ГИАБ©
ISSN 0236-1493
Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)

Индексирование

С 2001 г. по настоящее время ГИАБ входит в Перечень периодических научных изданий, рекомендуемых ВАК Минобразования России для публикации научных работ соискателей ученых степеней.

Журнал индексируется:

- наукометрической базой данных Scopus;
- международной базой данных CrossRef;
- научно-исследовательской базой данных EBSCO Information Services;
- российским индексом научного цитирования (РИНЦ) и научной электронной библиотекой eLIBRARY.RU;
- научной электронной библиотекой КиберЛенинка.

← Show this widget in your own website

Just copy the code below and paste within your html code:

<a href="https://www.scimag

Журнал основан в 1992 г. ISSN 0236-1493

ГОРНЫЙ

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ

(НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ)

MINING INFORMATIONAL AND ANALYTICAL BULLETIN

(SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL)

№ 9
2022

ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ГОРНАЯ КНИГА»

Журнал основан в 1992 г. **ISSN 0236-1493**

ГОРНЫЙ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ (ГИАБ)
MINING INFORMATIONAL AND ANALYTICAL BULLETIN (MIAB)

Секретариат ГИАБ
Н.А. Голубцов, О.Н. Киреева

Рабочая группа:
Руководитель *Н.А. Голубцов*
Подготовка макета *Л.В. Гречнева*
Дизайн оформления *В.Ю. Котов, Е.Б. Капралова*
Инвестиционные проекты *Н.А. Голубцов, О.Н. Киреева*

Государственное свидетельство
о регистрации ГИАБ в Роскомнадзоре
ПИ № ФС77-70578 от 15.08.2017

Решением Президиума ВАК журнал включен
в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов
и изданий, в которых могут быть опубликованы
основные научные результаты диссертаций
на соискание ученой степени кандидата и доктора наук

Все статьи ГИАБ рецензируются.
Редакция принимает решение о публикации
по результатам рецензирования и имеет право
отклонить статью без объяснения причин

Статьи публикуются в авторской редакции
При перепечатке ссылка на ГИАБ обязательна

Электронная версия ГИАБ на сайтах:
www.GIAB-online.ru, www.e-library.ru,
www.cyberleninka.ru, www.ebsco.com

Метаданные статей (DOI) представлены на сайте
агентства цифровой стандартизации www.crossref.org

Индексируется в международной базе данных Scopus

Подписной индекс издания
в каталоге АО «Почта России» – **ПП837**

Подписано в печать 10.08.2022.
Формат 70×100/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,95. Тираж 500 экз.
Изд № 3547-2022. Заказ №

119049, Москва, Ленинский проспект, 6,
издательство «Горная книга»
тел. (499) 236-15-01; (495) 737-32-64

Отпечатано в АО «Первая Образцовая типография»
Филиал «Чеховский Печатный Двор»
142300, Московская область, г. Чехов, ул. Полиграфистов, 1
www.chpd.ru, e-mail: sales@chpd.ru, тел. 8 (499) 270-73-59

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ГОРНАЯ КНИГА»

ISSN 0236-1493

№ 9
2022

СОДЕРЖАНИЕ

Геотехнология

Курленя М.В.*, *Цупов М.Н.*, *Савченко А.В. Приток метана в горные выработки в результате воздействия технологических взрывов на угольный пласт 5

Федотенко В.С.*, *Корякин А.А. Перспективы применения эжекторных земснарядов для очистки шламонакопителей обогатительных фабрик 15

Чебан А.Ю.*, *Секисов А.Г.*, *Рассказов М.И. и др. Повышение эффективности селективной выемки богатых руд путем их предварительного физико-химического разупрочнения 29

Горнопромышленная геология, горная геофизика

Ратов Б.Т.*, *Федоров Б.В.*, *Куттыбаев А.Е. и др. Буровые инструменты, оснащенные комбинированным вооружением, для сооружения гидрогеологических и геотехнологических скважин 42

Янников А.М.*, *Зырянов И.В.*, *Корепанов А.Ю.*, *Стручкова А.С. Динамика и прогноз изменения гидродинамического режима нижнекембрийского водоносного комплекса в пределах Далдынского кимберлитового поля 60

Зуева И.А. Современные возможности карельской сейсмической сети для регистрации взрывной сейсмичности на территории Карелии 74

Геомеханика, разрушение горных пород

Корчак С.А.*, *Абатурова И.В.*, *Савинцев И.А.*, *Стороженко Л.А. Оценка состояния массива горных пород для выделения потенциально опасных участков проектируемого карьера 87

Тайлаков О.В.*, *Макеев М.П.*, *Уткаев Е.А. Определение коллекторских свойств угля на основе численного моделирования и в лабораторных исследованиях 99

Фрянов В.Н.*, *Павлова Л.Д.*, *Исаченко А.А.*, *Корнев Е.С. Закономерности дебита метана при комбинированной дегазации отрабатываемого угольного пласта 109

Горные машины

Теплякова А.В.*, *Азимов А.М.*, *Алиева Л.*, *Жуков И.А. Обзор и анализ технических решений для повышения долговечности и улучшения технологичности элементов ударных узлов бурильных машин 120

Тошов Ж.Б.*, *Тошов Б.Р.*, *Баратов Б.Н.*, *Хакбердиев А.Л. Вопросы проектирования буровых долот нового поколения с оптимальным межосевым эксцентриситетом 133

Обогащение полезных ископаемых

Чжо З.Я.*, *Хтет З.У.*, *Пье Ч.Ч.*, *Вай З.Ч. Оптимизация технологической схемы обогащения золотосульфидных руд «двойной упорности» 143

Шумилова Л.В.*, *Юргенсон Г.А.*, *Хатькова А.Н. Отходы разработки оловополиметаллических месторождений Забайкалья и физико-химическая геотехнология извлечения комплекса редких и цветных металлов 156

Энергетика и энергоэффективность горной промышленности

Малафеев С.И.*, *Коняшин В.И.*, *Новгородов А.А. Проектирование и реализация мехатронной трансмиссии автосамосвала БЕЛАЗ-90 169

ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(9):109-119
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.817.4 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_109

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕБИТА МЕТАНА ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ДЕГАЗАЦИИ ОТРАБАТЫВАЕМОГО УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

В.Н. Фрянов[1], Л.Д. Павлова[1], А.А. Исаченко[2], Е.С. Корнев[1]

[1] Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), Новокузнецк, Россия, e-mail: ekornev@yandex.ru

[2] Филиал АО «ОУК «Южкузбассуголь» — Шахта «Ерунаковская-8», Новокузнецк, Россия

Аннотация: На основе современной теории газофильтрационных процессов в искусственно созданной плазменно-импульсным воздействием пористой среде отрабатываемого угольного пласта и анализа результатов практического применения дегазации угольных пластов рекомендована организация работ по применению комбинированного способа поэтапного снижения метаноносности угольных пластов с использованием скважин, пробуренных с земной поверхности и из подземных выработок. Обоснованы условия применения комбинированного способа дегазации угольного пласта без снижения производительности длинного комплексно-механизированного забоя и сокращения простоев по газовому фактору. Для оценки эффективности комбинированного способа дегазации использовался статистический метод обработки и анализа данных, полученных при проведении натурных измерений параметров эксплуатации 24 скважин в течение четырех лет. Основными результатами исследований являются установленные зависимости дебита метана от времени формирования миграционных каналов в угольном пласте: возрастание дебита метана в начальный период эксплуатации дегазационных скважин, последовательное снижение выделения метана после достижения максимума. Обоснована эффективность комбинированного способа дегазации угольных пластов с использованием заблаговременной дегазации поверхностными скважинами с плазменно-импульсным воздействием на пласт и скважинами направленного бурения из подземных выработок. Отличие разработанного подхода состоит в синергетическом эффекте плазменно-импульсного воздействия на угольные пласты через скважины и снижении в три раза плотности расположения скважин направленного бурения на участках с заблаговременной дегазацией.

Ключевые слова: анализ данных, давление флюида, дебит метана, дегазация, плазменно-импульсное воздействие, подземные выработки, угольный пласт, скважины.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-41-420004.

Для цитирования: *Фрянов В. Н., Павлова Л. Д., Исаченко А. А., Корнев Е. С.* Закономерности дебита метана при комбинированной дегазации отрабатываемого угольного пласта//Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 9. – С. 109–119. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_109.

© В.Н. Фрянов, Л.Д. Павлова, А.А. Исаченко, Е.С. Корнев. 2022.

Methane flow rate patterns in mixed-type degassing of coal seam during mining

V.N. Fryanov[1], L.D. Pavlova[1], A.A. Isachenko[2], E.S. Kornev[1]

[1] Siberian State Industrial University (SibSIU), Novokuznetsk, Russia,
e-mail: ekornev@yandex.ru

[2] Branch «Mine Erunakovskaya-VIII» JSC «OUK «Yuzhkuzbassugol», Novokuznetsk, Russia

Abstract: On the basis of modern theory of gas flow in a manmade porous environment created by impulse plasma treatment of coal seam and from the analysis of actual coal seam gas drainage data, it is recommended to use a mixed-type method of stage-by-stage reduction in coal seam methane content using surface and underground boreholes. The conditions of the mixed-type method of coal seam methane drainage without decrease in the longwall mining equipment productivity and at reduced downtime because of gas emission are justified. Efficiency of the mixed-type methane drainage was estimated using statistical data processing and analysis of in-situ measurement data obtained in 24 operating boreholes within four years. The main research findings are the found dependences between the methane flow rate and time of formation of the flow channels in coal seams: methane flow rate grows in the early period of operation of drainage boreholes and, then, after reaching a maximum, methane emission gradually lowers. Efficiency of the mixed-type coal seam methane drainage method including pre-mine drainage via surface borehole drilling for impulse plasma treatment of coal seam and via directional drilling of holes from underground roadways is validated. The developed approach features the synergistic effect of impulse plasma treatment of coal seams using surface boreholes and the three times reduction in the directional drilling density in the areas of the pre-mine degassing.

Key words: data analysis, fluid pressure, methane flow rate, gas drainage, impulse plasma treatment, underground roadways, coal seam, borehole.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research and by the Kemerovo Region, Project No. 20-41-420004.

For citation: Fryanov V. N., Pavlova L. D., Isachenko A. A., Kornev E. S. Methane flow rate patterns in mixed-type degassing of coal seam during mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(9):109-119. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_109.

Введение

Угольные месторождения в России и за рубежом, как правило, являются метаноносными. Например, метаноносность угольных пластов на шахтах Кузбасса на глубине 500 м составляет 25 м^3/т [1]. Современные средства проветривания подземных выработок не всегда обеспечивают требования действующих федеральных норм и правил в области промышленной безопасности по допустимой концентрации метана, что приводит к ограничениям производительности угледобывающей техники и повышению риска возникновения опасных производственных ситуаций на угольных шахтах [2, 3]. В связи с этим возникает необходимость проведения дополнительных мероприятий по нормализации метановой ситуации в соответствии с требованиями нормативных документов. Среди таких мероприятий, кроме применения эффективных схем вентиляции выемочных полей и участков [4], прово-

дится дегазация скважинами с земной поверхности и пробуренными из горных выработок [5 — 7].

В настоящее время в соответствии с требованиями Инструкции по дегазации угольных шахт рекомендуются для применения на шахтах России следующие способы дегазации: заблаговременная, предварительная и текущая [3, 8]. Учитывая, что максимально достижимый коэффициент дегазации скважинами, пробуренными из подземных выработок (нисходящими или восходящими параллельно одиночной скважине, перекрещивающимися скважинами в зоне предварительного гидроразрыва и др.), согласно Инструкции по дегазации угольных шахт не превышает 0,5, на практике широко применяются комбинированные способы и схемы искусственного повышения проницаемости угольного пласта [9 — 11].

Различные варианты механизма газофильтрационных процессов в массиве горных пород описаны в работах многих авторов [12 — 14]. При периодическом воздействии на угольный пласт с помощью конденсатора с напряжением 300. В источника импульсов возникает разряд, который с импульсом в период 9 — 55 мкс приводит к ударным, тепловым и вибрационным воздействиям в виде сдвиговых колебаний с частотой 4 — 9 Гц [12]. Под влиянием этих воздействий в структурно неоднородном геомассиве возникает неравномерная сетка трещин. В лабораторных условиях было установлено, что происходит раскрытие природных и формирование новых трещин в виде ортогональной сетки вдоль и перпендикулярно напластованию породных слоев [13].

При частичной разгрузке угольного пласта трещинами в соответствии с эффектом П.А. Ребиндера происходит разрушение угля, переход метана из сорбированного и растворенного состояния в свободное. Плазменно-импульсное воздействие приводит к раскрытию трещин и формированию каналов для миграции флюида [14].

Целью данной работы являются исследования, направленные на обоснование условий применения комбинированного способа дегазации угольного пласта без снижения производительности длинного комплексно-механизированного забоя и сокращения простоев по газовому фактору. Решение этой задачи осуществлено с учетом результатов научных исследований с применением методов численного моделирования [15 — 17], а также анализа производственного опыта реализации комбинированных способов дегазации угольных пластов при интенсивной их отработке высокопроизводительными комплексно-механизированными забоями [12, 18].

Методика и объект исследования

Объектом исследования является комбинированный способ дегазации угольного пласта, включающий плазменно-импульсное воздействие на пласт через скважины, пробуренные с поверхности, и скважины направленного бурения из подземных выработок.

Сущность плазменно-импульсного воздействия на угольный пласт состоит в следующем [18]. В пробуренной с земной поверхности скважине угольный пласт условно делится на участки высотой 0,25 — 0,50 м. В скважине вывешивается на геофизическом кабеле перфорированная эксплуатационная колонна, и против соответствующего участка угольного пласта с помощью источника импульсов инициируются периодические сжимающие и растягивающие напряжения. Согласно результатам теоретических и лабораторных исследований происходит накопление в структурно неоднородном геомассиве знакопеременных деформаций, увеличение

трещиноватости и проницаемости угольного пласта. После импульсной обработки массива горных пород создается поток флюида посредством откачки его с помощью водяного насоса.

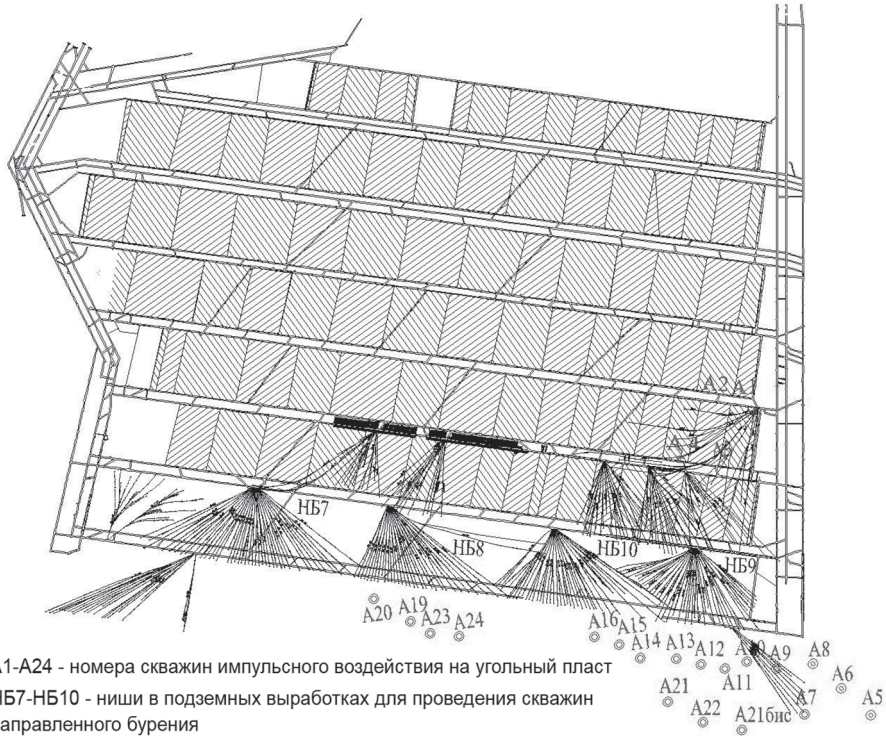
Для заблаговременной дегазации угольного пласта на экспериментальном участке одной из шахт Кузбасса с применением плазменно-импульсного воздействия было пробурено с земной поверхности 24 скважины, которые пересекли свиту угольных пластов на глубине 400 — 500 м (рис. 1). По проекту скважины располагались вне контура выработанного пространства таким образом, чтобы после 2 — 3 лет работы скважин выемка угольных пластов осуществлялась в пределах дегазированных участков.

По условиям эксперимента для отработки дегазированного пласта при ограниченных размерах лицензионного участка необходимо было соблюдение следующих технологических требований:

- обеспечение предельно допустимой концентрации в выемочном участке;
- сокращение сроков заблаговременной дегазации до одного года;
- непрерывное ведение горных работ на выемочных участках длиной до 4 км.

Для выполнения этих требований применение плазменно-импульсного воздействия на угольный пласт оказалась недостаточным, поэтому дополнительно на экспериментальном участке проводилась дегазация пласта с помощью скважин направленного бурения из подземных выработок (рис. 1).

Результаты исследований за последние 4 года систематизированы в виде таблиц по каждой скважине и обрабо-



А1-А24 - номера скважин импульсного воздействия на угольный пласт

НБ7-НБ10 - ниши в подземных выработках для проведения скважин направленного бурения

Рис. 1. Схема расположения дегазационных скважин

Рис. 1. Drainage borehole pattern design

Фрагмент результатов измерений параметров дегазации в скважине А12
Fragment of measurement results of gas drainage in borehole A12

Дата	Давление флюида в забое, атм	Давление флюида в затрубном пространстве, атм	Объем извлечения метана (нарастающим итогом), м^3	Обороты насоса, об./мин	Дебит воды, м^3/ч	Уровень флюида в скважине, м	Уровень воды над пластом, м	Дебит метана, м^3/ч
26.05.2 020	9,67	4,11	1 107 618	650	11,81	638,04	58,07	83,38
27.05.2 020	20,88	0,89	1 108 569	650	4,49	493,74	202,37	39,63
28.05.2 020	10,16	2,66	1 109 519	700	8,75	618,64	77,47	39,58
29.05.2 020	11,02	2,68	1 110 897	700	16,55	610,24	85,87	57,42
30.05.2 020	10,10	2,95	1 112 334	720	21,73	622,14	73,97	59,88
31.05.2 020	12,57	2,58	1 113 469	690	8,56	593,74	102,37	47,29
01.06.2 020	12,28	2,91	1 114 848	690	17,26	599,94	96,17	57,46
02.06.2 020	12,13	3,04	1 116 290	690	19,83	602,74	93,37	60,08
03.06.2 020	12,00	3,10	1 117 762	690	23,38	604,64	91,47	61,33
04.06.2 020	11,99	3,07	1 119 243	690	19,90	604,44	91,67	61,71
05.06.2 020	11,91	3,02	1 120 693	690	14,53	604,74	91,37	60,42
06.06.2 020	11,82	2,94	1 122 125	690	10,91	604,84	91,27	59,67
07.06.2 020	11,70	2,88	1 123 521	690	17,59	605,44	90,67	58,17
08.06.2 020	17,56	1,94	1 124 795	0	7,35	537,44	158,67	53,08
09.06.2 020	17,56	1,67	1 125 755	0	0,00	534,74	161,37	40,00
10.06.2 020	17,56	0,00	1 126 694	0	13,37	518,04	178,07	39,13

таны для количественной оценки изменения дебита скважин за весь период их эксплуатации. Общее количество суточных натурных наблюдений режимов работы дегазационных скважин превысило 2000. В каждые сутки фиксировались следующие параметры (таблица): давление флюида в забое и затрубном пространстве скважины, объем извлечения метана (нарастающим итогом), обороты насоса, дебит воды. По аналитическим зависимостям вычислялся уровень воды в скважине относительно дегазируемого пласта и дебит газа. В качестве примера в таблице приведен фрагмент результатов вычислений указанных параметров в течение 16 сут по скважине А12, в которой проведено плазменно-импульсное воздействие на пласт.

Для проведения исследований в качестве основного параметра принят дебит метана из скважин плазменно-импульсного воздействия и рассмотрено влияние на него других факторов.

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе исследований изучена динамика дебита метана за весь период работы скважины, а на втором этапе выявлены наиболее значимые факторы, влияющие на дебит метана. Учитывая большой объем выборки показателей работы скважин, для анализа приняты результаты мониторинга режимов работы трех скважин А8, А10 и А15. Выбор этих скважин обусловлен их расположением относительно границ отработанных выемочных столбов, указанных на рис. 1.

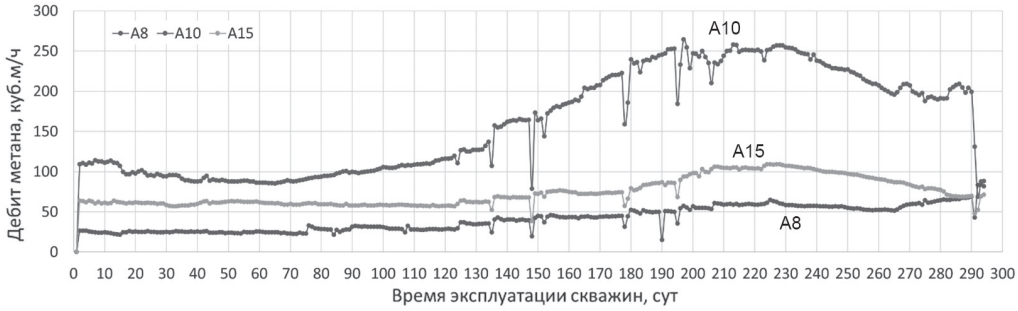


Рис. 2. Графики изменения дебита метана в зависимости от времени эксплуатации скважины
Рис. 2. Methane flow rate versus operating time of drainage borehole

На рис. 2 представлены графики изменения дебита метана по трем скважинам в период их эксплуатации. Согласно графикам в начальный период до 100—120 сут работы скважины дебит метана существенно не изменяется. Далее начинается постепенный рост дебита, и его максимум достигается в течение 200—230 сут, после этого выход метана постепенно снижается. Следует отметить, что почти на всех графиках дебит метана изменяется плавно, кроме случаев аварийных остановок насоса.

Графики изменения давления флюида в затрубном пространстве, представленные на рис. 3, подобны графикам рис. 2, однако характеризуются резкими перепадами в случае нарушений регламентов работы насосов.

Так как дебит метана из скважин плазменно-импульсного воздействия на угольный пласт через 200—230 сут снижается, а производственная необходимость интенсивной отработки пласта сохраняется, то в подземных выработках были созданы буровые ниши НБ7-НБ10 (рис. 1), из которых осуществлено бурение вееров скважин направленного бурения и проведена дополнительная предварительная дегазация пласта, в том числе в зонах, где ранее осуществлена заблаговременная дегазация через скважины с плазменно-импульсным воздействием на пласт.

Графики изменения дебита метана из скважин направленного бурения в каждой нише показаны на рис. 4. Работа скважин направленного бурения была остановлена одновременно 09.09.2021 г. перед запуском в эксплуатацию очередного очистного забоя.

При анализе эффективности комбинированной дегазации по дебиту метана из скважин плазменно-импульсного

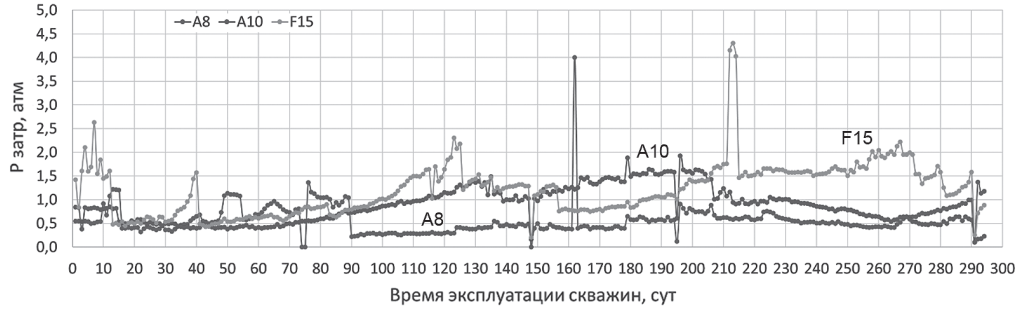


Рис. 3. Графики изменения давления флюида в затрубном пространстве, атм
Рис. 3. Variation in fluid pressure in hole clearance, atm

Рис. 4. Графики изменения дебита метана из скважин направленного бурения
Рис. 4. Change in methane flow rate in directional drilling holes

воздействия учтены время эксплуатации скважин и их пространственное положение относительно подземных выработок и скважин разных типов. Согласно рис. 1 веера скважин направленного бурения из ниш НБ7 и НБ8 расположены вне зоны влияния скважин с плазменно-импульсным воздействием на пласт. Скважины А19, А20, А23, А24 пробурены после завершения дегазации скважинами направленного бурения. Дебит метана из скважин направленного бурения вееров ниш НБ7 и НБ8 (на рис. 4 обозначены 7 и 8) оказался максимальным. Скважины направленного бурения из ниш НБ9 и НБ10 (на рис. 4 обозначены 9—10), наоборот оказались в зоне влияния заблаговременной дегазации. В этом случае дебит метана из скважин направленного бурения уменьшился почти в три раза (рис. 4). Поэтому предлагается использовать скважины заблаговременной дегазации с плазменно-импульсным воздействием только до начала проходки подготовительных выработок подготавливаемого к выемке участка пласта, а скважины направленного бурения из ниш, сформированных в подготовительных выработках, бурить одновременно с горноподготовительными работами в выемочном столбе, что позволяет сократить затраты на эксплуатацию дорогостоящих поверхностных скважин.

После завершения заблаговременной дегазации скважины плазменно-импульсного воздействия предлагается повторно использовать для дегазации выработанных пространств.

Учитывая относительно низкий дебит метана из веера скважин направленного бурения в нишах НБ9 и НБ10, предлагается сократить при комбинированном способе дегазации удельную плотность расположения скважин направленного бурения в зонах заблаговременной дегазации скважинами с плазменно-импульсным воздействием на пласт.

Заключение

На основе анализа и обработки данных натурных наблюдений предлагается следующая организация работ по применению комбинированного способа поэтапного снижения метаноносности угольных пластов:

- заблаговременная дегазации поверхностными скважинами с плазменно-импульсным воздействием на пласт в период до одного года;
- предварительная дегазация скважинами направленного бурения из оконтуривающих выработок подготавливаемого к отработке выемочного столба;

• повторное использование скважин плазменно-импульсного воздействия для дегазации выработанных пространств.

Применение апробированного на действующей шахте комбинированного способа обеспечивает снижение затрат за счет сокращения времени эксплуатации поверхностных дегазационных установок заблаговременной дегазации и сокращения в три раза количества скважин направленного бурения на участках с ранее проведенной заблаговременной дегазацией при соблюдении планового графика ведения подготовительных и очистных работ на угольной шахте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Забурдяев В. С.*, *Захаров В. Н.*, *Артемьев В. Б.*, *Ясюченя С. В.* Шахтный метан: проблемы извлечения и утилизации. — М.: «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2014. — 256 с.

2. *Качурин Н. М.*, *Воробьев С. А.*, *Качурин А. Н.* Прогноз метановыделения с поверхности обнажения угольного пласта в подготовительную выработку при высокой скорости проходки // Горный журнал. — 2014. — № 4. — С. 70—73.

3. *Колесниченко Е. А.*, *Артемьев В. Б.*, *Колесниченко И. Е.* Внезапные выбросы метана: теоретические основы. — М.: «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2013. — 232 с.

4. *Качурин Н. М.*, *Ермаков А. Ю.*, *Сенкус Вал. В.* Аэрогазодинамика очистных и подготовительных участков при отработке мощных пологих пластов. — Кемерово: АИ «Кузбассвузиздат», 2017. — 287 с.

5. *Fan C., Li S., Luo M., Mingkun W. Du, Yang Z.* Coal and gas outburst dynamic system // International Journal of Mining Science and Technology. 2017, vol. 27, no. 1, pp. 49—55.

6. *Feng Gao, Yi Xue, Yanan Gao, Zhizhen Zhang, Teng Teng, Xin Liang* Fully coupled thermo-hydro-mechanical model for extraction of coal seam gas with slotted boreholes // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2016, vol. 31, pp. 226—235.

7. *Каркашадзе Г. Г.*, *Мазаник Е. В.*, *Пащенков П. Н.* Результаты определения пластового давления, газопроницаемости и параметров сорбции угольного пласта по результатам шахтных измерений истечения метана из коротких скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 9. — С. 259—264.

8. *Имгрунд Т., Шалашинский А.* Направленное бурение — новая технология для повышения эффективности предварительной дегазации в российских угольных шахтах // Глюкауф майнинг репорт. — 2015. — № 1. — С. 16—19.

9. *Плаксин М. С. Родин Р. И.*, *Альков В. И.* Газокинетическая реакция углеметанового пласта при создании в нем трещин посредством нагнетания флюидов // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сборник научных статей. — Новокузнецк: СибГИУ, 2017. — С. 63—67.

10. *Каркашадзе Г. Г.*, *Сластунов С. В.*, *Ермак Г. П.*, *Мазаник Е. В.* Интенсификация дегазации угольного пласта на основе учета его геомеханического состояния в условиях нестационарных механических и сорбционных деформаций // Уголь. — 2015. — № 11. — С. 62—65.

11. *Чанышев А. И., Абдулин И. М.* Исследования упругого, упруго-пластичного и запредельного состояний массива горных пород вблизи выработок по данным измерений на границах // ФТПРПИ. — 2019. — № 4. — С. 27—35.

12. *Павленко М. В.* Формирование волновых возмущений через скважины в угольном массиве в виде вибрационных колебаний для создания в них газопроводящих трещин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 5. — С. 36—42.

13. *Gent Jiabo, Xu Jiang, Nie Wen, Peng Shoujian, Zhang Chaolin, Luo Xiaohang* Regression analysis of major parameters affecting the intensity of coal fnd gas out-bursts in laboratory // International Journal of Mining Science and Technology. 2017, vol. 27, pp. 327—332.

14. *Плаксин М. С.*, *Рябцев А. А.* Особенности развития динамических газопроявлений при проведении подготовительной выработки / Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сборник научных статей. — Новокузнецк: СибГИУ, 2017. — С. 67—73.

15. *Zhang Y., Underschultz J., Langhi L., Mallants D., Stran J.* Numerical modelling of coal seam depressurization during coal seam gas production and its effect on the geomechanical stability of faults and coal beds // International Journal of Coal Geology. 2018, vol. 195, pp. 1—13.

16. *Fryanov V. N.*, *Pavlova L. D.*, *Petrova O. A.*, *Shiryaev S. N.* Numerical simulation of interaction of methane filtration and rock massif deformation during mining of methane-bearing seams // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 377, pp. 1—7. DOI: 10.1088/1755-1315/377/1/012036.

17. *Цветков А. Б.*, *Павлова Л. Д.* Численное моделирование распределения метана при отработке свиты пластов // В мире научных открытий. — 2014. — № 2.1(50). — С. 815—827.

18. *Агеев П. Г.*, *Агеев Н. П.*, *Агеев Д. П.*, *Десяткин А. С.*, *Пащенко А. Ф.* Плазменно-импульсное воздействие — инновационный подход к добыче традиционных и нетрадиционный подход к добыче традиционных и нетрадиционных углеводородов и заблаговременной дегазации угольных пластов // Бурение и нефть. — 2016. — № 7-8. — С. 34—40. ГИАБ

REFERENCES

1. Zaburdyaev V. S., Zakharov V. N., Artem'ev V. B., Yasyuchenya S. V. *Shakhtnyy metan: problemy izvlecheniya i utilizatsii* [Coal mine methane: problems of extraction and recycling], Moscow, «Gornoe delo» OOO «Kimmeriyskiy tsentr», 2014, 256 p.

2. Kachurin N. M., Vorob'jov S. A., Kachurin A. N. Forecast of methane release from the surface of an outcrop of a coal seam into a development working at a high rate of penetration. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no. 4, pp. 70—73. [In Russ].

3. Kolesnichenko E. A., Artem'ev V. B., Kolesnichenko I. E. *Vnezapnye vybrosy metana: teoreticheskie osnovy* [Methane bursts: theoretical foundations], Moscow, «Gornoe delo» OOO «Kimmeriyskiy tsentr», 2013, 232 p.

4. Kachurin N. M., Ermakov A. Yu., Senkus Val. V. *Aerogazodinamika ochistnykh i podgotovitel'nykh uchastkov pri otrabotke moshchnykh pologikh plastov* [Aerogasdynamics of treatment and preparation areas during the development of thick shallow seams], Kemerovo, AI «Kuzbassvuzizdat», 2017, 287 p.

5. Fan C., Li S., Luo M., Mingkun W. Du, Yang Z. Coal and gas outburst dynamic system. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017, vol. 27, no. 1, pp. 49—55.

6. Feng Gao, Yi Xue, Yanan Gao, Zhizhen Zhang, Teng Teng, Xin Liang Fully coupled thermo-hydro-mechanical model for extraction of coal seam gas with slotted boreholes. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016, vol. 31, pp. 226—235.

7. Karkashadze G. G., Mazanik E. V., Pashhenkov P. N. Results of determining reservoir pressure, gas permeability and parameters of sorption of a coal seam based on the results of mine measurements of methane efflux from short wells. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no. 9, pp. 259—264. [In Russ].

8. Imgrund T., Shalashinskij A. Directional drilling is a new technology to improve the efficiency of preliminary degassing in Russian coal mines. *Gljukauf Majning Report*. 2015, no. 1, pp. 16—19. [In Russ].

9. Plaksin M. S. Rodin R. I., Al'kov V. I. Gas-kinetic reaction of a coal-methane seam during the creation of cracks in it by means of fluid injection. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*: sbornik nauchnykh statey [High-tech technologies for the development and use of mineral resources: collection of scientific articles], Novokuznetsk, SibGIU, 2017, pp. 63—67.

10. Karkashadze G. G., Slastunov S. V., Ermak G. P., Mazanik E. V. Intensification of degassing of a coal seam based on taking into account its geomechanical state under conditions of unsteady mechanical and sorption deformations. *Ugol'*. 2015, no. 11, pp. 62 — 65. [In Russ].

11. Chanyshev A. I. Abdulin I. M. Studies of the elastic, elastoplastic and out-of-limit states of the rock mass near the workings according to measurements at the boundaries. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2019, no. 4, pp. 27 — 35. [In Russ].

12. Pavlenko M. V. Formation of wave disturbances through wells in a coal mass in the form of vibration vibrations to create gas-conducting cracks in them. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no. 5, pp. 36 — 42. [In Russ].

13. Gent Jiabo, Xu Jiang, Nie Wen, Peng Shoujian, Zhang Chaolin, Luo Xiaohang Regression analysis of major parameters affecting the intensity of coal fnd gas out-bursts in laboratory. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2017, vol. 27, pp. 327 — 332.

14. Plaksin M. S., Ryabcev A. A. Features of the development of gas-dynamic manifestations during preparatory workings. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*: sbornik nauchnykh statey [High-tech technologies for the development and use of mineral resources: collection of scientific articles], Novokuznetsk, SibGIU, 2017, pp. 67 — 73.

15. Zhang Y., Underschultz J., Langhi L., Mallants D., Stran J. Numerical modelling of coal seam depressurization during coal seam gas production and its effect on the geomechanical stability of faults and coal beds. *International Journal of Coal Geology*. 2018, vol. 195, pp. 1 — 13.

16. Fryanov V. N., Pavlova L. D., Petrova O. A., Shiryaev S. N. Numerical simulation of interaction of methane filtration and rock massif deformation during mining of methane-bearing seams. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 377, pp. 1 — 7. DOI:10.1088/1755-1315/377/1/012036.

17. Cvetkov A. B., Pavlova L. D. Numerical modeling of methane distribution during the development of a suite of seams. *V mire nauchnykh otkrytiy*. 2014, no. 2.1(50), pp. 815 — 827. [In Russ].

18. Ageev P. G., Ageev N. P., Ageev D. P., Desjatkin A. S., Pashhenko A. F. Plasma pulse impact — an innovative approach to conventional mining and an uncon-ventional approach to conventional and unconventional hydrocarbon production and early degassing of coal seams. *Burenie i neft'*. 2016, no. 7-8, pp. 34 — 40. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фрянов Виктор Николаевич[1] — д-р техн. наук,
профессор, зав. кафедрой, e-mail: zzz338@rdtc.ru,
ORCID ID: 0000-0001-6803-458X,
Павлова Лариса Дмитриевна[1] — д-р техн. наук,
профессор, директор института
Информационных технологий и автоматизированных
систем, e-mail: ld_pavlova@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2480-8165,
Исаченко Алексей Александрович — канд. техн. наук,
заместитель главного инженера по технологии,
Филиал АО «ОУК «Южкузбассуголь» —
Шахта «Ерунаковская-8», 654006,
e-mail: aleksey.isachenko@evraz.com,
Корнев Евгений Сергеевич[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: ekornev@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1811-6007,
[1] Сибирский государственный индустриальный университет.
Для контактов: Корнев Е.С., e-mail: ekornev@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.N. Fryanov[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of Chair, e-mail: zzz338@rdtc.ru,
ORCID ID: 0000-0001-6803-458X,
L.D. Pavlova[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director,
Institute of Computer Technologies
and Automated Systems, e-mail: ld_pavlova@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2480-8165,
A.A. Isachenko, Cand. Sci. (Eng.),
Deputy Chief Engineer of Technology,
Branch Mine «Erunakovskaya-VIII»
JSC «OUK «Yuzhkuzbassugol»,
654006, Novokuznetsk, Russia,
e-mail: aleksey.isachenko@evraz.com,
E.S. Kornev[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: ekornev@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1811-6007,
[1] Siberian State Industrial University (SibSIU),
654007, Novokuznetsk, Russia,
Corresponding author: E.S. Kornev, e-mail: ekornev@yandex.ru.

Получена редакцией 21.01.2022; получена после рецензии 11.07.2022; принята к печати 10.08.2022.
Received by the editors 21.01.2022; received after the review 11.07.2022; accepted for printing 10.08.2022.

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В ГОРНОМ МАШИНОСТРОЕНИИ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОРНЫХ МАШИН

(2022, № 5, СВ 3, 16 с. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_3_13)

Шибанов Д.А.[1] — канд. техн. наук, доцент; *Иванов С.Л.*[1] — д-р техн. наук, профессор,
Иванов А.А. — студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,
[1] Санкт-Петербургский горный университет.

В концепции цифрового карьера основное оборудование рассматривается как переменная в функции основного технологического процесса (ОТП). Для повышения эффективности функционирования ОТП карьера с точки управления жизненным циклом оборудования, его остаточным ресурсом, графиком технического обслуживания и ремонта, необходимо рассматривать машину как отдельную функцию. Это обуславливает необходимость разработки цифровых двойников горных машин (ЦД ГМ) как инструмента повышения эффективности их эксплуатации. Приведены общие представления о ЦД ГМ, реализованные примеры ЦД машины и оборудования в горном машиностроении; указаны направления развития функционала карьерного экскаватора при условии разработки его ЦД.

Ключевые слова: цифровой двойник, карьерный экскаватор, имитация нагрузок, оптимизация рабочих параметром, проектирование новых моделей, техническое обслуживание и ремонт.

DIGITAL DOUBLES IN MINING ENGINEERING AS A TOOL TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF MINING MACHINERY OPERATION

D.A. Shibanov[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor; *S.L. Ivanov*[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
A.A. Ivanov, Student, G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University, 455000, Magnitogorsk, Russia,
[1] Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

In the concept of a digital quarry, the main equipment is considered as a variable in the function of the main technological process (MTP). To improve the efficiency of the operation of the MTP quarry from the point of view of managing the life cycle of equipment, its residual resource, maintenance and repair schedule, it is necessary to consider the machine as a separate function. This necessitates the development of digital counterparts of mining machines (DC MM) as a tool to improve the efficiency of their operation. The general ideas about the DC MM, implemented examples of the DC of machinery and equipment in mining engineering are given; directions for the development of the functional of a quarry excavator are indicated, subject to the development of its DC.

Key words: digital twin, quarry excavator, load simulation, optimization of working parameters, design of new models, maintenance and repair.