

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ДЕГАЗАЦИОННЫХ СКВАЖИН

Д.И. Блохин¹, И.М. Закоршменный¹, С.С. Кубрин¹, А.С. Кобылкин¹,
Е.Э. Поздеев², А.Н. Пушилин³

¹ Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия,
e-mail: dblokhin@yandex.ru

² ООО «Цифровые Технологии и Платформы», Москва, Россия

³ НИИОСП им. Н.М. Герсеванова – структурное подразделение
АО «НИЦ «Строительство», Москва, Россия

Аннотация: Представлены результаты исследований по оценке влияния высокointенсивной отработки газоносных угольных пластов в сложных горно-геологических условиях на эффективность работы систем дегазации выемочного участка. На основе данных шахтных наблюдений подтверждены факты роста локального газовыделения из углепородного массива, вызванного повышением коллекторских свойств горных пород под воздействием процессов пучения. Показано, что указанные деформационные процессы также существенно влияют на устойчивость дегазационных скважин, в первую очередь на участках их пересечений со слоями слабых водонасыщенных пород. По результатам натурных исследований сделан вывод о необходимости учета такого влияния при оценке функционального состояния дегазационных скважин. Описано построение схемы компьютерного моделирования изменений напряженно-деформированного состояния слоистого углепородного массива, включающего дегазационную скважину, при различных положениях очистного забоя. Для условий шахты им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс» проведены численные эксперименты методом конечных элементов в программном комплексе (ПК) Plaxis. Для реализации нелинейного характера деформирования углепородного массива использована упругопластическая модель Кулона-Мора. Обоснована целесообразность проведения корректировки схем дегазации для выемочных участков угольных шахт с условиями отработки, аналогичным рассматриваемым.

Ключевые слова: углепородный массив, горные выработки, метан, дегазационные скважины, напряжения, деформации, устойчивость, численные методы, PLAXIS.

Для цитирования: Блохин Д. И., Закоршменный И. М., Кубрин С. С., Кобылкин А. С., Поздеев Е. Э., Пушилин А. Н. Численные исследования влияния изменений напряженно-деформированного состояния углепородного массива на устойчивость дегазационных скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 11. – С. 17–32. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_17.

Numerical research of effect of stress-strain changes on stability of gas drainage wells in coal-rock mass

D.I. Blokhin¹, I.M. Zakorshmenniy¹, S.S. Kubrin¹, A.S. Kobylykin¹, E.E. Pozdeev², A.N. Pushilin³

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: dblokhin@yandex.ru

² LLC Digital Technologies and Platforms, Moscow, Russia

³ Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures
JSC Research Center of Construction, Moscow, Russia

Abstract: The article presents the studies on the effect exerted by high-rate mining of gas-bearing coal seams in difficult geological conditions on gas drainage performance in longwalls. The data of mine observations confirm an increase in local gas release from coal-rock mass due to the rise in the reservoir characteristics of rocks under impact of swelling. It is shown that swelling processes also substantially affect stability of gas drainage wells, primarily at intersections of the wells with the layers of weak water-saturated rocks. From the field observations, it is concluded on the necessity of taking into account this influence in the evaluation of gas drainage wells. The article describes the circuit of computer-aided modeling of the stress-strain changes in stratified coal-rock mass with a gas drainage well at different positions of longwall face. The numerical experiments using the finite element method and PLAXIS software application are carried out for the conditions of Kirov Mine, SUEK-Kuzbass. The nonlinear behavior of coal-rock mass deformation is depicted using the Mohr-Coulomb elastoplastic model. The justification is provided for the expedience of correction of gas drainage patterns for coal longwalls which occur in the similar mining conditions as in the presented research.

Key words: coal-rock mass, roadways, methane, gas drainage wells, stresses, strains, stability, numerical methods, PLAXIS.

For citation: Blokhin D. I., Zakorshmenniy I. M., Kubrin S. S., Kobylykin A. S., Pozdeev E. E., Pushilin A. N. Numerical research of effect of stress-strain changes on stability of gas drainage wells in coal-rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(11):17-32. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_17.

Введение

В настоящее время благодаря применению на угледобывающих предприятиях эффективных схем вентиляции и дегазации, а также внедрению современных систем газового контроля вероятность возникновения катастрофических аварийных происшествий, обусловленных метановым фактором, неуклонно снижается [1 – 4]. Тем не менее ситуации, когда значения параметров рудничной атмосферы приближаются к предельным нормативным величинам, характер-

изующим загазованность призабойного пространства, что влечет остановку технологического оборудования, остаются существенной причиной снижения производительности угольных шахт [5, 6]. Поэтому обеспечение устойчивого и эффективного функционирования систем дегазации по-прежнему остается одной из приоритетных задач подземной угледобычи.

Одним из важнейших факторов, влияющих на ритмичность работы очистного забоя, являются геомеханические процес-

сы, сопутствующие интенсивной отработке угольных пластов и тесно связанные с изменениями метанообильности выемочных участков [7, 8]. Так, фиксируемое с увеличением глубины ведения горных работ пучение почвы вызывает повышение коллекторских свойств горных пород, проявляющееся в изменении их трещиноватости, что становится одной из причин роста локального газовыделения из углепородного массива [9–12]. При этом характер пучения определяется степенью набухания горных пород при увеличении их влажности [10, 13].

В качестве практического примера, характеризующего указанную геотехническую ситуацию, рассмотрим результаты натурных наблюдений в лаве 24–64 пласта Болдыревский шахты им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс», полученные при проведении исследований по установлению влияния высокointен-

сивной отработки газоносных угольных запасов на параметры рудничной атмосферы.

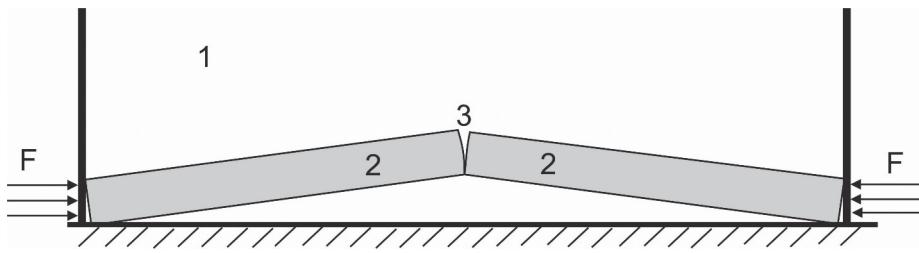
На рис. 1 представлена схема ежедневных (в период с 24.09.2022 по 22.10.2022) изменений числа и местоположения источников локальных выделений метана, координаты которых привязаны к местам расположения секций механизированной крепи. Как видно из представленной на рис. 1 схемы, количество мест локальных источников выделения метана увеличивается с течением времени, т.е. увеличивается и нарушенность горных пород, слагающих почву выработки, рост которой обуславливает наблюданную активизацию газовыделения.

Известно, что описываемые негативные явления наиболее часто наблюдаются при наличии в почве отрабатываемых пластов одного или нескольких слоев прочных пород, лежащих на бо-



Рис. 1. Схема расположения локальных источников выделения метана в почве лавы 24–64 пласта Болдыревский шахты им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс», в период 24.09.2022 – 22.10.2022

Fig. 1. The scheme of the local sources of methane release in the lava floor of the 24–64 formation of the Boldyrevsky mine named after S.M. Kirov JSC «SUEK-Kuzbass», in the period 24.09.2022 – 22.10.2022



1 – выработка; 2 – породный слой непосредственной почвы; 3 – трещина отрыва

Рис. 2. Схема выпирания пород почвы
Fig. 2. The scheme of bulging floors rocks

ле слабых породах [13]. Простейшим геомеханическим обоснованием указанного факта может служить модель изгиба породного слоя в почве выработки с образованием трещины отрыва [14]. В рамках такой модели слои пород почвы рассматриваются как балки бесконечной длины на упругом основании, разгруженные сверху и испытывающие боковое давление. При определенной величине пролета породного слоя почвы он выгибается с образованием в центральной части одной или нескольких трещин отрыва. Схема описанной геомеханической модели показана на рис. 2.

Таким образом, можно предположить, что и зоны максимального изменения нарушенности пород почвы в аналогичных условиях деформирования должны наблюдаться в центральной части призабойного пространства, что в целом и подтверждается результатами проведенных натурных наблюдений. Следует отметить, что горно-геологические условия описываемого выемочного участка характеризуются наличием в породах почвы близлежащего (до 25 м) газоносного угольного пласта, также влияющего на интенсивность газовыделения [15].

Дегазационная система шахты им. С.М. Кирова включает в себя широкую сеть скважин, в т.ч. и направленных в почву [2, 15]. Тем не менее результаты газовой съемки показывают, что фиксируемые непосредственно у почвы зна-

чения концентрации метана периодически превышают нормативные значения. Отсюда можно сделать вывод о снижении эффективности функционирования имеющихся дегазационных скважин и высказать предположение о потере ими устойчивости в силу процессов пучения почвы, вызванных перераспределением напряжений в углепородном массиве при подвигании механизированного очистного комплекса. В рассматриваемых условиях возможность реализации такой ситуации связана с наличием в верхнем слое почвы пласта слабопрочных водонасыщенных аргиллитов, низкая прочность которых снижает устойчивость дегазационных скважин в местах пересечения ими указанного участка углепородного массива.

Задача об устойчивости дегазационных скважин в сложных горно-геологических условиях при подвигании очистного забоя не нова и рассматривалась во многих работах как российских, так и зарубежных ученых [16–20]. Однако большинство работ в указанной области рассматривают изменения напряженно-деформированного состояния дегазационных скважин, направленных в кровлю [16–18].

В настоящей работе описываются результаты численных экспериментов, проведенных с использованием средств ПК PLAXIS, позволяющие анализировать изменения напряженно-деформирован-

ного состояния углепородного массива, вмещающего скважину, пересекающую слой слабых водонасыщенных пород, с целью описания характера потери ее устойчивости в результате приближения забоя. Топологические особенности рассматриваемой геотехнической системы, а также геомеханические свойства вмещающих пород задаются исходя из данных, полученных на шахте им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс», и описываются ниже.

Постановка задачи

Значения геометрических параметров добычного участка в рассматриваемой модели соответствуют характеристикам лавы 24–64 пласта Болдыревского. Длина выемочного столба – 2425 м, лавы – 350 м. Выемочный столб подготовлен парными штреками, расстояние между которыми составляет 40 м. Глубина отработки лавы изменяется от 610 м у монтажной камеры до 485 м у линии доработки. Угол падения по прилегающим выработкам изменяется от 2° до 6° . Средняя мощность пласта 2,3 м, вы-

нимаемая – 2,39 м. Схема выемочного участка представлена на рис. 3.

Имеющий сложное геологическое строение, пласт Болдыревский состоит из трех угольных пачек, разделенных двумя породными прослойками. Над пластом по всей его площади распространена «ложная» кровля мощностью до 0,30 м, представленная переслаиванием темно-серого аргиллита и угля. По свойствам «ложная» кровля слабая ($f = 2,5$).

Непосредственная кровля пласта – аргиллит мощностью 1,5–2 м, средней крепости ($f = 3–4$). Основная кровля – алевролит ($f = 3–4,5$) и крепкий песчаник ($f = 6–7$) суммарной мощностью до 31 м. Первичный шаг обрушения непосредственной кровли – 28 м, последующий шаг обрушения непосредственной кровли – 9 м.

Ложная почва пласта представлена аргиллитами углистыми слабыми, склонными к размоканию и выдавливанию. Крепость слоя $f = 2–2,5$, мощность – 0,05–0,35 м. Непосредственная почва пласта – алевролиты ($f = 3–4$) мощностью 3–5 м и мелкозернистый песча-

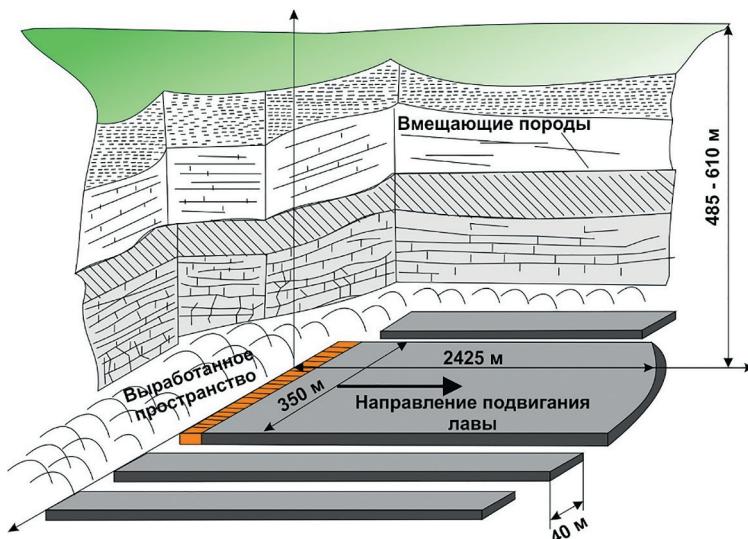


Рис. 3. Схема выемочного участка
Fig. 3. The scheme of the excavation site

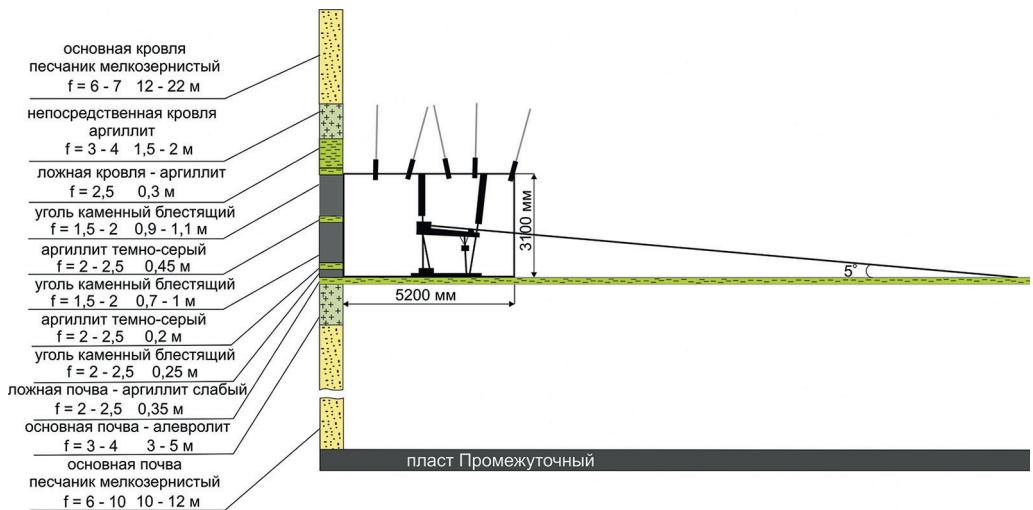


Рис. 4. Схема размещения дегазационной скважины, совмещенная с геологическим разрезом пласта
Fig. 4. The scheme of the degassing well combined with the geological section of the formation

ник ($f = 6 - 10$) суммарной мощностью до 17 м. Ниже расположен угольный пласт Промежуточный мощностью 1,5 м [15].

Геологический разрез исследуемого участка углепородного массива представлен на рис. 4.

Также на рис. 4 представлена совмещенная с геологическим разрезом схема размещения дегазационной скважины в подготовительной горной выработке прямоугольного сечения, закрепленной анкерной крепью. В борту выработки расположено устье скважины диаметром 96 мм длиной 120 м, направленной в почву разрабатываемого угольного пласта. Скважина пересекает слой ложной почвы мощностью до 0,35 м увлажненных аргиллитов под углом 5°.

Предполагается, что при приближении забоя лавы в местах пересечения дегазационной скважиной пород ложной почвы деформации контура ее ствола приобретают критические значения, приводящие к обрушению стенок. Задача описываемых исследований – получить картину изменения напряженно-деформированного состояния указанных

участков углепородного массива и оценить уровень поврежденности ствола скважины при различных положениях забоя.

Для решения многих задач прикладной геомеханики, в том числе и для выполнения расчетов по оценке влияния горных работ на существующие выработки различного назначения (включая скважины), эффективно используются подходы численного моделирования [8, 18, 21]. Одним из общепринятых подходов уже давно являются методы численного моделирования, основанные на использовании нелинейных моделей механики сплошных сред [22]. В частности, указанные подходы реализованы в программном комплексе PLAXIS [23 – 25].

Рассматриваемая задача решается методом конечных элементов в ПК PLAXIS с использованием нелинейной упругопластической модели Мора-Кулона [22, 25]. Хорошо известная модель Мора-Кулона (Mohr-Coulomb) может рассматриваться как приближение первого порядка к реальному описанию деформационных процессов в массиве горных пород, тем не менее такой подход позво-

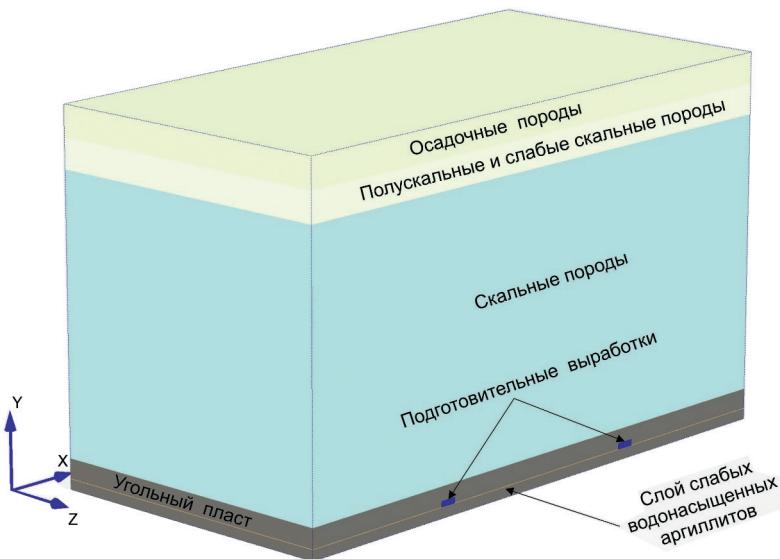


Рис. 5. Общий вид модели массива
Fig. 5. General view of the array model

ляет дать достаточно реалистичное представление о характере распределения искомых параметров, в т.ч. и при сложном геологическом строении массива.

Описываемые численные эксперименты включают в себя расчеты как в 3D-, так и в 2D-постановках. Расчет в рамках 3D-модели позволяет получить общие закономерности изменений напряженно-деформируемого состояния углепородного массива при различных положениях очистного забоя, в частности, оценить максимальные деформации локального участка, включающего дегазационную скважину. Дальнейшие расчеты проводятся в 2D-постановке, которая с учетом результатов первого этапа моделирования позволяет детализировать характер изменения во времени геометрических параметров контура скважины в местах ее сопряжения со слоем слабых пород, а значит, и отслеживать ее функциональную сохранность.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе исследований построена геометрическая 3D-модель угле-

породного массива от уровня дневной поверхности до уровня 20 м ниже подошвы очистного забоя (рис. 5). Общие геометрические размеры моделируемого объема массива: 600×1200 м – в плане, 600 м – высота. Модель также предполагает устройство в рассматриваемом объеме двух параллельных выработок на расстоянии 350 м в плане и трех дегазационных скважин (две со стороны одного штрека и одна – со стороны другого) (см. рис. 6).

Как следует из рис. 5, для упрощения вычислений в модельных расчетах рассматривалось 5 элементов, представляющих собой геоматериалы с различными физико-механическими свойствами, значения которых соответствуют усредненным величинам горных пород, составляющих геологическую структуру, представленную на рис. 3.

Значения используемых в расчетах деформационно-прочностных характеристик различных компонентов рассматриваемой геотехнической системы представлены в таблице (названия приведенных типов геоматериалов соот-

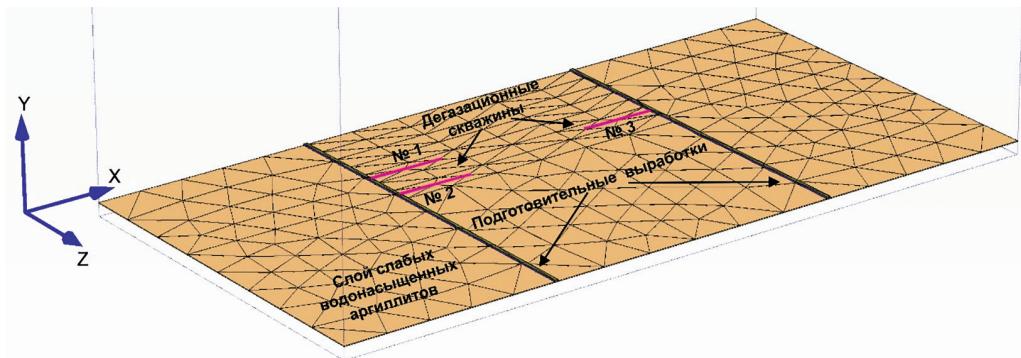


Рис. 6. Конструкционные элементы модели (срез трехмерной модели в уровне устьев дегазационных скважин)

Fig. 6. Structural elements of the model (a slice of a three-dimensional model at the level of the mouths of degassing wells)

ветствуют терминологии, принятой в описании ПК PLAXIS).

В рамках описываемой расчетной схемы было выполнено поэтапное моделирование напряженно-деформированного состояния отрабатываемого угольного пласта для 4 участков длиной 10 м каждый с последовательным приближением к дегазационным скважинам (рис. 7 и 8). Значение длины участков выбрано приблизительно равным шагу обрушения непосредственной кровли в лаве 24–64 пласта Болдыревский шахты им. С.М. Кирова. Всего рассматривается 5 этапов моделирования, при этом 1-й этап соответствует моменту времени,

предшествующему началу ведения горных работ на участке № 1. На финальном этапе моделирования проводятся расчеты для участка № 4, прилежащего к области пласта, вмещающей ближайшую дегазационную скважину (скважина № 1). В расчетную схему математического моделирования величины деформационно-прочностных параметров геоматериалов, заполняющих выработанное пространство, назначались в два раза ниже соответствующих показателей пород основной кровли (элемент № 3 в таблице). Скважины представлены в виде цилиндрических элементов, заполненных материалом со значениями физико-

Деформационно-прочностные характеристики различных компонентов

углекородного массива

Deformation properties and strength characteristics of different components of coal-rock mass

№	Тип геоматериала	Плотность ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$	Модуль упругости, E , МПа	Коэффициент Пуассона, $v \cdot 10^{-3}$	Предел прочности на сжатие, σ_c , МПа	Сцепление C , кПа	Угол внутреннего трения ϕ , °
1	Осадочные грунты	1900	20	300	15	10	25
2	Полускальные и слабые скальные породы	2200	50	250	25	100	25
3	Скальные породы	2700	300	200	50	500	50
4	Угольный пласт	2000	200	200	15	100	50
5	Слабые аргиллиты	2400	10	350	20	30	20

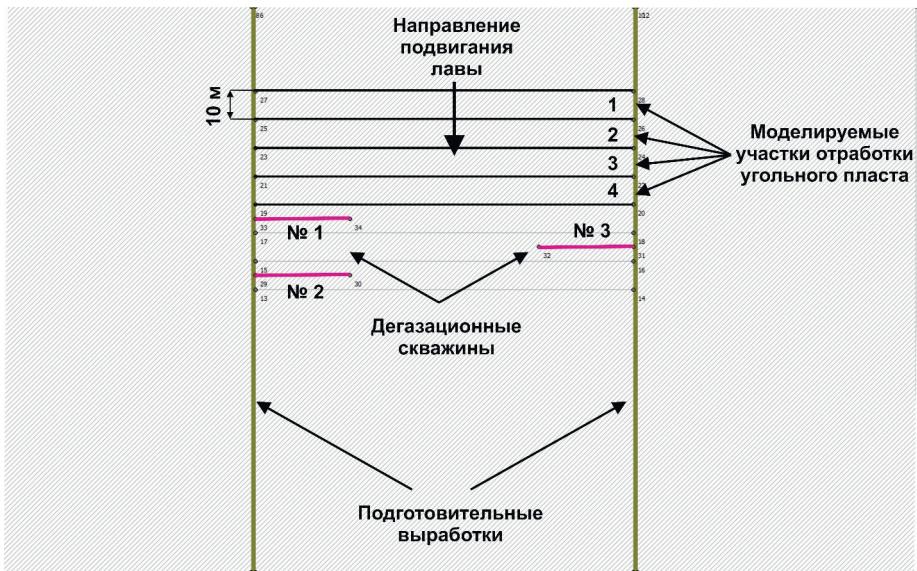


Рис. 7. Этапы моделирования напряженно-деформированного состояния отрабатываемого угольного пласта (проекция трехмерной модели в уровне устьев дегазационных скважин)

Fig. 7. Stages of modeling the stress-strain state of a mined coal seam (projection of a three-dimensional model at the level of the mouths of degassing wells)

механических характеристик, назначенных для выработанного пространства.

Для каждого этапа изменения напряженно-деформированного состояния получены значения перемещений скважин за счет подъема основания при снятии части напряжений (разгрузке при выработке пласта в пределах расстояния, равного шагу обрушения кровли). Выявленные максимальные значения смещений приkontурных массивов скважин

оказываются весьма существенными: около 0,37 м для скважины №1. Эпюры значений смещений скважин, соответствующие последнему этапу моделирования, представлены на рис. 9.

Далее следует переход к «плоской» модели. Для геометрической соразмерности модели и сечения скважины размеры участка породного массива приняты небольшими: 8×12 м. Диаметр сечения скважины – 0,1 м.

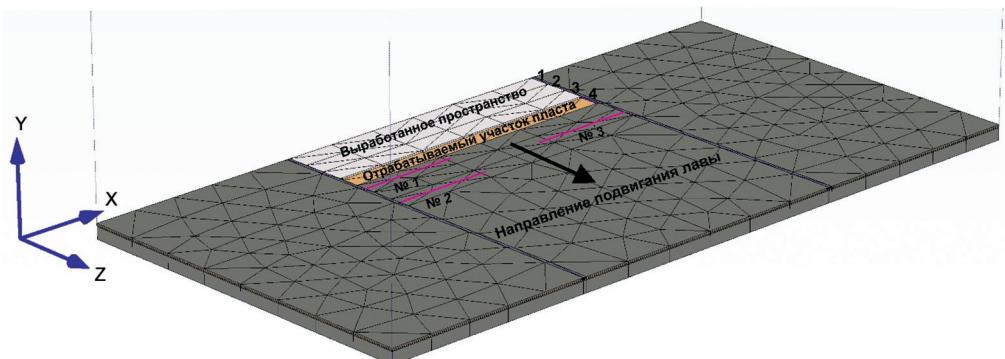


Рис. 8. Моделирование этапа отработки финального участка

Fig. 8. Modeling of the stage of working out the final section

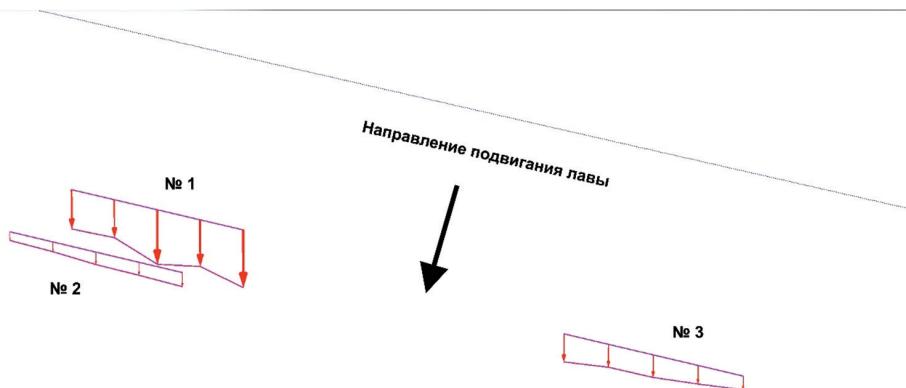


Рис. 9. Эпюры значений смещений дегазационных скважин

Fig. 9. Diagrams of displacement values of degassing wells

При этом следует отметить, что для скважин, полностью залегающих в относительно прочном однородном скальном массиве, величины изгибов оси скважины достаточно малы, чтобы вызывать напряжения, приводящие к разрывам контура и его обрушению. Более значимые величины напряжений на контуре скважины возникают, когда участок скважины расположен на границе двух слоев, характеризующихся различными деформационно-прочностными характеристиками. В этом случае возможно смятие слоя слабых горных пород (в рассматриваемом случае — слабые аргиллиты) более прочными (алевролиты).

На рис. 10, а, б представлены два подобных варианта расположения кон-

тура скважины относительно границы скального и слабого (аргиллитного) слоев массива, которые и рассматриваются на следующем этапе моделирования.

Оценка изменений параметров напряженно-деформированного состояния участка массива вблизи контура скважины в обоих описываемых случаях производится для ситуации, когда на рассматриваемом объеме задаются перемещения, значения которых назначаются исходя из результатов первого (3D) этапа моделирования. Так, для обоих случаев в качестве расчетных значений задаваемых перемещений принято максимальное из полученных значений «поднятия» скважины № 1 (0,37 м). Результатом моделирования являются распределения

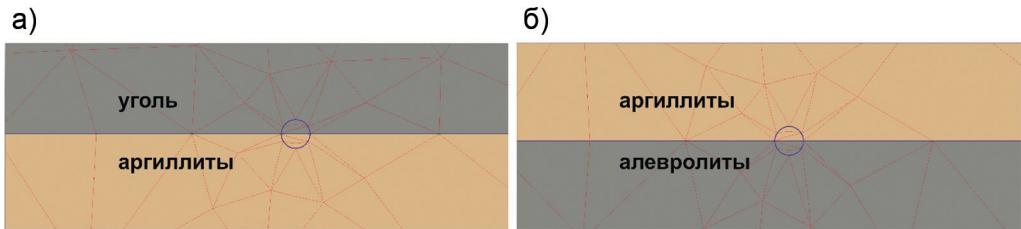


Рис. 10. Варианты расположения контура скважины относительно границы различных слоев углепородного массива: граница между угольным пластом и слоем слабых аргиллитов (а); граница между слоем слабых аргиллитов и основной почвой (алевролиты) (б)

Fig. 10. Options for the location of the well contour relative to the boundary of the various layers of the carboniferous massif: the boundary between a coal seam and a layer of weak mudstones (a); the boundary between the layer of weak mudstones and the main soil (siltstones) (b)

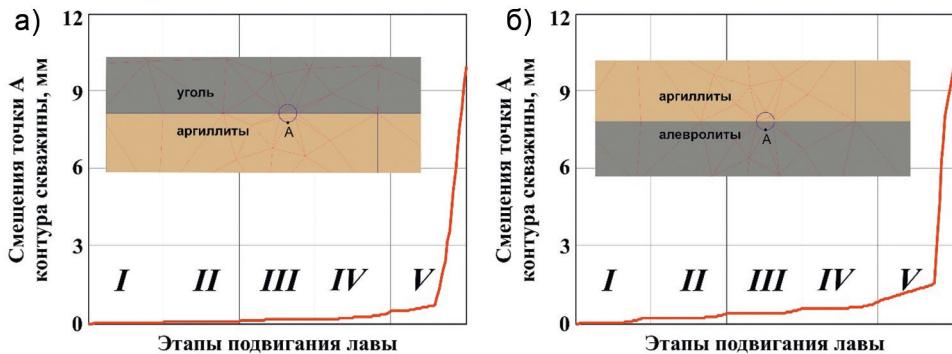


Рис. 11. Смещения точки контура дегазационной скважины на различных этапах подвигания лавы
Fig. 11. Displacement of the contour point of the degassing well at various stages of longwall face movement

значений перемещений произвольно выбранных на контуре скважины точек в зависимости от этапов подвигания забоя. Значение задаваемых перемещений участка массива, соответствующего каждому этапу, остается постоянным и, как было сказано выше, равняется 0,37 м. Указанные зависимости для точек А для двух вариантов расположения контура скважины представлены на рис. 11.

Как видно из графиков, представленных на рис. 11, а, б, смещения контура скважины для обоих приведенных случаев достигают значений более 1 мм только на последнем этапе. Однако для находящихся в водонасыщенном состоянии слабых скальных грунтов и такие значения перемещений являются критическими для устойчивого состояния бортов скважины, что, несомненно, снижает ее эксплуатационную надежность, а значит, повышает газовыделение в призабойное пространство. Следует также отметить, что длительность отработки участка пласта (5-й этап моделирования), соответствующего геометрическим размерам, принятым в рассматриваемом моделировании, составляет не менее 2 сут. Следовательно, снижение эффективности работы дегазационной системы выемочного участка на такой относительно длительный срок может привести к дополнительным остановкам технологи-

ческого оборудования, что в конечном счете ведет к снижению интенсивности общешахтных работ.

Заключение

Фиксируемая при отработке лавы 24–64 пласта Болдыревский шахты им. С.М. Кирова активизация газовыделения в призабойное пространство может быть объяснена процессами пучения почвы угольного пласта, инициируемыми подвиганием механизированного комплекса. Указанные процессы также являются геомеханической предпосылкой для объяснения снижения эффективности используемой дегазационной схемы скважин, пробуренных в почву и пересекающих слои слабых водонасыщенных пород, чьи низкие прочностные и деформационные характеристики обуславливают обрушение стенок скважин.

Построенная геомеханическая модель углепородного массива в полной мере отражает основные особенности его строения, подвигание забоя лавы и технологические параметры ведения горных работ. При этом учитывается, что обрушенные породы кровли лавы заполняют выработанное пространство и с учетом разуплотнения формируют техногенную геосреду, которая также включается в расчетную схему математического моделирования.

Результаты моделирования демонстрируют существенные величины значений смещений приконтурных областей скважин по мере подвигания лавы, что приводит к потере ими устойчивости, в первую очередь в зонах пересечения слоев слабых скальных пород.

Результаты проведенных натурных измерений и численных экспериментов указывают на необходимость учета влияния горно-геологических условий на функциональное состояние дегазационных скважин. В связи с этим для участков с условиями отработки, аналогичными рассматриваемым, представляется целесообразным проведение корректировки схем дегазации, связанное с изменением числа и направления бурения сква-

жин, длины обсаженных участков и т.д. Кроме того, на таких участках должны быть реализованы и дополнительные, помимо предусмотренных стационарными системами газового контроля, замеры значений параметров рудничной атмосферы. Своевременная реализация указанных мероприятий сможет существенно повысить уровень промышленной безопасности высокointенсивной подземной добычи угля в сложных горно-геологических условиях.

Авторы признательны проф. В.И. Шейнину (НИИОСП им. Н.М. Герсанова – АО «НИЦ «Строительство») за внимание к работе и помочь в постановке задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сластунов С. В., Ютяев Е. П., Мазаник Е. В., Садов А. П., Понизов А. П. Обеспечение метанобезопасности шахт на основе глубокой дегазации угольных пластов при их подготовке к интенсивной разработке // Уголь. – 2019. – № 7. – С. 42 – 47. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-42-47.
2. Сластунов С. В., Коликов К. С., Садов А. П., Хаутиев А. М.-Б., Комиссаров И. А. Обеспечение безопасной и интенсивной разработки газоносных угольных пластов на основе их комплексной дегазационной подготовки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 2. – С. 152 – 166. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_152.
3. Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Куликова Е. Ю. Иерархическая структура аэрогеологических рисков в угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 276 – 285. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-276-285.
4. Баловцев С. В. Аэрологические риски высших рангов в угольных шахтах // Горные науки и технологии. – 2022. – Т. 7. – № 4. – С. 310 – 319. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-08-18.
5. Закоршменный И. М., Кубрин С. С. Оценка рисков нарушения технологических процессов в очистном забое по фактору проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № S65. – С. 38 – 46. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-65-38-46.
6. Kopylov K. N., Kubrin S. S., Blokhin D. I. The simulation of the excavation sites of coal mines / Mining Goes Digital – Proceedings of the 39th international symposium on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry. London: Taylor & Francis Group. 2019, pp. 473 – 480. DOI: 10.1201/9780429320774-54.
7. Шинкевич М. В., Плаксин М. С. Связь геомеханики и метанообильности выработок при ведении подземных горных работ // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – № 5. – С. 15 – 24. – DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-15-23.
8. Захаров В. Н., Шляпин А. В., Трофимов В. А., Филиппов Ю. А. Изменение напряженно-деформированного состояния углепородного массива при отработке угольного пласта//

Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 9. – С. 5 – 24. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-5-24.

9. Смирнов А. В., Захаров В. Н., Харченко А. В. Геомеханическая модель процесса всучивания пород почвы в выработках угольных шахт // Горный журнал. – 2017. – № 11. – С. 33 – 36. DOI: 10.17580/gzh.2017.11.06.

10. Казанин О. И., Сидоренко А. А., Ильинец А. А., Васильев В. Ф. Численные исследования пучения почвы штреков при применении разгрузочных щелей на шахте «Талдинская-Западная 2» // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2018. – № 3. – С. 179 – 187.

11. Джииоева А. К., Бригидя В. С. Пространственная нелинейность динамики метано-выделения в подземных скважинах для устойчивого развития геотехнологий // Записки Горного института. – 2020. – Т. 245. – С. 522 – 530. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.3.

12. Zhai J., Liu D., Li G., Wang F. Floor failure evolution mechanism for a fully mechanized longwall mining face above a confined aquifer // Advances in Civil Engineering. 2019, vol. 2019, article 8036928. DOI: 10.1155/2019/8036928.

13. Malkowski P., Ostrowski L., Stasica J. Modeling of floor heave in underground roadways in dry and waterlogged conditions // Energies. 2022, vol. 15, no. 12, article 4340. DOI: 10.3390/en15124340.

14. Трубецкой К. Н., Иофис М. А., Есина Е. Н. Особенности геомеханического обеспечения освоения месторождений, склонных к газодинамическим явлениям // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 3. – С. 64 – 71. DOI: 10.1134/S1062739115030114.

15. Забурдяев В. С., Новикова И. А., Сметанин В. С. Эффективность дегазации выемочных участков при отработке сближенных угольных пластов на шахте им. С.М. Кирова (ОАО «СУЭК-Кузбасс») // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 10. – С. 13 – 19.

16. Бригидя В. С., Голик В. И., Дмитрак Ю. В., Габараев О. З. Обеспечение устойчивости подрабатываемых наклонных дегазационных скважин при интенсивной разработке свит газоносных угольных пластов // Записки Горного института. – 2019. – Т. 239. – С. 497 – 501. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.497.

17. Бригидя В. С., Голик В. И., Дмитрак Ю. В., Габараев О. З. Учет влияния ситуационных геомеханических условий для совершенствования дегазации подрабатываемого массива горных пород // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – № 2. – С. 279 – 288.

18. Захаров В. Н., Трофимов В. А., Филиппов Ю. А., Шляпин А. В. О дегазации углепородного массива в кровле отрабатываемого угольного пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 11. – С. 20 – 36. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_20.

19. Zhao X., Wang J., Mei Y. Analytical model of wellbore stability of fractured coal seam considering the effect of cleat filler and analysis of influencing factors // Applied Sciences. 2020, vol. 10, no. 3, article 1169. DOI: 10.3390/app10031169.

20. Hawkes C. D. Assessing the mechanical stability of horizontal boreholes in coal // Canadian Geotechnical Journal. 2011, vol. 44, no. 7, pp. 797 – 813. DOI: 10.1139/t07-021.

21. Трофимов В. А., Кубрин С. С., Филиппов Ю. А., Харитонов И. Л. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния вмещающего массива и пологого мощного угольного пласта при завершении отработки выемочного столба // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 8. – С. 42 – 56. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-42-56.

22. Brinkgreve R. B. J., Bakker H. L. Non-linear finite element analysis of safety factors / Proceedings of the 7th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Cairns, Australia, 1991, pp. 1117 – 1122.

23. Sas I. E., Cherepetskaya E. B., Pavlov I. A. Solving problems in geomechanics: Comparison of the Fidesys strength analysis system and the Plaxis software package // Key Engineering Materials. 2017, vol. 755, pp. 328 – 332. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.328.
24. Кобылкин С. С., Пугач А. С. Методика прогноза горных ударов и выбора безопасного направления фронта очистных работ // Горные науки и технологии. – 2022. – № 7(2). – С. 126 – 136. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-2-126-136.
25. Wongchana P., Jitsangiam P. Experimental investigation and modelling of claystone from Mae Moh Coal Mine, Thailand // Key Engineering Materials. 2020, vol. 841, pp. 155 – 160. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.841.155. [ГИАБ](#)

REFERENCES

1. Slastunov S. V., Yutyaev E. P., Mazanik E. V., Sadov A. P., Ponizov A. V. Ensuring methane safety of mines on the basis of deep degassing of coal seams in their preparation for intensive development. *Ugol'*. 2019, no. 7, pp. 42 – 47. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-7-42-47.
2. Slastunov S. V., Kolikov K. S., Sadov A. P., Khautiev A. M.-B., Komissarov I. A. Safe and high-rate mining of gas-bearing coal with integrated preparative degassing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 2, pp. 152 – 166. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_152.
3. Balovtsev S. V., Skopintseva O. V., Kulikova E. Yu. Hierarchical structure of aerological risks in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 2, pp. 276 – 285. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-276-285.
4. Balovtsev S. V. Higher rank aerological risks in coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022, vol. 7, no. 4, pp. 310 – 319. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-08-18.
5. Zakorshmennyi I. M., Kubrin S. S. Assessment of risks of violations of technological processes due to the ventilation of coal mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. S65, pp. 38 – 46. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-65-38-46.
6. Kopylov K. N., Kubrin S. S., Blokhin D. I. The simulation of the excavation sites of coal mines. *Mining Goes Digital – Proceedings of the 39th international symposium on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry*. London: Taylor & Francis Group. 2019, pp. 473 – 480. DOI: 10.1201/9780429320774-54.
7. Shinkevich M. V., Plaksin M. S. Relationship of geomechanics and methane content of mine workings when performing underground mining operations. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2017, no. 5, pp. 15 – 24. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-15-23.
8. Zakharov V. N., Shlyapin A. V., Trofimov V. A., Filippov Yu. A. Change in stress-strain behavior of coal-rock mass during coal mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 9, pp. 5 – 24. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-5-24.
9. Smirnov A. V., Zakharov V. N., Kharchenko A. V. Numerical simulation of the process of heaving rocks in the workings of coal mines. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 11, pp. 33 – 36. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.11.06.
10. Kazanin O. I., Sidorenko A. A., Ilinets A. A., Vasiliev V. F. Numerical studies of the entries floor heave while using relieve slots in the mine «Taldinskaya-Zapadnaya 2». *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2018, no. 3, pp. 179 – 187. [In Russ].
11. Dzhioeva A. K., Brigida V. S. Spatial non-linearity of methane release dynamics in underground boreholes for sustainable mining. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 245, pp. 522 – 530. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.3.
12. Zhai J., Liu D., Li G., Wang F. Floor failure evolution mechanism for a fully mechanized longwall mining face above a confined aquifer. *Advances in Civil Engineering*. 2019, vol. 2019, article 8036928. DOI: 10.1155/2019/8036928.
13. Malkowski P., Ostrowski L., Stasica J. Modeling of floor heave in underground roadways in dry and waterlogged conditions. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 12, article 4340. DOI: 10.3390/en15124340.

14. Trubetskoy K. N., Iofis M. A., Esina E. N. Geomechanical service in mining under gas-and-dynamic phenomena. *Fiziko-tehnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2015, no. 3, pp. 64 – 71. [In Russ]. DOI: 10.1134/S1062739115030114.
15. Zaburdayev V. S., Novikova I. A., Smetanin V. S. Efficiency of degassing of dredging sites during the development of converged coal seams at the Kirov mine (JSC «SUEK-Kuzbass»). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011, no. 10, pp. 13 – 19. [In Russ].
16. Brigida V. S., Golik V. I., Dmitrak Yu. V., Gabaraev O. Z. Ensuring stability of undermining inclined drainage holes during intensive development of multiple gas-bearing coal layers. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 239, pp. 497 – 501. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.497.
17. Brigida V. S., Golik V. I., Dmitrak Yu. V., Gabaraev O. Z. The impact of situational geomechanical conditions influence to improving of the drainage rock-mass caved. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2019, no. 2, pp. 279 – 288. [In Russ].
18. Zakharov V. N., Trofimov V. A., Filippov Yu. A., Shlyapin A. V. About degassing of the coal-rocks massif in the roof of the coal seam being worked out. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 11, pp. 20 – 36. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_11_0_20.
19. Zhao X., Wang J., Mei Y. Analytical model of wellbore stability of fractured coal seam considering the effect of cleat filler and analysis of influencing factors. *Applied Sciences*. 2020, vol. 10, no. 3, article 1169. DOI: 10.3390/app10031169.
20. Hawkes C. D. Assessing the mechanical stability of horizontal boreholes in coal. *Canadian Geotechnical Journal*. 2011, vol. 44, no. 7, pp. 797 – 813. DOI: 10.1139/t07-021.
21. Trofimov V.A., Kubrin S.S., Filippov Yu.A., Kharitonov I.L. Numerical modeling of stress-strain state for host rock mass and thick gently dipping coal seam after mining completion in extraction panel. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 8, pp. 42 – 56. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-42-56.
22. Brinkgreve R. B. J., Bakker H. L. Non-linear finite element analysis of safety factors. *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Cairns, Australia, 1991, pp. 1117 – 1122.
23. Sas I. E., Cherepetskaya E. B., Pavlov I. A. Solving problems in geomechanics: Comparison of the Fidesys strength analysis system and the Plaxis software package. *Key Engineering Materials*. 2017, vol. 755, pp. 328 – 332. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.328.
24. Kobylkin S. S., Pugach A. S. Rock burst forecasting technique and selecting a safe coal face advance direction. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022, no. 7(2), pp. 126 – 136. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-2-126-136.
25. Wongchana P., Jitsangiam P. Experimental investigation and modelling of claystone from Mae Moh Coal Mine, Thailand. *Key Engineering Materials*. 2020, vol. 841, pp. 155 – 160. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.841.155.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Блохин Дмитрий Иванович¹ – канд. техн. наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: dblokhin@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-4652-661X,
Закоршмениный Иосиф Михайлович¹ – д-р техн. наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: iosif-54@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9153-673X,
Кубрин Сергей Сергеевич¹ – д-р техн. наук,
зав. лабораторией, e-mail: s_kubrin@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0490-9065,

Кобылкин Александр Сергеевич¹ — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: aleksandr@kobylkin.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1512-890X,

Поздеев Евгений Эдуардович — руководитель
направления, Департамент по цифровизации
и автоматизации угольного дивизиона,
ООО «Цифровые Технологии и Платформы»,
e-mail: pozdeevee@suek.ru,

Пушилин Андрей Николаевич — старший
научный сотрудник, e-mail: apushilin@yandex.ru,
НИИОСП им. Н.М. Герсеванова —

структурное подразделение

АО «НИЦ «Строительство»,

¹ Институт проблем комплексного освоения недр РАН.

Для контактов: Блохин Д.И., e-mail: dblokhin@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

D.I. Blokhin¹, Cand. Sci. (Eng.),

Senior Researcher,

e-mail: dblokhin@yandex.ru,

ORCID ID: 0000-0002-4652-661X,

I.M. Zakorshmenniy¹, Dr. Sci. (Eng.),

Leading Researcher,

e-mail: iosif-54@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-9153-673X,

S.S. Kubrin¹, Dr. Sci. (Eng.),

Head of Laboratory, e-mail: s_kubrin@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0002-0490-9065,

A.S. Kobylnik¹, Cand. Sci. (Eng.),

Senior Researcher,

e-mail: aleksandr@kobylkin.ru,

ORCID ID: 0000-0002-1512-890X,

E.E. Pozdeev, Head of Division,

Department for Digitalization and Automation

of the Coal Division, LLC Digital Technologies

and Platforms, 115054, Moscow, Russia,

e-mail: pozdeevee@suek.ru,

A.N. Pushilin, Senior Researcher,

Gersevanov Research Institute of Bases

and Underground Structures

JSC Research Center of Construction,

109428, Moscow, Russia,

e-mail: apushilin@yandex.ru,

¹ Institute of Problems of Comprehensive Exploitation

of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences,

111020, Moscow, Russia.

Corresponding author: D.I. Blokhin, e-mail: dblokhin@yandex.ru.

Получена редакцией 05.06.2023; получена после рецензии 03.08.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 05.06.2023; received after the review 03.08.2023; accepted for printing 10.10.2023.