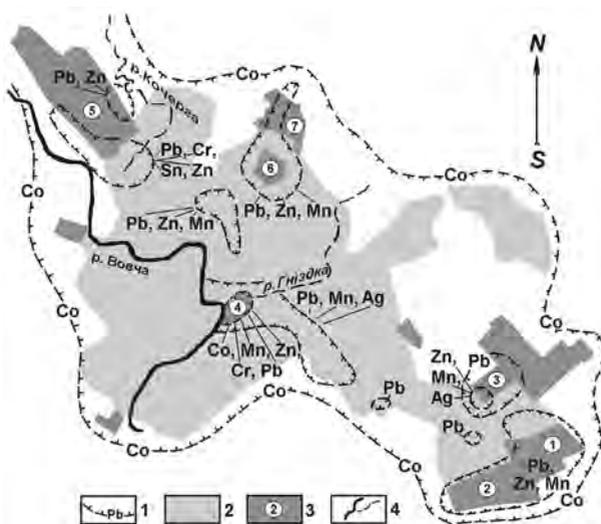


**Рис. 1. Площадное радиоактивное загрязнение  $Cs^{137}$  районов Западного Донбасса: I — Юрьевский, II — Павлоградский, III — Петропавловский, IV — Межевской; поверхностное загрязнение почвы  $Cs^{137}$ : 1 — 0,5 Ки/км<sup>2</sup>, 2 — 0,5—1,0 Ки/км<sup>2</sup>, 3 — 1,0—2,0 Ки/км<sup>2</sup>, 4 — 2,0 Ки/км<sup>2</sup>; границы: 5 — Днепропетровской области, 6 — районов Западного Донбасса**

Оперативные геохимические исследования. С целью оперативного изучения уровня загрязнения почвогрунтов на территории г. Павлограда проведено литохимическое опробование. Отбор проб в районах крупных промышленных объектов, как потенциальных источников загрязнения, проводился по периметру их территории с шагом ~100 м.

Для определения пространственной связи локальных аномалий на территориях промышленных объектов были проложены два ортогональных геохимических профиля, проходящих по территории города с северо-запада на юго-восток и с юго-запада на север-северо-восток. Расстояние между точками отбора проб по профилям составляло 500–700 м. В каждой точке пробы отбирались «по конверту» со стороны 2–3 м, на глубинах 0–10 см. По отобраным пробам был выполнен спектральный анализ на следующие элементы: Ba, Be, Cr, Pb, Sn, P, Ni, Y, Yb, Zn, Zr, Co, Ti, Cu, V, Ge, Mo, Li, Ce, Cs, Sr, Mn, Ga, W, Bi, Nb, Sc, Ag, Au, La, U, Th, Os, Ir, As, Hf, Ta, Sb, Si, Mg, Ca, Al, Fe, Cd.

В ходе наших исследований установлено, что на всей территории города верхний слой почвенного покрова загрязнен кобальтом; концентрации его варьируют в пределах 1,4–4,0 ПДК.



**Рис. 2.** Схема загрязнения почвогрунтов территории г. Павлоград: 1 — границы зон повышенного загрязнения почвогрунтов тяжелыми металлами (выше ПДК) и их химические символы, 2 — селитбная территория, 3 — промышленные предприятия: 1 — ООО Павлоградский машзавод «ИНТЕРА», 2 — Павлоградский станкозавод «ПЗТО», 3 — ЗАО «Завод ПАЛМАШ», 4 — АОТ Павлоградский мясокомбинат, 5 — Павлоградский химзавод, 6 — ЗАО «Завод Павлоградхиммаш», 7 — Павлоградский молокозавод, 4 — реки

На схеме загрязнения почвогрунтов территории города Павлоград (рис. 2) хорошо видно, что распределение повышенных концентраций кобальта, свинца, хрома, цинка, меди, марганца, бария и серебра определяется взаимодействием ландшафтно-гидрографических и техногенной систем.

Частота встречаемости этих химических элементов и величины превышения их концентраций над ПДК приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Частота встречаемости и концентрации химических элементов в почвогрунтах города**

Химические элементы	Частота встречаемости в отобранных пробах, %	Концентрации (в превышениях над ПДК)
Кобальт	100	3–4
Свинец	50	1–10 (единично до 160)
Марганец	37	1–1,3
Цинк	30	1,5–9
Серебро	16	1–5
Хром	14	1–1,5
Медь	2	1–2
Барий	2	3–4

По периферии крупных промышленных предприятий города были выявлены полиметалльные ореолы повышенного загрязнения почвогрунтов.

На северо-западе города (в районе ПХЗ) выявлены ореолы загрязнения почв свинцом – 2–10 ПДК, цинком – до 1 ПДК, марганцем – 1,3 ПДК, серебром – до 5 ПДК и единичные точки повышенного загрязнения барием – 3 ПДК, оловом и медью – 1–2 ПДК. Эти аномалии, вероятно, обусловлены наложением ореолов загрязнения природного (геохимического состав почвогрунтов) и техногенного (от технологических процессов и автотранспорта) происхождения.

На юго-востоке города (в районе завода ОАО «Палмаш») выявлена довольно обширная свинцово-кобальтовая геохимическая аномалия (свинец – 1–23 ПДК, кобальт – 3–4 ПДК), внутри которой находится небольшой участок с повышенной концентрацией цинка – до 2 ПДК, марганца – 1 ПДК и серебра – до 3 ПДК. В том же районе территории (вблизи ПМЗ и Станкозавода) загрязнены свинцом – 1,6–165 ПДК, цинком – 1,5–2,0 ПДК, марганцем – 1,0–1,3 ПДК.

Для сравнительной оценки уровня загрязнения почвогрунтов территории города и его окрестностей были отобраны и проанализированы пробы в селах Вязовок, Вербки, Межиричи и Малоалександровка, где, кроме загрязнения почвенного покрова кобальтом (1,4–3,0 ПДК), не

обнаружено никаких других аномалий повышенной концентрации тяжелых металлов.

### **Выводы**

Негативное влияние горнодобывающей промышленности на геологическую среду Западного Донбасса проявляется в образовании подрабатываемых территорий, создании отвалов, терриконов, хвостохранилищ, прудов-накопителей, откачке больших объемов подземных вод, сбросе высокоминерализованных и загрязненных вод в поверхностные водоемы и фильтрации их в подземные горизонты.

Для минимизации воздействия угледобывающей отрасли на все компоненты природной среды необходимо иметь достоверную информацию о минеральном сырье (химическом и минералогическом составе, токсичности сопутствующих микрокомпонентов в угле и вмещающих породах, а также отходов углеобогащения), учитывать показатели подвижности химических элементов и особенности их физико-химической миграции. Располагать информацией о распределении концентраций токсичных элементов в продуктах и отходах углеобогащения, а также характере воздействия токсичных элементов на организм человека [11,12].

Основными факторами, определяющими экологическое состояние и уровень комфортности проживания населения на разных участках исследуемых территорий, является загрязнение почвенного покрова кобальтом, свинцом, цинком, марганцем, концентрации которых на значительной площади превышают предельно допустимые.

На территории г. Павлограда и Западного Донбасса, по данным оперативных комплексных радиогеохимических исследований, выделены участки с различным уровнем геохимического и радиоактивного загрязнения, комфортности проживания населения и безопасности эксплуатации подземных коммуникаций. Для уточнения и детализации границ этих участков разработаны рекомендации на проведение комплексных эколого-радиогеохимических, гидрогеологических и геофизических исследований в масштабе 1:10000–1:25000.

Результаты указанных исследований станут основой при разработке геоинформационной системы экологического районирования и мониторинга Западного Донбасса. Такой же комплексный подход может быть применен для оперативной эколого-радиогеохимической оценки любых других угледобывающих регионов.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Екологічний атлас Дніпропетровської області / Под ред. А.Г. Шапара. – Дніпропетровськ, Моноліт, 2009. — 63 с.
2. Прохоров Б.Б. Социальная экология. — М.:Академия. 2012 г. — 432 с.

3. Тяпкин О.К., Кириченко В.А., Бондаренко Л.В. К вопросу о ресурсосберегающем зонировании техногенно нагруженных территорий Украины // Стратегия качества в промышленности и образовании: Матер. VIII междунар. конф. — Т.1. — Варна, Болгария, 2012. — С.150–153.

4. Бондаренко Л.В., Кириченко В.А., Тяпкин О.К. Еколого-радіохімічний стан міських територій вуглеводобувного регіону (на прикладі м. Павлограда) // Науковий вісник Національної гірничої академії України. — 2010. — №11–12. — С.42–48.

5. Тяпкин О.К. Прогнозирование развития радиологической обстановки в условиях юго-востока Украины // Доповіді Національної академії наук України. — 2001. — №10. — С.116–120.

6. Tyapkin O.K., Shapar A.G., Troyan J.G. The Prediction of Changes of a Radiological Situation of Industrial Advanced Regions of NIS // Proc. EAGE 63rd Conference and Technical Exhibition. — Vol.2. — Amsterdam (The Netherlands). — 2001. — Paper P. 233–234.

7. Рудько Г.І. Геолого-економічна оцінка родовищ корисних копалин України та проблеми надрокористування, зб. наук праць. Київ — Чернівці, 2013. — 308 с.

8. Долина Л.Ф. Сточные воды предприятий горной промышленности и методы их очистки — Днепропетровск, 2000. — 43 с.

9. Yemets N., Romanenko I. Features of the organization of environmental monitoring systems in industrial Pridneprovie // Proceedings of the 1st International Sciences Congress “Fundamental and Applied Studies in the Pacific and Atlantic oceans countries”. International Agency for the Development of Culture, Education and Science. — Japan, Tokyo, 2014. — P. 445–450.

10. Anisimova L.B., Tyapkin O.K. Prognostication of directions of dangerous influence of radioactive wastes stores // Cooperative particles: Patchy colloids, active matter and nanofluids: Proceeding of 23rd Geilo School. — Geilo, Norway, 2015. — P.4.

11. Остапенко Н.С., Кириченко В.А., Бондаренко Л.В. Токсическое воздействие микрокомпонентов в продуктах и отходах углеобогащения // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр // Под ред. К.Н. Трубецкого. — М.: ИПКОН РАН. — 2014. — С. 375–378.

12. Экологические проблемы недропользования. Наука и образование: Труды V международн. научн. конф. (Санкт-Петербург, 19–24 ноября, 2012 г.) / редкол.: С.В. Аплонов [и др.]. — Санкт-Петербург: СПбГУ, 2012. — 366 с. **ГИАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРАХ**

Остапенко Н.С. — кандидат химических наук, старший научный сотрудник,  
Бондаренко Л.В. — ведущий инженер,  
Кириченко В.А. — главный геолог, vakirichenko62@ukr.net,  
Институт Проблем Природопользования и Экологии НАН Украины, ул. Владимира Мономаха, 6, г. Днепр, Украина, 49000.

**Ostapenko N.S., Bondarenko L.V., Kirichenko V.A.**

## **Ecological-radiogeochemical estimation of coal-mining region of Ukraine (on the example of western- donbass)**

On an example of the coal-mining enterprises of the Western-Donbass region the efficiency of use of a complex ecological, lithogeochemical and radiological researches for their operative ecological-radiogeochemical estimation of coal-mining regions is shown.

The sites of territory of Pavlograd city with the various level of an ecological status, comfort of residing of the population and safety of exploitation of underground communications for the system of ecological monitoring are determined on the database of complex ecological-radiogeochemical researches.

Key words: ecological-radiogeochemical estimation, pollution of an environment, lithogeochemical researches, radioactive pollution, coal-mining region, Western-Donbass.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-535-543

## **AUTHORS**

*Ostapenko N.S.*, candidate of chemical sciences,  
*Bondarenko L.V.*, the leading engineer,  
*Kirichenko V.A.*, the senior geologist,  
*Institute of Nature Management Problems and Ecology of National Academy of Sciences of Ukraine (IPPE NANU), Vladimir Monomah st., 6, Dnieper, Ukraine.*

## **REFERENCES**

1. *Ekologichnij atlas Dnipropetrovs'koï oblasti* [Ecology Atlas Dnepropetrovsk region]. Pod red. A.G. Shapara. Dnipropetrovs'k, Monolit, 2009. 63 p.
2. Prohorov B.B. *Social'naya ekologiya* [Social ecology]. Moscow: Akademiya. 2012. 432 p.
3. Tyapkin O.K., Kirichenko V.A., Bondarenko L.V. *K voprosu o resursoberegayushchem zonirovaniï tekhnogenno nagruzhennyh territorij Ukrainy* [On the question of resource-saving zoning of technogenically loaded territories of Ukraine]. *Strategiya kachestva v promyshlennosti i obrazovanii: Mater. VIII mezhdunar. konf. T.1. Varna, Bolgariya*, 2012. pp.150–153.
4. Bondarenko L.V., Kirichenko V.A., Tyapkin O.K. *Ekologo-radiohimichnij stan mis'kih territorij uglevidobuvnogo regionu (na prikladi m. Pavlogradu)* [Ekologo-radojmij mill msica territories uglevodorodnogo region (preklad M. Pavlohrad)]. *Naukovij visnik Nacional'noi girnichoï akademii Ukraïni*. 2010. no 11–12. pp. 42–48.
5. Tyapkin O.K. *Prognozirovanie razvitiya radiologicheskoy obstanovki v usloviyah yugo-vostoka Ukrainy* [Prediction of the radiological situation in the South-East of Ukraine]. *Dopovidi Nacional'noi akademii nauk Ukraïni*. 2001. no 10. pp. 116–120.
6. Tyapkin O.K., Shapar A.G., Troyan J.G. *The Prediction of Changes of a Radiological Situation of Industrial Advanced Regions of NIS*. Proc. EAGE 63rd Conference and Technical Exhibition. Vol.2. Amsterdam (The Netherlands). 2001. pp. 233–234.
7. Rud'ko G.I. *Geologo-ekonomichna ocinka rodovishch korisnih kopalín Ukraïni ta problemi nadrokoristuvannya* [Geological-economic once of Rodovid Fig Kopalín of Ukraine the problems of nadrokorystuvach]. *zb. nauk prac'. Kiïv Chernivci*, 2013. 308 p.

8. Dolina L.F. *Stochnye vody predpriyatij gornoj promyshlennosti i metody ih ochistki* [The valley of the water of the enterprises of the mountain industry and methods of their purification]. Dnepropetrovsk, 2000. 43 s.

9. Yemets N., Romanenko I. *Features of the organization of environmental monitoring systems in industrial Pridneprovie*. Proceedings of the 1st International Sciences Congress "Fundamental and Applied Studies in the Pacific and Atlantic oceans countries". International Agency for the Development of Culture, Education and Science. Japan, Tokyo, 2014. P. 445–450.

10. Anisimova L.B., Tyapkin O.K. *Prognostication of directions of dangerous influence of radioactive wastes stores*. Cooperative particles: Patchy colloids, active matter and nanofluids: Proceeding of 23rd Geilo School. Geilo, Norway, 2015. P.4.

11. Ostapenko N.S., Kirichenko V.A., Bondarenko L.V. *Toksicheskoe vozdejstvie mikrokomponentov v produktah i othodah ugleobogashcheniya* [Toxic effect of micro-components in products and wastes of coal enrichment]. *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya i sohraneniya zemnyh nedr*. Pod red. K.N. Trubeckogo. Moscow: IPKON RAN. 2014. pp. 375–378.

12. *Ekologicheskie problemy nedropol'zovaniya* [Environmental problems of subsoil use]. *Nauka i obrazovanie: Trudy V mezhdunarodn. nauchn. konf. (Sankt-Peterburg, 19–24 noyabrya, 2012)*. redkol.: S.V. Aplonov [i dr.]. Sankt-Peterburg: SPbGU, 2012. 366 p.



## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ОБРАЗОВАНИЯ И СОСТАВА ДРЕНАЖНЫХ ВОД НА УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Выполнена серия термодинамических расчетов состава дренажного стока, формируемого на участках угольных разрезов в ходе добычных работ. Расчеты проводились на программном комплексе НСН (Шваров Ю.В., МГУ), позволяющем варьировать Р-Т параметрами системы «жидкая фаза-твердая фаза-газы (органическое вещество)», а так же валовым составом элементов системы, имитируя тем самым разнообразные гидрогеохимические условия как природного, так и техногенного характера.

Моделирование равновесного состояния взаимодействия каменного угля с водой проводилось для: температур 25 и 100 °С при отношении взаимодействующих масс породы и воды 50; различных содержаниях серы (1, 2,5 и 4 мас%) в породе; атмосферном давлении 1 бар и летучести кислорода  $I_{\text{g}}\text{fO}_2 = -50, -10$  и  $-1$ .

Термодинамическими расчетами показано, что с ростом температуры кислотный потенциал дренажного раствора растет (т.е. рН раствора снижается). К обратному эффекту приводит рост окислительно-восстановительного потенциала (Eh) при открытии системы «вода-порода-газы» по кислороду воздуха и окислению сульфидных минералов породы. Таким образом, при разработке месторождений угля открытым способом, на интенсивность закисления дренажного стока при прочих равных условиях будут оказывать влияние два «противофактора»: температура и доступ к кислороду воздуха.

Работа носит демонстрационный характер, без привязки к конкретному месторождению и показывает возможности термодинамического моделирования при анализе экологических последствий до начала разработки месторождения. Ключевые слова: угольные месторождения, дренажные воды, геохимические условия, термодинамическое моделирование, загрязнение тяжелыми металлами.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-544-550

### Введение

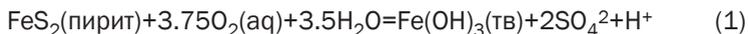
Геохимическая оценка экологического состояния территории, планируемой под разработку месторождения, заключается в оценке формирования и состава дренажных вод не только при разработке, но и до, и после окончания добычных работ на срок в десятки лет. Для

этих целей Лаборатория моделирования гидрогеохимических и гидротермальных процессов ГЕОХИ РАН предлагает использовать методы термодинамического (равновесного) и кинетико-термодинамического компьютерного моделирования [5, 6].

Одной из главных экологических проблем при угледобыче является загрязнение природных ландшафтов кислотными водами [1, 2, 3, 14], которые опасны не только своим низким pH, но и большим набором тяжелых металлов [10, 15]. Термин «кислотный дренаж» описывает кислые водные растворы, образующиеся при окислении сульфидных минералов угольных и рудных месторождений. Колчеданная (пиритная) сера – основной вид сернистых соединений в углях. На ее долю приходится в среднем 62% от общего содержания серы.

### **Геохимическое обоснование моделирования**

Процесс окисления пирита описывается суммарным уравнением [9, 11]:



согласно которому, продуктами окисления являются осадок гидроокиси железа и серная кислота. О сложном механизме реакции (1) свидетельствуют исследования кинетики и участия в нем нескольких видов бактерий. При 25 °С константа скорости реакции окисления пирита зависит от концентрации растворенного кислорода и pH раствора:  $r = 10^{-8.6 \times m\text{O}_{2(\text{aq})} \times m^{-1}_{\text{H}^+}}$ .

Горная порода нейтрализует водный раствор и в настоящее время для измерения потенциала нейтрализации используются лабораторные методы, которые заключаются в обработке пробы породы соляной кислотой и титровании избытка кислоты щелочью.

Кислотный сток и выщелачивание металлов может происходить и естественным путем в сульфидсодержащих толщах пород, но горнодобывающая деятельность ускоряет их ход, поскольку повышает вероятность обнажения и попадания сульфидных минералов под прямое воздействие воздуха и воды, активно ускоряющих естественные процессы. Присутствие в породе сульфидов свидетельствует о наличии потенциала выщелачивания металлов, как в ходе горных работ, так и после их прекращения. Последнее очень важно в случае планируемой длительности и значительных масштабов горных работ [13].

### **Методика термодинамического моделирования**

Термодинамическое компьютерное моделирование минерализации дренажных вод опирается на выводы фундаментальной гидрогеохимии [4]. Формирование химического состава природных вод в земной коре определяется гидрогеологическими ситуациями, в которых проявляются сложившиеся физико-химические характеристики изучае-

мого объекта: (а) количественные отношения между массами взаимодействующих пород и вод (R/W), (б) химический (особенно по летучим элементам Cl, F, S, C) и минеральный состав пород, с которыми контактирует и взаимодействует вода, (в) термодинамическая открытость (закрытость) гидрогеохимической системы по CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>, другим газам, (г) температура-давление существования рассматриваемой системы «вода-порода-газы». В реальных гидрогеохимических системах R/W отношения являются функцией пористости пород, скорости движения подземных вод и, в целом, интенсивности и времени водообмена [7]. Петрохимический тип породы влияет на состав водной фазы через скорость растворения минералов породы, особенно минералов-носителей летучих. Это послужило толчком к разработке алгоритма кинетико-термодинамического компьютерного моделирования [6].

Моделирование кислотного дренажа заключается в компьютерном расчете равновесного состояния смеси порций породы (R) известного химического состава и воды (W). Расчеты проводились с использованием программного комплекса HCh, разработанного Ю.В. Шваровым (кафедра геохимии МГУ им. М.В. Ломоносова) [8] и позволяющего оценить равновесное состояние системы «вода-порода-газы-органическое вещество» (рН, Eh, концентрации и формы существования компонентов в водном растворе, минеральные ассоциации) при заданных температуре, давлении, балансе масс инертных и летучести (парциальном давлении) вполне подвижных компонентов. Для практического использования метода компьютерного моделирования необходим анализ пород на макро и микрокомпоненты, а также минералогический анализ [12].

### **Результаты моделирования**

В данной работе для демонстрации возможностей компьютерного моделирования в решении практических геохимических задач мы использовали вещественный состав угля из общедоступных справочных источников. Моделирование равновесного состояния при температуре 25 и 100 °С, отношении R/W=50 выполнено для пробы каменного угля состава (мас.%) С 84.6, Н 3.6, О/С 0.1, содержанием серы 1, 2.5 и 4 мас.% с минеральной частью состава (мас.%) SiO<sub>2</sub> 30.0, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 26.4, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 23.1, CaO 7.8, MgO 1.5, TiO<sub>2</sub> 1.2, Na<sub>2</sub>O 0.5, K<sub>2</sub>O 0.8, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 6.6, SO<sub>3</sub> 2.1.

В табл. 1 представлены величины рН и Eh водной фазы системы, в которой прошел процесс взаимодействия воды с угольной породой, указанного выше состава при различных доступных (угольной породе) величинах летучести кислорода (lgfO<sub>2</sub> -50, -10, -1).

Таким образом, выполнен сопоставительный анализ двух вариантов угледобычи (открытый (lgfO<sub>2</sub>=-1) и подземный (lgfO<sub>2</sub>=-50)) при различной температуре и количестве в породе кислотообразующих минералов, в частности пирита. Условия обводнения были одинаковыми (R/W=50).

Таблица 1

**Формирование кислотного дренажа в каменноугольной породе**

S, мас.%	1.0					
T, °C	25			100		
lgfO <sub>2</sub>	-50	-10	-1	-50	-10	-1
pH	6.36	6.36	7.19	5.49	5.49	5.61
Eh, mV	+114	+114	+843	-165	+576	+777
S, мас.%	2.5					
T, °C	25			100		
lgfO <sub>2</sub>	-50	-10	-1	-50	-10	-1
pH	6.30	6.30	7.19	5.49	5.16	5.61
Eh, mV	+118	+118	+843	-165	+600	+777
S, мас.%	4.0					
T, °C	25			100		
lgfO <sub>2</sub>	-50	-10	-1	-50	-10	-1
pH	5.97	5.97	7.19	5.48	5.16	5.61
Eh, mV	+138	+138	+843	-165	+600	+777

**Выводы**

Анализируя результаты термодинамического моделирования, можно отметить следующее:

1) Увеличение отношения С/Н угольной породы приводит к небольшому возрастанию рН и понижению Eh состояния водной фазы. Результирующая величина рН дренажного раствора снижается с возрастанием парциальной летучести кислорода, в то время как с увеличением температуры рН дренажного раствора снижается.

2) Увеличение парциальной летучести кислорода приводит к соответствующему увеличению Eh и, вызванному окислением сульфидной серы, снижению рН водного раствора; образующаяся кислота частично нейтрализуется минеральной частью угля (более заметно при повышенной температуре). В восстановительных условиях отмечено образование метана.

3) Практическое внедрение термодинамического моделирования позволяет определить варианты развития экологических рисков при разработке угольных месторождений и обосновать технологию снижения негативного воздействия кислотного дренажа на окружающую среду, путем количественной оценки кислотообразующих минералов (таких как пирит и другие сульфиды) и минералов с кислотонейтрализующим свойством.

Авторы признательны сотрудникам ИПКОН РАН за привлечение внимания к поставленной проблеме и продуктивное обсуждение результатов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Войтович С.П.* Геохимические особенности шахтных вод угольных бассейнов Украины и России//Молодой ученый.-2015.-№23.-С. 395–397.
2. *Еделев А.В.* Прогнозная оценка состава дренажных вод, взаимодействующих с сульфидсодержащим веществом//Геология и геофизика. – 2013. – т.54. – №1. – С.144–157.
3. *Имайкин А.К.* Гидрогеоэкологические последствия подземной добычи угля на Коспашском месторождении каменного угля//Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2. Электронный научный журнал URL:<http://science-education.ru>
4. *Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М.* Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. 2-е издание. М.: ЦентрЛит-НефтеГаз, 2012. 672 с.
5. *Лиманцева О.А., Рыженко Б.Н., Черкасова Е.В.* Прогноз влияния кислотного дренажа на изменение гидрогеохимической обстановки в районах сульфидсодержащих месторождений//Геохимия. – 2015. – № 10. – С. 922–936.
6. *Мироненко М.В., Золотов М.Ю.* Равновесно-кинетическая модель взаимодействия вода-порода// Геохимия. – 2012. – № 1 – С. 3–9.
7. *Рыженко Б.Н., Крайнов С.Р., Барсуков Викт.Л., Шваров Ю.В.* Флюиды земной коры. Химические свойства (состав, pH, Eh) и определяющие их факторы //Петрология. – 2000. – Т. 8. – № 6. – С. 618–630.
8. *Шваров Ю.В.* HCl: новые возможности термодинамического моделирования динамических геохимических систем, предоставляемые Windows // Геохимия. – 2008. – № 8. – С. 890–897.
9. *Appelo C.A.J., Postma D.* Geochemistry, Groundwater and Pollution. BALKEMA. 2005. 635 p.
10. *Blowes D.W., Ptacek C.J., Jambor J.L., Weisener C.G., Paktunc D., Gould W.D., Johnson D.B.* The Geochemistry of Acid Mine Drainage//Environmental Geochemistry, Treatise on Geochemistry, 2014, Vol. 11, pp. 131–190.
11. *Lapakko, K., Trujillo, E.* (2015) Pyrite oxidation rates from laboratory tests on waste rock. 10th ICARD/IMWA Annual meeting, Santiago, Chile, April 20–25. 14 pp.
12. *Maest Ann S., Nordstrom D. Kirk.* Geochemical Processes in a Column: Modeling Humidity Cell Test Results//Mine Water and Circular Economy, 2017, 642–648 pp.
13. *Nordstrom D. Kirk, Bowell Robert J., Campbell Kate M., Alpers Charles N.* Challenges in Recovering Resources from Acid Mine Drainage//Mine Water and Circular Economy, 2017, pp. 1138–1146.
14. *Ozoko D.C.* Heavy Metal Geochemistry of Acid Mine Drainage in Onyema Coal Mine, Enugu, Southeastern Nigeria//Journal of Environment and Earth Science, 2015, Vol. 5, no 10, pp. 120–127.
15. *Petrilakova A., Balintova M., Holub M.* Precipitation of heavy metals from acid mine drainage and their geochemical modeling//Journal of Civil Engineering, 2014, Vol. 9, issue 1, pp. 74–86. **ГИАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Рыженко Б.Н. — доктор химических наук, главный научный сотрудник,  
Лиманцева О.А. — кандидат геолого-минералогических наук, доцент, стар-  
ший научный сотрудник,  
Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН, e-mail:  
wri-lab@geokhi.ru: Москва 119991, ул.Косыгина, 19.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 544–550.

**Ryzhenko B.N., Limantseva O.A.**

### **Computer simulation for geochemical Evaluation of drainage water formation and composition on coal deposits**

The simulation of drainage waters of coal mine composition is performed. The simulation is done using HCh code developed by Yu.Shvarov of the Moscow State University. The code may be used if change of temperature-pressure of the liquid/solid-gas (organic matter) system ratio and bulk composition of the system. It permits to change natural or technogenic hydrogeochemical conditions variation.

Simulation of equilibrium state of coal-water reaction at 25 and 100oC, rock/water ratio =50 and sulfur content of 1, 2.5 and 4 mass% in the rock? Atmosphere pressure and oxygen fugacity pressure  $\lg f_{O_2} = -50, -10$  и  $-1$ .

It was shown by thermodynamic simulation of coal and water system that acidic potential of drainage waters grow up when temperature increase occurs (pH decrease). The Eh increase causes opposite effect when  $O_2$  partial pressure increase and sulfides oxydation. So at open coal mining the acidity of drainage solution will depends on two opposite factors, namely, temperature and oxygen access.

The publication is the only demonstration of simulation ability and benefit of thermodynamic simulation technique use before coal mining.

Key Words: coal deposits, Drainage waters, geochemical conditions, thermodynamic simulation, heavy metal pollution.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-544-550

## AUTHORS

*Ryzhenko B.N.*, doctor of chemical Sciences, chief researcher,  
*Limantseva O.A.*, candidate of geological-mineralogical Sciences, associate  
Professor, senior researcher,  
Veradsky Institute of geochen-mistry RAS, Russia Moscow 119991. Kosigin st., 19.

## REFERENCES

1. Vojtovich S.P. *Geohimicheskie osobennosti shahtnyh vod ugol'nyh bassejnov Ukrainy i Rossii* [Geochemical features of coal mine waters in Ukraine and Russia]. Molodoj uchenyj. 2015. no 23. pp. 395–397.
2. Edelev A.V. *Prognoznaya ocenka sostava drenazhnyh vod, vzaimodejstvuyushchih s sul'fidsoderzhashchim veshchestvom* [Estimation of drainage waters, interact with sulfide-containing substance]. Geologiya i geofizika. 2013. t.54. no 1. pp.144–157.

3. Imajkin A.K. Hidrogeoekologicheskie posledstviya podzemnoj dobychi uglja na Kospashskom mestorozhdenii kamennogo uglja//Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2012. no 2. Elektronnyj nauchnyj zhurnal URL:<http://science-education.ru>

4. Krajnov S.R., Ryzhenko B.N., Shvec V.M. *Geohimiya podzemnyh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of groundwater. Theoretically, the determination of human, applied and environmental aspects]. 2-e izdanie. Moscow: CentrLitNefteGaz, 2012. 672 p.

5. Limanceva O.A., Ryzhenko B.N., Cherkasova E.V. *Prognoz vliyaniya kislotnogo drenazha na izmenenie gidrogeohimicheskoy obstanovki v rajonah sul'fidsoderzhashchih mestorozhdenij* [Forecast of the influence of acid drainage on the change of hydrogeochemical situation in the areas of sulfide-containing deposits]. *Geohimiya*. 2015. no 10. pp. 922–936.

6. Mironenko M.V., Zolotov M.Yu. *Ravnovesno-kineticheskaya model' vzaimodejstvij voda-poroda* [Equilibrium-kinetic model of water-rock interactions]. *Geohimiya*. 2012. no 1 pp. 3–9.

7. Ryzhenko B.N., Krajnov S.R., Barsukov Vikt.L., Shvarov Yu.V. *Flyuidy zemnoj kory. Himicheskie svoystva (sostav, nH, Eh) i opredelyayushchie ih faktory* [Fluids in the earth's crust. Chemical properties (composition, pH, e) and their determining factors]. *Petrologiya*. 2000. T. 8. no 6. pp. 618–630.

8. Shvarov Yu.V. *HCh: novye vozmozhnosti termodinamicheskogo modelirovaniya dinamicheskikh geohimicheskikh sistem, predostavlyayemye Windows* [HCH: new potentialities for the thermodynamic modeling research Institute of dynamic geochemical systems provided by Windows]. *Geohimiya*. 2008. no 8. pp. 890–897.

9. Appelo C.A.J., Postma D. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. Balkema. 2005. 635 p.

10. Blowes D.W., Ptacek C.J., Jambor J.L., Weisener C.G., Paktunc D., Gould W.D., Johnson D.B. *The Geochemistry of Acid Mine Drainage*. Environmental Geochemistry, Treatise on Geochemistry, 2014, Vol. 11, pp. 131–190.

11. Lapakko, K., Trujillo, E. (2015) *Pyrite oxidation rates from laboratory tests on waste rock*. 10th ICARD. IMWA Annual meeting, Santiago, Chile, April 20–25. 14 pp.

12. Maest Ann S., Nordstrom D. Kirk. *Geochemical Processes in a Column: Modeling Humidity Cell Test Results*. Mine Water and Circular Economy, 2017, 642–648 pp.

13. Nordstrom D. Kirk, Bowell Robert J., Campbell Kate M., Alpers Charles N. *Challenges in Recovering Resources from Acid Mine Drainage*. Mine Water and Circular Economy, 2017, pp. 1138–1146.

14. Ozoko D.C. *Heavy Metal Geochemistry of Acid Mine Drainage in Onyeama Coal Mine, Enugu, Southeastern Nigeria*. Journal of Environment and Earth Science, 2015, Vol. 5, no 10, pp. 120–127.

15. Petrilakova A., Balintova M., Holub M. *Precipitation of heavy metals from acid mine drainage and their geochemical modeling*. Journal of Civil Engineering, 2014, Vol. 9, issue 1, pp. 74–86.



О.А. Скрипник

## РЕАБИЛИТАЦИЯ НАРУШЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ УГОЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ЗАПАДНОГО ДОНБАССА ПУТЕМ СОЗДАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТНЫХ ЗАКАЗНИКОВ

Анализ существующих технологий ревитализации («возврат жизни») нарушенных земель свидетельствует, что наилучшие показатели имеют те из них, которые в качестве движущей силы используют природные биологические процессы. Технологии реабилитации предусматривают наименьшее вмешательство в природные механизмы, имеют наименьшие энергоемкость и отходы. Создание вторичного растительного покрова позволяет в разы уменьшить негативное влияние нарушенных земель на окружающую среду. Исследование нарушенных земель угледобывающих предприятий Западного Донбасса позволило выделить 4 участка на площади около 74 га, где процессы восстановления (успешная лесная рекультивация, биоинженерные сооружения, производственные эксперименты) привели к появлению вторичных экосистем, уникальных по ландшафтному и биологическому разнообразию. Для сохранения результатов реабилитации наиболее подходящей формой является создание техногенных ландшафтных заказников с интеграцией их в территориально-функциональные системы природно-заповедного фонда и экологической сети. Для активизации развития природных сообществ обоснованы методы управления строением поверхности, почвообразованием, созданием растительного покрова. Наиболее перспективными для активизации формирования растительности в условиях Западного Донбасса являются древесные виды: акация белая, можжевельник виргинский, берест.

Ключевые слова: реабилитация нарушенных горными работами земель, геометризация поверхности почвенного покрова, техногенные ландшафтные заказники.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-551-559

### Введение

В результате разрушения живой природы человечество несет конкретные убытки в связи с необходимостью поддержания функций по очистке воздуха, воды, почв, воспроизведению биологических ресурсов, стабилизации климата. Кроме того, активизируются опасные процессы эрозии, абразии, оползнеобразования, которые наносят огромный вред хозяйственному комплексу. Кризис и трансформация экосистем сопро-

вождается опустыниванием, снижением производительности сельского, лесного, рыбного хозяйства, технологии которых имеют в своей основе функционирования живых систем [1].

Если раньше основные усилия направлялись на эксплуатацию экосистем для получения прибыли, то сегодня стала очевидной необходимость сохранения природы, особенно, экосистем, как источника и условия получения материальных благ. Формируется необходимость развития деятельности сохранения, которая не только описывает процессы, а и разрабатывает меры по поддержке функционирования экосистем путем воспроизведения взаимодействия их компонентов. Эффективность осуществления рекомендаций деятельности сохранения зависит от совершенства применяемых технологий [2].

Разработка современных горных технологий требует решения ряда экологических проблем. Технологии реабилитации нарушенных горными работами земель имеют целью преодолеть негативные экологические последствия производства и устаревших технологий. Поэтому привлечение природных процессов [3] к решению технологических задач, особенно связанных с сохранением и восстановлением окружающей среды, является наиболее перспективным направлением совершенствования технологий.

Методы исследований. Для изучения строения поверхности использовались современные картографические [4] и картометрические методы [5], в том числе методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с использованием данных модели SRTM и индекса «зеленого» NDVI [6]. Почвы и растительность исследовались стандартными методами [7].

Результаты исследований. Анализ современных технологий позволил создать классификацию технологий ревитализации по критерию участия природных процессов с выделением классов мелиорации (<25%), рекультивации (25-50%), реабилитации (> 50%)

Наибольшее распространение среди них сегодня получают технологии реабилитации, которые, согласно Конвенции ООН по борьбе с опустыниванием, направлены на восстановление способности земель к выполнению экосистемных и хозяйственных функций.

Основными критериями устойчивого развития являются параметры энергоемкости и отходности. Известно, что в энерго- и ресурсосбережении ведущие позиции занимают живые организмы.

Наши расчеты показывают, что технология формирования вторичных экосистем с активизацией самовосстановления, как технология реабилитации, в основе которой лежит содействие развитию биоты, требует в 16 раз меньше ресурсных затрат и вызывает в 20 раз меньшее негативное влияние на окружающую среду, чем традиционные технологии рекультивации (табл. 1).

Вместе с тем, даже пионерная растительность способна не только обеспечивать развитие продукционного компонента экосистем, но и существенно уменьшать негативные процессы водной и ветровой эрозии, загрязнения атмосферы и гидросферы. Наши наблюдения на опытном участке ПАО ДТЭК «Павлоградуголь» свидетельствуют об уменьшении пыления его поверхности в 5 раз при формировании травянистых (донниковых), и в 10 раз - древесных (с преобладанием береста) группировок.

Таблица 1

**Энергоемкость и отходность технологий ревитализации**

Технология реабилитации	Энергоемкость, ГДж/га	Отходность, кг/га
Сельскохозяйственная рекультивация	47	47 8063
Лесохозяйственная рекультивация	30	30 5109
Рекреационная рекультивация	16	16 2176
Реабилитация с активизацией самовосстановления	3	3 390

Исследование нарушенных земель позволило выделить основные перспективные участки для заповедания и определить основные параметры их вторичных экосистем (табл. 2)

Основной экологической проблемой подземной добычи угля является оседание поверхности при обрушении шахтных выработок. В Западном Донбассе такое оседание часто сопровождается затоплением, утратой ценных пойменных земель. Примером успешной лесной рекультивации стали результаты работ проведенных рекультивационной бригадой Комплексной экспедиции ДГУ с участием автора в 1975 г. на участке 3 га. Горнотехнический этап рекультивации заключался в послойном наращивании поверхности с применением горной породы, суглинка, песка и чернозема. Как показала практика, наилучшие результаты на биологическом этапе дает создание древесной растительности с использованием лоха узколистного, березы бородавчатой, можжевельника виргинского, клена остролистного, клена татарского, вяза перистоветвистого, ивы вавилонской, тополей боле и черного на черноземах и суглинках [8]. Однако, уникальные вторичные лесные экосистемы нуждаются в охране от самовольной вырубке, пожаров, других антропогенных воздействий. Перевод земель успешной лесной рекультивации в природно-заповедный фонд (табл. 2; рис.1) в качестве ландшафтного заказника является необходимым для сохранения уникальных вторичных экосистем и их биоразнообразия.

Отвалы горных пород, появлением которых сопровождается добыча каменного угля, служат источником загрязнения окружающей среды: гидросферы в результате развития водной эрозии, атмосферы

в результате развития ветровой эрозии, почв в результате выпадения на их поверхность эродированного материала. Эффективным способом противодействия эрозии является создание растительного покрова. Естественным путем процессы самовосстановления длятся столетиями. Активизация самовосстановления путем внесения органических отходов коммунальных, перерабатывающих предприятий, фосфоритов, орошения возвратными водами, применения фашинных методов позволяет сократить этот процесс до десятилетий.

Таблица 2

**Координаты участков перспективных для заповедания и некоторые параметры вторичных экосистем проектируемых ландшафтных заказников на территории ПАО ДТЭК «Павлоградуголь»**

Заказник	Координаты с.ш.	Координаты в.д.	Максимальный наклон, град	Площадь, га	Среднее проективное покрытие растительности, %
Лесная рекультивация	48° 33' 37,42" 48° 33' 40,40" 48° 33' 34,20" 48° 33' 37,42"	35° 58' 29,51" 35° 58' 34,20" 35° 58' 39,25" 35° 58' 34,20"	2	3	100
Биоинженерные сооружения	48° 23' 41,28" 48° 23' 59,02" 48° 23' 48,30" 48° 23' 15,36"	36° 24' 45,64" 36° 24' 45,64" 36° 24' 28,40" 36° 24' 27,02"	4	30	90
Отвал ш. «Степная»	48° 22' 36,50" 48° 22' 42,55" 48° 22' 25,50" 48° 22' 25,50"	36° 22' 27,80" 36° 22' 40,80" 36° 22' 56,90" 36° 22' 56,90"	45	14	60
Отвал ш. «Першотравневая»	48° 21' 31,50" 48° 21' 31,68" 48° 21' 5,76" 48° 21' 11,70"	36° 21' 42,0" 36° 21' 54,85" 36° 21' 14,18" 36° 21' 2,0"	35	27	70

Исследования [9,10] свидетельствуют о развитии процессов выщелачивания, расслоения углистых сланцев и аргиллитов, почвообразования в аккумулятивных формах поверхности. Здесь в условиях опытного участка специалистами Никитского ботанического сада были произведены посадки древесно-кустарниковых видов [6]: акации белой, ясеня зеленейшего, дуба обыкновенного, груши обыкновенной, абрикоса обыкновенного, форзиции промежуточной, тамарикса четырехтычинкового.

Для активизации формирования вторичных экосистем проводилось внесение гуминовых кислот для уменьшения концентрации

обменного алюминия. В результате проведенных работ были созданы уникальные древесно-кустарниковые экосистемы на вершинах отвалов ш. «Першотравневая», «Степная», «Павлоградская» ДТЭК «Павлоградуголь», которые нуждаются в охране (рис.).

В настоящее время все большее распространение получают технологии, основанные на биологических процессах. К ним относят биоинженерные сооружения (БИС), основным производящим элементом которых является высшая водная растительность (ВВР).



**Рис. Пространственное положение и проектируемые границы (обозначены прямыми линиями) участков перспективных для создания техногенных ландшафтных заказников на плановой основе в виде крупномасштабных снимков Google Earth: А – участок лесной рекультивации Комплексной экспедиции ДГУ; В – участок биоинженерных сооружений (БИС) «Балка Косминная»; С – отвал ш. «Степная»; D – отвал ш. «Першотравневая»**

Здесь формируются болотные экосистемы с доминированием тростника южного, рогаза широколистного, осок. С одной стороны они

представляют собой элемент технологии очистки возвратных вод, с другой – водно-болотные экосистемы с интенсивным оборотом биомассы и развивающимся биоразнообразием.

Для дополнительных гарантий охраны вторичных экосистем на территории БИС рекомендуется создать техногенный ландшафтный заказник «Балка Косминная» (рисунок) [11].

Эффективность реабилитации определяется соответствием формирующихся вторичных экосистем условиям, складывающимся на нарушенных землях. Их основой является строение поверхности, параметры которой являются управляемыми на горнотехническом этапе реабилитации [12,13]. Для достижения наилучших морфометрических параметров поверхности сегодня применяются методы геометрического ландшафтного дизайна нарушенных горными работами земель [14,15]. Для активизации формирования вторичных почв применяется внесение соединений, содержащих элементы минерального питания, органических отходов, гуматов, мелиорантов [10,12,16]. Более устойчивой к деструктивным воздействиям является древесно-кустарниковая растительность, наилучшие результаты дает в условиях Западного Донбасса дает лесная рекультивация. Наиболее приспособленными при дефиците минерального питания увлажнения являются акация белая, можжевельник виргинский, берест.

Внедрение в технологии реабилитации нарушенных горными работами земель этапа сохранения предусматривает создание заказников, интеграцию их в территориально-функциональные системы природно-заповедного фонда и экологической сети.

Заключение. Нарушенные земли добывающих предприятий, в том числе угледобывающие, вступая во взаимодействие с биотой, формируют вторичные экосистемы. Здесь формируются уникальные по ландшафтному и биологическому разнообразию сообщества, способные противостоять водной и ветровой эрозии, загрязнению окружающей среды. Для ускорения естественных процессов экосистемообразования необходимо осуществлять мероприятия по активизации (формирования вторичных поверхностей, внесение дефицитных химических веществ, диаспор перспективных видов). Для сохранения результатов реабилитации нарушенных земель необходимо создание охраняемых территорий. Наиболее подходящей для этого формой являются техногенные ландшафтные заказники, способные служить объектом исследований, просвещения, рекреации и туризма.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Примак Р.* Основы сохранения биоразнообразия. – М.: Издательство научного и учебно-методического центра, 2006. – 256 с.
2. Сохранение и восстановление биоразнообразия [Флинт В.Е., Смирнова О.В., Ханина Л.Г., Бобровский М.В., и другие] М.: Издательство научного и учебно-методического центра, 2002. – 286 с.

3. *Polster D.* 2017. Natural Processes for Restoring Mines // Reclamation matters: 28–30

4. *Кусов В.С.* Основы геодезии, картографии и космоаэрофотосъемки / В.С.Кусов, учебник – М.: ИЦ «Академия», 2009 . – 256 с.

5. *Кудрицкий Д.М.* Картометрические работы. – Л: Тип. ВВМУПП им. Ленинского комсомола, 1978 – 80 с.

6. *Кохан С.С., Востоков А.Б., Леонтьев О.О.* Дистанційне зондування Землі. – Київ: МП “ЛЕСЯ”. 2010. – 300 с.

7. Общесоюзная инструкция по проведению геоботанического обследования природных кормовых угодий и составлению крупномасштабных геоботанических карт. М.: «Колос», 1984. – 104 с.

8. *Белова Н.А.* Экология, микроморфология, антропогенез лесных почв степной зоны Украины. – Днепропетровск: Изд-во Днепропетровского государственного университета, 1997 – 264 с.

9. *Новицкий М.Л.* О рельефоформирующем способе рекультивации сульфидсодержащих отвалов шахт Западного Донбасса // Бюлл. Государств. Никит. Ботан. Сад., 2014. – № 113. – С. 71 - 77.

10. *Новицкий М.Л.* Физико-химические и химические свойства сульфидных горной породы и молодой почвы шахтных отвалов Западного Донбасса // Бюлл. Государств. Никит. Ботан. Сад, 2014. – № 113. – С. 71 - 77.

11. *Скрипник О.А., Андреев В.Г.* Оценка эффективности технологических решений по применению биоинженерных сооружений для очистки шахтных вод «ДТЭК Павлоградуголь» // Мат. научн. симп. «Неделя еколога – 2017» 10–13 апреля 2017 г., г. Каменское (Днепродзержинск), Украина – С. 95 – 99.

12. *Скрипник О.О.* Геометризаційні основи зменшення екоризиків від порушених гірничими роботами земель // Зб. наук. праць ІПРЕ «Екологія і природокористування». Випуск 18. Дніпропетровськ. – 2014. – С. 20 – 27.

13. *Скрипник О.О.* Будова поверхні порушених гірничими роботами земель – основний фактор розвитку вторинних екосистем/ Скрипник О.О. // Зб. наук. праць ІПРЕ «Екологія і природокористування». Випуск 19. Дніпропетровськ. – 2015. – С. 71–78.

14. *Buckley, C., Hopkinson L., Quaranta J., Mack B., Ziemkiewicz P.* 2013. “Investigating design parameters in the design of West Virginia valley fills to support application of geomorphic landform design principles.” Environmental Considerations in Energy Production, J.R. Craynon, (ed.) Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), Englewood, CO, 405- 414.

15. *Russell, H., DePriest N., Quaranta J.D.* 2014. “Stability analysis comparison of conventional valley-fill to geomorphic landform designs.” Trans. Soc. Min. Metall. Expl., 336., 414–420

16. *Howell, D.M., Das Gupta, S., Pinno, B.D. and MacKenzie, M.D.* 2017. Reclaimed soils, fertilizer, and bioavailable nutrients: Determining similarity with natural benchmarks over time. Canadian Journal of Soil Science. 97:149–158.

**ГНАБ**

## **КОРОТКО ОБ АВТОРЕ**

*Скрипник Олег Александрович* доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, тел.: +380993006767, E-mail: skrypnuk.oleg@gmail.

com, Институт проблем природопользования и экологии, Национальной академии наук Украины (ИППЭ НАНУ), 49000, Украина, г Днепропетровск (Днепр), ул. Московская (Владимира Мономаха), 6.

---

ISSN 0236–1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018.  
No. 11 (special'nyj vypusk 49), pp. 551–559.

**Skrypnyk O.A.**

## **Rehabilitation of the disturbed land from the coal enterprises in the western donbass by creating anthropogenic landscape reserve**

Analysis of existing technologies for revitalization of disturbed lands shows that the best indicators are those that use natural biological processes as a driving force. Technologies of rehabilitation makes the least interference with natural mechanisms, have the least energy intensity and waste. The creation of a secondary vegetative cover allows to reduce the negative impact of disturbed lands on the environment in several times. The study of the disturbed lands from the coal mining enterprises in the Western Donbass made it possible to identify 4 plots in the area of about 74 hectares, where recovery processes (successful forest reclamation, bioengineering facilities, production experiments) led to the appearance of the unique secondary ecosystems in terms of landscape and biological diversity. To preserve the results of rehabilitation, the most appropriate form is the creation of anthropogenic landscape reserves with their integration into the territorial- functional systems of the natural reserve fund and ecological network. To enhance the development of natural communities, methods of controlling the structure of the surface, soil formation, and the creation of vegetation cover are justified. The most promising species for activating the formation of vegetation in the Western Donbass are woody species: white acacia, virgin juniper, elm.

Key words: rehabilitation of disturbed lands by mining, geometrization of soil cover, anthropogenic landscape reserves.

---

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-551-559

## **AUTHORS**

Skrypnyk O.A., Doctor of Technical Sciences, Deputy Director for Research, tel.: +380993006767, E-mail: skrypnyk.oleg@gmail.com, Institute of Nature Management and Ecology, National Academy of Sciences of Ukraine (IPPE NASU), Postal address: 49000, Ukraine, Dnepropetrovsk (Dnepr), st. Moscow (Vladimir Monomakh), 6.

## **REFERENCES**

1. Primak R. *Osnovy sohraneniya bioraznoobraziya* [Fundamentals of biodiversity conservation]. Moscow: Izdatel'stvo nauchnogo i uchebno-metodicheskogo centra, 2006. 256 p.
2. Flint V.E., Smirnova O.V., Hanina L.G., Bobrovskij M.V., i dr. *Sohranenie i vosstanovlenie bioraznoobraziya* [Conservation and restoration of biodiversity]. Moscow: Izdatel'stvo nauchnogo i uchebno-metodicheskogo centra, 2002. 286 p.
3. Polster D. 2017. *Natural Processes for Restoring Mines*. Reclamation matters: 28–30
4. Kusov V.S. *Osnovy geodezii, kartografii i kosmoaeros»emki* [Fundamentals of geodesy, cartography and cosmo aerography]. Moscow: IC «Akademiya», 2009. 256 p.

5. Kudrickij D.M. *Kartometricheskie raboty* [Cortometrajes work]. Leningrad: Tip. VVMUPP im. Leninskogo komsomola, 1978 80 p.
6. Kohan S.S., Vostokov A.B., Leont'ev O.O. Distancijne zonduvannya Zemli. Kiïv: MP "LESYa". 2010. 300 s.
7. *Obshchesoyuznaya instrukciya po provedeniyu geobotanicheskogo obsledovaniya prirodnyh kormovyh ugodij i sostavleniyu krupnomasshtabnyh geobotanicheskikh kart* [Union manual for conducting geobotanical survey of the natural pastures and the development of large scale geobotanical maps]. Moscow: «Kolos», 1984. 104 p.
8. Belova N.A. *Ekologiya, mikromorfologiya, antropogenez lesnyh pochv stepnoj zony Ukrainy* [Ecology, micromorphology, anthropogenesis of forest soils of the steppe zone of Ukraine]. Dnepropetrovsk: Izd-vo Dnepropetrovskogo gosuniversiteta, 1997 264 p.
9. Novickij M.L. *O rel'efoformiruyushchem sposobe rekul'tivacii sul'fidsoderzhashchih otvalov shaht Zapadnogo Donbassa* [On the relief-forming method of recultivation of sulfide-containing dumps of mines of the Western Donbass]. Byull. Gosudarstv. Nikit. Botan. Sad., 2014. no 113. pp. 71–77.
10. Novickij M.L. *Fiziko-himicheskie i himicheskie svoystva sul'fidnyh gornoj porody i molodoy pochvy shahtnyh otvalov Zapadnogo Donbassa* [Physico-chemical and chemical properties of sulphide rock and young soil of mine dumps of Western Donbass]. Byull. Gosudarstv. Nikit. Botan. Sad, 2014. no 113. pp. 71–77.
11. Skripnik O.A., Andreev V.G. *Ocenka effektivnosti tekhnologicheskikh reshenij po primeniyu bioinzhenernyh sooruzhenij dlya ochistki shahtnyh vod «DTEK Pavlogradugol'»* [Evaluation of the efficiency of technological solutions for the use of bioengineering facilities for the treatment of mine waters «DTEK Pavlogradugol'». Mat. nauchn. simp. «Nedelya ekologa 2017» 10–13 aprelya 2017 g., g. Kamenskoe (Dneprodzerzhinsk), Ukraina. pp. 95–99.
12. Skripnik O.O. *Geometrizacijni osnovi zmeshennya ekorizikiv vid porushenih gïrnichimi robotami zemel'* [Geometrization basis reduction carisolv from disturbed mining lands]. Zb. nauk. prac' IPPE «Ekologiya i prirodokoristuvannya». Vipusk 18. Dnipropetrovs'k. 2014. pp. 20–27.
13. Skripnik O.O. *Budova poverhni porushenih gïrnichimi robotami zemel' – osnovnij faktor rozvitku vtornih ekosistem* [Structure of the surface mining disturbed land is the main factor of development of secondary ecosystems]. Zb. nauk. prac' IPPE «Ekologiya i prirodokoristuvannya». Vipusk 19. Dnipropetrovs'k. 2015. pp. 71–78.
14. Buckley, C., Hopkinson L., Quaranta J., Mack B., Ziemkiewicz P. 2013. *Investigating design parameters in the design of West Virginia valley fills to support application of geomorphic landform design principles*. Environmental Considerations in Energy Production, J.R. Craynon, (ed.) Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), Englewood, CO, pp. 405–414.
15. Russell, H., DePriest N., Quaranta J.D. 2014. *Stability analysis comparison of conventional valley-fill to geomorphic landform designs*. Trans. Soc. Min. Metall. Expl., 336, 414–420
16. Howell, D.M., Das Gupta, S., Pinno, B.D. and MacKenzie, M.D. 2017. *Reclaimed soils, fertilizer, and bioavailable nutrients: Determining similarity with natural benchmarks over time*. Canadian Journal of Soil Science. 97:149–158.

