

### Раздел 3. Физика горных процессов на больших глубинах

УДК 622.273.217.4

<https://doi.org/10.37101/ftpgp21.01.011>

#### ВЗАИМОСВЯЗЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАКЛАДОЧНОГО МАССИВА С ЕГО КАЧЕСТВЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

М.В. Петлёванный<sup>1\*</sup>, А.М. Кузьменко<sup>1</sup>, Е.С. Сай<sup>1</sup>, А.В. Филоненко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет «Днепровская политехника»,  
г. Днепр, Украина

\*Ответственный автор: e-mail: petlyovany@ukr.net

#### RELATIONSHIP OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF BACKFILLING MASSIF FORMATION WITH ITS QUALITATIVE CHARACTERISTICS

M.V. Petlovanyi<sup>1\*</sup>, O.M. Kuzmenko<sup>1</sup>, K.S. Sai<sup>1</sup>, O.V. Filonenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

\*Corresponding author: e-mail: petlyovany@ukr.net

#### ABSTRACT

**Purpose.** To solve the of the relationship between the technological parameters of the formation of the backfilling massif from the hardening backfill with its qualitative characteristics.

**Methods.** The paper carried out analytical studies of the formation of the backfilling massif on the basis of a comprehensive analysis of the actual data of the parameters of the filling operations during the intensive processing of the extracting chambers: the complex's performance, the operation of ball mills, the mobility of the mixture, the composition of the filling mixture, the strength of the filling mixture before being fed into the chamber, and the fineness of grinding of the binder material.

**Findings.** The results of analytical studies of the relationship of technological parameters of the formation of the backfilling massif and its qualitative characteristics are presented. The negative effect of the layering of the backfilling massif on its stability and quality is established. It is proposed to use the coefficient of variation of the backfill strength along the height of the chamber for the most complete strength characteristics of the backfilling massif. The relationship between the strength of the backfill and the amount of dilution of the ore is obtained.

**Originality.** The nonlinear nature of the change in the strength of the backfilling massif along the height of the treatment chamber is established, depending on fluctuations in the fineness of grinding of the binder, the composition of the filling mixture, and the stops of the filling complex and leading to a deterioration in its quality characteristics.

**Practical implications.** The results can be used to refine the calculated parameters of the extraction chambers, where the strength of the contacting backfilling massif is taken into account. The results are useful for making additions to projects for filling the spent chamber spaces with a hardening backfill.

**Keywords:** filling mass, component, composition, strength, backfill layer destruction

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Мировой и отечественный опыт подземной разработки руд ценных черных и цветных металлов, показывает, что основным приоритетным направлением развития горных работ является внедрение различных вариантов систем разработки с твердеющей закладкой, при которых достигаются высокие технико-экономические показатели [1-3]. Успешное внедрение систем разработки с закладкой обеспечивает полноту выемки руд при минимальных потерях и засорении, безопасность ведения горных работ, снижает техногенную нагрузку на природную окружающую среду [4-5].

При подземной добыче мощных рудных залежей камерными системами с твердеющей закладкой одним из важных вопросов является сохранение устойчивости обнажения искусственного массива, способного безопасно воспринимать нагрузку от налегающих пород [6-7]. Формирование прочного и устойчивого массива обеспечивается подбором закладочных материалов с определенными физико-химическими свойствами и соблюдением оптимальных технологических параметров его возведения.

Эффективность применения систем разработки рудных залежей с твердеющей закладки, оценивается по величине потерь и разубоживания руды [8-10]. Попадание закладки в отбитую руду (разубоживание) по причине ее низкой устойчивости к проявлениям горного давления и сейсмических воздействий взрывных работ значительно снижает ее качество. Существует ряд причин, под влиянием которых закладочный массив формируется разного качества и устойчивости, и это является важной задачей для горной науки. Одной из причин снижения устойчивости закладочного массива является условия и параметры его формирования в выработанном пространстве камер, что часто приводит к его неоднородности и слоистости [11-12].

Данная статья посвящена вопросам исследования влияния параметров формирования закладочного массива на его качественные характеристики при отработке Южно-Белозерского месторождения.

## 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования возведения и формирования прочности закладочного массива при заполнении отработанных камер были проанализированы данные закладочных работ при отработке запасов руд в этаже 640-740 м и 740-840 м, отработанные камеры которых заполнялись твердеющей закладкой из молотых металлургических шлаков, отходов известняков и дробленных отвальных пород. Проанализированы следующие параметры закладочных работ при интенсивной отработке очистных камер: производительность ком-

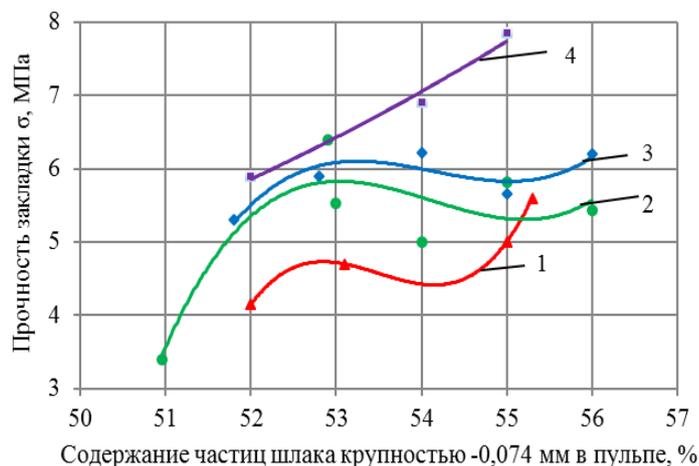
плекса, время работы шаровых мельниц, подвижность смеси, состав закладочной смеси, прочность закладочной смеси перед подачей в камеру в возрасте 90 дней, контроль тонкости измельчения вяжущего материала. На основании анализа параметров формирования закладочного массива установлены и просчитаны слои твердеющей закладки, которые образуются при остановке закладочного комплекса в процессе укладки закладочной смеси в камере. Проведен анализ данных разубоживания добытой руды из камер этажа 640-740 м на контакте с закладочным массивом и прочностной характеристикой контактирующего закладочного массива.

Необходимо установить негативное влияние слоистости закладочного массива на его устойчивость и качество. В данной работе предложено для наиболее полноценной прочностной характеристики закладочного массива использовать коэффициент изменения прочности закладки по высоте камеры.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В Украине единственное предприятие, применяющее технологию разработки запасов богатых железных руд Южно-Белозерского месторождения с твердеющей закладкой, является ПИИ ЧАО «Запорожский железорудный комбинат». В зависимости от технологических особенностей отработки и значимости камер выработанное пространство заполняют различными составами.

Обработка данных закладочных работ по приготовлению вяжущего материала на поверхностном комплексе при закладке камер в этаже 640-740 м позволила установить ряд зависимостей прочности закладки от доли частиц в пульпе при промышленной тонкости помола 50 – 55 % частиц - 0,074 мм при разных соотношениях компонентов в закладочной смеси (рис. 1).



**Рисунок 1. Взаимосвязь прочности закладки и содержания частиц крупностью -0,074 мм в пульпе мельницы при разных соотношениях вяжущее-заполнитель: (1) – 1:6,4; (2) – 1: 4,6; (3) – 1:4,5; (4) – 1: 4,1**

Анализ приведенных зависимостей (рис. 1) показывает следующее: возрастание прочности закладки наблюдается при тонкости измельчения 55 % частиц крупностью - 0,074 мм. В процессе добычи руды на горизонтах 640, 740 и 840 м при составе закладки с высоким соотношением вяжущее-заполнитель 1:4,1 (расход шлака в смеси 510 кг/м<sup>3</sup>) и максимальной тонкости измельчения 55 % не представляется возможным формирование закладочного массива прочностью 8 – 10 МПа [13]. Для ее повышения необходимо применять в закладочных смесях дорогостоящий цемент или активирующие добавки. К этим мерам приступают для упрочнения днищ камер и слоев закладки в местах расположения подэтажных выработок. Значительную сложность в формировании закладочного массива нормативной прочности оказывает неравномерность измельчения шлака в шаровой мельнице, которое изменяется в достаточно широких пределах от 46 до 55 % частиц крупностью - 0,074 мм [14]. Постоянство распределения доли тонких частиц в закладочной смеси при определенном соотношении химических соединений обеспечит требуемую прочность закладочного массива.

Объем очистного пространства камер, подлежащих закладке, имеет разные величины и зависит от колебания мощности рудной залежи. Камеры северного крыла имеют меньшие размеры, а южного – большие. Объем выработанного пространства камер северной части залежи находится в пределах 60–90, а южной части – 100–150 тыс. м<sup>3</sup> и более. Размер выработанного пространства для размещения определенного объема закладки оказывает влияние на слоистость закладочного массива. С его увеличением возрастает число слоев уложенной твердеющей закладки.

Рассмотрим камеры этажей 640–740, 740–840 м по объему уложенной твердеющей закладки. Слоем закладки считаем объем уложенной порции закладочной смеси, когда перерывы времени между подачами порций закладочной смеси составляют более 24 ч. Это означает, что произошла потеря подвижности смеси и начался процесс схватывания, связанный с гидратацией активных минералов.

В табл. 1. представлены данные объемов заложенных камер и аналитически определены количественные значения слоев уложенной закладки. Полученные результаты свидетельствует о неоднородности получаемого искусственного массива как по структуре так и по прочности.

Данные табл. 1 представим в виде графика, который приведен на рис. 2. График распределения слоев закладки в камерах различных объемов показывает тенденцию возрастания числа слоев твердеющей закладки с увеличением объема пустот камер, способствуя неоднородности массива. Это объясняется тем, что с увеличением объема очистного пространства, подлежащего закладке, возрастает вероятность проявления факторов, влияющих на слоистость.

Таблица 1. Расчетное количество слоев при определенном объеме пустот камер

Этаж	Камера	Расчетное количество слоев	Объем, м <sup>3</sup>
605 – 740	1/7ю	19	158,2
605 – 740	1/3ю	14	126,8
605 – 740	1/1ю	10	169,4
605 – 740	1/15ю	25	169,7
715 – 840	1/1с	17	109,4
740 – 840	1/5ю	26	163,3
605 – 740	1/9ю	15	122,1
715 – 840	1/1ю	17	169,7
715 – 840	2/3с	13	94,4
740 – 840	2/13ю	13	69,2

Распределение количества слоев в заложеной камере от ее объема может быть представлено уравнением вида

$$N = 0,0962V + 4,6417, \text{ при } R^2 = 0,50,$$

где  $N$  – число слоев закладки в камере;  $V$  – объем пустот камер, м<sup>3</sup>.

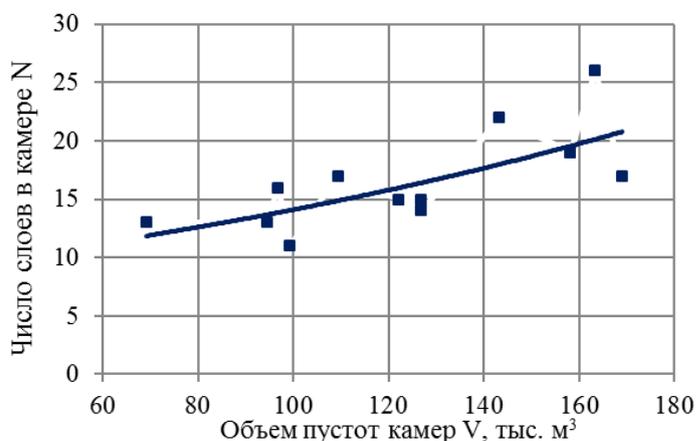


Рисунок 2. Распределение числа слоев закладки от объема камер

Неблагоприятным фактором, влияющим на устойчивость заложеной камеры, является резкое колебание прочности закладки в слоях, которое достигает 2–4 МПа или 50–70 % от установленного норматива, а физико-механические свойства слоев твердеющей закладки характеризуются изотропностью.

Слоистость закладочного массива определяется также количеством подэтажей в камерной системе разработки. При камерной системе разработ-

ки в этажах 640–740 и 740–840 м 4 подэтажа. Уменьшение количества слоев закладки может быть достигнуто при переходе на другой вариант системы разработки, где уменьшается количество подэтажных нарезных выработок. Устойчивость горизонтальных и вертикальных обнажений закладочного массива находится в прямой зависимости от качества закладочной смеси, времени твердения и монолитности, а монолитность зависит от степени расчленения смеси в перерывах при закладке камер.

Установлено, что закладочный массив обладает слоистостью на всех горизонтах и по элементам камер (потолочина, днище, бока). Неоднородность закладочного массива по прочности наблюдается в камерах первой очереди отработки в этажах 640–740 и 740–840 м. Это – негативный фактор, так как массив является несущей опорой при разработке камер второй очереди. В очистное пространство закладочный массив обрушается в двух направлениях: при разработке камер нижележащего этажа в форме обрушения заложенного днища верхнего этажа и с боков ранее заложенных камер.

С увеличением непрерывности подачи закладочной смеси количество слоев уменьшается, массив приобретает монолитность. Стоит отметить, что прочность днищ камер достаточно часто получается низкой, даже с учетом добавления цемента. Это связано с тонкостью помола шлаков и свойствами новообразований. Как правило, слой твердеющей закладки днища камеры отстаивается 24 часа и более. Второй слой обладает более низкими прочностными свойствами и связь контакта поверхностного слоя днища (адгезия) и второго слоя ослабевает, приводя к отрыву (отслоению) объема закладки днища камеры под действием гравитационных сил. Важную роль также играет время старения смеси первого слоя (днища), так как с увеличением времени отстаивания слоя закладки сила адгезии между первым и вторым слоем будет снижаться. Поэтому при сокращении отстаивания уложенной порции закладочной смеси  $t < 20$  ч заложенный массив стремится к однородности. Для снижения слоистости закладочного массива не представляется возможным уменьшить число остановок мельниц, поэтому прочность в формируемых слоях должна соответствовать нормативной.

Так средняя прочность закладочного массива не всегда выдерживается, что прослеживается в камерах этажа 605–740 м: 1/5ю – 4,5 МПа, 1/1 с – 5,4 МПа, 1/3ю – 5 МПа, 1/9ю – 4,4 МПа, 1/9с – 4,6 МПа, 1/7с – 5,1 МПа, 1/11ю – 5,4 МПа, 1/15ю – 5,3 МПа, 1/16с – 5,3 МПа; и в этаже 715–840 м: 2/3ю – 5,4 МПа, 2/3с – 4,1 МПа, 2/1ю – 4,3 МПа, 2/11ю – 4,4 МПа, 2/9ю – 4,9 МПа, 1/8с – 5,4 МПа. Если для вторичных камер прочность и состав закладки не регламентируется, то для первичных камер прочность должна соответствовать нормативному значению.

С увеличением глубины разработки растягивающие напряжения вокруг очистной камеры возрастают и превышают фактическая прочность закладочного массива на растяжение находится всего лишь в пределах 0,05-0,1  $\sigma_{сж}$ . Это приводит к отслоению и выдавливанию с последующим осыпанием части заложенного массива от общего объема заложенной камеры [15-16]. Узким местом при заполнении очистной камеры твердеющей смесью является создание прочного фундамента днища. От прочности твердеющей закладки

днища будет зависеть устойчивость кровли очистной камеры нижележащего этажа. При отработке руды глубоких горизонтов этажей 640–740 и 740–840 м объемы камеры имеют большие значения, площадь и высота обнажения закладочного массива увеличиваются, что требует строгого подхода к прочности.

Для расчета объемов закладочной смеси, уложенной в слое и определения его высоты, использовались параметры закладочного комплекса и данные по объему и форме выработанного пространства пустой камеры под закладку.

Объем слоя закладки вычислялся из выражения

$$V_c = tQ_3, \text{ м}^3,$$

где  $t$  – время заполнения слоя, ч;  $Q_3$  – производительность закладочного комплекса, м<sup>3</sup>/ч.

Средняя прочность в слое определялась по контрольным замерам прочности в пределах слоя, а прочность самого слоя – из выражения

$$\sigma_c = \frac{\sum \sigma_i}{n}, \text{ МПа},$$

где  $\sum \sigma_i$  – суммарные замеры прочности в пределах слоя закладки, МПа;  $n$  – число замеров прочности в слое закладки.

Высота заполнения вычислялась по фактическим размерам камеры (ширина и длина), согласно которым определяется горизонтальная площадь камеры. Поскольку горизонтальные площади камеры фактически постоянны по высоте, то высота заполнения закладки определялась

$$h_c = \frac{V_c}{S_k}, \text{ м},$$

где  $V_c$  – объем уложенного слоя, м<sup>3</sup>;  $S_k$  – горизонтальная площадь камеры в месте укладки слоя, м<sup>2</sup>.

Негативное влияние слоистости закладочного материала на его качество показано на примере одной из ранее заполненных камер. Согласно графической документации установлены фактические контуры, форма и параметры очистной камеры 1/11ю [17]. Были рассчитаны объем и высота каждого слоя твердеющей закладки, которые образуются при остановке закладочного комплекса в процессе укладки закладочной смеси в камере. Учитывая, как параметры закладочных работ, так и параметры очистного пространства рассматриваемой камеры аналитическим способом смоделирован сформированный закладочный массив камеры 1/11ю. Закладочный массив камеры 1/11ю, откуда произошло обрушение в очистное пространство камеры 1/10ю возведен за 30 дней (с 23.06.07 по 23.07.07), а спустя 2 месяца произведена докладка оставшихся пустот. Объем уложенной закладочной смеси в выработанное пространство камеры 1/11ю составил 64,6 тыс. м<sup>3</sup> (запасы каме-

ры составляли 258 тыс. т). Для возведения закладочного массива камеры 1/11ю использовался одинаковый состав твердеющей закладки: молотый доменный гранулированный шлак – 17,6%, отсев флюса – 44,2%; дробленая горная порода – 22%, вода – 16,2%. Подвижность закладочной смеси находилась в пределах 11,4–11,7 см.

Учитывая, как параметры закладочных работ, так и параметры очистного пространства рассматриваемой камеры аналитическим способом воспроизведена история его формирования (рис. 3).

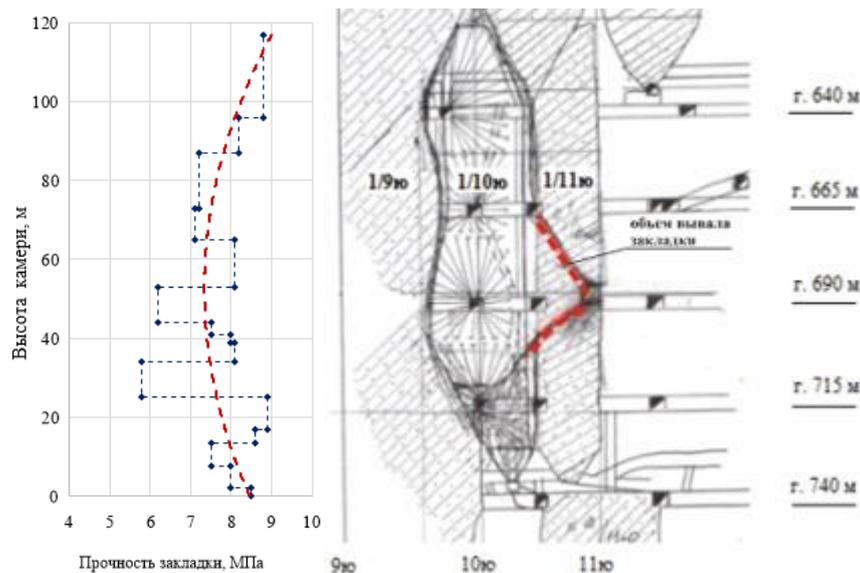


Рисунок 3. Формирование зон пониженной устойчивости закладочного массива по его высоте

Анализ графика рис. 3 показал, что распределение прочности в камере характеризуется нелинейным характером, при этом устойчивость вертикального обнажения в центре искусственного массива не обеспечивается. Характер изменения прочности закладки по высоте (штрихпунктирная линия) показывает тенденцию падения прочности в интервале высот 30–60 м что приводит к формированию концентраций напряжений и ориентируют направления вывалов закладочного массива в очистное пространство.

На основе анализа данных разубоживания добытой руды из камер этажа 640–740 м и показателей прочности закладочного массива, контактирующего с этими камерами установлена корреляционная взаимосвязь этих параметров, выражающаяся экспоненциальной зависимостью с величиной достоверности  $R^2 = 0.55$ , представленная на рис. 4.

Анализ зависимости рис 4. показывает, что прочность закладочного массива имеет существенное значение для качества извлечения запасов руд: с ее снижением увеличивается вероятность обрушений закладки в добываемую камеру, что ухудшает качество выпускаемой руды. Так, с увеличением прочности закладочного массива с 7,0 до 8,5 МПа показатель разубоживания добытой руды может снижаться с 5 до 3%.

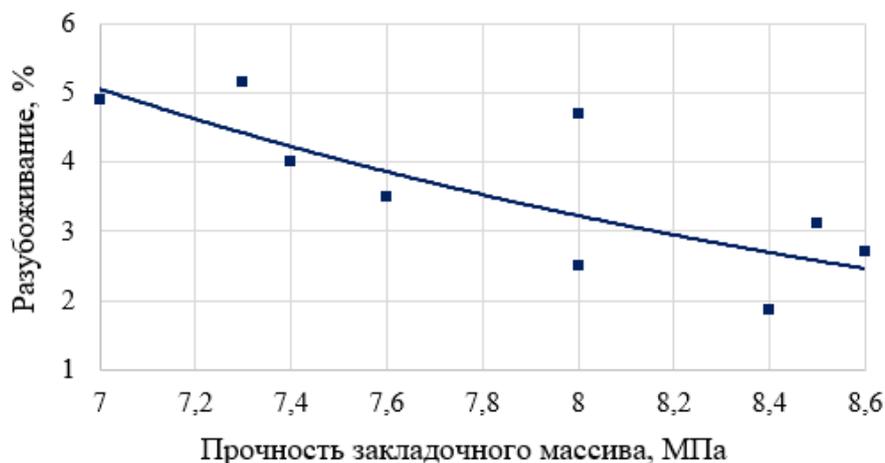


Рисунок 4. Взаимосвязь прочности закладки с показателем разубоживания

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Области пониженной устойчивости при построении зависимостей прочности по высоте камер хорошо согласуются с данными областей фактических вывалов. Прочность по высоте камеры распределяется по полиномиальной зависимости. Несоответствие предела прочности закладки в этих областях относительно значения нагрузок на массив в целом, возникающих на глубине 640–740 и 740–840 м, приводит к разрушению и вывалообразованию закладочного массива. Данные распределения прочности по высоте камеры показывают слабоустойчивые области закладочного массива, которые попадают в зону разрушений. Эти данные коррелируются с данными маркшейдерских наблюдений за вывалами закладки.

При нагрузке на искусственный массив камер первой очереди происходит выдавливание маломощных низкопрочных слоев в очистное пространство камеры второй очереди, что приводит к разубоживанию добываемой руды. При производстве строительных конструкций данный эффект носит название внецентренное сжатие, которое представляет собой вид деформации, когда равнодействующая сил не совпадает с осью конструкции. В заложенных камерах этому способствует неравномерность распределения прочности по высоте. Из этого следует, что необходимо соблюдать линейность распределения прочности по высоте для предотвращения негативных проявлений разрушения или же формировать прочность закладочного массива не ниже нормативной. Для заполнения выработанного пространства очистных камер используют несколько составов твердеющей закладки. Некоторые камеры заполняют однородным составом, другие – тремя-четырьмя составами закладки, это объясняется одновременным заполнением нескольких камер.

Для расчета прочности закладочного массива учитываются показатели лабораторного контроля прочности закладочной смеси, вследствие этого выводится среднеарифметическое значение по камере. При возведении за-

кладочного массива слои закладки определенной прочности заполняются на разную высоту, следовательно, необходимо не только учитывать прочностные значения, но и высоту заполнения слоев, что, несомненно, влияет на устойчивость всего складочного массива. Данное утверждение можно представить в виде коэффициента изменения прочности закладки по высоте камеры

$$k = \frac{\sigma}{\sigma_h},$$

где  $\sigma$  – среднеарифметическая прочность слоев закладки в камере, МПа;

$\sigma_h$  – прочность закладки с учетом высоты заполнения, МПа.

$$\sigma_h = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i h}{H_k}, \text{ МПа,}$$

где  $\sigma_i$  – прочность слоя закладки, МПа;  $h$  – высота заполнения слоя в камере, м;  $H_k$  – высота камеры, м.

После заполнения твердеющей закладкой очистной камеры по значениям средней прочности закладки можно уточнить прочность заложеной камеры, которая учитывает высоту заполнения. Это даст возможность корректировать расчет параметров очистного пространства выемочных камер, где учитывается прочность закладки. Прочность камеры с учетом высоты заполнения может отличаться от принятой в паспортах до 15%.

Установленный коэффициент свидетельствует о негативном влиянии слоистости складочного массива на его прочность, так как массив разбит на разномошные и разнопрочные слои. Необходимо формировать складочный массив с прочностью не ниже нормативной. Если количество слоев не удастся уменьшить, то для устойчивого состояния складочного массива следует повышать их прочность, чтобы предотвратить влияние очистного пространства отрабатываемой камеры. В условиях Южно-Белозерского месторождения это затруднительно, так как применяемый состав складочной смеси по фактору схватываемости и набору прочности не позволяет над слоем подэтажной выработки в камере размещать мощные слои складочного массива. Поэтому на уровне подэтажной переемычки необходимо создавать слои закладки высокой прочности до 10 МПа для удержания мощных слоев.

## 5. ВЫВОДЫ

Проведенные исследования технологических особенностей формирования складочного массива и его качественных характеристик позволили получить следующие результаты:

– установить ряд зависимостей прочности закладки от доли частиц в пульпе при промышленной тонкости помола 50–55% частиц - 0,074 мм при разных соотношениях компонентов в складочной смеси;

- выявить тенденцию возрастания числа слоев твердеющей закладки с увеличением объема пустот камер и характера режима возведения закладочной смеси в камере, способствуя формированию неоднородности и слоистости массива. С увеличением объема очистного пространства, подлежащего закладке, возрастает вероятность проявления факторов, влияющих на слоистость;
- прочность закладочного массива распределяется нелинейно по высоте очистной камеры и наиболее точно описывается кривой второго порядка, что вызывает концентрации напряжения на контуре обнажающегося закладочного массива;
- установить корреляционную взаимосвязь между показателем разубоживания добытой руды и прочности закладочного массива, контактирующего с этими камерами.

### **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Булат, А.Ф., Четверик, М.С., Бубнова, Е.А., & Левченко, Е.С. (2017). Проблемы и перспективы использования нарушенных открытыми и подземными разработками геологических сред. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, (1), 90–97.
2. Peregodov, V.V., Gritsina, A.E., & Dragan, B.T. (2010). Current state and future development of iron-ore industry in Ukraine. *Metallurgical and Mining Industry*, 2(2), 145–151.
3. Грінюв, В.Г., Хорольський, А.О., & Калиущенко, О.П. (2019). Розроблення екологічних сценаріїв ефективного освоєння цінних родовищ корисних копалин. *Мінеральні ресурси України*, (2), 46–50. <https://doi.org/10.31996/mru.2019.2.46-50>
4. Petlovanyi, M., Kuzmenko, O., Lozynskyi, V., Popovych, V., Sai, K., & Saik, P. (2019). Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 13(1), 24–38. <https://doi:10.33271/mining13.01.024>
5. Zhang, Y., Wang, X., Wei, C., & Zhang, Q. (2017). Dynamic mechanical properties and instability behavior of layered backfill under intermediate strain rates. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(7), 1608–1617. [https://doi:10.1016/s1003-6326\(17\)60183-3](https://doi:10.1016/s1003-6326(17)60183-3)
6. Liu, G., Li, L., Yang, X., & Guo, L. (2017). Numerical Analysis of Stress Distribution in Backfilled Stopes Considering Interfaces between the Backfill and Rock Walls. *International Journal of Geomechanics*, 17(2), 06016014. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000702](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000702)
7. Chistyakov, E., Ruskih, V., & Zubko, S. (2012). Investigation of the Geomechanical Processes while Mining Thick Ore Deposits by Room Systems with Backfill of Worked-Out Area. *Geomechanical Processes During Underground Mining – Proceedings of the School of Underground Mining*, 127–132. <https://doi.org/10.1201/b13157-23>
8. Urli, V., & Esmaili, K. (2016). A stability-economic model for an open stope to prevent dilution using the ore-skin design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (82), 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.12.001>
9. Кузьменко, А.М., & Петлёваный, М.В. (2014). Влияние структуры горного массива и порядка отработки камерных запасов на разубоживание руды. *Геотехнічна механіка*, (118), 37–45.
10. Khorolskyi, A., Hrinov, V., & Kaliushenko, O. (2019). Network models for searching for optimal economic and environmental strategies for field development. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 6(3), 463–471.

11. Битимбаев, М.Ж., Крупник, Л.А., & Шапошник, Ю.Н. (2012). *Теория и практика закладочных работ при разработке месторождений полезных ископаемых*. Алматы: Изд. Ассоциации ВУЗов РК.
12. Kuzmenko, O., Petlyovanyu, M., & Heylo, A. (2014). Application of fine-grained binding materials in technology of hardening backfill construction. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 465–469. <https://doi.org/10.1201/b17547-79>
13. Кузьменко, А.М., Петлёванный, М.В., & Усатый, В.Ю. (2010). Влияние тонкоизмельченных фракций шлака на прочностные свойства твердеющей закладки. В *Матеріалах Міжнародної науково-практичної конференції «Школа підземної розробки»* (с. 383–386). Дніпропетровськ: Національний гірничий університет.
14. Kuzmenko, O., & Petlovanyi, M. (2015). Substantiation the expediency of fine gridding of cementing material during backfill works. *Mining of Mineral Deposits*, 9(2), 183–190. <https://doi.org/10.15407/mining09.02.183>
15. Кузьменко, О.М., & Петльований, М.В. (2017). Стійкість штучного масиву при підземній розробці потужного рудного покладу на великій глибині. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, (50), 56–62.
16. Khomenko, O., Kononenko, M., & Petlovanyi, M. (2015). Analytical modeling of the backfill massif deformations around the chamber with mining depth increase. *New Developments in Mining Engineering*, 265–269. <https://doi.org/10.1201/b19901-47>
17. Кузьменко, А.М., & Петлёванный, М.В. (2017). Разрушение закладочного массива в зависимости от технологии его возведения. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, (52), 159–166.

## REFERENCES

1. Bulat, A.F., Chetverik, M.S., Bubnova, E.A., & Levchenko, E.S. (2017). Problemy i perspektivy is-polzovaniya narushennyh otkrytymi i podzemnymi razrabotkami geologicheskikh sred. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, (1), 90–97.
2. Peregudov, V.V., Gritsina, A.E., & Dragun, B.T. (2010). Current state and future development of iron-ore industry in Ukraine. *Metallurgical and Mining Industry*, 2(2), 145–151.
3. Grin'ov, V.G., Horol's'kyj, A.O., & Kaliushhenko, O.P. (2019). Rozroblennja ekologichnyh scenarij'v efektyvnogo osvojennja cinnyh rodovyshh korysnyh kopalyn. *Mineral'ni resursy Ukrainy*, (2), 46–50. <https://doi.org/10.31996/mru.2019.2.46-50>
4. Petlovanyi, M., Kuzmenko, O., Lozynskyi, V., Popovych, V., Sai, K., & Saik, P. (2019). Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 13(1), 24–38. <https://doi:10.33271/mining13.01.024>
5. Zhang, Y., Wang, X., Wei, C., & Zhang, Q. (2017). Dynamic mechanical properties and instability behavior of layered backfill under intermediate strain rates. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(7), 1608–1617. [https://doi:10.1016/s1003-6326\(17\)60183-3](https://doi:10.1016/s1003-6326(17)60183-3)
6. Liu, G., Li, L., Yang, X., & Guo, L. (2017). Numerical Analysis of Stress Distribution in Backfilled Stopes Considering Interfaces between the Backfill and Rock Walls. *International Journal of Geomechanics*, 17(2), 06016014. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0000702](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000702)
7. Chistyakov, E., Ruskih, V., & Zubko, S. (2012). Investigation of the Geomechanical Processes whil Mining Thick Ore Deposits by Room Systems with Backfill of Worked-Out Area. Geomechanical Processes During Underground Mining – *Proceedings of the School of Underground Mining*, 127–132. <https://doi.org/10.1201/b13157-23>

8. Urli, V., & Esmaili, K. (2016). A stability-economic model for an open stope to prevent dilution using the ore-skin design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (82), 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.12.001>

9. Kuzmenko, A.M., & Petlyovanyj, M.V. (2014). Vliyanie struktury gornogo massiva i poryadka otrabotki kamernih zapasov na razubozhivanie rudy. *Geotekhnichna mehanika*, (118), 37–45.

10. Khorolskyi, A., Hrinov, V., & Kaliushenko, O. (2019). Network models for searching for optimal economic and environmental strategies for field development. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 6(3), 463–471.

11. Bitimbaev, M.Zh., Krupnik, L.A., & Shaposhnik, Yu.N. (2012). *Teoriya i praktika zakladochnykh rabot pri razrabotke mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh*. Almaty: Izd. Associacii VUZov RK.

12. Kuzmenko, O., Petlyovanyy, M., & Heylo, A. (2014). Application of fine-grained binding materials in technology of hardening backfill construction. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 465–469. <https://doi.org/10.1201/b17547-79>

13. Kuzmenko, A.M., Petlyovanyj, M.V., & Usatyj, V.Yu. (2010). Vliyanie tonkoizmelchennykh frakcij shlaka na prochnostnye svoystva tverdeyushej zakladki. V *Materialah Mizhnarodnoyi naukovykh-praktichnoyi konferenciyi «Shkola pidzemnoyi rozrobki»* (s. 383–386). Dnipropetrovsk: Nacionalnij gornichij universitet.

14. Kuzmenko, O., & Petlovanyi, M. (2015). Substantiation the expediency of fine gridding of cementing material during backfill works. *Mining of Mineral Deposits*, 9(2), 183–190. <https://doi.org/10.15407/mining09.02.183>

15. Kuzmenko, O.M., & Petlovanyj, M.V. (2017). Stijkist shtuchnogo masivu pri pidzemnij rozrobci potuzhnogo rudnogo pokladu na velikij glibini. *Zbirnik naukovih prac Nacionalnogo gornichogo universitetu*, (50), 56–62.

16. Khomenko, O., Kononenko, M., & Petlovanyi, M. (2015). Analytical modeling of the backfill massif deformations around the chamber with mining depth increase. *New Developments in Mining Engineering*, 265–269. <https://doi.org/10.1201/b19901-47>

17. Kuzmenko, A.M., & Petlyovanyj, M.V. (2017). Razrushenie zakladochnogo massiva v zavisimosti ot tehnologii ego vozvedeniya. *Zbirnik naukovih prac Nacionalnogo gornichogo universitetu*, (52), 159–166.

## **ABSTRACT (IN UKRAINIAN)**

**Мета.** Встановлення характеру взаємозв'язку технологічних параметрів формування закладки масиву, що твердіє з його якісними характеристиками.

**Методика.** В роботі проведені аналітичні дослідження формування закладного масиву на основі комплексного аналізу фактичних даних параметрів закладних робіт при інтенсивному відпрацюванні очисних камер: продуктивність комплексу, час роботи кульових млинів, рухливість суміші, склад закладної суміші, міцність закладної суміші перед подачею в камеру, контроль тонкощі подрібнення в'язучого матеріалу.

**Результати.** Наведено результати аналітичних досліджень взаємозв'язку технологічних параметрів формування закладного масиву і його якісних характеристик. Встановлено негативний вплив шаруватості закладного масиву на його стійкість і якість. Запропоновано для найбільш повноцінної оцінки міцнісної характеристики закладного масиву використовувати коефіцієнт

зміни міцності закладки по висоті камери. Отримано залежність взаємозв'язку міцності закладки з величиною збіднення руди.

**Наукова новизна.** Встановлено нелінійний характер зміни міцності закладного масиву по висоті очисної камери, що залежить від коливань тонкощі помелу в'яжучого, складу закладної суміші, зупинок закладного комплексу і приводить до погіршення його якісних характеристик.

**Практична значимість.** Отримані результати можуть використовуватися для уточнення розрахованих параметрів очисного простору виїмкових камер, де враховується міцність контактуючого закладного масиву. Результати корисні для внесення доповнень у проекти заповнення відпрацьованих просторів камер з твердючою закладкою.

**Ключові слова:** закладний масив, компонентний склад, міцність, закладний шар, руйнування

#### ABSTRACT (IN RUSSIAN)

**Цель.** Установление характера взаимосвязи технологических параметров формирования закладочного массива из твердеющей закладки с его качественными характеристиками.

**Методика.** В работе проведены аналитические исследования формирования закладочного массива на основе комплексного анализа фактических данных параметров закладочных работ при интенсивной отработке очистных камер: производительность комплекса, время работы шаровых мельниц, подвижность смеси, состав закладочной смеси, прочность закладочной смеси перед подачей в камеру, контроль тонкости измельчения вяжущего материала.

**Результаты.** Приведены результаты аналитических исследований взаимосвязи технологических параметров формирования закладочного массива и его качественных характеристик. Установлено негативное влияние слоистости закладочного массива на его устойчивость и качество. Предложено для наиболее полноценной оценки прочностной характеристики закладочного массива использовать коэффициент изменения прочности закладки по высоте камеры. Получена зависимость взаимосвязи прочности закладки с величиной разубоживания руды.

**Научная новизна.** Установлен нелинейный характер изменения прочности закладочного массива по высоте очистной камеры, который зависит от колебаний тонкости помола вяжущего, состава закладочной смеси, остановок закладочного комплекса и приводящий к ухудшению его качественных характеристик.

**Практическая значимость.** Полученные результаты могут использоваться для уточнения рассчитанных параметров очистного пространства выемочных камер, где учитывается прочность контактирующего закладочного массива. Результаты полезны для внесения дополнений в проекты заполнения отработанных пространств камер твердеющей закладкой.

**Ключевые слова:** закладочный массив, компонентный состав, прочность, закладочный слой, разрушение

**ABOUT AUTHORS**

Mykhailo Petlovanyi, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dnipro University of Technology, Associate Professor of the Mining Engineering and Education Department, 19 Yavornytskoho Ave., Dnipro, Ukraine, 49005, E-mail: petlyovany@ukr.net

Oleksandr Kuzmenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Dnipro University of Technology, Professor of the Mining Engineering and Education Department, 19 Yavornytskoho Ave., Dnipro, Ukraine, 49005, E-mail: Kuzmenko.o.m@nmu.one

Kateryna Sai, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dnipro University of Technology, Associate Professor of the Mining Engineering and Education Department, 19 Yavornytskoho Ave., Dnipro, Ukraine, 49005, E-mail: kateryna.sai@gmail.com

Oleksandr Filonenko, Postgraduate Student, Dnipro University of Technology, Associate Professor of the Mining Engineering and Education Department, 19 Yavornytskoho Ave., Dnipro, Ukraine, 49005, E-mail: aleksandr.filonenko2017@gmail.com