

ПП837
Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)
Mining Informational and Analytical Bulletin

Mining Informational and Analytical Bulletin



ГОРНЫЙ

ИНФОРМАЦИОННО-
АНАЛИТИЧЕСКИЙ
БЮЛЛЕТЕНЬ

(НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ)

MINING INFORMATIONAL
AND ANALYTICAL
BULLETIN

(SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL)

№ 1
2023

ТЕМЫ НОМЕРА:

Геомеханика, разрушение горных пород
 Геотехнология
 Геоэкология
 Горнопромышленная геология, горная геофизика
 Горные машины
 Обогащение полезных ископаемых
 Геоинформатика
 Энергетика и энергоэффективность горной промышленности

ВЫПУСКАЕТСЯ ИЗДАТЕЛЬСТВОМ «ГОРНАЯ КНИГА» ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:

Сибирской угольной энергетической компании,
 Высшего горного совета НП «Горнопромышленники России»,
 Инвестиционного фонда поддержки горного книгоиздания,
 проект ГИАБ-3564-2023



СОДЕРЖАНИЕ

Геомеханика, разрушение горных пород	
Барях А.А., Ломакин И.С., Самоделькина Н.А., Тенисон Л.О. Оценка степени нагружения междокамерных целиков при отработке двух пластов на Верхнекамском месторождении солей.....	5
Ковалевский В.Н., Мысин А.В. Особенности функционирования трубчатых эластичных зарядов, применяемых при добыче блочного камня.....	20
Трофимов В.А., Филиппов Ю.А., Загоршнев И.М. и др. Моделирование взаимодействия сталеполимерных анкеров с массивом горных пород при различных условиях закрепления для оценки их несущей способности.....	35
Черепетская Е.Б., Безруков В.И. Оценка коэффициента трещиностойкости при циклическом воздействии температурными полями.....	49
Геотехнология	
Урбаев Д.А., Ахпашев Б.А., Галайко А.В., Новиков А.А. Разработка рекомендаций по выбору оптимальных вариантов снабжения взрывных работ при разработке золоторудных месторождений жильного типа.....	59
Геоэкология	
Миков Л.С., Шастливец Е.Л., Андрокханов В.А. Оценка эффективности рекультивации на участках разреза «Назаровский» с помощью данных дистанционного зондирования.....	70
Горнопромышленная геология, горная геофизика	
Босиков И.И., Ключев Р.В., Ревазов В.Ч., Пилиева Д.Э. Структурно-геологические особенности рудных зон юго-восточной части Сибирской платформы.....	84
Николенько П.В., Зайцев М.Г. Комплексный оптико-акустический каротаж приконтурного массива. Оборудование и физическое моделирование.....	95
Горные машины	
Юнгмейстер Д.А., Тимофеев М.И., Исаев А.И., Гасымов Э.Э. Совершенствование исполнительного органа тоннелепроходческого механизированного комплекса S-78.....	107
Обогащение полезных ископаемых	
Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Ланцова Л.Б., Гладышева О.И. Экспериментальное обоснование применения реагента цианэтилдитиокарбамата для повышения извлечения меди и серебра из лежалых хвостов Солнечного ГОКа.....	119
Расказова А.В., Секисов А.Г., Бурданов А.Е. Активационное выщелачивание упорных первичных руд Малмыжского месторождения.....	130
Геоинформатика	
Липницкий Н.А., Огородников Р.Г., Устинова Я.В. Создание имитационной модели работы подземных усреднительных складов руды рудника сложноструктурных соляных месторождений.....	142
Энергетика и энергоэффективность горной промышленности	
Сычев Ю.А., Костин В.Н., Сериков В.А., Аладин М.Е. Анализ несинусоидальных режимов в системах электроснабжения горных предприятий с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками.....	159

CONTENT

Geomechanics, Rock failure	
Baryakh A.A., Lomakin I.S., Samodelkina N.A., Tenison L.O. Loading of rib pillars in multiple seam mining at the Upper Kama salt deposit.....	5
Kovalevsky V.N., Mysyn A.V. Performance of tubular elastic charges in natural stone production.....	20
Trofimov V.A., Filippov Yu.A., Zakorshnenny I.M., etc. Modeling interaction of rock mass and chemically anchored rock bolts to assess their load-bearing capacity in different fixation conditions.....	35
Cherepetskaya E.B., Bezrukov V.I. Fracture toughness under different temperature effects.....	49
Geotechnology	
Urbayev D.A., Akhpashev B.A., Galaiko A.V., Novikov A.A. Recommendations on selecting optimized blasting supply scenarios in lode gold ore mining.....	59
Geocology	
Mikov L.S., Shastlivtsev E.L., Androkhonov V.A. Reclamation efficiency assessment at Nazarovo open pit mine using remote sensing.....	70
Mining industrial geology, Mining geophysics	
Bosikov I.I., Klyuev R.V., Revazov V.Ch., Pileva D.E. Structural and geological features of ore zones in the southeast of the Siberian Platform.....	84
Nikolenko P.V., Zaitsev M.G. Integrated acoustic and optical logging in adjacent rock mass. Equipment and physical modeling.....	95
Mining machinery	
Yungmeister D.A., Timofeev M.I., Isaev A.I., Gasymov E.E. Improvement of tunnel boring machine S-782 cutter head.....	107
Enrichment of minerals	
Matveeva T.N., Gromova N.K., Lantsova L.B., Gladysheva O.I. Experimental justification of cyanoethyl dithiocarbamate usability toward enhanced copper and silver recovery from old waste at Solnechny GOK.....	119
Raskazova A.V., Sekisov A.G., Burdonov A.E. Activation leaching of difficult primary ore at Malmyzh deposit.....	130
Geoinformatics	
Lipnitsky N.A., Ogorodnikov R.G., Ustinova Ya.V. Simulation modeling of underground blending warehouse operation at structurally complex salt deposits.....	142
Energetics and energy efficiency of mining industry	
Sychev Yu.A., Kostin V.N., Serikov V.A., Aladin M.E. Nonsinusoidal modes in power-supply systems with nonlinear loads and capacitors in mining.....	159

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ НАГРУЖЕНИЯ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ ДВУХ ПЛАСТОВ НА ВЕРХНЕКАМСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ СОЛЕЙ

А.А. Барях¹, И.С. Ломакин¹, Н.А. Самоделкина¹, Л.О. Тенисон²

¹ Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия, e-mail: bar@Mi-perm.ru

² ПАО «Уралкалий», Березники, Россия

Аннотация: Разработана процедура оценки степени нагружения междукammerных целиков, основанная на определении методами математического моделирования нормированной величины интенсивности напряжений в центре их вертикального сечения. В отличие от стандартной методики Турнера-Шевякова данный подход не ограничен простыми вариантами камерной системы разработки (выемка одиночного пласта, субгоризонтальное его залегание, каноническая форма целиков) и может быть использован в более сложных горнотехнических ситуациях. Предложенная схема расчета реализована применительно к отработке двух сильвинитовых пластов при соосном и несоосном расположении очистных камер. Установлено, что при соосной отработке двух сильвинитовых пластов использование формулы Турнера-Шевякова в целом дает заниженные значения степени нагружения междукammerных целиков. Уровень этого снижения зависит от мощности технологического междупластья и соотношения размеров очистных камер на обоих рабочих пластах. При несоосном расположении очистных камер методика Турнера-Шевякова, наоборот, обуславливает существенно завышенные оценки степени нагружения междукammerных целиков при мощности технологического междупластья менее 4 м, поскольку не учитывает разгрузку целиков, особенно в условиях подработки. Формально, полученные результаты указывают на возможность повышения извлечения руды из недр при несоосной отработке, но требуют детального геомеханического обоснования вследствие опасности обрушения целика на верхнем обрабатываемом пласте в камеру нижнего пласта.

Ключевые слова: камерная система, междукammerные целики, степень нагружения, математическое моделирование, напряженное состояние, интенсивность напряжений, прочность, разрушение.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-77-30008).

Для цитирования: Барях А. А., Ломакин И. С., Самоделкина Н. А., Тенисон Л. О. Оценка степени нагружения междукammerных целиков при отработке двух пластов на Верхнекамском месторождении солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 1. – С. 5–19. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_5.

Loading of rib pillars in multiple seam mining at the Upper Kama salt deposit

A.A. Baryakh¹, I.S. Lomakin¹, N.A. Samodelkina¹, L.O. Tenison²

¹ Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Perm, Russia, e-mail: bar@Mi-perm.ru

² Uralkali, Berezniki, Russia

Abstract: The load estimation procedure for rib pillars uses the methods of mathematical modeling to find a normalized value of shear stress intensity in the center of vertical pillar section. As distinct from the standard procedure by Turner–Shevyakov, the new approach is unlimited by simple options of an open stoping system (single seam mining, flat lying seam, canonically shaped pillars) and is applicable in complex geotechnical situations. The article describes implementation of the calculation as a case-study of two sylvinite seams in cases of in-line and off-line arrangement of stopes. It is found that in the in-line stoping in mining of two sylvinite seams, the Turner–Shevyakov formula produces generally lower estimates of loading of rib pillars. The underestimation level depends on the thickness of the seam parting and on the size ratio of stopes in both working seams. In the off-line arrangement of stopes, the Turner–Shevyakov procedure, vice versa, gives essentially overestimated loading of rib pillars when the seam parting is less than 4 m thick as the procedure neglects unloading of the pillars, especially in undermining. Formally, the research findings demonstrate feasibility of increased extraction of ore in case of the off-line stoping but need a comprehensive geomechanical validation because of the hazard of caving of the upper working seam pillar to the stoping void of the lower working pillar.

Key words: stoping system, rib pillars, loading, mathematic modeling, stress state, stress intensity, strength, failure.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 19-77-30008.

For citation: Baryakh A. A., Lomakin I. S., Samodelkina N. A., Tenison L. O. Loading of rib pillars in multiple seam mining at the Upper Kama salt deposit. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(1):5-19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_5.

Введение

Камерная и камерно-столбовая системы отработки широко применяются на рудных, угольных, калийных и соляных месторождениях. При этом инженерные методики расчетов целиков базируются на различных модификациях известной формулы Турнера-Шевякова [1], которая определяет степень их нагружения. Расчет данного показателя основывается на отношении действующей на целик на-

рузки к его несущей способности. Нагрузка определяется весом всей налегающей породной толщи, а несущая способность зависит от формы целика (отношение высоты к ширине), прочности пород и ряда структурных геологических факторов, характерных для конкретных месторождений [2 – 6]. Нормативными документами степень нагружения междукammerных целиков регламентируется и обычно не превышает 0,5, что соответствует

коэффициенту запаса несущей способности более 2. Увеличение степени нагружения целиков повышает риски прорыва пресных вод в горные выработки [7] и обуславливает более высокий уровень техногенной нагрузки на подработанную территорию [8].

Следует отметить, что в условиях полной подработки, надлежащем подборе коэффициентов, корректирующих прочность целиков, метод Турнера-Шевякова обеспечивает достаточное качество практических расчетов и с успехом уже много лет применяется в мировой горной практике [9–11]. Вместе с тем использование формулы Турнера-Шевякова ограничено простыми вариантами подземной разработки: субгоризонтальное залегание рабочих пластов, одинаковые размеры целиков, их каноническая форма и т.д. В более сложных случаях в последние годы для расчета целиков все шире применяются методы математического моделирования. При этом в рамках упругих постановок дается оценка коэффициента безопасности или степени нагружения целиков [12–14]. Несмотря на относительную простоту, этот подход позволяет сохранить для горняков-практиков привычную идеологию расчета устойчивости целиков. Используются и более сложные модели, основанные на критериях Кулона-Мора, Хука-Брауна в сочетании с различным поведением геоматериалов под нагрузкой [15–17]. В последние годы при расчете опорных целиков значительное внимание стало уделяться дискретным и гибридным методам анализа их устойчивости [18, 19]. Несмотря на очевидную их привлекательность, численная реализация этих подходов требует существенных вычислительных затрат и устойчивого параметрического обеспечения.

Целью настоящих исследований является оценка степени нагружения междокамерных целиков применительно к

отработке свиты силвинитовых пластов в условиях Верхнекамского месторождения солей (ВКМС). Необходимость этой работы обусловлена тем, что метод Турнера-Шевякова определяет степень нагружения целиков раздельно для каждого рабочего пласта и не учитывает их взаимное влияние.

Основные методические положения

На ВКМС расчет степени нагружения ленточных междокамерных целиков (C) базируется на методике Турнера-Шевякова, которая в действующем технологическом регламенте (ТР) [22] определяется следующим соотношением:

$$C = \xi \gamma H_0 \frac{a+b}{b k_f \sigma_m}, \quad (1)$$

где ξ — коэффициент, учитывающий изменение нагрузки на целики вследствие влияния различных горнотехнических факторов (пригрузка от солеотвалов, опорное давление, наличие межходовых целиков и др.); γ — объемный вес пород; H_0 — максимальное значение расстояния от земной поверхности до кровли целиков; a — ширина очистных камер; b — ширина междокамерных целиков; k_f — коэффициент формы целиков; σ_m — агрегатная прочность пород в массиве, которая вычисляется на основе эквивалентной прочности пород, слагающих целики, с использованием нескольких коэффициентов, определяющих усредненное влияние особенностей их строения и состояния (наличие масштабного фактора, глинистых прослоек, увлажнения пород и т.п.).

В работе [14] на основе анализа многовариантных вычислительных экспериментов установлена взаимосвязь между степенью нагружения целиков C , определенной по формуле (1), и нормированной величиной интенсивности напряжений $K = \sigma_i / \sigma_m$, где $\sigma_i = \sqrt{I_2(D_\sigma)}$ —

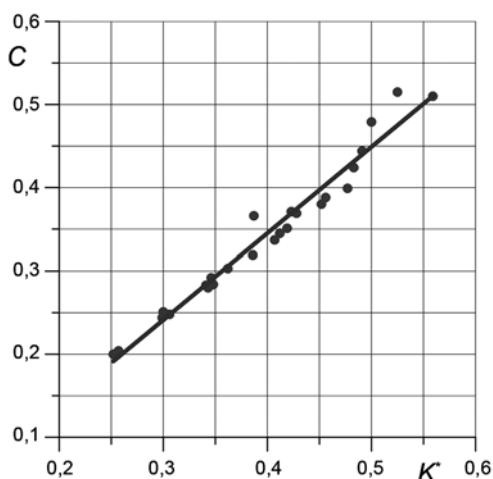


Рис. 1. Взаимосвязь степени нагружения, рассчитанной по методике Турнера-Шевякова, с нормированной величиной интенсивности напряжений в центре вертикального сечения целика

Fig. 1. The relationship between load degree, calculated by Tournaire-Shevyakov method, and tangential stress intensity normalized value in the middle of pillar vertical section

интенсивность напряжений, определяемая величиной второго инварианта девиатора напряжений.

Показано [14], что

$$C \approx K^* \quad (2)$$

где K^* — максимальная величина показателя K , достигаемая в каждом вертикальном сечении целика.

Соотношение (2) использовалось [14] для оценки степени нагружения междукамерных целиков при наклонном залегании рабочих пластов, анализе влияния на этот показатель межходовых целиков и, в целом, показало вполне приемлемую работоспособность. Вместе с тем выявились и недостатки реализации данной схемы математического моделирования, связанные, в частности, с вычислительным неудобством определения показателя K^* по изолиниям распределения в вертикальном сечении междукамерного целика максимальной нормированной величины интенсивности напряжений.

В этой связи в широком диапазоне вариации степени нагружения междукамерных целиков (от 0,2 до 0,6) выполнены численные эксперименты по установлению зависимости этого показателя от нормированной величины интенсивности напряжений, определенной в центре вертикального сечения целика. Математическое моделирование проводилось методом конечных элементов [20, 21]. Исходное распределение напряжений в ненарушенном горными работами соляном массиве принималось гидростатическим. Расчетная схема соответствовала стандартному анализу напряженного состояния однопластового горизонтально залегающего камерного блока, находящегося в условиях полной подработки. В этой связи в силу симметрии на боковых границах камерного блока горизонтальные смещения, а на нижней — вертикальные считались равными нулю. Верхняя граница, соответствующая земной поверхности, являлась свободной. В пределах рассматриваемой области задавались массовые силы интенсивностью γ_i (γ_i — удельный вес пород i -го элемента геологического разреза).

На основе результатов математического моделирования установлена устойчивая линейная взаимосвязь между нормированной величиной интенсивности напряжений, определенной в центре вертикального сечения целика, и степенью его нагружения, рассчитанной по методике Турнера-Шевякова (рис. 1). Полученная взаимосвязь аппроксимируется выражением

$$C = f(K^*) = 1,05 \cdot K^* - 0,1 \quad (3)$$

с коэффициентом корреляции 0,98.

Использование соотношения (3) открывает возможность достаточно простой оценки степени нагружения междукамерных целиков в условиях отработки, не охваченных методикой Турнера-Шевякова. Это и наклонное залегание ра-

бочих пластов, и многослойная отработка, включая несоосное расположение очистных камер, и многие другие горнотехнические случаи.

Отработка двух пластов с соосным расположением очистных камер

Рассматривалась отработка двух сильвинитовых пластов АБ и Кр// с соосным расположением камер (межосевое расстояние одинаковое для обоих пластов ($l_{AB} = l_{Kr//}$), разделенных технологическим междупластьем. В этом случае расчет степени нагружения междуканальных целиков согласно нормативному документу [22] предусматривает только возможность независимого определения этого показателя для каждого пласта. Вместе с тем при двухпластовой отработке формируется взаимосвязанная система очистных камер, которая априори должна оказывать влияние на степень нагружения целиков. В этой связи можно предположить, что основными факторами, влияющими на степень нагружения целиков, являются мощность технологического междупластья и соотношение размеров камер на пластах АБ и Кр//.

В качестве расчетных вариантов рассматривалась отработка верхнего пласта АБ комбайном «Урал-61А» (ширина камеры $a_{AB} = 3,05$ м; ширина целика $b_{AB} = 8,05$ м; вынимаемая мощность $m_{AB} = 3,1$ м) и комбайном «Урал-20Р» ($a_{AB} = 5,1$ м; ширина целика $b_{AB} = 6,0$ м;

вынимаемая мощность $m_{AB} = 3,05$ м). Выемка пласта Кр// производилась комбайном «Урал-20Р» в два хода по высоте ($a_{Kr//} = 5,1$ м; ширина целика $b_{Kr//} = 6,0$ м; вынимаемая мощность $m_{Kr//} = 5,0$ м). Результаты оценки степени нагружения междуканальных целиков, выполненные в соответствии с нормативными рекомендациями ТР, представлены в табл. 1. Здесь же для сравнения приведены расчеты степени нагружения целиков, полученные методом математического моделирования с использованием соотношения (3) для условий отработки одного рабочего пласта. Как видно, отмечается хорошее согласование результатов математического моделирования с методикой Турнера-Шевякова, адаптированной к ВКМС.

Принципиальная геомеханическая расчетная схема двухпластового камерного блока для двух вариантов отработки пласта АБ представлена на рис. 2.

На рис. 3 показано распределение нормированной величины интенсивности напряжений по сечению двухпластового камерного блока.

Результаты расчета степени нагружения междуканальных целиков при двухпластовой отработке и мощности технологического междупластья 3 м в сравнении с однопластовой (табл. 1), оценка которой выполнена в соответствии с ТР, приведены в табл. 2 (округление до 2-го знака). Анализ выполнялся для двух размеров очистных камер пласта АБ, сфор-

Таблица 1

Степень нагружения целиков при отработке одного рабочего пласта Pillar load degree for one-layer mining

Пласт	Комбайн	Глубина до кровли пласта, м	Степень нагружения целиков	
			по методике ТР	математическое моделирование
АБ	Урал-20Р	391	0,336	0,336
АБ	Урал-61А	391	0,23	0,235
Кр//	Урал-20Р	397	0,382	0,381

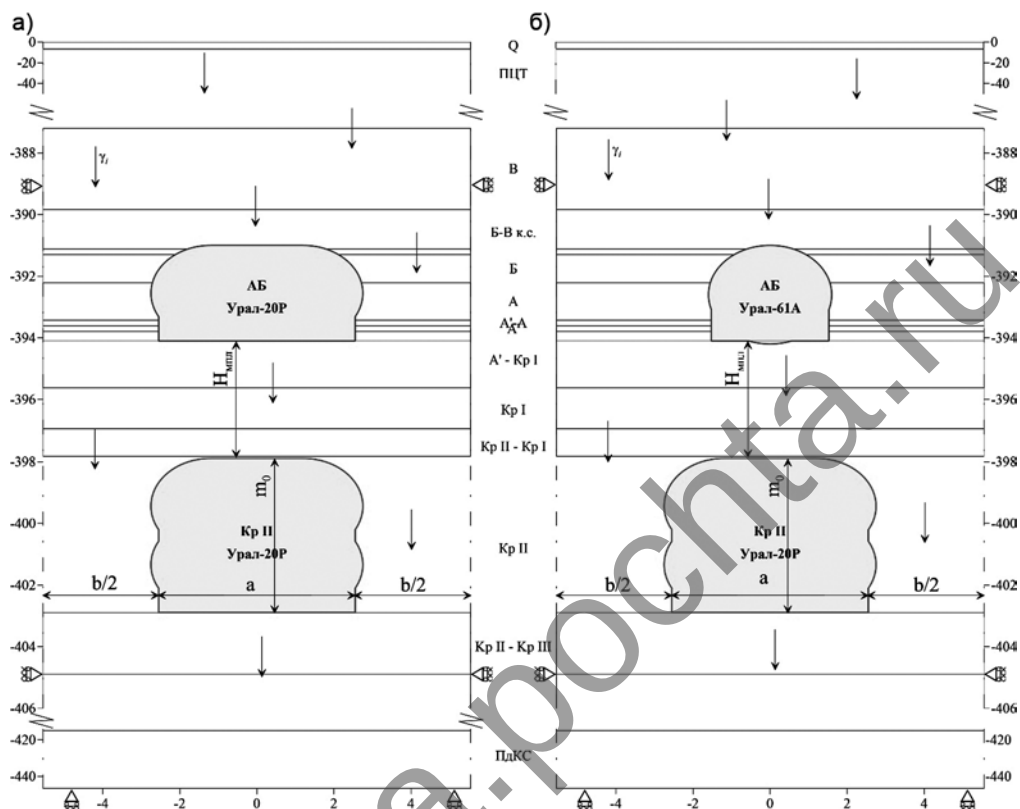


Рис. 2. Принципиальная геомеханическая схема расчетов: отработка пласта АБ комбайном «Урал-20Р» (а); отработка пласта АБ комбайном «Урал-61А» (б)

Fig. 2. Fundamental geomechanical calculation scheme: AB layer is mined by «Ural-20R» combine (a); AB layer is mined by «Ural-61A» combine (b)

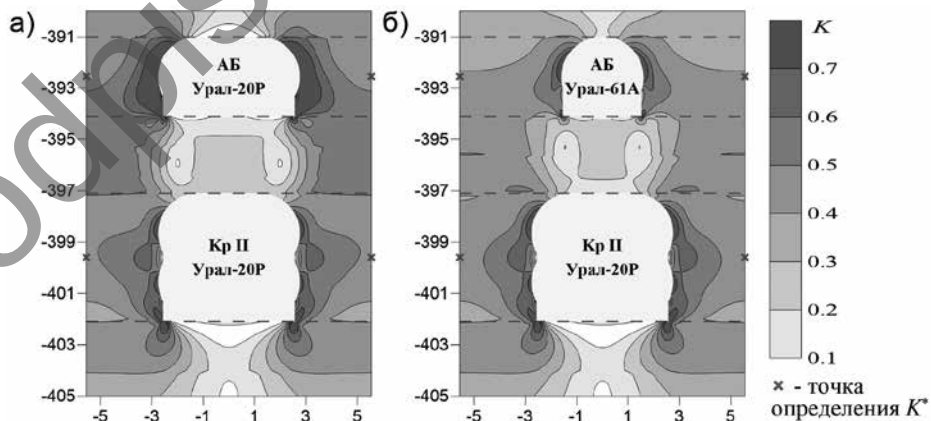


Рис. 3. Распределение нормированной величины интенсивности напряжений по сечению двухпластового камерного блока: при отработке пласта АБ комбайном «Урал-20Р» (а); при отработке пласта АБ комбайном «Урал-61А» (б)

Fig. 3. Tangential stress intensity normalized value cross-section distribution in two-layer chamber block: AB layer is mined by «Ural-20R» combine (a); AB layer is mined by «Ural-61A» combine (b)

Таблица 2

Степень нагружения целиков при отработке двух сильвинитовых пластов**Pillar load degree for two sylvinite layers mining**

Варианты	Пласт	Комбайн	Степень нагружения целиков	
			по методике ТР	математическое моделирование
1	АБ	Урал-20Р	0,34	0,39
	КрII	Урал-20Р	0,38	0,42
2	АБ	Урал-61А	0,23	0,33
	КрII	Урал-20Р	0,38	0,39

мированных соответственно комбайнами «Урал-20Р» и «Урал-61А».

Полученные оценки (см. табл. 2) в качественном и количественном отношении достаточно очевидно отражают взаимное влияние очистных камер пластов АБ и КрII на степень нагружения целиков. При одинаковых размерах камер, пройденных комбайном «Урал-20Р», погрешность определения степени нагружения целиков по методике ТР соизмерима для обоих пластов и варьируется в диапазоне от 10,5% (пласт КрII) до 15% (пласт АБ). Отметим, что учет фактора «двухпластовая отработка» обуславливает увеличение степени нагружения целиков, т.е. оценки этого показателя, рассчитанные согласно нормативному документу ТР, являются заниженными.

Еще более заниженные оценки степени нагружения целиков на верхнем сильвинитовом пласте АБ имеют место при его отработке камерами меньшей ширины («Урал-61А») по отношению к нижнему пласту КрII. При этом влияние отработки пласта АБ на междукамерные целики пласта КрII оказывается минимальным и использование формулы Турнера-Шевякова вполне допустимо (см. табл. 2).

Как уже отмечалось, уровень взаимного влияния отработки пластов АБ и КрII на степень нагружения целиков в значительной мере будет зависеть от мощности технологического междупластья. На рис. 4 представлены результаты оценки погрешности методики ТР при определении степени нагружения меж-

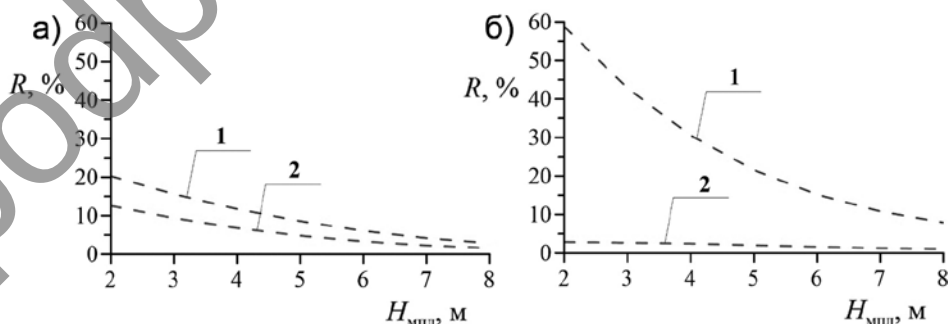


Рис. 4. Зависимость погрешности оценки степени нагружения междукамерных целиков на пласте АБ (1) и КрII (2) от мощности технологического междупластья: отработка пласта АБ комбайном «Урал-20Р» (а); отработка пласта АБ комбайном «Урал-61А» (б)

Fig. 4. Dependence of rib pillar load degree estimation error at AB (1) and KrII (2) layers on interlayer pillar width: AB layer is mined by «Ural-20R» combine (a); AB layer is mined by «Ural-61A» combine (b)

дукамерных целиков в условиях двух-пластовой отработки в зависимости от мощности технологического междупластья. Погрешность определялась в процентах согласно следующему соотношению:

$$R = (C_m / C_0 - 1) \cdot 100\%, \quad (4)$$

где C_m — степень нагружения, рассчитанная методом математического моделирования; C_0 — по методике ТР. Мощность междупластья изменялась от 2 до 8 м.

Представленные на рис. 4 результаты анализа показывают, что при одинаковых размерах очистных камер (рис. 4, а) и мощности технологического междупластья более 6 м погрешность оценки по нормативной методике [22] обеспечивают приемлемую оценку степени нагружения междуканальных целиков. При меньших мощностях междупластья погрешность может достигать 20% для целиков пласта АБ и 13% для целиков пласта КрII.

При очистной выемке пласта АБ комбайном «Урал-61А» (ширина камеры 3,05 м), как уже отмечалось, расчет степени нагружения целиков пласта КрII вне зависимости от мощности междупластья может производиться по схеме отработки одиночного пласта, по формуле Турнера-Шевякова (рис. 4, б). Вместе с тем отработка пласта КрII комбайном «Урал-20Р» обуславливает существенное увеличение степени нагружения целиков на пласте АБ. В этом случае погрешность использования методики ТР может достигать более 50%.

Несоосное расположение камер

Один из вариантов несоосного расположения очистных камер на двух рабочих пластах представлен в виде расчетной схемы на рис. 5. Он коррелирует с рассмотренным выше случаем, когда пласт АБ отрабатывается комбайнами «Урал-61А» или «Урал-20Р», а пласт КрII — комбайном «Урал-20Р». При этом для простоты анализа на обоих пла-

Таблица 3

Степень нагружения целиков при несоосном расположении камер и отработке пласта АБ комбайном «Урал-20Р»

Pillar load degree for out-of-alignment mining chamber layout during AB layer mining by «Ural-20R» combine

Мощность междупластья, м	Пласт	Комбайн	Степень нагружения целиков	
			по методике ТР	математическое моделирование
2,0	АБ	Урал-20Р	0,336	0,14
	КрII	Урал-20Р	0,381	0,23
3,0	АБ	Урал-20Р	0,336	0,21
	КрII	Урал-20Р	0,382	0,29
4,0	АБ	Урал-20Р	0,336	0,26
	КрII	Урал-20Р	0,383	0,33
6,0	АБ	Урал-20Р	0,336	0,31
	КрII	Урал-20Р	0,385	0,37
8,0	АБ	Урал-20Р	0,336	0,33
	КрII	Урал-20Р	0,387	0,38

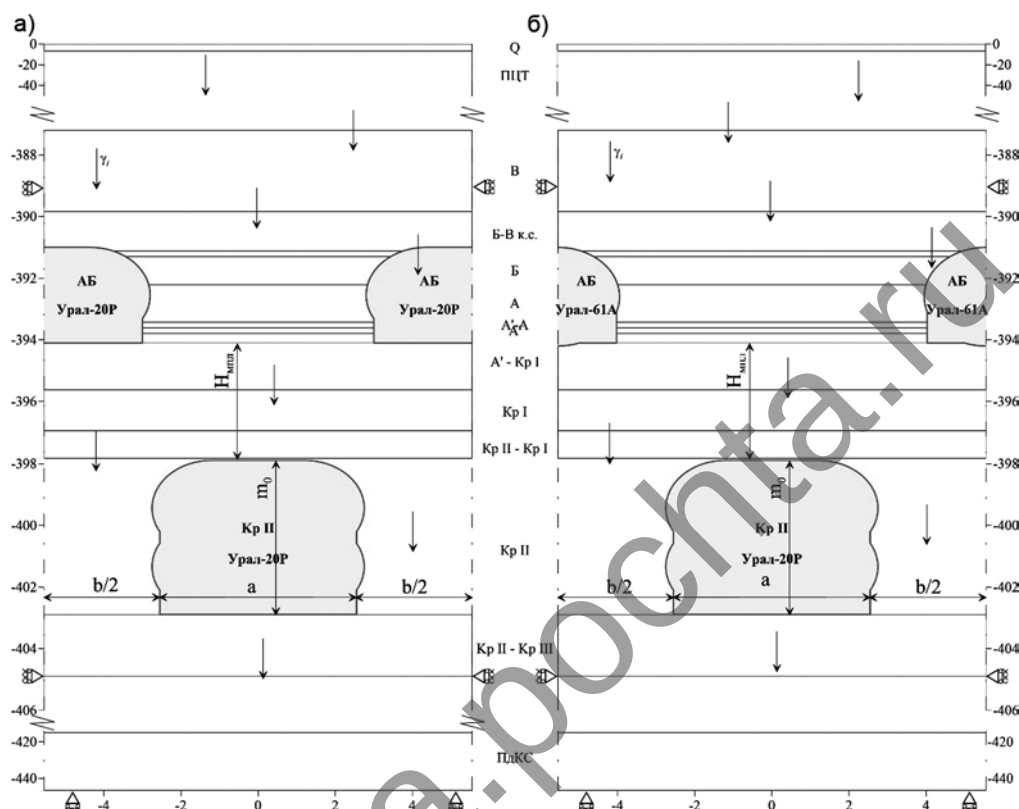


Рис. 5. Расчетная схема варианта несоосного расположения очистных камер: отработка пласта АБ комбайном «Урал-20Р» (а); отработка пласта АБ комбайном «Урал-61А» (б)

Fig. 5. Calculation scheme of out-of-alignment mining chamber layout variant: AB layer is mined by «Ural-20R» combine (a); AB layer is mined by «Ural-61A» combine (b)

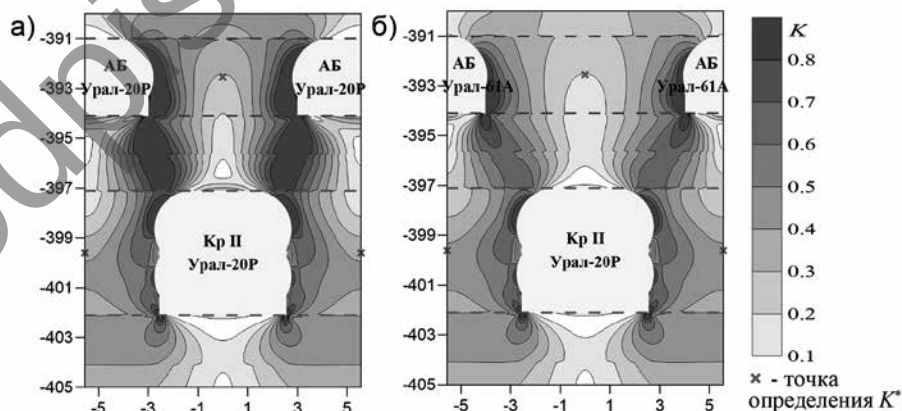


Рис. 6. Распределение нормированной величины интенсивности напряжений по сечению двухпластового камерного блока при несоосном расположении очистных камер: отработка пласта АБ комбайном «Урал-20Р» (а); отработка пласта АБ комбайном «Урал-61А» (б)

Fig. 6. Tangential stress intensity normalized value cross-section distribution in two-layer chamber block for out-of-alignment mining chamber layout: AB layer is mined by «Ural-20R» combine (a); AB layer is mined by «Ural-61A» combine (b)

Таблица 4

Степень нагружения целиков при несоосном расположении камер и отработке пласта АБ комбайном «Урал-61А»

Pillar load degree for out-of-alignment mining chamber layout during AB layer mining by «Ural-61A» combine

Мощность между-пластья, м	Пласт	Комбайн	Степень нагружения целиков	
			по методике ТР1	математическое моделирование
2,0	АБ	Урал-61А	0,23	0,06
	Кр II	Урал-20Р	0,381	0,3
3,0	АБ	Урал-61А	0,23	0,11
	Кр II	Урал-20Р	0,382	0,34
4,0	АБ	Урал-61А	0,23	0,15
	Кр II	Урал-20Р	0,383	0,36
6,0	АБ	Урал-61А	0,23	0,2
	Кр II	Урал-20Р	0,385	0,38
8,0	АБ	Урал-61А	0,23	0,22
	Кр II	Урал-20Р	0,387	0,39

стах сохраняется принятое ранее межосевое расстояние: $l_{AB} = l_{KpII} = 11,1$ м.

Распределение нормированной величины интенсивности напряжений для данного варианта несоосного расположения камер при мощности технологического междупластья 3 м показано на рис. 6. Как видно, междуканальные целики находятся в разгруженном состоянии, что отражается в количественных значениях степени их нагружения. Безусловно, снижение данного показателя напрямую зависит от мощности технологического междупластья (табл. 3, 4). По отношению к расчетным оценкам по стандартной методике Турнера-Шевякова [22] полученные величины степени нагружения междуканальных целиков определяются более низкими значениями. Особенно выражено это проявляется на обоих пластах при их отработке комбайном «Урал-20Р» и малой мощности междупластья (до 4 м). Очистная выемка пласта АБ «узкими» камерами (комбайн «Урал-61А») обуславливает менее

интенсивную разгрузку целиков пласта КрII и уменьшение степени их нагружения. В целом можно констатировать, что при несоосном расположении камер действующая методика ТР дает завышенные оценки степени нагружения междуканальных целиков, что связано с неучетом взаимного влияния отработки двух пластов.

Изменение погрешности определения степени нагружения междуканальных целиков в зависимости от мощности технологического междупластья, рассчитанной по формуле (4), иллюстрируется на рис. 7 (знак «-» указывает на превышение результатов расчета по методике ТР в сравнении с математическим моделированием). Здесь наглядно видно, что с увеличением мощности междупластья (более 6 м) взаимное влияние пластов нивелируется и значения степени нагружения целиков, полученные по методике ТР и методом математического моделирования, практически совпадают. При меньших мощностях меж-

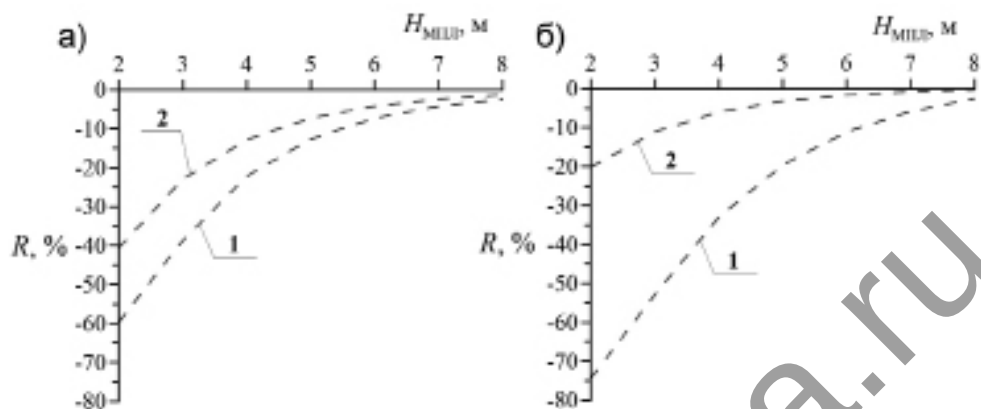


Рис. 7. Зависимость погрешности оценки степени нагружения междукamerных целиков на пласте АБ (1) и Кр II (2) от мощности технологического междупластья при несоосном расположении очистных камер: отработка пласта АБ комбайном «Урал-20Р» (а); отработка пласта АБ комбайном «Урал-61А» (б)
Fig. 7. Dependence of rib pillar load degree estimation error at AB (1) and Kr II (2) layers on interlayer pillar width for out-of-alignment mining chamber layout: AB layer is mined by «Ural-20R» combine (a); AB layer is mined by «Ural-61A» combine (b)

дупластья для обоих пластов методика ТР дает явно завышенные степени нагружения междукamerных целиков. Причем для рассмотренных вариантов отработки в количественном выражении более завышенные оценки отмечаются для целиков пласта АБ.

Анализ результатов определения степени нагружения междукamerных целиков формально указывает на возможность повышения извлечения руды при несоосном расположении очистных камер. Однако этот вопрос гораздо сложнее, чем кажется на первый взгляд. Предваритель-

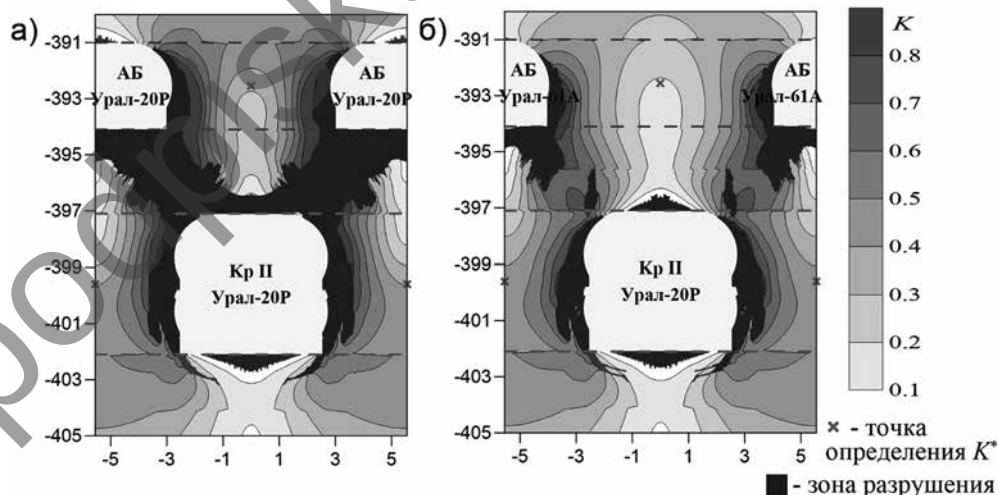


Рис. 8. Характер разрушения технологического междупластья мощностью 3 м при несоосном расположении очистных камер: отработка пласта АБ комбайном «Урал-20Р» (а); отработка пласта АБ комбайном «Урал-61А» (б)
Fig. 8. Failure pattern of 3-meter-wide interlayer pillar for out-of-alignment mining chamber layout: AB layer is mined by «Ural-20R» combine (a); AB layer is mined by «Ural-61A» combine (b)

ные прочностные оценки, выполненные по критерию Кулона-Мора (рис. 8), показали, что в технологическом междупластье формируются зоны разрушения, которые обуславливают риски «сползания» целика на верхнем отработываемом пласте АБ в камеру нижнего пласта КрII. В этой связи для анализа реальных перспектив повышения извлечения руды за счет несоосного расположения очистных камер требуется проведение специальных детальных геомеханических исследований, основанных на обосновании оптимальных параметров отработки пластов, увязанных с горно-геологическими условиями разработки.

Заключение

1. Разработана основанная на математическом моделировании напряженно-деформированного состояния междукammerных целиков методика определения степени их нагружения. Предложенная расчетная схема позволяет получить оценку данного показателя для различных вариантов камерной системы разработки, не охваченных стандартной методикой Турнера-Шевякова: наклонное залегание рабочих пластов, неканоническая форма целиков, многопластовая отработка, включая несоосное расположение очистных камер и др.

2. Показано, что при отработке двух сильвинитовых пластов с соосным расположением очистных камер применение формулы Турнера-Шевякова в целом дает заниженные значения степени нагружения междукammerных целиков, вследствие неучета взаимного влияния рабочих пластов. Уровень этого снижения зависит от мощности технологического междупластья и соотношения размеров очистных камер на обоих рабочих пластах.

3. При несоосном расположении очистных камер методика Турнера-Шевякова обуславливает существенно завышенные оценки степени нагружения междукammerных целиков при мощности технологического междупластья менее 4 м. Это формально указывает на возможность повышения извлечения руды из недр за счет уменьшения ширины междукammerных целиков. Вместе с тем предварительные прочностные расчеты показали, что при несоосном расположении очистных камер возникают риски обрушения целика на верхнем отработываемом пласте в камеру нижнего пласта. Для обоснования реальных перспектив повышения извлечения руды из недр за счет несоосного расположения очистных камер требуется проведение детальных геомеханических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевяков Л. Д. Разработка месторождений полезных ископаемых. — М.: Госгортехиздат, 1963. — 728 с.
2. Горпинченко В. А., Сазнов В. В., Андреев А. А., Вильчинский В. Б. Методика определения эффективных параметров разгрузочных скважин для безопасной разработки удачноопасных месторождений Норильского промышленного района // Горный журнал. — 2015. — № 6. — С. 68–73. DOI: 10.17580/gzh.2015.06.14.
3. Sankovsky A. A., Aleksenko A. G., Nikiforov A. V. Practical experience analysis: superimposed seams series mining at the Verkhnekamsk potassium-magnesium salts deposit applying room-and-pillar mining method // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018, vol. 9, no. 6, pp. 715–728.
4. Осинцев В. А., Беркович В. М., Горбунов А. Г., Любавина В. А. Расчет нагруженности ленточных междукammerных целиков // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2013. — № 1. — С. 11–14.

ГОРНЫЙ

ИНФОРМАЦИОННО-
АНАЛИТИЧЕСКИЙ
БЮЛЛЕТЕНЬ

(НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ)

MINING INFORMATIONAL
AND ANALYTICAL
BULLETIN

(SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL)

ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ГОРНАЯ КНИГА»

№ 11
2023



ТЕМЫ НОМЕРА:

Геомеханика, разрушение горных пород
Геотехнология
Геоэкология
Горные машины
Обогащение полезных ископаемых
Энергетика и энергоэффективность горной промышленности

ВЫПУСКАЕТСЯ ИЗДАТЕЛЬСТВОМ «ГОРНАЯ КНИГА» ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:

Сибирской угольной энергетической компании,
Высшего горного совета НП «Горнопромышленники России»,
Инвестиционного фонда поддержки горного книгоиздания,
проект ГИАБ-3584-2023



СОДЕРЖАНИЕ

Геомеханика, разрушение горных пород	
Высотин Н.Г., Винников В.А. Опыт построения модели упругого гистерезиса горных пород различных генотипов на основе теории Прейсаха	5
Блохин Д.И., Загоршманный И.М., Кубрин С.С. и др. Численные исследования влияния изменений напряженно-деформированного состояния углеродного массива на устойчивость дегазационных скважин	17
Деменков П.А., Романова Е.Л., Котиков Д.А. Исследование формирования напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола и вмещающего массива горных пород в условиях неравномерности его контура	33
Карасев М.А., Поспехов Г.Б., Астапенко Т.С., Шишкина В.С. Анализ моделей прогноза напряженно-деформированного состояния техногенных грунтов низкой прочности	49
Назаров Л.А., Голиков Н.А., Скулкин А.А., Назарова Л.А. Метод экспериментального определения деформационных и фильтрационных характеристик горных пород регулярно-блочной структуры	70
Геотехнология	
Боровков Ю.А., Деревяшкин И.В., Мерзляков В.Г., Блудов А.Н. Влияние структуры горных пород и глубины разработки на скорость их гидравлического резания	82
Еременко А.А., Колтышев В.Н., Узун Е.Е., Христороубов Е.А. Оценка структуры массива горных пород по состоянию поверхности разгрузочных скважин в породном целике на шахте Шерегешская	91
Геоэкология	
Мощенко Д.И., Кузина А.А., Колесников С.И., Казеев К.Ш. Опыт определения региональных экологически безопасных концентраций меди в почвах в районе меднодобывающего предприятия	102
Горные машины	
Галкин В.И., Доблер М.О., Дьяченко В.П. Обоснование конструктивных параметров линейной вантовой секции подвесного канатного конвейера типа RopeCon®	115
Обогащение полезных ископаемых	
Пье Чжо Чжо, Чжо Зай Яя, Горячев Б.Е. Действие композиции металлосодержащих модификаторов поверхности сульфидных минералов цветных тяжелых металлов при флотации медно-цинковых руд	128
Шумилова Л.В., Хатькова А.Н., Размахнин К.К. Исследование процессов окисления углеродсодержащих соединений и извлечения золота из упорного минерального сырья	143
Энергетика и энергоэффективность горной промышленности	
Сычев Ю.А., Аладин М.Е. Анализ эффективности работы универсальных регуляторов качества электрической энергии на основе активных преобразователей в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой	159

CONTENT

Geomechanics, Rock failure	
Vysotin N.G., Vinnikov V.A. A case history of modeling elastic hysteresis of different-genotype rocks based on the Preisach model	5
Blukhin D.I., Zakorshmenniy I.M., Kubrin S.S., etc. Numerical research of effect of stress-strain changes on stability of gas drainage wells in coal-rock mass	17
Demchenk P.A., Romanova E.L., Kotikov D.A. Stress-strain analysis of vertical shaft lining and adjacent rock mass under conditions of irregular contour	33
Karasev M.A., Posphehov G.B., Astapenko T.S., Shishkina V.S. Stress-strain behavior prediction models for weak manmade soil	49
Nazarov L.A., Golikov N.A., Skulkin A.A., Nazarova L.A. Method of experimental determination of deformation and flow characteristics in rocks with regular block structure	70
Geotechnology	
Borovkov Yu.A., Derevyashkin I.V., Merzlyakov V.G., Bludov A.N. Effect of structure and mining depth on hydraulic cutting velocity in rocks	82
Eremenko A.A., Koltyshev V.N., Uzun E.E., Khristolyubov E.A. Rock mass structure assessment on the destress borehole surface in rock pillar in Sheregesh Mine	91
Geocology	
Moshchenko D.I., Kuzina A.A., Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh. Experience of determining regional ecologically safe copper concentrations in soils at a copper mine	102
Mining machinery	
Galkin V.I., Dobler M.O., Dyachenko V.P. Justification of design factors for linear cable-stayed section of overhead wire rope conveyor of RopeCon® type	115
Enrichment of minerals	
Phyoe Kyaw Kyaw, Kyaw Zaya Ya, Goryachev B.E. Effect of composition of metal-bearing surface modifiers for sulfide minerals of base heavy metals in copper-zinc ore flotation	128
Shumilova L.V., Khatkova A.N., Razmakhnin K.K. Oxidation of carbon-bearing compounds and gold recovery from difficult minerals	143
Energetics and energy efficiency of mining industry	
Sychev Y.A., Aladin M.E. Overall performance analysis of general-purpose power quality controls on the basis of active converters in nonlinearly loaded industrial power lines	159

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

Д.И. Блохин¹, И.М. Загоршменный¹, 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. Герсевича — структурное подразделение
АО «НИЦ «Строительство», Москва, Россия

Аннотация: Представлены результаты исследований по оценке влияния высокоинтенсивной 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., Загоршменный 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. Kobylkin¹, 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., Kobylkin 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. *MLAB. 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, характе-

ризующим 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 высокоинтен-

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 и обуславливает наблюдаемую активизацию газовыделения.

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

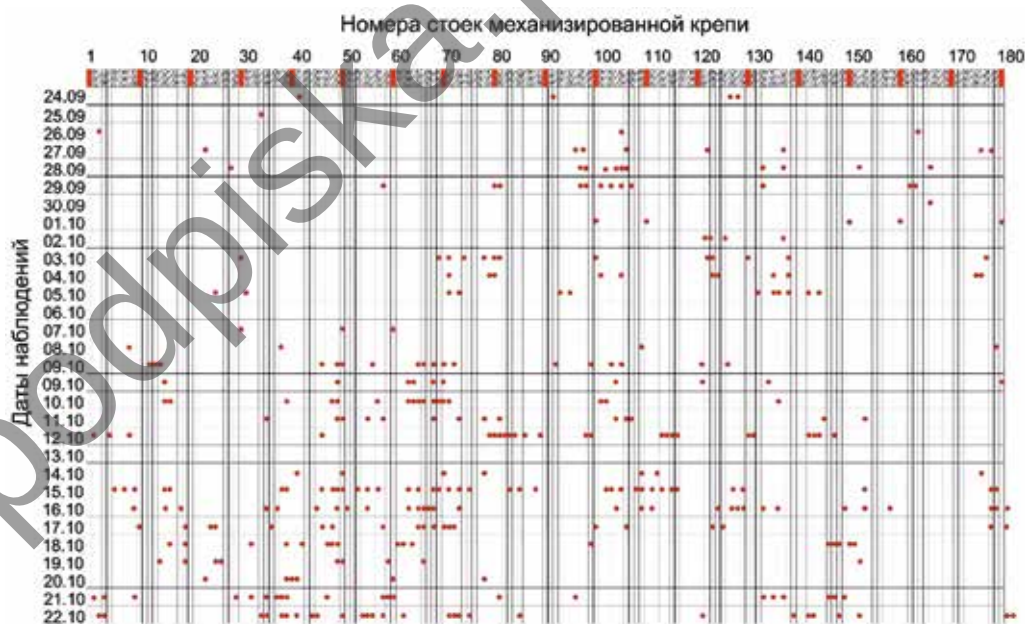


Рис. 1. Схема расположения локальных источников выделения метана в почве лавы 24–64 пласта Болдыревский шахты им. С.М. Кирова АО «СУЭК-Кузбасс», в период 24.09.2022 – 22.10.2022

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



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

лее 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, последний 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-

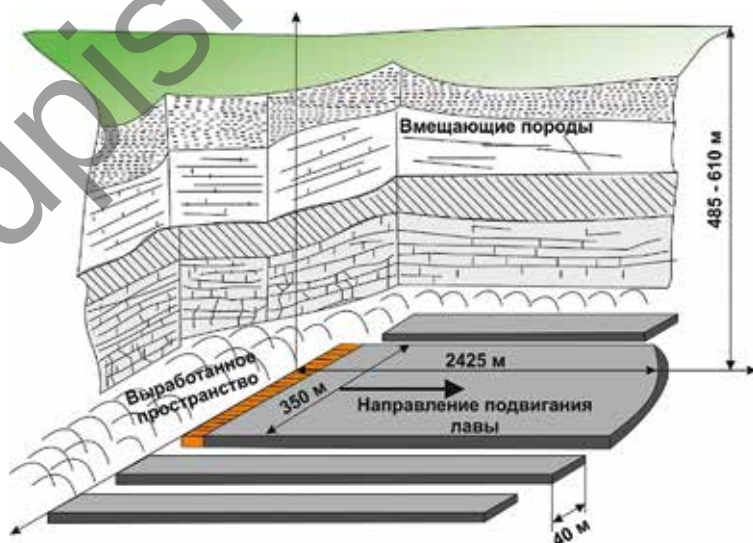


Рис. 3. Схема выемочного участка

Fig. 3. The scheme of the excavation site

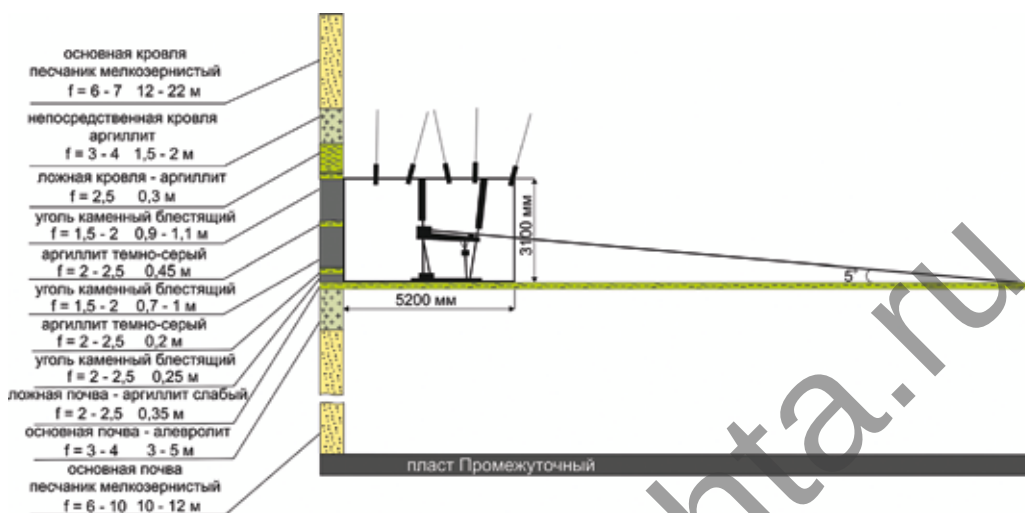


Рис. 4. Схема размещения дегазационной скважины, совмещенная с геологическим разрезом пласта
Fig. 4. The scheme of the degassing well combined with the geological section of the formation

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-

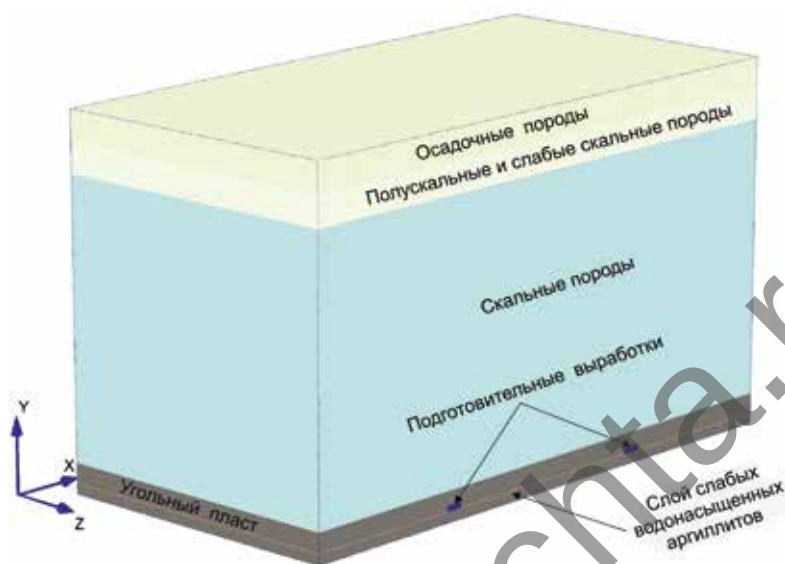


Рис. 5. Общий вид модели массива
Fig. 5. General view of the array model

ляет дать достаточно реалистичное представление о характере распределения искоемых 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-

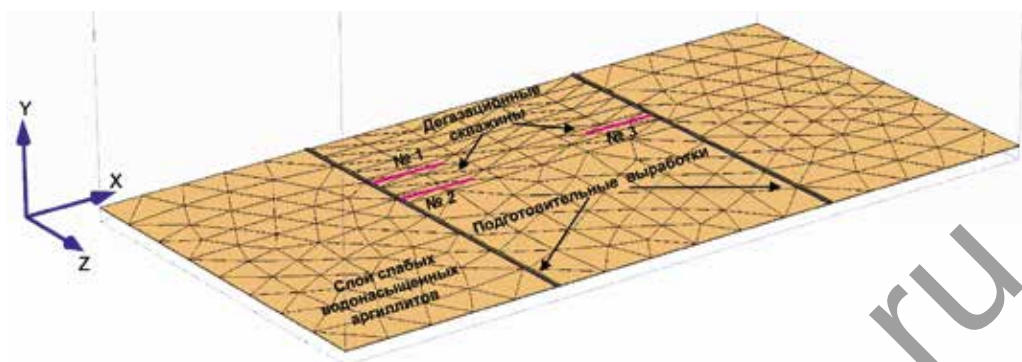


Рис. 6. Конструкционные элементы модели (срез трехмерной модели в уровне устьев дегазационных скважин)

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 углепородного массива

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

№	Тип геоматериала	Плотность ρ , кг/м ³	Модуль упругости, Е, МПа	Коэффициент Пуассона, $\nu \cdot 10^{-3}$	Предел прочности на сжатие, σ_c , МПа	Сцепление С, 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

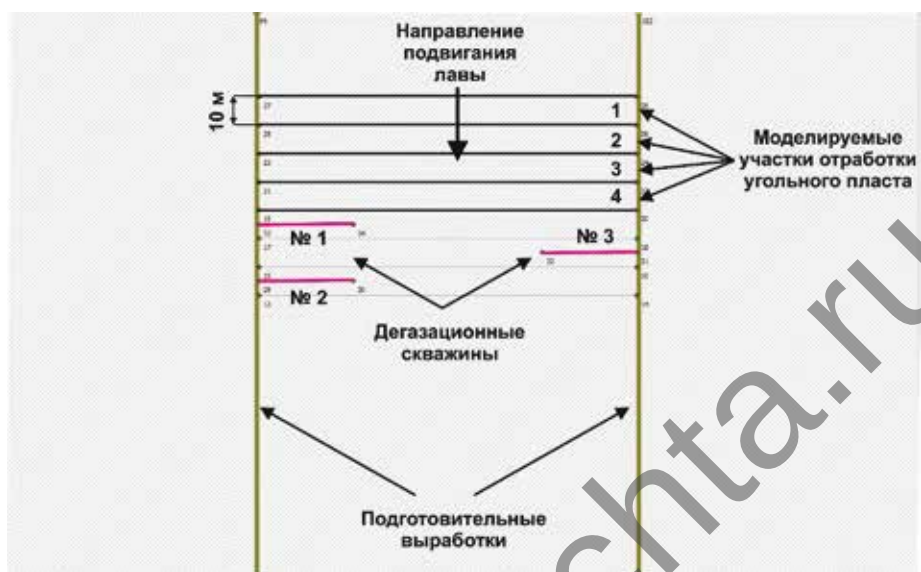


Рис. 7. Этапы моделирования напряженно-деформированного состояния отработываемого угольного пласта (проекция трехмерной модели в уровне устьев дегазационных скважин)

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 приконтурных 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.

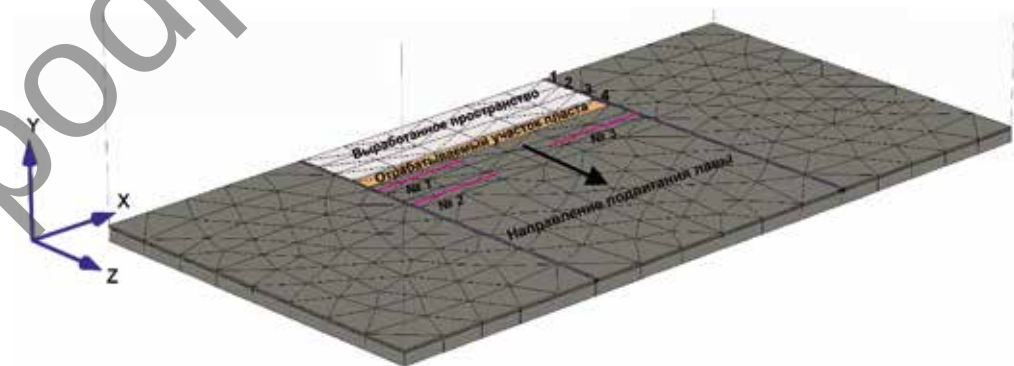


Рис. 8. Моделирование этапа отработки финального участка

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

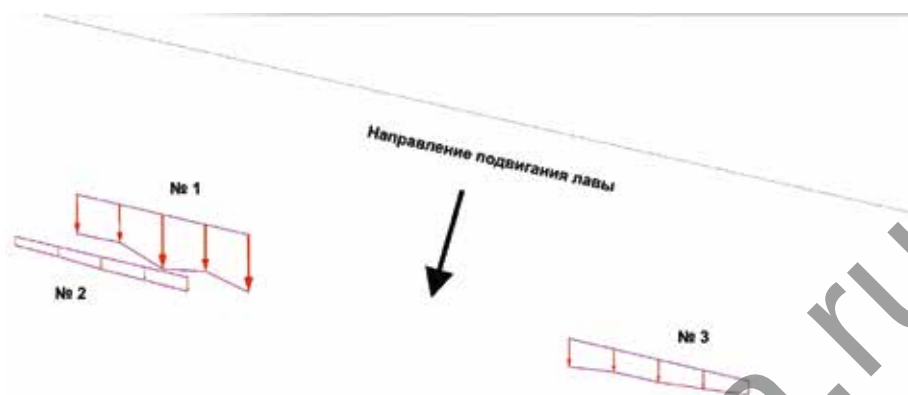


Рис. 9. Эпюры значений смещений дегазационных скважин
Fig. 9. Diagrams of displacement values of degassing wells

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 (алевролитами).

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

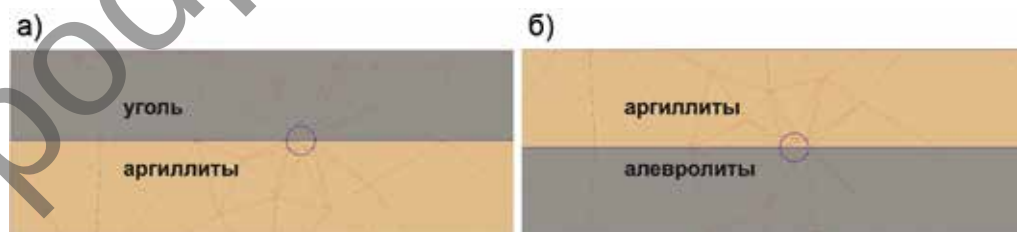


Рис. 10. Варианты расположения контура скважины относительно границы различных слоев углеродного массива: граница между угольным пластом и слоем слабых аргиллитов (а); граница между слоем слабых аргиллитов и основной почвой (алевролиты) (б)

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 (а); the boundary between the layer of weak mudstones and the main soil (siltstones) (б)

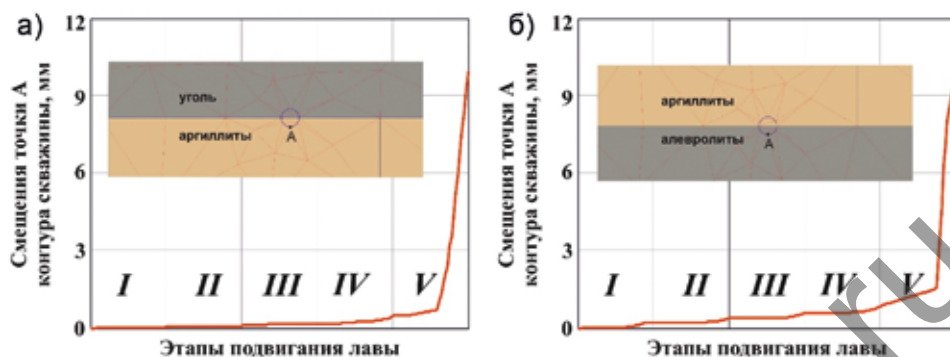


Рис. 11. Смещения точки контура дегазационной скважины на различных этапах подвигания лавы
Fig. 11. Displacement of the contour point of the degassing well at various stages of longwall face movement

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 высокоинтенсивной подземной добычи угля в сложных горно-геологических условиях.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сластунов С. В., Ютяев Е. П., Мазаник Е. В., Садов А. П., Позин 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 аэрологических 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., Плaksin 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 //