

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ КАМЕРНОЙ СИСТЕМЕ РАЗРАБОТКИ ПЛАСТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАКЛАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА

М.А. Журавков<sup>1</sup>, М.А. Николайчик<sup>1</sup>, Д.А. Петрачков<sup>1</sup>, П.Г. Феоктистов<sup>2</sup>,  
И.В. Морочковский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь,  
e-mail: petrachkou.daniil@gmail.com

<sup>2</sup> ООО «ПГП», Минск, Республика Беларусь

**Аннотация:** Актуальность работы обусловлена необходимостью поиска технологических схем очистных работ, минимизирующих потери запасов полезного ископаемого. Значительное увеличение доли извлекаемых запасов возможно благодаря созданию искусственных целиков из упрочняющегося закладочного материала на основе солеотходов. Объектом исследований является напряженно-деформированное состояние (НДС) массива горных пород при его отработке камерной системой с применением технологической схемы, подразумевающей создание в отработанных камерах искусственных целиков из твердеющего закладочного материала и последующую отработку междукamerных целиков. Цель исследований заключается в построении механико-математических моделей описания НДС массивов горных пород; исследовании и выборе физико-механических свойств закладочного материала, обеспечивающих несущую способность рассматриваемой геотехнической системы «массив горных пород – искусственный целик». Основным методом исследования является численное моделирование с использованием метода конечных элементов (МКЭ). По результатам исследований предложен ряд схем поведения закладочного материала и выбрана наиболее приемлемая схема набора прочности материала закладки с точки зрения обеспечения несущей способности рассматриваемой геотехнической системы.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние массива горных пород, закладка выработанного пространства, искусственный целик, камерная система отработки, метод конечных элементов, устойчивость породного массива, закладочный материал, численное моделирование.

**Для цитирования:** Журавков М. А., Николайчик М. А., Петрачков Д. А., Феоктистов П. Г., Морочковский И. В. Исследование напряженно-деформированного состояния массива горных пород при камерной системе разработки пластовых месторождений полезных ископаемых с учетом различных скоростей изменения жесткостных характеристик закладочного материала // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 5. – С. 50–64. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_5\_0\_50.

---

## Stress–strain analysis of rock mass during open stoping of bedded mineral deposits with regard to various rates of change of backfill stiffness characteristics

M.A. Zhuravkov<sup>1</sup>, M.A. Nikolaitchik<sup>1</sup>, D.A. Petrachkov<sup>1</sup>, P.G. Feoktistov<sup>2</sup>, I.V. Morochkovski<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: petrachkou.daniil@gmail.com

<sup>2</sup> LLC «PGP», Minsk, Belarus

---

**Abstract:** The relevance of the study is defined by the need to find open stoping flowsheets to minimize losses of minerals. A considerable increase in the volume of extraction of mineral resources is possible through creation of artificial pillars made of a hardening backfill material composed of salt waste. The object of study is the stress–strain behavior of rock mass in the course of stoping using a flowsheet that involves creation of artificial pillars made of a hardening backfill material in the mined-out stopes and the further extraction of resources from rib pillars. The objective of study consists in: mechanical–mathematical stress–strain modeling of rock mass; analysis and selection of the physical and mechanical properties of backfill materials to ensure load-carrying capacity of the test geotechnical rock mass–manmade pillar system. The main method of study is the numerical modeling using the finite element method. Based on the research findings, some patterns of the backfill material behavior are proposed and the best acceptable chart of development of strength in the backfill material from the viewpoint of the required load-carrying capacity of the test geotechnical system is selected.

**Key words:** stress–strain behavior of rock mass, backfill of mined-out stope, artificial pillar, open stoping, finite element method, rock mass stability, backfill material, numerical modeling.

**For citation:** Zhuravkov M. A., Nikolaitchik M. A., Petrachkov D. A., Feoktistov P. G., Morochkovski I. V. Stress–strain analysis of rock mass during open stoping of bedded mineral deposits with regard to various rates of change of backfill stiffness characteristics. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(5):50–64. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_5\_0\_50.

---

### Введение

Вследствие интенсификации процессов добычи полезных ископаемых все более актуальной становится задача разработки высокоэффективных технологий разработки месторождений полезных ископаемых, обеспечивающих максимальное извлечение полезных компонентов без увеличения риска безопасной работы персонала и эксплуатации рудника, и в то же время минимизирующих вредное воздействие на окружающую среду. С этой точки зрения особо перспективными представляются технологии ведения горных работ с закладкой отработанного пространства, что позволяет существенно уменьшить объемы породы,

размещаемой на дневной поверхности, и увеличить процент извлечения полезного компонента за счет, например, уменьшения размеров междукамерных целиков или их последующей отработки и т.д.

При использовании камерной системы разработки на калийных месторождениях междукамерные целики служат для сохранения устойчивости камер и обязательного обеспечения сохранности водозащитной толщи (ВЗТ). Ширина опорных междукамерных целиков определяется с учетом их нагружения. Применение жестких целиков без закладки или с закладкой камер, не являющейся все же конструктивным элементом системы разработки, во многих случаях до-

статочно эффективно обеспечивает устойчивость и сохранность ВЗТ, однако приводит к соответствующему увеличению размеров целиков и значительной потере в экономической эффективности отработки месторождения в связи с увеличением оставляемых запасов полезного ископаемого. Например, на Верхнекамском месторождении в России потери составляют по сильвинитам до 60%, карналлитам до 70%, каменной соли до 55% [1]. Если же размеры целиков недостаточны, то, при определенных горно-геологических и горнотехнических условиях, существует риск потери устойчивости и разрушения некоторых элементов обрабатываемого блока.

Для сохранения устойчивости выработанного пространства и уменьшения оседаний дневной поверхности на калийных рудниках отработанные камеры все чаще закладываются сухой или гидравлической закладочной смесью. При этом повышение доли извлеченных запасов достигается путем формирования в отработанных камерах искусственных целиков из закладочного материала, способных нести нагрузку вышележащих пород и позволяющих полностью отработать запасы полезных пород, содержащихся в соседних целиках [2].

К настоящему времени в мировой практике накоплен большой опыт применения гидравлической и других видов закладки при разработке калийных месторождений [3]. Закладка выработанного пространства при разработке месторождений калийных солей успешно применяется в горнодобывающей промышленности Европы [4, 5], Канады [6], России [7–10], Беларуси [11, 12].

Выполненные исследования показали эффективность использования технологий с закладкой выработанного пространства для уменьшения нагружения целиков, в том числе для камерных систем отработки [8, 13, 14].

В то же время в литературе в меньшей степени представлены исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород, когда происходит полное изъятие породных масс из целиков и закладочные материалы становятся единственным конструктивным элементом системы, обеспечивающим ее прочность [14–17]. Опыт применения закладки выработанного пространства с целью повторной отработки целиков и повышения извлечения полезных ископаемых успешно применяется на месторождениях соленосного района города Зондерсхаузен в Германии [4].

В случае, когда устойчивость геомеханической системы зависит от несущей способности искусственных целиков, предельно важными становятся тип и физико-механические свойства используемого закладочного материала, обеспечивающие, с одной стороны, относительную простоту и дешевизну изготовления, транспортировки, закладки и высокий уровень заполнения отработанных камер, а с другой стороны, необходимую прочность и жесткость при консолидации закладочного материала в пределах требуемых временных сроков.

Отметим, что результаты выполненных исследований физико-механических характеристик закладочного материала в зависимости от их химического состава изложены в целом ряде публикаций (см., например, [10, 15, 18–21]).

На калийных рудниках в основном используются следующие типы закладочного материала: сухая закладка, гидравлическая закладка, твердеющая закладка [22].

Применение сухой закладки сопряжено с определенными трудностями, связанными со сложностью доставки и размещения сухих смесей в выработанном пространстве, неполнота заполнения ка-

мер под кровлю и значительная усадка закладочного массива.

Гидравлическая закладка состоит из солеотходов, а также, для упрощения транспортировки, содержит большое количество воды и рассолов, которые снижают прочностные характеристики соляных пород. Таким образом, ее применение вынуждает принимать меры по организации дренажа.

Под «твердеющей» в данном случае понимают гидравлическую закладку, химический состав которой обеспечивает ее консолидацию и увеличение прочности со временем.

Таким образом, наиболее эффективным способом закладки в рассматриваемом случае признается именно твердеющая закладка на основе солеотходов и местных материалов — как обеспечивающая наибольший процент заполнения камер, низкий уровень рассолоотдачи, высокую сплошность и прочность закладочного массива [9, 10]. Вместе с тем отметим, что нами не найдено опубликованных результатов полномасштабных исследований НДС массивов горных пород в окрестности обрабатываемой камерной системой блока области, позволяющих делать выводы об оптимальных физико-механических свойст-

вах закладочного материала, обеспечивающих несущую способность рассматриваемой геомеханической системы.

Целью данного исследования является изучение влияния характера консолидации закладочного материала на геомеханическое состояние массива горных пород в окрестности обрабатываемого камерной системой блока в условиях отработки междукамерных целиков с последующей закладкой всего выработанного пространства.

### Основная часть

Рассматриваемая модельная схема ведения горных работ (рис. 1) подразумевает заполнение отработанных камер первой очереди (камеры 1 – 5) твердеющей закладкой и последующую отработку междукамерных целиков. Заполнение камер сдвинуто на 1 камеру (т.е. во время отработки следующей камеры одновременно закладывается предыдущая), между обрабатываемой и закладываемой камерами размещен целик, состоящий из неотработанного массива. Затем, сразу после проходки последней камеры первой очереди, осуществляется отработка оставленных целиков между заложеными камерами, также с их дальнейшим заполнением твердеющей

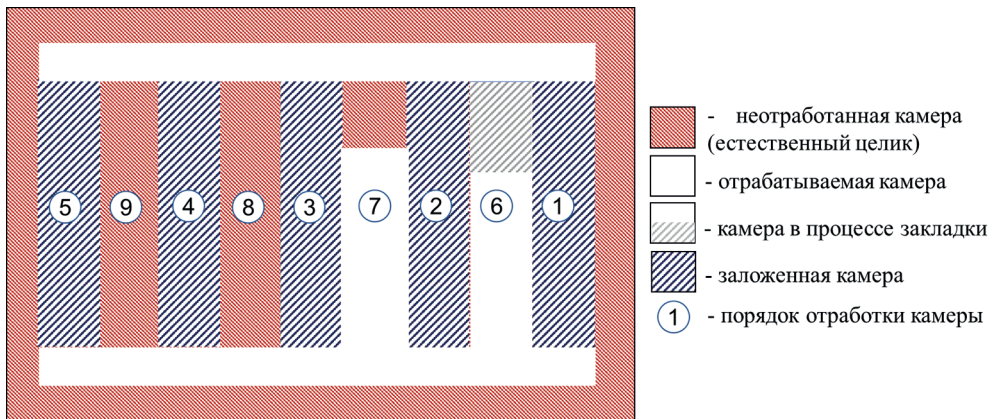


Рис. 1. Организация очистных работ технологической схемой с твердеющей закладкой

Fig. 1. Organization of mining by the technological scheme with consolidating backfill

Таблица 1

**Расчетные шаги модели**  
**Computational steps of the model**

№ расчетного этапа	Вид работ	Начало работы, сут.	Окончание работы, сут.
1	Проходка камеры № 1	0	4
2	Проходка камеры № 2	4	10
3	Закладка камеры № 1	4	10
4	Проходка камеры № 3	10	16
5	Закладка камеры № 2	10	16
6	Проходка камеры № 4	16	22
7	Закладка камеры № 3	16	22
8	Проходка камеры № 5	22	29
9	Закладка камеры № 4	22	29
10	Проходка камеры № 6	29	35
11	Закладка камеры № 5	29	35
12	Проходка камеры № 7	35	41
13	Проходка камеры № 8	41	47
14	Закладка камеры № 6	43	49
15	Проходка камеры № 9	47	55
16	Закладка камеры № 7	49	54
17	Закладка камеры № 8	54	60
18	Закладка камеры № 9	60	67

закладкой. Заложенная и обрабатываемая выработки прилегают друг к другу вплотную. Выемка осуществляется в заранее определенные этапы, которым соответствует определенное время от начала отработки блока. Таким образом удастся извлечь максимальный объем запасов полезного ископаемого.

Задача исследований заключается в определении поведения закладочного материала (изменение его свойств с течением времени и под нагрузкой), обеспечивающего оптимальное геомеханическое состояние породного массива для конкретной технологической схемы отработки пластов полезного ископаемого. Примем последовательность отработки

камер, представленную в табл. 1. Красным цветом отмечены этапы проходки камер первой очереди, синим — этапы закладки камер первой очереди, желтым — этапы проходки целиков, голубым цветом — этапы закладки целиков.

### Постановка задачи

Моделируется НДС массива горных пород в окрестности обрабатываемого камерной системой блока при размещении в выработанное пространство закладочного материала согласно принятой технологии отработки (см. рис. 1).

Геометрическая модель расчетной области представляет из себя прямоугольник размерами 300\*206 м. Расчетная область разбита на слои в соответствии с принимаемым геологическим строением вмещающего массива горных пород. Геологические слои кровли и подошвы моделируются эффективными (приведенными) слоями с физико-механическими характеристиками, соответственно, нижележащих и вышележащих пород. Свойства пород, используемые при построении расчетной модели, указаны в табл. 2.

Соседние выработки в модели расположены вплотную друг к другу. Подошва выработок расположена на уровне 1150 м. В рамках численного моделирования рассматривается область от отметки 1045 м до отметки 1251 м. На рис. 2 представлен участок рассматриваемой области породной толщи в промежутке глубин от 1125 до 1175 м.

Расчетная модель строится на основе метода конечных элементов [23]. Алгоритм численного моделирования состоит из последовательного выполнения нескольких расчетных шагов: определения естественного напряженного состояния в массиве горных пород и дальнейших расчетных шагов, соответствующих отработке пласта полезного ископаемого, закладке выработанного пространства

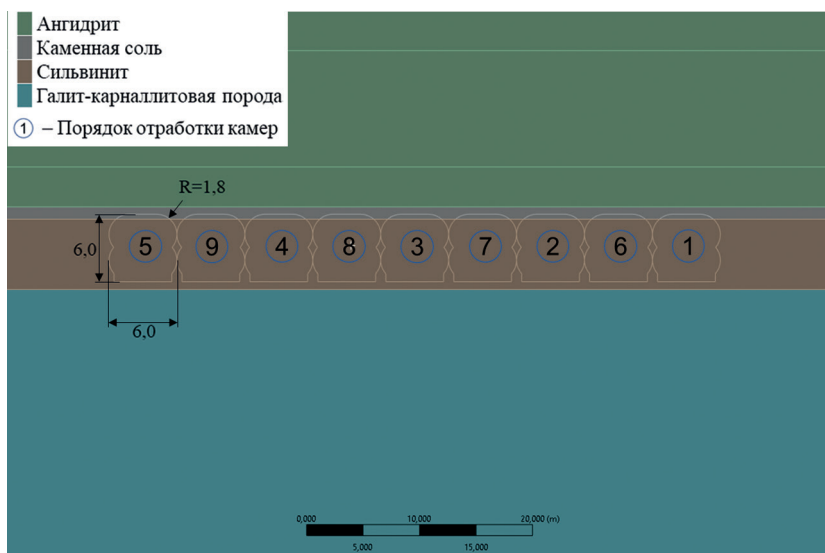


Рис. 2. Строение породного массива в окрестности обрабатываемого пространства и геометрические размеры камер

Fig. 2. Rock massif structure in vicinity of a mined area and geometrical dimensions of chambers

или изменению свойств закладочного материала, порядок которых определяется в соответствии с технологической схемой отработки. Задача решается в условиях плоско-деформируемого состояния рассматриваемой области породной толщи.

На первом расчетном шаге определяется начальное напряженное состояние рассматриваемой области породной толщи. Для каждого слоя принимаются следующие граничные условия: по верхней грани — давление вышележащих породных слоев, по нижней грани — сила реакции нижележащих слоев. На боковых поверхностях задается литостатическое давление. В серединной точке нижней грани расчетной области задано ограничение перемещений по всем направлениям (для предотвращения перемещения модели в целом), в серединной точке верхней грани расчетной области задано ограничение горизонтальных перемещений. При расчете начального НДС массива условия контактов между слоями не задаются [24].

На втором и последующих расчетных шагах учитывается начальное напряженное состояние в массиве, полученное на первом расчетном шаге, путем записи значений компонент тензора напряжений в соответствующих узлах конечно-элементной сетки модели (решение задачи в полных напряжениях). На дальнейших расчетных шагах, соответствующих отработке и закладке камер, а также изменению свойств закладочного материала, граничное условие в виде давления на боковых гранях расчетной области заменяется на условие ограничения перемещений по горизонтальной оси, на нижней грани — на ограничение перемещений по вертикальной оси.

Слои, составляющие расчетную область породной толщи, рассматриваются как однородные, изотропные, упруго-пластические с моделью пластичности Кулона–Мора. Согласно модели Кулона–Мора, критерий пластичности определяется как

$$\tau \geq C + \sigma \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

Таблица 2

**Физико-механические свойства горных пород**  
**Physical-mechanical properties of rocks**

Наименование пласта пород	Глубина залегания, м	Модуль Юнга $E$ , ГПа	Коэффициент Пуассона $\nu$	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	Сцепление $C$ , МПа	Предел прочности на сжатие $\sigma_{comp}$ , МПа	Предел прочности на растяжение $\sigma_{tens}$ , МПа
Ангидрит	1045 – 1144	9,6	0,2	85,9	1,08	60,16	0,02
Соль каменная	1144–1145	3	0,13	57,5	2,82	28,39	0,58
Сильвинит	1145–1151	2,46	0,24	59,7	3,2	23,92	0,66
Галит-карналлитовая порода	1151–1180	3,08	0,17	59,7	3,2	24,96	0,23
Соль каменная	1180–1251	2,78	0,14	66,1	2,41	24,5	0,5

где  $\tau$  — касательное напряжение;  $\sigma$  — нормальное напряжение;  $\varphi$  — угол внутреннего трения пород;  $C$  — сцепление пород.

Физико-механические свойства пород, составляющих данные слои, приведены в табл. 2. При моделировании между слоями на данных расчетных этапах предполагаются условия полного контакта. Материал закладки моделируется однородной, изотропной, упругой средой, физико-механические свойства которой определяются по результатам испытаний образцов закладочного материала [13].

С целью изучения влияния на геомеханическое состояние вмещающего массива различных схем поведения за-

кладки рассматриваются различные модели изменения свойств закладочного материала со временем (табл. 3).

**Критерии предельного состояния**

В условиях сложного напряженного состояния применимость того или иного критерия зависит от типа напряженно-деформированного состояния, в котором находится рассматриваемая область. Выделяют три основных типа напряженно-деформированного состояния: обобщенное растяжение, обобщенный сдвиг и обобщенное сжатие. Тип напряженно-деформированного состояния определяется с использованием коэффициента Надаи–Лоде [25]:

**Схемы изменения прочностных свойств и деформационных характеристик материала закладки во времени**  
**Schemes of strength properties and deformation characteristics of the backfill material during the time**

№ схемы		$t$ , сут			
		0	15	30	
1	$E(t)$ , МПа	$E_0 = E = 20$	$E_1 = 50E = 1 \cdot 10^3$	$E_2 = 100E = 2 \cdot 10^3$	
2		$E_0 = E = 20$	$E_1 = 100E = 2 \cdot 10^3$	$E_2 = 100E = 2 \cdot 10^3$	
3		$E_0 = E = 20$	$E_1 = 10E = 0,2 \cdot 10^3$	$E_2 = 100E = 2 \cdot 10^3$	
4		$t$ , сут			
		0	10	20	30
		$E_0 = E = 20$	$E_1 = 4,6E = 92,5$	$E_2 = 21E = 427$	$E_3 = 100E = 2 \cdot 10^3$

$$\mu = \frac{2(\sigma_2 - \sigma_3)}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1. \quad (2)$$

Здесь и далее везде  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  — соответственно максимальное, среднее и минимальное главные напряжения.

Коэффициент Надаи–Лоде принимает значения в интервале  $[-1, 1]$ , при этом интервал, в котором находится значение коэффициента Надаи–Лоде, характеризует тип напряженно-деформированного состояния следующим образом:

$\mu \in [-1; -0,5)$  — обобщенное растяжение;

$\mu \in [-0,5; 0,5]$  — обобщенный сдвиг;

$\mu \in (0,5; 1]$  — обобщенное сжатие.

В качестве критериев предельного состояния были выбраны следующие: критерий наибольших напряжений [25]; критерий предельных деформаций; критерий Кулона–Мора [26]. Критерии предельного состояния применяются следующим образом: определяется тип обобщенного напряженного состояния по коэффициенту Надаи–Лоде, затем в зонах обобщенного сжатия либо растяжения применяются соответствующие критерии наибольших напряжений или предельных деформаций, а в зонах обобщенного сдвига — критерий Кулона–Мора.

Предельные значения деформации для сильвинита и каменной соли получают на основе обработки данных экспериментальных или натурных исследований. Предельная деформация сжатия  $\varepsilon_{\text{comp}}$  лежит в диапазоне 2–6%; предельная деформация растяжения  $\varepsilon_{\text{tens}}$  — в диапазоне 0,1–0,2% [27].

## Результаты

На рис. 3, 4 представлены результаты моделирования на всех этапах процесса отработки пласта полезного ископаемого в виде графиков опасных объемов зон предельного состояния в зависимости от расчетного шага. Для оценки эффективности той или иной схемы поведения

закладочного материала используем далее понятие опасного объема, т.е. объема, где по одному из критериев массив переходит в предельное состояние. Сравнение различных схем поведения материала закладки производится по значениям опасных объемов.

Отметим, что по критериям наибольших сжимающих, наибольших растягивающих деформаций и наибольших растягивающих напряжений зоны предельного состояния не образуются или образуются незначительные несвязные зоны, не оказывающие влияния на устойчивость массива.

Общий вид зон предельного состояния, сформировавшихся после закладки всех камер (на последнем расчетном шаге), показан на рис. 4 на примере схемы № 4. Подобный вид имеют зоны предельного состояния при применении схем № 1, № 2 и № 3.

Зоны возможного трещинообразования преимущественно распространяются вниз от выработанного пространства, а не вверх (см. рис. 4, б). Данный факт обусловлен особенностями геологического строения и прочностными свойствами горных пород.

## Обсуждение результатов

В результате серии численных модельных расчетов выполнены оценки НДС на каждом из этапов технологии ведения горных работ с закладкой выработанного пространства (см. рис. 1). Рассмотрены различные схемы консолидации закладочного материала (см. табл. 3) и произведен анализ влияния режимов консолидации на геомеханическое состояние массива горных пород в окрестности выработанного пространства.

В табл. 4 отмечены красным цветом номера схем возможного изменения механического состояния (консолидации) закладочного материала, которые в ре-



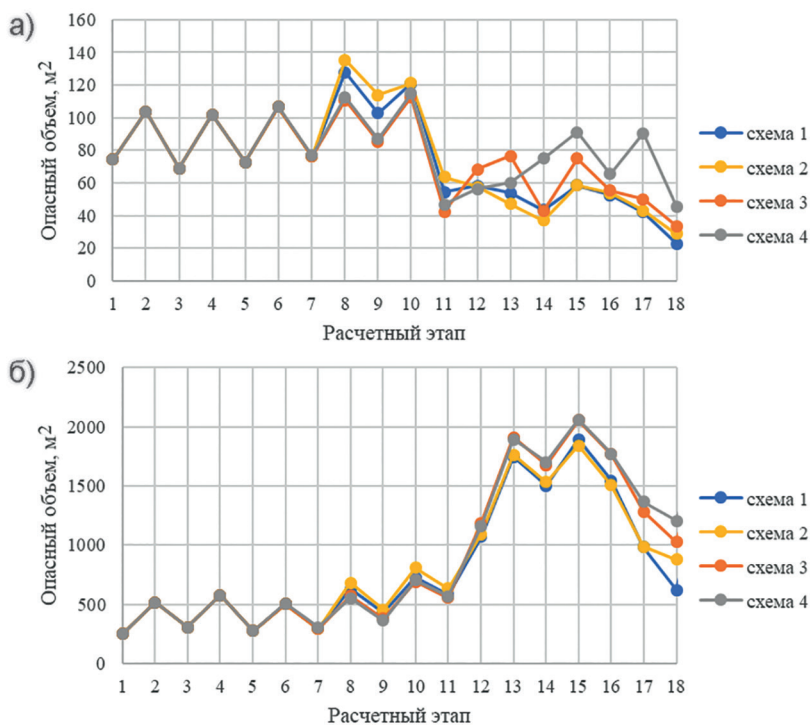


Рис. 3. Графики значений опасных объемов зон предельного состояния на различных расчетных шагах: по критерию наибольших сжимающих напряжений (а); по критерию Кулона–Мора (б)  
 Fig. 3. Values of dangerous volumes of the limit state zones on the different computational steps by: minimum principal stress criteria (a); Coulomb–Mohr criteria (b)

зультате сравнительного анализа геомеханического состояния вмещающего массива в окрестности обрабатываемого пространства на каждом из этапов моделирования оказывались самыми неблагоприятными. Сравнение проводилось

по величине суммарной площади конечных элементов, в которых нарушается какой-либо из вышеприведенных критериев (размеры опасного объема) в окрестности рассматриваемых камер. При закладке каждой камеры в рамках одной

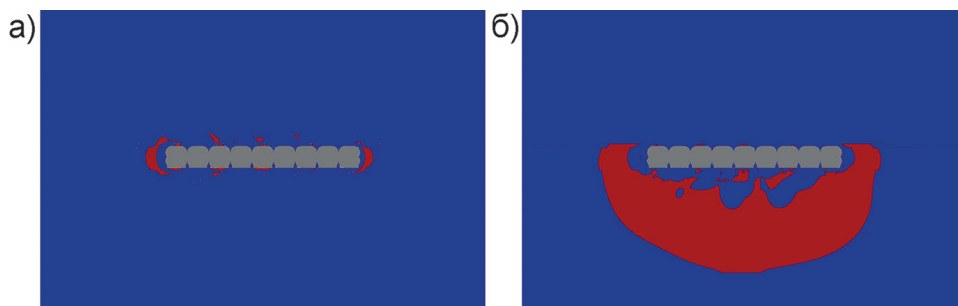


Рис. 4. Общий вид зон предельного состояния (красным) на последнем расчетном шаге (на примере схемы № 4): по критерию наибольших сжимающих напряжений (а); по критерию Кулона–Мора (б)  
 Fig. 4. Common view of the limit state zones (with red) on the last computational step (scheme no. 4) by: minimum principal stress criteria (a); Coulomb–Mohr criteria (b)

Таблица 4

**Оценка геомеханического состояния вмещающего массива на основе критериев предельного состояния при использовании различных схем возможного изменения механического состояния (консолидации) закладочного материала**

**Estimation of geomechanical state of the massif through limiting state criteria during usage of different schemes of possible changing of mechanical state (consolidation) of backfill material**

№ и описание шага		№ схемы			
		1	2	3	4
1	Проходка камеры № 1				
2	Проходка камеры № 2				
3	Закладка камеры № 1				
4	Проходка камеры № 3				
5	Закладка камеры № 2				
6	Проходка камеры № 4				
7	Закладка камеры № 3				
8	Проходка камеры № 5				
9	Закладка камеры № 4				
10	Проходка камеры № 6				
11	Закладка камеры № 5				
12	Проходка камеры № 7				
13	Проходка камеры № 8				
14	Закладка камеры № 6				
15	Проходка камеры № 9				
16	Закладка камеры № 7				
17	Закладка камеры № 8				
18	Закладка камеры № 9				

схемы предполагалось, что используют смеси с одинаковым режимом консолидации.

### Заключение

Установлено, что с точки зрения влияния режима консолидации закладочного материала на геомеханическое состояние вмещающего массива в окрестности обрабатываемого пространства:

- на этапах ведения горных работ до начала отработки целиков более предпочтительными являются технологические схемы, при которых закладочный материал «медленно набирает свою максимальную жесткость», то есть остается податливым в течение большого периода времени;

- на этапах отработки целиков более эффективными являются схемы, при

которых на момент начала отработки целика закладка консолидируется (набирает наибольшую жесткость).

Таким образом, по результатам выполненных исследований получено, что при камерной системе разработки пластовых месторождений полезных ископаемых с закладкой отработанного пространства и последующей отработкой целиков наиболее эффективным является вариант равномерного набора жесткости закладочного материала.

Установлено, что до этапа отработки междукамерных целиков предпочтительным является вариант, при котором закладочный материал является податливым. Когда же начинают обрабатывать целики, то к тому моменту времени закладочный материал должен «набрать» свою максимальную жесткость.

Среди рассмотренных вариантов различных схем изменения механического состояния закладочного материала во времени наиболее удовлетворяющим заявленным условиям является вариант № 1, т.е. вариант, реализующий равномерное увеличение жесткости во времени закладочного материала. Отметим,

что оптимальный характер поведения и затвердевания закладочного материала должен быть установлен для конкретной технологической схемы отработки и закладки массива, в частности, под конкретные временные промежутки между началом горных работ и началом отработки междукамерных целиков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппов С. А., Артемова А. Ю. Формирование концепции рационального освоения запасов солей Верхнекамского месторождения // Недропользование XXI век. — 2009. — № 4. — С. 92–93.

2. Zhang Z. X., Hou D. F., Aladejare A., Ozoji T., Qiao Y. World mineral loss and possibility to increase ore recovery ratio in mining production // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2021, vol. 35, no. 9, pp. 670–691.

3. Каримов Ё. Л., Хужакулов А. М., Латипов З. Ё. У. Гидравлическая закладка выработанного пространства при подземной добыче калийных руд // Journal of Advances in Engineering Technology. — 2020. — № 1. — С. 25–28.

4. Fliß T., Marx H., Thona H. Backfilling and pillar re-mining in potash industry / Minefill 2011, 10th International Symposium on Mining with Backfill, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2011, режим доступа: [https://www.k-utec.de/fileadmin/redakteur/GMB/Dokumente/paper\\_kutec\\_minefill\\_en1.pdf](https://www.k-utec.de/fileadmin/redakteur/GMB/Dokumente/paper_kutec_minefill_en1.pdf).

5. Marx H., Lack D., Krauke W. Substantial aspects of the recycling of industrial wastes as backfilling material in salt mines / 20th World Mining Congress & EXPO «Mining and Sustainable Development». Tehran, Iran, 2005, режим доступа: [https://www.k-utec.de/fileadmin/redakteur/Downloads/Veroeffentlichungen\\_und\\_Praesentationen/abstract3.pdf](https://www.k-utec.de/fileadmin/redakteur/Downloads/Veroeffentlichungen_und_Praesentationen/abstract3.pdf).

6. Dyduch G., Jarczyk P., Jendryś M. Geomechanical analysis of the rock mass stability in the area of the «Regis» shaft in the «Wieliczka» salt mine / Minefill 2020–2021, CRC Press, 2021, pp. 349–359. DOI: 10.1201/9781003205906-31.

7. Смирнов Э. В., Чернопазов Д. С., Секунцов А. И. Технология последовательной выемки запасов сильвинитовых пластов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2017. — № 2. — С. 11–16.

8. Васильев А. Л., Васильева М. А. Применение гидравлической закладки на основе твердеющих смесей из отходов калийного производства // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. — 2015. — № 1. — С. 224–227.

9. Титов Н. В., Евсюкова А. А., Колесниченко Е. И. Исследование возможности применения твердеющей закладки, формируемой на основе отходов обогащения сильвинитовой руды / Современные прикладные исследования. Материалы седьмой Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Шахты, 2021. — С. 308–310.

10. Радченко Д. Н., Татарников В. И. Выбор состава закладочных смесей для формирования консолидированного закладочного массива при подземной отработке Гремячинского месторождения / Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр. Материалы 5-й конференции Международной научной школы академика РАН К.Н. Трубецкого. — М.: ИПКОН РАН, 2022. — С. 222–225.

11. Дешковский В. Н., Новокшонов В. Н., Палто П. П. Разработка методики расчета высоты распространения зоны водопроводящих трещин для столбовых систем разработки с частичной закладкой выработанного пространства в виде бутовых полос // Горная механика. — 2007. — № 2. — С. 77–84.

12. Шваб Р. Г., Дешковский В. Н. Управление состоянием подрабатываемого массива горных пород частичной закладкой выработанного пространства в виде бутовых полос из разрушенного галита при извлечении запасов калийных руд столбовой системой разработки // Недропользование. — 2009. — № 4. — С. 20–27.

13. Ковальский Е. Р., Громцев К. В. Разработка технологии закладки выработанного пространства при выемке // Записки Горного института. — 2022. — Т. 254. — С. 202–209. DOI: 10.31897/PMI.2022.36.
14. Гилев М. В., Константинова С. А., Мараков В. Е., Чернопазов С. А. Закладка выработанного пространства при разработке сильвинитовых пластов как конструктивный элемент системы разработки // Маркшейдерский вестник. — 2007. — № 1. — С. 33–40.
15. Рыбак Я., Хайрутдинов М. М., Кузиев Д. А., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Бабырь Н. В. Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой // Записки Горного института. — 2022. — Т. 253. — С. 61–70. DOI: 10.31897/PMI.2022.2.
16. Rybak J. M., Kongar-Syuryun C., Tyulyaeva Y., Khayrutdinov A. M., Akinshin I. Geomechanical substantiation of parameters of technology for mining salt deposits with a backfill // Mining Science. 2021, vol. 28, pp. 19–32. DOI: 10.37190/msc212802.
17. Akinshin I., Missal C., te Kamp L. Simulation of pressure and time-dependent behavior of backfill material in numerical calculations // Mining Report. 2017, vol. 153, no. 2, pp. 166–172.
18. Конгар-Сюрюн Ч. Б., Ковальский Е. Р. Твердеющие закладочные смеси на калийных рудниках: перспективные материалы, регулирующие напряженно-деформированное состояние массива // Геология и геофизика Юга России. — 2023. — Т. 13. — № 4. — С. 177–187. DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014.
19. Wang J., Zhang Q., Li M., Liu H., Zhu C. Effect of compressive behaviours of tail salt filling materials on roof deformation in potash mine // Advances in Civil Engineering. 2021, vol. 2021, pp. 1–10.
20. Pokhee N., Thongprapha T., Artkhonghan K., Fuenkajorn K. Consolidation of compacted sludge-crushed salt mixtures as backfill in potash mines // Engineering Journal of Research and Development. 2020, vol. 31, no. 3, pp. 41–48.
21. Sitthimongkol L., Thongprapha T., Fuenkajorn K. Properties of compacted bentonite-aggregate mixtures as backfill in salt and potash mines // Engineering Journal of Research and Development. 2020, vol. 31, no. 1, pp. 45–53.
22. Савич И. Н., Зенько Д. К., Айнбиндер И. И., Савич О. И. К вопросу о классификации технологий и составов закладки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2000. — № 1. — С. 186–187.
23. Господариков А. П., Зацепин М. А. Математическое моделирование прикладных задач механики горных пород и массивов // Записки Горного института. — 2014. — Т. 207. — С. 217–221.
24. Журавков М. А., Николайчик М. А., Климович Н. М. Оценка возможности уменьшения размеров охранных целиков при ведении очистных работ в окрестности шахтных стволов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2023. — Т. 10. — № 2. — С. 32–39.
25. Журавков М. А., Лопатин С. Н. Геомеханика глубоких подземных сооружений / Нефтехимия–2021: Материалы IV Международного научно-технического форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке. — Минск: БГТУ, 2021. — С. 280–283.
26. Кургузов В. Д. Сравнительный анализ критериев разрушения искусственных строительных материалов и горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 5. — С. 79–89. DOI: 10.15372/FTPPI20190509.
27. Журавков М. А., Зубович В. С. Устойчивость и сдвигание массивов горных пород. — М.: РУДН, 2009. — 432 с. **PLoS**

## REFERENCES

- Filippov S. A., Artemova A. Y. Forming of the conception of rational development of the salt reserves of the Verkhnekamskoe deposit. *Nedropolzovanie XXI vek*. 2009, no. 4, pp. 92–93. [In Russ].
- Zhang Z. X., Hou D. F., Aladejare A., Ozoji T., Qiao Y. World mineral loss and possibility to increase ore recovery ratio in mining production. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2021, vol. 35, no. 9, pp. 670–691.
- Karimov Y. L., Huzhakulov A. M., Latipov Z. Y. U. Hydraulic backfill of a mined-out space during the underground excavation of potash. *Journal of Advances in Engineering Technology*. 2020, no. 1, pp. 25–28. [In Russ].
- Fliß T., Marx H., Thona H. Backfilling and pillar re-mining in potash industry. *Minefill 2011, 10th International Symposium on Mining with Backfill, The Southern African Institute of Mining and*

*Metallurgy*. 2011, available at: [https://www.k-utec.de/fileadmin/redakteur/GMB/Dokumente/paper\\_kutec\\_minefill\\_en1.pdf](https://www.k-utec.de/fileadmin/redakteur/GMB/Dokumente/paper_kutec_minefill_en1.pdf).

5. Marx H., Lack D., Krauke W. Substantial aspects of the recycling of industrial wastes as backfilling material in salt mines. *20th World Mining Congress & EXPO «Mining and Sustainable Development»*. Tehran, Iran, 2005, available at: [https://www.k-utec.de/fileadmin/redakteur/Downloads/Veroeffentlichungen\\_und\\_Praesentationen/abstract3.pdf](https://www.k-utec.de/fileadmin/redakteur/Downloads/Veroeffentlichungen_und_Praesentationen/abstract3.pdf).

6. Dyduch G., Jarczyk P., Jendryś M. Geomechanical analysis of the rock mass stability in the area of the «Regis» shaft in the «Wieliczka» salt mine. *Minefill 2020–2021*, CRC Press, 2021, pp. 349–359. DOI: 10.1201/9781003205906-31.

7. Smirnov E. V., Chernopazov D. S., Sekuntsov A. I. The technology of successive winning of silvinitic seams reserves in the conditions of Verkhnekamskoye deposit of potassium salts. *Minerals and Mining Engineering*. 2017, no. 2, pp. 11–16. [In Russ].

8. Vasilyev A. L., Vasilyeva M. A. Using of hydraulic filling on a base of hardening mixtures from the potash industry wastes. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh*. 2015, no. 1, pp. 224–227. [In Russ].

9. Titov N. V., Evsyukova A. A., Kolesnichenko E. I. Investigation of the possibility of using a hardening bookmark formed on the basis of silvinitic ore dressing waste. *Sovremennye prikladnye issledovaniya. Materialy sed'moy Vserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern applied research. Proceedings of the seventh All-Russian (National) Scientific and Practical Conference], Shakhty, 2021, pp. 308–310. [In Russ].

10. Radchenko D. N., Tatarnikov V. I. Choose of the formulation of the backfilling mixtures for the forming of the consolidated filling massif during underground extraction in the Gremyachinskoye deposit. *Problemy i perspektivy kompleksnogo osvoeniya i sokhraneniya zemnykh nedr. Materialy 5-y konferentsii Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly akademika RAN K.N. Trubetskogo* [Problems and prospects of integrated development and conservation of the Earth's interior. Proceedings of the 5th conference of the International Scientific School of Academician of the Russian Academy of Sciences K.N. Trubetskoy], Moscow, IPKON RAN, 2022, pp. 222–225. [In Russ].

11. Deshkovskiy V. N., Novokshonov V. N., Palto P. P. Development of the methodology of estimation of the height of the water conducting cracks zone propagation for the pillar mining system with partial filling of the mined-out area with the gob pack. *Gornaya mekhanika*. 2007, no. 2, pp. 77–84. [In Russ].

12. Shvab R. G., Deshkovskiy V. N. Control of the state of the worked rock massif by the partial filling of mined-out area with the gob pack from the destroyed halite during the potash excavation. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*. 2009, no. 4, pp. 20–27. [In Russ].

13. Kovalskii E. R., Gromtsev K. V. Development of the technology of stowing the developed space during mining. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 254, pp. 202–209. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.36.

14. Gilev M. V., Konstantinova S. A., Marakov V. E., Chernopazov S. A. Filling of the mined-out space during mining silvinitic layers as a constructive element of the mining system. *Mine Surveying Bulletin*. 2007, no. 1, pp. 33–40. [In Russ].

15. Rybak J., Khayrutdinov M. M., Kuziev D. A., Kongar-Syuryun C. B., Babyr N. V. Prediction of the geomechanical state of the rock mass when mining salt deposits with stowing. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 61–70. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.2.

16. Rybak J. M., Kongar-Syuryun C., Tyulyaeva Y., Khayrutdinov A. M., Akinshin I. Geomechanical substantiation of parameters of technology for mining salt deposits with a backfill. *Mining Science*. 2021, vol. 28, pp. 19–32. DOI: 10.37190/msc212802.

17. Akinshin I., Missal C., te Kamp L. Simulation of pressure and time-dependent behavior of backfill material in numerical calculations. *Mining Report*. 2017, vol. 153, no. 2, pp. 166–172.

18. Kongar-Syuryun Ch. B., Kovalski E. R. Hardening backfill at potash mines: promising materials regulating stress-strain behavior of rock mass. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023, vol. 13, no. 4, pp. 177–187. [In Russ]. DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014.

19. Wang J., Zhang Q., Li M., Liu H., Zhu C. Effect of compressive behaviours of tail salt filling materials on roof deformation in potash mine. *Advances in Civil Engineering*. 2021, vol. 2021, pp. 1–10.

20. Pokhee N., Thongprapha T., Artkhonghan K., Fuenkajorn K. Consolidation of compacted sludge-crushed salt mixtures as backfill in potash mines. *Engineering Journal of Research and Development*. 2020, vol. 31, no. 3, pp. 41–48.

21. Sitthimongkol L., Thongprapha T., Fuenkajorn K. Properties of compacted bentonite-aggregate mixtures as backfill in salt and potash mines. *Engineering Journal of Research and Development*. 2020, vol. 31, no. 1, pp. 45–53.

22. Savich I. N., Zenko D. K., Ainbinder I. I., Savich O. I. To the problem of the classification of the technologies and compositions of the backfilling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2000, no. 1, pp. 186–187. [In Russ].

23. Gospodarikov A. P., Zatssepina M. A. Mathematical modelling of applied problems of rock mechanics and rock massifs. *Journal of Mining Institute*. 2014, vol. 207, pp. 217–221. [In Russ].

24. Zhuravkov M. A., Nikolaichik M. A., Klimkovich N. M. Estimation of the possibility to decrease the size of the pillars during excavations in vicinity of the shaft. *Mining sciences: fundamental and applied issues*. 2023, vol. 10, no. 2, pp. 32–39. [In Russ].

25. Zhuravkov M. A., Lopatin S. N. Geomechanics of the deep underground constructions. *Neft-khimiya–2021: Materialy IV Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma po khimicheskim tekhnologiyam i neftegazopererabotke* [Petrochemistry–2021: Proceedings of the IV International Scientific and Technical Forum on Chemical Technologies and Oil and Gas Processing], Minsk, BGUT, 2021, pp. 280–283. [In Russ].

26. Kurguzov V. D. Comparing analysis of the failure criteria of the artificial construction materials and rocks. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2019, no. 5, pp. 79–89. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20190509.

27. Zhuravkov M. A., Zubovich V. S. *Ustoychivost' i sdvizhenie massivov gornykh porod* [Stability and displacement of rock massifs], Moscow, RUDN, 2009, 432 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Журавков Михаил Анатольевич*<sup>1</sup> — д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, e-mail: zhuravkov@bsu.by, ORCID ID: 0000-0002-7420-5821,

*Николайчик Михаил Александрович*<sup>1</sup> — канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией, e-mail: nikolaitchik.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3733-1615,

*Петрачков Даниил Александрович*<sup>1</sup> — магистр физ.-мат. наук, младший научный сотрудник, e-mail: petrachkou.daniil@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-7385-6162,

*Феоктистов Павел Геннадьевич*<sup>2</sup> — директор, e-mail: pavel.feoktistov@pgrp.by, ORCID ID: 0000-0003-3733-1615,

*Морочковский Иван Владимирович*<sup>2</sup> — начальник горного отдела, e-mail: ivan.morochkovski@pgrp.by, ORCID ID: 0009-0000-2230-1494,

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет,

<sup>2</sup> ООО «ПГП».

**Для контактов:** Петрачков Д.А., e-mail: petrachkou.daniil@gmail.com.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*M.A. Zhuravkov*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Professor, Head of Chair, e-mail: zhuravkov@bsu.by, ORCID ID: 0000-0002-7420-5821,

*M.A. Nikolaitchik*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Phys. Mathem.), Head of Laboratory, e-mail: nikolaitchik.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3733-1615,

*D.A. Petrachkov*<sup>1</sup>, Master of Science, Junior Researcher, e-mail: petrachkou.daniil@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-7385-6162,

*P.G. Feoktistov*<sup>2</sup>, Director, e-mail: pavel.feoktistov@pgrp.by,  
ORCID ID: 0000-0003-3733-1615,  
*I.V. Morochkovski*<sup>2</sup>, Head of Mining Department,  
e-mail: ivan.morochkovski@pgrp.by,  
ORCID ID: 0009-0000-2230-1494,

<sup>1</sup> Belarusian State University, 220030, Minsk, Belarus,

<sup>2</sup> LLC «PGP», 220024, Minsk, Belarus.

**Corresponding author:** D.A. Petrachkov, e-mail: petrachkou.daniil@gmail.com.

Получена редакцией 04.06.2024; получена после рецензии 29.01.2025; принята к печати 10.04.2025.

Received by the editors 04.06.2024; received after the review 29.01.2025; accepted for printing 10.04.2025.



---

**ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ  
(СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)**

---

**РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВТОРНОЙ ДОБЫЧИ РУД ИЗ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ,  
ОСТАВЛЕННЫХ В ЗОНЕ ОБРУШЕНИЯ НА ЗАВЕРШАЮЩЕЙ СТАДИИ ОТРАБОТКИ  
ЖЕЗКАЗГАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

(2025, № 2, СБ 4, 20 с.)

*Бекбергенов Досанбай Калдврбаевич* — канд. техн. наук, зав. лабораторией,  
Институт горного дела им. Д.А. Кунаева, Алматы, Казахстан, e-mail: kdbekbergen@mail.ru,  
*Зейнуллин Абдикарим Абжалелович* — д-р техн. наук, профессор,  
Казахский университет технологии и бизнеса им. К. Кулажанова, Казахстан.

Приведены результаты исследования по обоснованию технологии повторной выемки ранее оставленных запасов из междукammerных целиков в блоках в сложных горнотехнических условиях зоны обрушения с полевой подготовкой с применением металлической арочной крепи и последующим обрушением и выпуском руды. Определены конструктивные параметры буро-доставочных выработок при системе с полевой подготовкой и представлена технологическая схема с расчетами параметров отбойки для разбуривания междукammerных целиков, а также порядок проведения горных работ при отработке оставленных запасов руд из целиков. Представлены расчетные технологические сетки и глубина анкерного крепления на отработываемом участке по рекомендуемой технологической схеме. Обоснованы шаг установки податливых металлических арочных рам в зависимости от физико-механических свойств массива пород для проходки буро-доставочных выработок. Спроектированы сечения буро-доставочных выработок с деталями крепления податливого металлического арочного рамного крепления с объемами работ и расходом материалов. Решены вопросы вентиляции и выбраны самоходные погрузочно-доставочные машины с расчетами их производительности до участкового рудоспуска рудника.

Ключевые слова: повторная выемка, междукammerные целики, зона обрушения, металлическая арочная крепь, полевая подготовка, анкерное крепление, схема разбуривания междукammerных целиков, типовой паспорт буро-доставочных выработок.

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR THE RE-EXTRACTION OF ORE FROM INTER-CHAMBER PILLARS  
LEFT IN THE COLLAPSE ZONES AT THE FINAL STAGE OF WORKING OUT OF ZHEZKAZGAN DEPOSIT**

*D.K. Bekbergenov*, Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory,  
D.A. Kunaev Institute of Mining, Almaty, Kazakhstan, e-mail: kdbekbergen@mail.ru,  
*A.A. Zeynullin*, Dr. Sci. (Eng.), Professor, K.Kulazhanov Kazakh University of Technology and Business.

The results of a study to substantiate the technology of re-excavation of previously abandoned reserves from inter-chamber pillars in blocks in difficult mining conditions of the collapse zone with field training using metal arch supports and subsequent collapse and ore release are presented. The design parameters of drilling and delivery workings with a field-trained system are determined and a technological scheme is presented with calculations of the parameters of the chipping for drilling inter-chamber pillars, as well as the procedure for mining operations during the development of abandoned ore reserves from the pillars. The calculated technological grids and the depth of anchoring in the area under development are presented according to the recommended technological scheme. The step of installing malleable metal arched frames is justified depending on the physical and mechanical properties of the rock mass for drilling and delivery workings. Sections of drilling and delivery workings with details of fastening of a pliable metal arched frame fastening with volumes of work and consumption of materials are designed. Ventilation issues have been resolved and self-propelled loading and delivery machines have been selected with calculations of their productivity before the site mine start-up.

Key words: re-excavation, inter-chamber sights, collapse zone, metal arch support, field training, anchor fastening, drilling scheme of inter-chamber sights, standard passport of drilling and delivery workings.