ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2023;(6):81-96
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.2 DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_81

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕМОНТАЖНЫХ КАМЕР В УСЛОВИЯХ НЕУСТОЙЧИВОЙ КРОВЛИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Г.Н. Карпов[1], Е.Р. Ковальский[1], А.А. Носов[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: Nosovspmi@gmail.com

Аннотация: Проблема длительных непроизводительных простоев очистного оборудования на угледобывающих предприятиях не теряет своей актуальности из-за ухудшения горно-геологических условий отработки угольных месторождений. Простои добычного оборудования в период формирования демонтажной камеры и последующего ведения демонтажных работ главным образом связаны с состоянием пород непосредственной кровли над местом расположения демонтажной камеры, и могут составлять более ста суток. Разработан и представлен новый способ формирования демонтажной камеры, основанный на идее замещения пород кровли над местом расположения будущей демонтажной камеры на массив из твердеющих материалов, который обладает большими прочностными свойствами по сравнению с породами кровли. Для определения основных параметров предлагаемой технологии, а именно высоты и глубины заделки закладочного массива, авторами был проведен ряд исследований. Для определения глубины заделки закладочного массива впереди конечного положения забоя проведены компьютерное и физическое моделирования на эквивалентных материалах процессов формирования демонтажной камеры. Таким образом, минимальная толщина формируемой плиты определяется теорией предельных пролетов по условию устойчивого состояния ее максимального обнажения. Глубина заделки закладочного массива, в целях предотвращения разрушения краевой части пласта, должна быть не менее одной мощности пласта (высоты демонтажной камеры).

Ключевые слова: добыча угля, демонтаж, формирование демонтажных камер, предварительно пройденная демонтажная камера, закладочный массив, крепление кровли, моделирование, компьютерное моделирование, физическое моделирование, эквивалентные материалы, напряженно-деформированное состояние.

Для цитирования: *Карпов Г. Н., Ковальский Е. Р., Носов А. А.* Моделирование геомеханических процессов при реализации новой технологии формирования демонтажных камер в условиях неустойчивой кровли угольных пластов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 6. – С. 81–96. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_81.

© Г.Н. Карпов, Е.Р. Ковальский, А.А. Носов. 2023.

Modeling geomechanical processes in implementation of new construction technology for recovery room under unstable coal seam roof

G.N. Karpov[1], E.R. Kovalski[1], A.A. Nosov[1]

[1] Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Nosovspmi@gmail.com

Abstract: The problem of longwall equipment downtime periods duration keeps being acute at modern coal mines because of geological conditions deterioration. Longwall face move downtime duration including recovery room erection period may take over a hundred days and caused mainly with immediate roof instability. Authors have invented and describe a new recovery room erection method, based on the idea of unstable immediate roof replacement by backfill material of specific physical properties. Main technique parameters including backfill massif height and width are determined for specific mining conditions by a number of scientific research. For example the distance between longwall face final destination location and the front edge of backfill massif was found as a result of both computer and physical modeling using equivalent materials. In its turn, minimal height of backfill massif was determined using the theory of limit spans according to the condition of the stable state of its maximum exposure. It is fund that in described geological and mining conditions the backfill massif advance to the face final destination location should not be less than the recovery room height.

Key words: coal mining, longwall recovery, recovery room erecting, pre-driven recovery rooms, backfill, roof lining, modeling, numerical modeling, physical modeling, equivalent materials, strain-stress distribution.

For citation: Karpov G. N., Kovalski E. R., Nosov A. A. Modeling geomechanical processes in implementation of new construction technology for recovery room under unstable coal seam roof. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(6):81-96. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_81.

Введение

Уже долгое время на угольных шахтах России актуальна проблема длительных непроизводительных простоев [1—3], связанных с демонтажем механизированных комплексов [4—6]. Основной причиной таких простоев является неудовлетворительное состояние пород кровли в демонтажных выработках [7—9] несмотря на применения различных способов крепления [10, 11]. При этом, ведение демонтажных работ характеризуются повышенным риском травматизма горнорабочих, и как следствие, количеством несчастных случаев [12].

На основе анализа опыта ведения монтажно-демонтажных работ на угольных шахтах России [13—15] (с учетом места заложения демонтажной камеры [16—18]) и мира [19—21] (технологии формирования демонтажной камеры с применением закладочных массивов [22, 23]) авторами статьи предложен способ формирования демонтажной камеры [24], при котором породы кровли над местом будущего демонтажа механизированного комплекса заблаговременно извлекаются, а на их месте возводится закладочный массив из твердеющих материалов. Благодаря этому в кровле демонтажной камеры формируется искусственная несущая плита, обладающая большей устойчивостью, чем породы непосредственной (ложной) кровли.

В целях обоснования параметров предлагаемого способа авторами выполнен комплекс исследований, включающий физическое и компьютерное моделирование процесса формирования демонтажной камеры по предлагаемой технологии и анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород (МГП) в ее окрестности.

Краткое описание предлагаемого способа формирования демонтажной камеры

Мероприятия по реализации предлагаемого способа начинают выполнять заблаговременно до подхода очистного забоя к проектному месту расположения демонтажной камеры. Для этого из участковой выработки в кровлю пласта в месте будущего демонтажа проходят наклонный заезд. Затем в породах кровли на всю длину будущей демонтажной камеры сооружают выработку, которую впоследствии закладывают твердеющей смесью.

Механизированный комплекс заводится под искусственное перекрытие в режиме обычного подвигания забоя. Демонтажная дорожка начинает формироваться в момент, когда поддерживающая часть секций механизированной крепи полностью заходит под закладочный массив (рис. 1).

В целях снижения интенсивности вывалов пород ложной и непосредственной кровли при приближении механизированного комплекса к закладочному массиву, возможно проведение мероприятий по опережающему креплению пород кровли.

Толщину искусственной плиты $h_{ЗМ}$ следует определять исходя из условий технологичности проведения закладываемой выработки и обеспечения необходимой несущей способности плиты.

Ширина плиты $B_{ЗМ}$ складывается из трех параметров: длина поддерживающего перекрытия секции крепи A, ширины демонтажной дорожки $3r$ (где r — ширина захвата выемочного комбайна) и глубины заделки закладочного

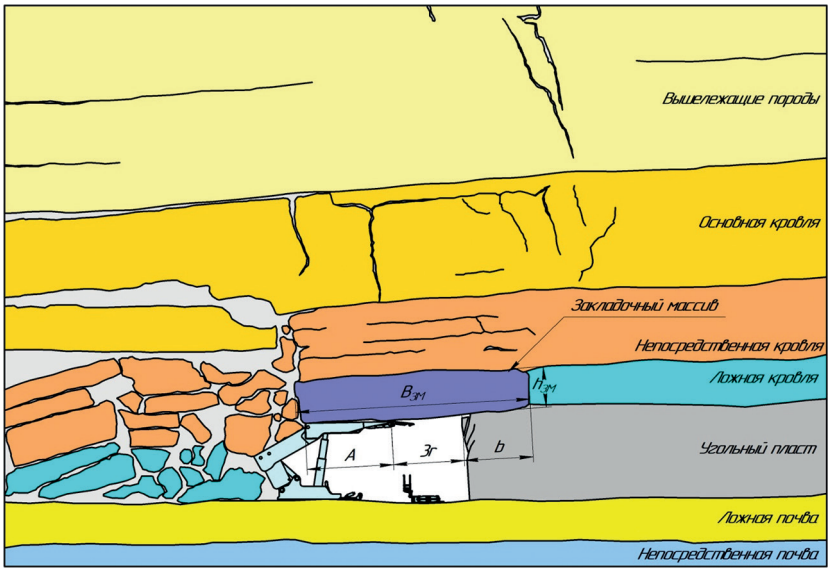

Рис. 1. Поперечное сечение вмещающего массива и демонтажной камеры, сформированной согласно предлагаемому способу

Fig. 1. The cross-section of the recovery room formed by the offered method

массива впереди конечного положения забоя b.

Основными параметрами данного способа, требующими отдельного обоснования, являются: требуемая толщина искусственной плиты $h_{зм}$ и глубина ее заделки b.

Обоснование необходимой толщины закладочного массива

Минимальная толщина искусственной плиты из закладочного материала должна определяться по условию обеспечения ее устойчивого состояния.

Наибольшая площадь обнажения искусственной плиты, согласно предлагаемой технологии, возникает в зоне извлечения секций механизированной крепи между крайней неизвлеченной секцией и пилотными секциями крепи.

Необходимую прочность закладочного материала предлагается определять на основе теории предельных пролетов. На обозначенном участке искусственная кровля камеры представляет собой прямоугольную плиту, защемленную по периметру. Эквивалентный пролет такой плиты определяется по известной формуле:

$$l_э = \frac{ab}{a+b}, \qquad (1)$$

где $l_э$ — эквивалентный пролет, м; a — ширина плиты, м; b — длина плиты, м.

Устойчивость плиты должна быть проверена по двум условиям: на изгиб и на срез. При горизонтальном залегании пласта эти условия описываются соответствующими формулами:

$$l_э \le 1{,}63 h_{зм} \sqrt{\frac{\sigma_р}{\gamma H}}; \qquad (2)$$

$$l_э \le 2 h_{зм} \frac{\sigma_{сдв}}{\gamma H}, \qquad (3)$$

где $h_{зм}$ — требуемая толщина искусственной плиты из затвердевшего закладочного массива, м; $\sigma_р$ и $\sigma_{сдв}$ — пределы прочности на растяжение и на сдвиг искусственной плиты соответственно, МПа; γ — средний объемный вес вышележащей толщи горных пород, МН/м^3; H — глубина залегания искусственной плиты, м.

Основываясь на принятой в исследованиях горнотехнической ситуации и приняв бетон в качестве закладочного материала, получаем следующие исходные данные:

a = 2,7 м; b = 2 м; $\sigma_р$ = 2 МПа; $\sigma_{сдв}$ = 5 МПа; γ = 0,0238 МН/м^3; H = 208 м.

Соответственно, минимальная необходимая толщина закладочного массива $h_{зм}$ определится:

- из условия сопротивления изгибу — 1,1 м;
- из условия сопротивления срезу — 0,57 м.

В качестве окончательного значения толщины закладочного массива принимаем максимальное из двух полученных значений — 1,1 м (после усадки).

Методика компьютерного моделирования НДС МГП в окрестности демонтажной камеры при реализации предлагаемого способа

Компьютерное моделирование выполнялось в упругопластической плоскодеформированной постановке с помощью метода конечных элементов [25, 26]. На данный момент, метод компьютерного моделирования получил наибольшее распространение и применяется при решении разнообразнейших проблем в области горного дела [27—29].

Моделировался геологический разрез массива горных пород (МГП), включающий горизонтально залегающий угольный пласт, породы ложной кровли, непосредственной кровли, основной кровли, ложной почвы, непосредственной почвы, а также подстилающую и вышележащую толщу пород (рис. 2).

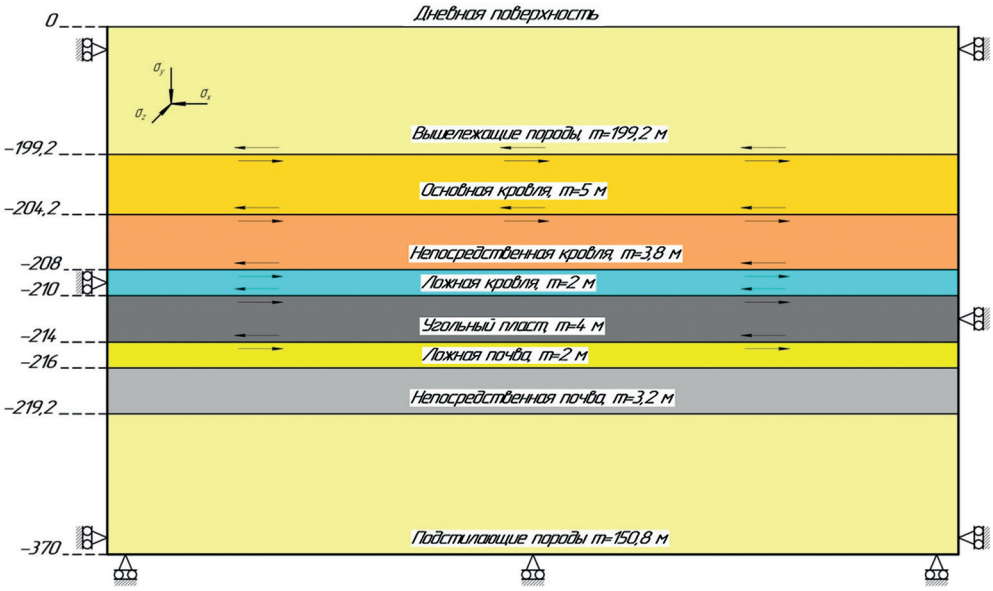

Рис. 2. Схематическое изображение моделируемого разреза
Fig. 2. Schematic representation of the simulated section

Начальное поле напряжений принималось геостатическим. Граничные условия задавались таким образом, чтобы представлять МГП в виде условно бесконечного полупространства, и при этом исключить возможность его перемещения как единого целого.

Контактные условия между различными слоями кровли, между ложной кровлей и пластом, а также между ложной почвой и пластом задавались в виде неполного сцепления (с возможностью проскальзывания). Физико-механические свойства горных пород и закладоч-

Физико-механические свойства моделируемых пород
Physical and mechanical properties of the simulated media

	Плотность, кг/м^3	Прочность на сжатие в массиве, МПа	Прочность на сдвиг в массиве (сцепление), МПа	Прочность на растяжение в массиве, МПа	Коэффициент Пуассона	Модуль Юнга, МПа	Угол внутреннего трения, град
Вышележащие породы	2380	41	13	1	0,31	19 900	40
Основная кровля	2420	51	15	1	0,34	21 600	42
Непосредственная кровля	2330	19	7	1	0,28	17 700	37
Ложная кровля	2150	14	5	1	0,3	10 000	35
Пласт	1370	12	3	0,4	0,26	2500	36
Ложная почва	2150	14	5	1	0,3	10 000	35
Непосредственная почва	2300	20	7	1	0,26	17 200	39
Подстилающие породы	2380	41	13	1	0,31	19 900	40
Закладочный массив (бетон В30)	2200	35	5	2	0,2	34 500	60

ного массива приняты в соответствии с таблицей.

Предметом исследования являлось минимальное расстояние от конечного положения забоя до дальнего края закладочного массива, при котором теряется устойчивость краевой части пласта, играющей роль опоры для закладочного массива (глубина заделки закладочного массива *b*). Моделирование производилось в несколько этапов, соответствующих реальному технологическому циклу формирования демонтажной камеры согласно предлагаемой технологии:

1 этап — формирование естественного исходного поля напряжений до начала отработки пласта;

2 этап — условно-мгновенное создание полости закладываемой выработки в ложной кровле над местом будущего демонтажа;

3 этап — условно-мгновенное возведение закладочного массива в данной выработке с величиной недозаклада 20% от ее высоты;

4 этап — закрытие полости недозаклада под действием горного давления;

5 этап — условно-мгновенное формирование обширного выработанного пространства с положением очистного забоя на расстоянии 9-ти кратной ширины захвата очистного комбайна (9 выемочных циклов) от ближнего края закладочного массива;

6—14 этап — последовательное приближение забоя лавы к месту будущего демонтажа с обрушением пород ложной кровли после каждого цикла выемки, а непосредственной и основной — через каждые три цикла выемки;

15—19 этап — последовательное заведение механизированного комплекса под закладочный массив;

20—23 этап — расширение демонтажной дорожки до момента разрушения краевой части пласта.

На рис. 3 в качестве примера приведена расчетная схема одного из перечисленных этапов.

Ширина пролета выработанного пространства 90 м принята из условия формирования опор для пород вышележащей толщи: в выработанном пространстве они опираются на уплотненные

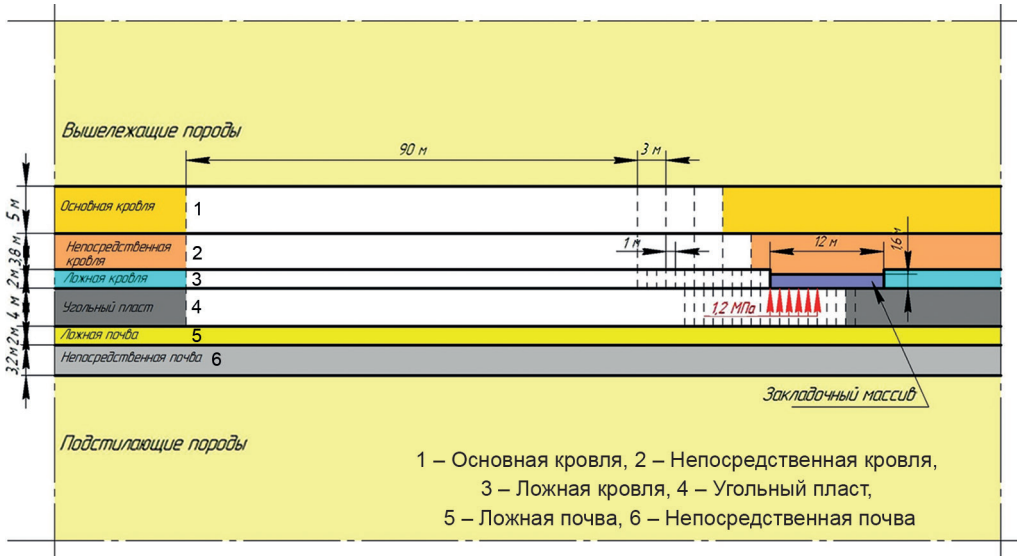

Рис. 3. Схема модели. Этап 22 — формирование демонтажной дорожки
Fig. 3. Model scheme. Stage 22 — recovery passage erection

обрушенные породы, впереди забоя — на краевую часть массива.

Область выработанного пространства между двумя опорами моделируется как незаполненная полость ввиду того, что обрушенные породы за механизированной крепью находятся в разуплотненном состоянии и их реакцией опоры можно пренебречь [24].

Помимо этого, при компьютерном моделировании были приняты следующие характерные размеры:

- ширина поддерживаемого крепью призабойного пространства лавы — 5 м;
- шаг подвигания очистного забоя на каждом цикле моделирован — 1 м;
- шаги обрушения основной и непосредственной кровли — 3 м;
- ширина демонтажной дорожки — 3 м (ширина трех выемочных циклов).

Ширина закладочного массива 12 м представляла сумму двух размеров:

- неизменной технологически необходимой ширины 8 м, складывающейся из длины поддерживающей части механизированной крепи 5 м и ширины демонтажной дорожки, равной подвиганию забоя за три выемочных цикла — 3 м;
- глубины заделки закладочного массива, постепенно уменьшаемой по мере подвигания комплекса и изначально равной 4 м.

Отпор механизированной крепи моделировался как равномерно распределенная нагрузка величиной 1,2 МПа, приложенная к породам ложной кровли (закладочному массиву) со стороны призабойной части пласта на ширине 5 м.

Высота закладываемой выработки была принята равной мощности ложной кровли — 2 м. С учетом принятой суммарной величины недозаклада и усадки закладочного массива, равной 10%, толщина искусственного массива составила 1,8 м, что больше рассчитанной ранее минимальной необходимой толщины $h_{зм}$. Дополнительно были исследованы модели, в которых варьировалась вынимаемая мощность пласта при сохранении остальных параметров.

Результаты компьютерного моделирования НДС МГП в окрестности демонтажной камеры при реализации предлагаемого способа

На рис. 4 представлен полученный в результате моделирования график опорного давления впереди очистного забоя. Максимум опорного давления достига-

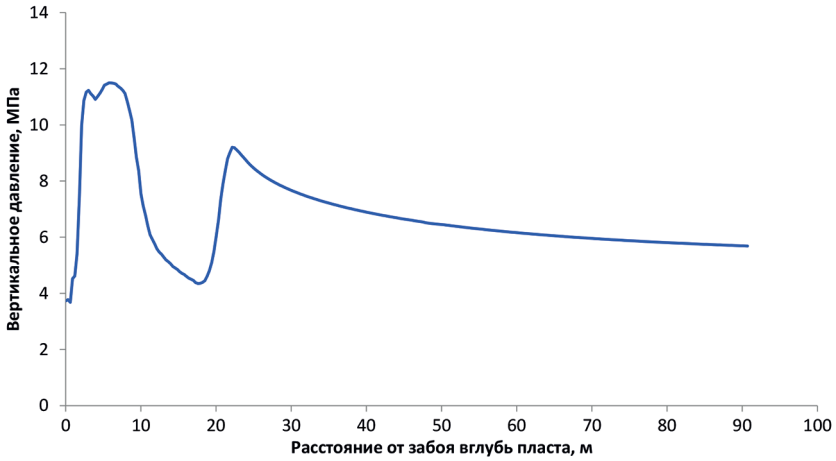

Рис. 4. График опорного давления впереди очистного забоя
Fig. 4. Longwall face front abutment pressure

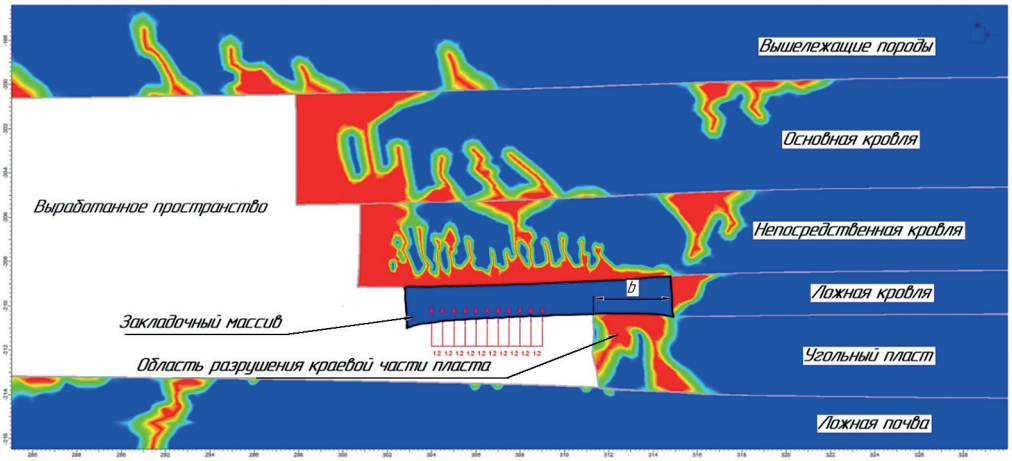

Рис. 5. Зоны разрушения МГП в окрестности демонтажной камеры
Fig. 5. Zones of rocks destruction around the recovery room

ет значения порядка 12 МПа, что превышает уровень естественных для данной глубины напряжений (5 МПа) в 2,4 раза. Пик опорного давления располагается на расстоянии ~8 м от забоя, т.к. краевая часть пласта находится в разрушенном состоянии. После пика прослеживается зона разгрузки пласта от напряжений, которая геометрически соответствует месту расположения в его кровле заложенной выработки. Затем давление снова возрастает, после чего начинает постепенно уменьшаться вплоть до уровня естественных напряжений.

На рис. 5 синим цветом показаны неразрушенные горные породы и красным — зоны перехода МГП в область пластического деформирования (зоны потери несущей способности) в окрестности формируемой демонтажной камеры. Рисунок показывает конечное положение забоя в модели, при котором краевая часть пласта, на которую опирается закладочный массив, полностью разрушена, т.е. иллюстрирует искомую ситуацию.

Согласно результатам компьютерного моделирования, глубина заделки закладочного массива *b* при принятых в качестве исходных данных ГГУ должна составлять не менее 4 м, т.е. не менее мощности пласта (высоты демонтажной камеры). Дополнительные модели с варьируемой мощностью пласта подтверждают данный тезис: глубина заделки закладочного массива впереди конечного положения забоя *b* должна быть не менее вынимаемой мощности пласта *m* в период формирования камеры.

Методика физического моделирования НДС МГП в окрестности демонтажной камеры при реализации предлагаемого способа

Физическое моделирование процесса формирования демонтажной камеры осуществлялось с помощью метода эквивалентных материалов на базе лаборатории моделирования научного Центра геомеханики и проблем горного производства Горного университета [30 — 33].

Моделирование производилось в геометрическом масштабе 1:50 в стенде с размерами 80×70×20 см (В×Ш×Г), при этом высота модели составила 60 см (рис. 6). Смеси для изготовления эквивалентных материалов состояли из эпоксидных смол ЭД-20 и ДЭГ-1, глицерина, отвердителя ПЭПА, кварцевого песка

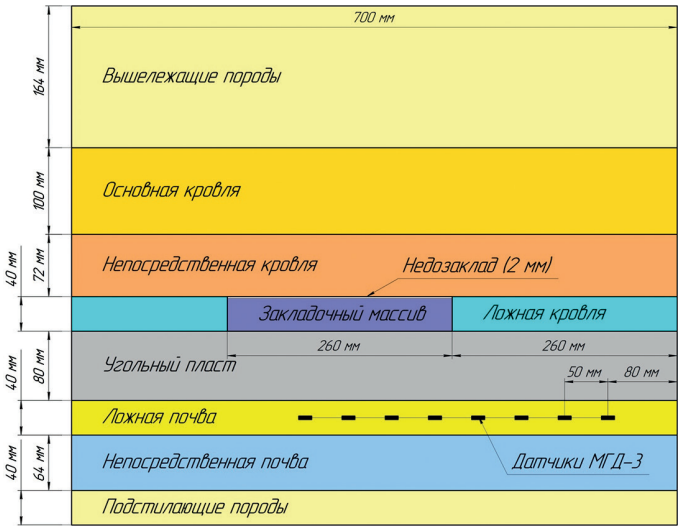

Рис. 6. Принципиальная схема физической модели
Fig. 6. Physical model scheme

[30]. Рецептура материалов была получена в результате испытания физико-механических свойств 31 образца материалов с различным составом на подготовительном этапе.

Нагрузка от вышележащих пород (с учетом коэффициента подобия) создавалась электродвигателем и передавалась на модель через червячный вал на металлическую балку с проставкой из фанеры. Для предотвращения выдавливания материала из модели и создания условий всестороннего сжатия с тыльной стороны стенда была установлена скользящая опалубка из ламинированной фанеры, а с фронтальной стороны — опалубка из органического стекла (рис. 7).

В породах ложной почвы под местом расположения будущей демонтажной камеры и на некотором опережении относительно нее были установлены пьезоэлектрические датчики давления МГД-3

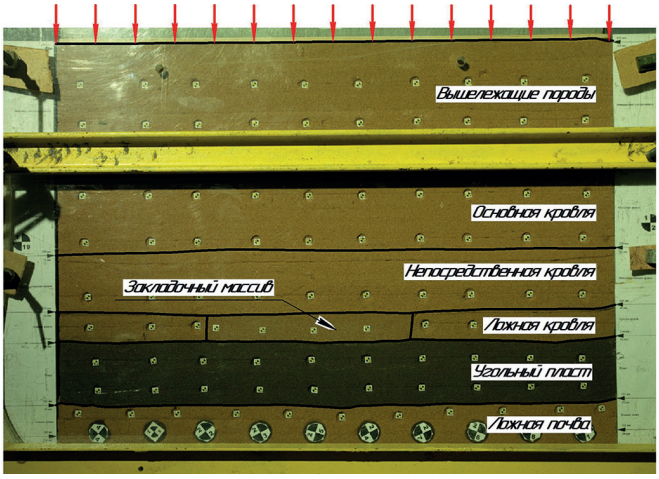

Рис. 7. Физическая модель из эквивалентных материалов до начала отработки
Fig. 7. Physical model before the research

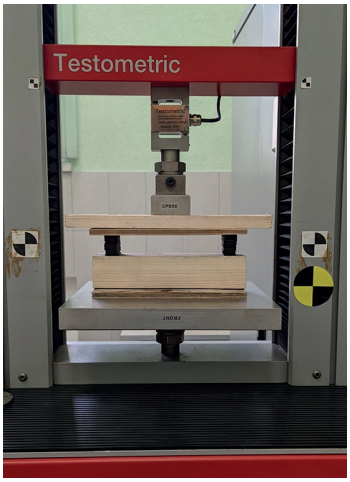

Рис. 8. Модель механизированной крепи в процессе испытаний на податливость
Fig. 8. Longwall shields model being tested for pliability

[31]. Для обеспечения возможности анализа смещений элементов моделируемого МГП на фронтальную сторону модели были установлены маркеры, перемещения которых фиксировались фотоаппаратурой. Условия проскальзывания между отдельными характерными слоями МГП обеспечивались за счет просыпки слюдяной крошки между ними в процессе изготовления модели.

Модель механизированной крепи очистного забоя представляла собой податливую упругую конструкцию, поддерживающее перекрытие и основание которой были изготовлены из древесины. Между ними располагались податливые элементы из резиновых пластинок. Геометрические параметры конструкции определялись из условий геометрического масштаба модели. Податливость конструкции подбиралась экспериментально таким образом, чтобы отражать характеристики реальной механизированной крепи (рис. 8). Отработка пласта в модели производилась в направлении слева-направо с шагом 0,8 м (16 мм). Как и в случае компьютерного моделирования, искомым параметром являлась критическая глубина заделки закладочного массива впереди забоя лавы.

Результаты физического моделирования НДС МГП в окрестности демонтажной камеры при реализации предлагаемого способа

На рис. 9 показан промежуточный этап отработки модели. Картина разрушения слоистой толщи пород в выработанном пространстве и над механизированной крепью соответствует классическим представлениям механики горных пород.

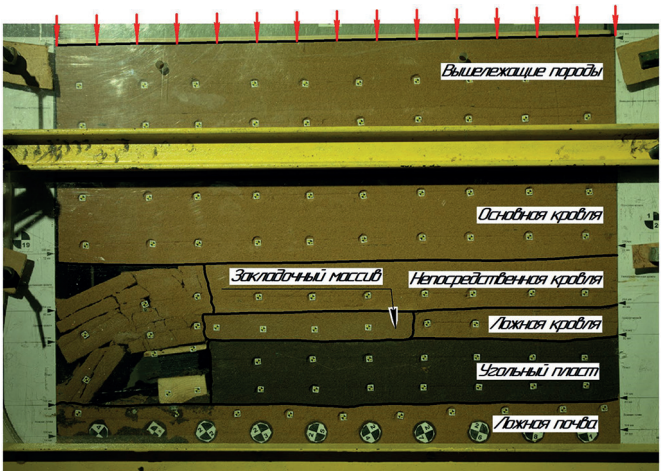

Рис. 9. Моделирование подвигания очистного забоя
Fig. 9. Coal extraction modeling

Рис. 10. Состояние физической модели после разрушения краевой части пласта
Fig. 10. Physical model after the face collapse

На рис. 10 представлен последний этап отработки модели, на котором призабойная часть пласта разрушается под действием опорного давления. Разрушение краевой части пласта приводит к тому, что консоль закладочного массива в кровле теряет опору и демонтажная камера переходит в аварийное состояние. При этом, как и в случае компьютерного моделирования, разрушение краевой пласта произошло в момент когда глубина заделки искусственной плиты в результате расширения демонтажной дорожки оказалась меньше мощности пласта.

Потеря устойчивости краевой части пласта подтверждается графиками на рис. 11. Видно, что в датчиках *6*, *5*, расположенных под краевой частью пласта, после ее разрушения произошло падение напряжений, что свидетельствует о потере несущей способности вышележащего массива (угольного пласта). При этом величина напряжений в датчиках *4*, *3* увеличилась в результате их перераспределения.

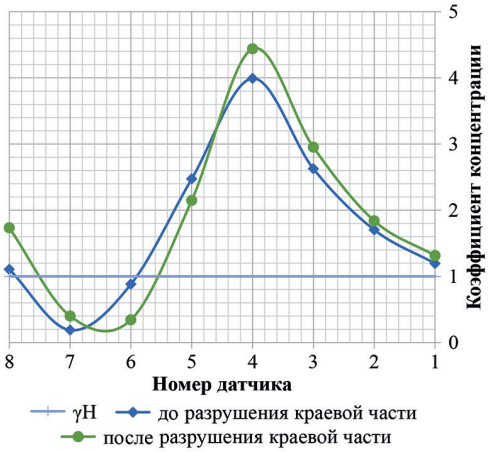

Рис. 11. Графики распределения коэффициента концентрации напряжений под краевой частью пласта (в физической модели)
Fig. 11. The graph of stress ratio distribution (respectively to sensors on fig. 10)

Заключение

Разработанная технология формирования демонтажных камер позволяет повысить устойчивость кровли над рабочим пространством за счет замещения ее закладочным массивом. В результате комплекса проведенных исследований определены следующие параметры: толщина плиты закладочного массива и глубина ее заделки впереди конечного положения очистного забоя. Толщина плиты определяется из условия устойчивости ее максимального обнажения и для рассмотренных условий составляет не менее 1,1 м. Глубина заделки плиты в целях предотвращения разрушения краевой части пласта должна составлять не менее высоты демонтажной камеры (мощности пласта).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Казанин О. И.*, *Сидоренко А. А.*, *Мешков А. А.* Организационно-технологические принципы реализации потенциала современного высокопроизводительного очистного оборудования // Уголь. — 2019. — № 12. — С. 4—13. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-12-4-13.

2. *Харитонов И. Л.*, *Кубрин С. С.*, *Закоршменный И. М.*, *Блохин Д. И.* Оценка эффективности технологий формирования демонтажных камер при отработке мощных пологих угольных пластов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № S48. — С. 252—258. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-48-252-258.

3. *Мешков А. А.*, *Казанин О. И.*, *Сидоренко А. А.* Реализация производственного потенциала высокопроизводительного оборудования — ключевое направление совершенствования подземной добычи энергетических углей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 12. — С. 156—165. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-156-165.

4. *Шулятьева Л. И.* Пространственно-временное моделирование и организация процессов подготовки запасов угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 12. — С. 166—181. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-166-181.

5. *Торро В. О., Ремезов А. В., Климов В. В., Дедиков Е. А.* Факторы оценки устойчивости демонтажных камер при формировании их очистным забоем // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2017. — № 6. — С. 47—53. DOI: 10.26730/1999-4125-2017-6-47-53.

6. *Зубов В. П.* Состояние и направления совершенствования систем разработки угольных пластов на перспективных угольных шахтах Кузбасса // Записки Горного института. — 2017. — Т. 225. — С. 292—297. DOI: 10.18454/pmi.2017.3.292.

7. *Харитонов И. Л.* Опыт подготовки очистных забоев к демонтажу в условиях шахты имени 7 Ноября // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 2. — С. 127—136.

8. *Носов А. А.* Анализ технологий формирования демонтажных камер на пологих угольных пластах // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2021. — № 1. — С. 56—63. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-1-56-63.

9. *Wang B., Dang F., Chao W., Miao Y., Li J.* Surrounding rock deformation and stress evolution in pre-driven longwall recovery rooms at the end of mining stage // International Journal of Coal Science & Technology. 2019, vol. 6, no. 4, pp. 536—546. DOI: 10.1007/s40789-019-00277-0.

10. *Stankus J., Xiaoting L., Lumin M., Faulkner D.* A case study of a low overburden longwall recovery with pre-developed recovery entries / 33rd International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, WV Univ., 2014, pp. 1—8.

11. *Zhiyi Zh., Chen H., Li D., Zhang Zh.* Stability control of the equipment recovery passage in a fully mechanized longwall mining: Case study // Geotechnical and Geological Engineering. 2021, vol. 39, no. 6, pp. 799—813. DOI: 10.1007/s10706-020-01522-z.

12. *Гендлер С. Г.*, *Габов В. В.*, *Бабырь Н. В.*, *Прохорова Е. А.* Обоснование технических решений по снижению производственного травматизма в лавах угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 1. — С. 5—19. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_5.

13. *Мешков А. А.*, *Казанин О. И.*, *Сидоренко А. А.* Повышение эффективности технологии и организации монтажно-демонтажных работ при интенсивной разработке пологих угольных пластов на шахтах Кузбасса // Записки Горного института. — 2021. — Т. 249. — С. 342—350. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.3.

14. *Ермакова И. А.*, *Федусов В. А.* Влияние расположения демонтажных камер на длительность демонтажных работ на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» // Известия ТулГУ. — 2020. — № 1. — С. 234—243.

15. *Торро В. О.*, *Ремезов А. В.* Исследование изменений геомеханического состояния массива при входе очистных забоев в демонтажные камеры по пласту «Байкаимский»

шахты им. 7 Ноября АО «СУЭК-Кузбасс» // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2018. — № 4. — С. 75—83. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-4-75-83.

16. *Ремезов А. В.*, *Торро В. О.*, *Кузнецов Е. В.* Исследование распределения нагрузки у границы предохранительного целика в зоне формирования демонтажной камеры очистным забоем // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2018. — № 4. — С. 65—74. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-4-65-74.

17. *Харитонов И. Л.*, *Черданцев В. В.*, *Тациенко В. П.* Исследования геомеханической безопасности в очистном забое 50-03 при высокопроизводительной отработке пласта 50 в условиях шахты им. В.Д. Ялевского // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2017. — № 6. — С. 97—108. DOI: 10.26730/1999-4125-2017-6-97-108.

18. *Ремезов А. В.*, *Климов В. В.* Что может являться уточненной границей отработки выемочного столба, как определить точку остановки очистного забоя и дальнейшее формирование очистным забоем демонтажной камеры // Уголь. — 2017. — № 1. — С. 27—28. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-1-27-29.

19. *Zhang P., Beck K., Mishra M., Trackemas J., Zeglen E.* Bi-directional shield recovery in a wide face longwall move with a pre-driven recovery room under weak roof conditions / 27rd International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, WV Univ., 2008, pp. 141—148.

20. *James D.* Longwall shield recovery, using phenolic foam injection for gob control as an alternative to recovery mesh / 32th International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, WV Univ. 2013, pp. 387—394.

21. *Wang S., Ma L.* Characteristics and control of mining induced fractures above longwall mines using backfilling // Energies. 2019, vol. 12, no. 23, article 4604. DOI: 10.3390/en12234604.

22. *Kang H., Lv H., Zhang X., Gao F., Wu Z., Wang Z.* Evaluation of the ground response of a pre-driven longwall recovery room supported by concrete cribs // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016, vol. 49, no. 3, pp. 1025—1040.

23. *Gearhart D., Jones T., Compton C.* Ground response as a longwall advances into a backfilled recovery room under low cove / 33th International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, WV Univ. 2014, pp. 39—45.

24. *Карпов Г. Н.*, *Ковальский Е. Р.*, *Носов А. А.* Патент РФ № RU 2743162 C1. Способ формирования демонтажной камеры при разработке пологих угольных пластов, 14.10.2020. 2021. Бюл. №5.

25. *Huang P., Spearing S., Feng J.* Formulation of the problem for calculating the stress state of a pillar for a longwall recovery room // E3S Web of Conferences. 2021, vol. 315, article 01019. DOI: 10.1051/e3sconf /202131501019.

26. *Карпов Г. Н.*, *Ковальский Е. Р.*, *Смычник А. Д.* Определение параметров разгрузки массива горных пород на концевых участках демонтажной камеры // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 8. — С. 95—107. DOI: 10.25018/0236-14932019-08-0-95-107

27. *Kazanin O. I.*, *Sirenko Y. G.*, *Sidorenko A. A.* Analysis of the methods of calculating the main roof-caving increment in mining shallow coal seams with long breaking faces // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019, vol. 14, no. 3, pp. 732—736.

28. *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.

29. *Басов В. В.* Методика оценки соответствия результатов численного моделирования и шахтных измерений геомеханических параметров массива горных пород в окрестности сопряжений горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 3. — С. 51—62. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-51-62.

30. *Зуев Б. Ю.* Методология моделирования нелинейных геомеханических процессов в блочных и слоистых горных массивах на моделях из эквивалентных материалов // Записки Горного института. — 2021. — Т. 250. — С. 542—552. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.7.

31. *Zuev B. Yu. Zubov V. P., Fedorov A. S.* Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals // Eurasian mining. 2019, no. 1, pp. 8—12. DOI: 10.17580/em.2019.01.02.

32. *Зуев Б. Ю., Кротов Н. В., Истомин Р. С., Мельницкая М. Е., Вьюнков А. А.* Физическое моделирование формирования зон разрушения в области влияния очистных горных работ / Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: геологическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ: Сборник научных трудов. — СПб.: СПбГУ, 2017. — С. 412—417.

33. *Зуев Б. В., Цирель С. В., Истомин Р. С., Мельницкая М. Е.* Физическое моделирование динамических явлений при подземной разработке полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № S60-2. — С. 117—127. ГИАБ

REFERENCES

1. Kazanin O. I., Sidorenko A. A. Meshkov A. A. Organizational and technological principles of realization of the modern high productive longwall equipment capacity. *Ugol'*. 2019, no. 12, pp. 4—13. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-12-4-13.

2. Kharitonov I. L., Kubrin S. S., Zakorshmennyi I. M., Blokhin D. I. Technology efficiency estimation of break-down chambers formation at processing of thick flat coal seams. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. S48, pp. 252—258. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-48-252-258.

3. Meshkov A. A., Kazanin O. I., Sidorenko A. A. Implementation of production potential of high-performance equipment—A key trend of improvement in underground mining of power-generating coal. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 12, pp. 156—165. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-156-165.

4. Shulyatieva L. I. Space–time modeling and process management in coal mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 12, pp. 166—181. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-166-181.

5. Torro V. O. Remezov A. V., Klimov V. V., Dedikov Ye. A. Factors for estimating stability of dismantling chambers at their formation by working face. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2017, no. 6, pp. 47—53. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2017-6-47-53.

6. Zubov V. P. Status and directions of improvement of development systems of coal seams on perspective Kuzbass coal mines. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 225, pp. 292—297. [In Russ]. DOI: 10.18454/pmi.2017.3.292.

7. Kharitonov I. L. Experience in preparing stoping faces for dismantling in the conditions of the mine 7 Noyabrya. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2013, no. 2, pp. 127—136. [In Russ].

8. Nosov A. A. The analysis of technologies of recovery rooms creation in flat coal seams. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2021, no. 1, pp. 56—63. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-1-56-63.

9. Wang B., Dang F., Chao W., Miao Y., Li J. Surrounding rock deformation and stress evolution in pre-driven longwall recovery rooms at the end of mining stage. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2019, vol. 6, no. 4, pp. 536—546. DOI: 10.1007/s40789-019-00277-0.

10. Stankus J., Xiaoting L., Lumin M., Faulkner D. A case study of a low overburden longwall recovery with pre-developed recovery entries. *33rd International Conference on Ground Control in Mining*. Morgantown, WV Univ., 2014, pp. 1—8.

11. Zhiyi Zh., Chen H., Li D., Zhang Zh. Stability control of the equipment recovery passage in a fully mechanized longwall mining: Case study. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2021, vol. 39, no. 6, pp. 799—813. DOI: 10.1007/s10706-020-01522-z.

12. Gendler S. G., Gabov V. V., Babyr N. V., Prokhorova E. A. Justification of engineering solutions on reduction of occupational traumatism in coal longwalls. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 1, pp. 5 — 19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_5.

13. Meshkov A. A., Kazanin O. I., Sidorenko A. A. Improving the efficiency of the technology and organization of the longwall face move during the intensive flat-lying coal seams mining at the Kuzbass mines. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 249, pp. 342 — 350. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.3.

14. Ermakova I. A., Fedusov V. A. Influence of location of longwall recovery room on work duration in JSC SUEK-Kuzbass mines. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020, no. 1, pp. 234 — 243. [In Russ].

15. Torro B. O., Remezov A. V. Study of changes in the geomechanical condition of the rock strata when a production face enters a dismantling chamber in seam «Bajkaimsky» of 7th November mine, JSC «SUEK-Kuzbass». *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2018, no. 4, pp. 75 — 83. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-4-75-83.

16. Remezov A. V., Torro V. O., Kuznetsov Ye. V. Study of load distribution at the border of the protective pillar in the zone of dismantling chamber formation by a production face. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2018, no. 4, pp. 65 — 74. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-4-65-74.

17. Haritonov I. L., Cherdantsev V. V., Tatsienko V. P. The study of geomechanical safety in a working face 50-03 during high-performance mining of seam 50 in the conditions of V.D. Yalevskogo mine. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2017, no. 6, pp. 97 — 108. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2017-6-97-108.

18. Remezov A. V., Klimov V. V. What can serve as the extraction column verified boundary, how can be stope limit defined with further break-down chamber formation. *Ugol'*. 2017, no. 1, pp. 27 — 28. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-1-27-29.

19. Zhang P., Beck K., Mishra M., Trackemas J., Zeglen E. Bi-directional shield recovery in a wide face longwall move with a pre-driven recovery room under weak roof conditions. *27rd International Conference on Ground Control in Mining*. Morgantown, WV Univ., 2008, pp. 141 — 148.

20. James D. Longwall shield recovery, using phenolic foam injection for gob control as an alternative to recovery mesh. *32th International Conference on Ground Control in Mining*, Morgantown, WV Univ. 2013, pp. 387 — 394.

21. Wang S., Ma L. Characteristics and control of mining induced fractures above longwall mines using backfilling. *Energies*. 2019, vol. 12, no. 23, article 4604. DOI: 10.3390/en12234604.

22. Kang H., Lv H., Zhang X., Gao F., Wu Z., Wang Z. Evaluation of the ground response of a pre-driven longwall recovery room supported by concrete cribs. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2016, vol. 49, no. 3, pp. 1025 — 1040.

23. Gearhart D., Jones T., Compton C. Ground response as a longwall advances into a backfilled recovery room under low cove. *33th International Conference on Ground Control in Mining*, Morgantown, WV Univ. 2014, pp. 39 — 45.

24. Karpov G. N., Kovalsy E. R., Nosov A. A. *Patent RU 2743162 S1*, 14.10.2020. [In Russ].

25. Huang P., Spearing S., Feng J. Formulation of the problem for calculating the stress state of a pillar for a longwall recovery room. *E3S Web of Conferences*. 2021, vol. 315, article 01019. DOI: 10.1051/e3sconf /202131501019.

26. Karpov G. N., Kovalski E. R., Smychnik A. D. Determination of rock destressing parameters at the ends of disassembling room. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 8, pp. 95 — 107. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-14932019-08-0-95-107

27. Kazanin O. I., Sirenko Y. G., Sidorenko A. A. Analysis of the methods of calculating the main roof-caving increment in mining shallow coal seams with long breaking faces. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019, vol. 14, no. 3, pp. 732 — 736.

28. Rybak J., Khayrutdinov M. M., Kuziev D. A., Kongar-Syuryun P. 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.

29. Basov V. V. Evaluation procedure of conformance between numerical modeling and in-situ measurement data on geomechanical parameters of rock mass near intersections in mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 3, pp. 51 – 62. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-03-0-51-62.

30. Zuev B. Yu. Methodology of modeling nonlinear geomechanical processes in blocky and layered rock masses on models made of equivalent materials. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 250, pp. 542 – 552. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.7.

31. Zuev B. Yu. Zubov V. P., Fedorov A. S. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals. *Eurasian mining*. 2019, no. 1, pp. 8 – 12. DOI: 10.17580/em.2019.01.02.

32. Zuyev B. Yu., Krotov N. V., Istomin R. S., Mel'nitskaya M. Ye., V'yunkov A. A. Physical modeling of the formation of destruction zones in the area of influence of mining. *Innovatsionnye napravleniya v proektirovanii gornodobyvayushchikh predpriyatiy: geologicheskoe obespechenie proektirovaniya i soprovozhdeniya gornykh rabot: Sbornik nauchnykh trudov* [Innovative directions in the design of mining enterprises: geological support for the design and maintenance of mining operations: Collection of scientific papers], Saint-Petersburg, SPbGU, 2017, pp. 412 – 417. [In Russ].

33. Zuyev B. V., Tsirel' S. V., Istomin R. S., Mel'nitskaya M. Ye. Physical modeling of dynamic phenomena in underground mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. S60-2, pp. 117 – 127. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Карпов Григорий Николаевич[1] – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Karpov_GN@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3763-2701,
Ковальский Евгений Ростиславович[1] – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Kovalskiy_ER@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-6656-9377,
Носов Александр Алексеевич[1] – аспирант,
e-mail: Nosov_AA@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7453-4556,
[1] Санкт-Петербургский горный университет.
Для контактов: Носов А.А., e-mail: Nosovspmi@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

G.N. Karpov[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: Karpov_GN@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3763-2701,
E.R. Kovalski[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: Kovalskiy_ER@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-6656-9377,
A.A. Nosov[1], Graduate Student,
e-mail: Nosov_AA@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-7453-4556,
[1] Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: A.A. Nosov, e-mail: Nosovspmi@gmail.com.

Получена редакцией 12.04.2022; получена после рецензии 09.02.2023; принята к печати 10.05.2023.
Received by the editors 12.04.2022; received after the review 09.02.2023; accepted for printing 10.05.2023.