ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(6–1):68–82
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.33 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_68

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНОЙ КРОВЛИ НА ПАРАМЕТРЫ ЗОНЫ ОПОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В КРАЕВОЙ ЧАСТИ ПЛАСТА

Ле Куанг Фук[1], П.Н. Дмитриев[1], Тхан Ван Зуи[1], Ли Юньпэн[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 199106, Россия

Аннотация: Распределение опорного давления в краевой части угольного пласта играет решающую роль в нестабильности вмещающих пород, формируя потенциальную опасность горных ударов на шахтах. С помощью физической модели в лаборатории и теоретического анализа напряженного состояния исследованы характеристики распределения зоны опорного давления. Определены область воздействия опорного давления в краевой части угольного пласта, положение пика напряжения, с четким разделением на стадии до и после обрушения основной кровли. Перед обрушением основной кровли пик напряжения располагается вблизи границы выработанного пространства с его максимальным значением. Под нагрузкой слоев кровли консоль основной кровли опускается, поворачивается и ломается на расстоянии примерно в 1–1,5 мощности пласта (по данным лабораторного моделирования). При этом пик напряжений перемещается внутрь массива угля сразу после обрушения основной кровли, в краевой части угольного пласта образуется зона пониженного напряжения. Результаты этого исследования могут быть очень полезны для объяснения причин некоторых динамических проявлений опорного давления основной кровли и для принятия необходимых решений для управления горным давлением на шахтах.

Ключевые слова: труднообрушающиеся породы основной кровли, опорное давление, распределение горного давления, физическая модель, подземная добыча угля, распределение напряжений, обрушение пород кровли, эквивалентные материалы.

Для цитирования: *Ле Куанг Фук*, *Дмитриев П.Н.*, *Тхан Ван Зуи*, *Ли Юньпэн* Влияние основной кровли на параметры зоны опорного давления в краевой части пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6–1. – С. 68–82. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_68.

Influence of the main roof on the parameters of the abutment pressure zone in the selvedge of the seam

Le Quang Phuc[1], P.N. Dmitriev[1], Than Van Duy[1], Li Yunpeng[1]

[1] Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russia, rectorat@spmi.ru

Abstract: The distribution of the abutment pressure in the selvedge of the coal seam plays a decisive role in the instability of the surrounding rocks, the potential hazard of rock bursts in underground mining. Based on the study of the physical model in the laboratory and the theoretical analysis of the stress state, the characteristics of the distribution of the abutment pressure zone are investigated. The simulation results determined the area of influence of

© Ле Куанг Фук, П.Н. Дмитриев, Тхан Ван Зуи, Ли Юньпэн. 2022

the abutment pressure is located in the selvedge of the coal seam, the position of the stress peak shows a change and a clear separation at the stage before and after the collapse of the main roof. Before the collapse of the main roof, the stress peak was distributed near the goaf boundary, with a maximum value. Under the load of the roof layers, the main roof console drops, turns and breaks at position 1–1.5 times the thickness of the seam (according to the results of laboratory modeling). And especially, the stress peak moves from the edge of the coal face into the deepest parts of the coal seam immediately after the main roof collapses, and a reduced stress zone is formed in the selvedge of the coal seam. The results of this study can be very useful to explain the reasons for some of the dynamic influences of the main roof, and the necessary solutions to control mining pressure in underground mining.

Key words: hard-rocks of the main roof, abutment pressure, distribution of mining pressure, physical model, underground coal mining, stress distribution, roof collapse, equivalent materials.

For citation: Le Quang Phuc, Dmitriev P. N., Than Van Duy, Li Yunpeng Influence of the main roof on the parameters of the abutment pressure zone in the selvedge of the seam. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(6–1):68–82. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_68.

Введение

Горные работы при подземной добыче угля приводят к изменению первичного напряженного состояния в массиве горных пород. В результате перераспределения напряжений в массиве образуется новое поле напряжений и в краевой части, где концентрируются напряжения, формируются новые проявления опорного давления. В частности, при значениях напряжений, превышающих прочность угля, вероятно образование зон пластической деформации, в которых возможны опасные проявления горного давления, такие как динамические опускания кровли, разрушение кромки угольных пластов, горные удары, а также выбросы газа и пород. Структура зоны опорного давления в краевой части угольного пласта со временем изменяется, особенно под влиянием обрушений зависающих консолей основной кровли.

Управление величиной и распределением опорного давления является одной из геомеханических задач, решение которых имеет исключительную практическую важность. Результатами исследований, проводившихся ВНИМИ по определению параметров зон опорного давления, стали математические выражения и общие графики для определения параметров зоны опорного давления, формирующейся в краевой части углевмещающего массива. Полученные с использованием этих методов рекомендации по управлению опорным давлением широко использовались в угледобывающей промышленности России.

Применение методов теоретического анализа, физического и численного моделирования позволило установить влияние скорости движения лавы на параметры зоны опорного давления [1–3] и определить, в частности, что длина консоли и прогиб основной кровли сильно изменяются при увеличении скорости движения лавы от 2 до 10 м/сутки. Кроме того, большое влияние на разрушение кровли и распределение опорного давления над краевой частью пласта имеют реологические свойства и модуль упругости пород кровли.

В работе [4] были объединены численное моделирование и шахтные исследования для изучения положения пика опорного давления и области влияния горного давления в краевой части

угольного пласта. Согласно результатам, при отработке угольных пластов с низкой крепостью опорное давление развивается на значительных площадях, пик напряжений расположен в глубине массива, отмечаются значительные разрушения краевой части массива при малом коэффициенте концентрации напряжений.

В работах [5–7] авторы исследовали зависимость распространения зоны опорного давления и ее ширины в упругих и неупругих областях массива угля при ограниченных условиях равновесия. Они предположили, что ширина пластической зоны в краевой части пласта не зависит от положения пика опорного давления, но зависит от остаточной прочности угля, мощности разрабатываемого пласта, модуля упругости и угла обрушения пород кровли; ширина неупругой зоны тесно связана с положением пика опорного давления, сцеплением в угле и коэффициентом трения пород кровли; ширина упругой зоны зависит от мощности разрабатываемого пласта, коэффициента бокового распора и коэффициента трения пород кровли. Кроме того, в данных работах был сделан вывод, что величина зоны опорного давления зависит от многих факторов, включая глубину работ, физико-механические свойства вмещающих пород и мощность слоев пород кровли, а также длительности зависания формирования консоли кровли.

Коллектив авторов в исследовании [8] установил закономерности распределения опорного давления с помощью теоретического анализа и численного моделирования программой FLAC 3D с учетом результатов натурных измерений. Исследования позволили установить характер и форму распределения опорного давления, значения концентраций напряжений, влияние на них мощности угольного пласта, а также глубины горных работ и скорости движения лавы.

Еремин М., Эстержуйзен Г. и Смолин И. [9] использовали метод конечных разностей для моделирования развития напряжений в горном массиве. Результаты были получены с помощью численного моделирования и соотнесены с результатами производственных экспериментов на нескольких шахтах Южного Кузбасса.

В исследовании [10] использовался метод дискретных элементов, заложенный в программу UDEC, для оценки влияющих факторов от стратиграфического строения пород кровли на величины параметров зоны опорного давления. Авторы утверждают, что коэффициент концентрации напряжений в пласте с прочной основной кровлей намного больше, чем в пласте с основной кровлей, сложенной менее прочными породами.

Авторы работы [11] исследовали по скважинам значения напряженно-деформированного состояния вмещающих пород. Полученные результаты показывают, что расстояние воздействия зоны опорного давления над краевой частью массива зависит от расстояния до забоя лавы. В работе [12] представлены экспериментальные результаты физического моделирования и численного моделирования изучения процесса обрушения пород кровли на параметры зоны опорного давления. Было выявлено, что процесс динамического нагружения со стороны прочных кровель разделяется на три фазы: начальная фаза, фаза динамической нагрузки и фаза статической нагрузки.

Группой исследователей в [13] проанализировано влияние надработки верхнего пласта свиты на распределение опорного давления во время процесса отработки надработанного

ранее пласта. Результаты показали, что на распределение напряжений влияют физико-механические свойства слоёв пород кровли верхнего пласта и междупластья.

Исследовавшие параметры горного давления при повторном нагружении авторы [14] обобщили результаты полевых исследований развития напряжений при отработке полезных ископаемых в различных горно-геологических условиях. Группа авторов в работе [15] применила геофизические методы для изучения массива горных пород и оценили перераспределение напряжений во вмещающих породах над отрабатываемым выемочным столбом. В работе [16] использованы уравнения Вильсона для определения параметров, влияющих на перераспределение напряжений в краевой части массива для систем разработки длинными столбами.

Вышеупомянутые исследования в целом определили параметры и распределение опорного давления при отработке угольных пластов. Однако в приведенных выше результатах очень мало учитывается влияние основной кровли, сложенной труднообрушающимися породами.

Из-за разницы в строении пород кровли их влияние на распределение давления над краевой частью массива различно. Прочная основная кровля большой мощности играет роль основного несущего блока; непосредственная относительно малопрочная кровля оказывает только начальное несущее действие, наибольшее давление массива будет создавать основная кровля. Таким образом, породы основной кровли играют решающую роль как источника распределения опорного давления в краевой части массива угля [17, 18]. Некоторые авторы исследовали влияние строения основной кровли на распределение горного давления над краевой частью угольного пласта [19—21]. Они рассмотрели ее различное нагружение для массивов пород различного стратиграфического состава на моделях из эквивалентных материалов и с помощью численного моделирования в программах UDEC и FLAC 3D. Установлено, что при непрерывном движении лавы опорное давление будет определяться наличием сложной системы трещин и периодическими зависаниями слоев пород кровли.

Вышеупомянутые исследования учитывали влияние структуры основной кровли на основе простого анализа этой структуры на распределение и величины напряжений в зоне опорного давления, причем распределение напряжений в зоне опорного давления на стадиях до и после обрушения основной консоли над краевой частью угольного пласта не рассматривалось.

Исследования, описанные в нашей работе, учитывали результаты предыдущих исследований, прежде всего применительно к влиянию труднообрушающихся пород основной кровли на зону опорного давления в пределах краевой части угольного пласта. Для изучения процессов влияния зависаний основной кровли в наших исследованиях рассматривается состояние краевой части пласта во все время накопления зависания и после обрушения консоли основной кровли. Метод исследования заключался в лабораторном анализе физической модели, на которой представлены несколько различных состояний краевой части массива в процессе отработки. Результаты моделирования показали, что наблюдается четкое изменение структуры и параметров зоны опорного давления в периоды до и после обрушения основной кровли над краевой частью угольного пласта.

Лабораторные исследования физической модели

Испытания проводились на плоской испытательной модели в лаборатории моделирования Санкт-Петербургского горного университета. Размеры модели: 2800 мм (длина) х 200 мм (ширина) х 1000 мм (высота). Исходные данные для моделирования взяты в соответствии с геологическими данными пласта 11 шахты «Хечам» (рис. 1) с труднообрушаемой кровлей, а именно: глубина залегания угольного пласта 400 м, его мощность 3 м. Угол падения пласта равен 9°, в модели залегание предполагается горизонтальным.

На основании теории подобия [22, 23] константа геометрического подобия имеет вид (1), (2) и (3):

$$C_L = \frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{100}; \quad (1)$$

$$C_\rho = \frac{\rho_m}{\rho_p} = \frac{1}{1.5}; \quad (2)$$

$$C_\sigma = \frac{\sigma_m}{\sigma_p} = \frac{1}{130}, \quad (3)$$

где L_p, ρ_p, и σ_p — соответственно геометрический размер, плотность и прочность на одноосное сжатие слоев горных пород в районе исследования; L_m, ρ_m, и σ_m — соответственно геометрический размер, плотность и прочность на одноосное сжатие слоев горных пород в модели.

Для этого модельного испытания были подготовлены четыре типа материалов, характеризующих следующие слои горных пород с различными характеристиками деформации и прочности: уголь, аргиллиты, алевролиты и песчаники. В состав материала входят полиэтиленполиамин и смолы ДЭГ-1 с различными соотношениями смешения [24–26]. Для каждого пропорционально смешанного материала цилиндрический стандартный образец породы со стороной 50 мм и высотой 100 мм изготовлен в соответствии с правилами

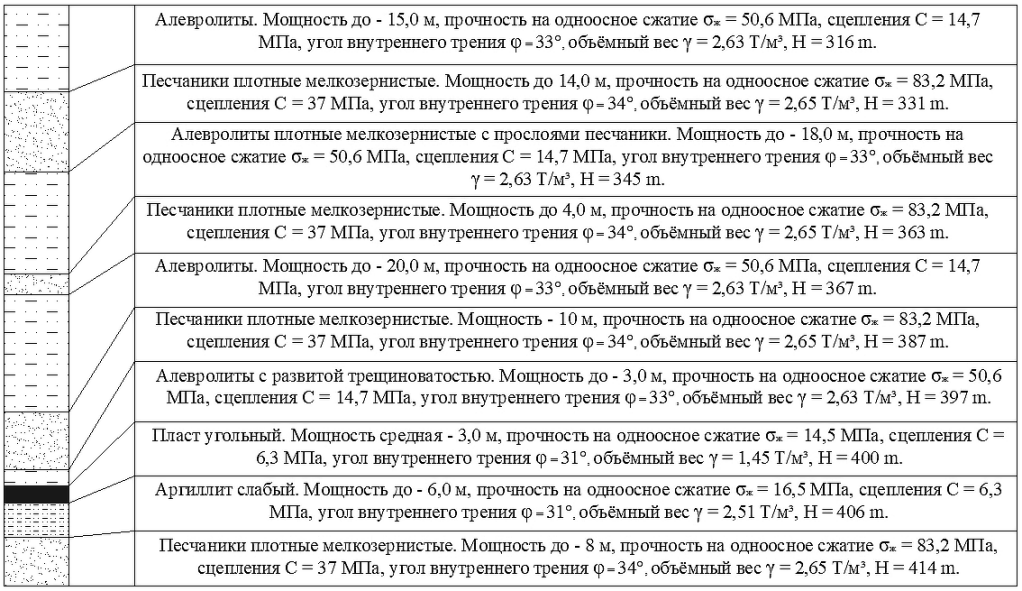

Рис. 1. Стратиграфическая колонка и физико-механические свойства слоев горных пород в области исследования

Fig. 1. Stratigraphic column and physical-mechanical properties of rock layers in the study area

подготовки материалов для лабораторных испытаний механики горных пород и подвергнут испытаниям на одноосное сжатие. Окончательный состав смеси для эквивалентного материала определяется, когда значение интенсивности совпадает с теоретическими результатами расчета.

Процессы изменения опорного давления на краевую часть моделируемого пласта регистрируются комплектом датчиков с обработкой программным комплексом «ACTest Pro», к которому датчики подключены через соединительный кабель.

Статическое напряжение в отдельных точках необходимо установить, чтобы выявить параметры зоны опорного давления и закономерность перераспределения напряжений в краевой части пласта угля. Для этого непосредственно в слоях материала модели было установлено 20 датчиков давления МГД-3. Частотный диапазон каждого датчика от 0 до 5 кГц. В зоне расположения выработки и целика угля ниже угольного пласта установлено 20 датчиков давления МГД-3. Расстояние от крайнего датчика до правого края модели составляет 48 см, что фактически соответствует 48 м. Между датчиками расстояние 4 см, что соответствует фактическому расстоянию 4 м. Схема расположения датчиков в модели показана на рис. 2.

Тарировка датчиков давления МГД-3 и обработка их показаний проводились по методике, принятой в Санкт-Петербургском горном университете [23–26]. Система оснащена программным обеспечением типа «ACTest Pro» (рис. 3), пригодным для обработки сигналов всех типов, и позволяет контролировать ход эксперимента в реальном времени. Данное программное обеспечение позволяет: 1) — отображать на экране компьютера необработанные сигналы от любого типа датчика, подключенного к любому модулю и от групп или всех датчиков одновременно; 2) — производить математическую обработку сигналов от датчиков как в реальном времени, так и в записи после эксперимента; 3) — обрабатывать данные, полученные в ходе эксперимента, сравнивать их с данными других экспериментов, экспортировать диаграммы в виде изображений или данных в виде электронной таблицы.

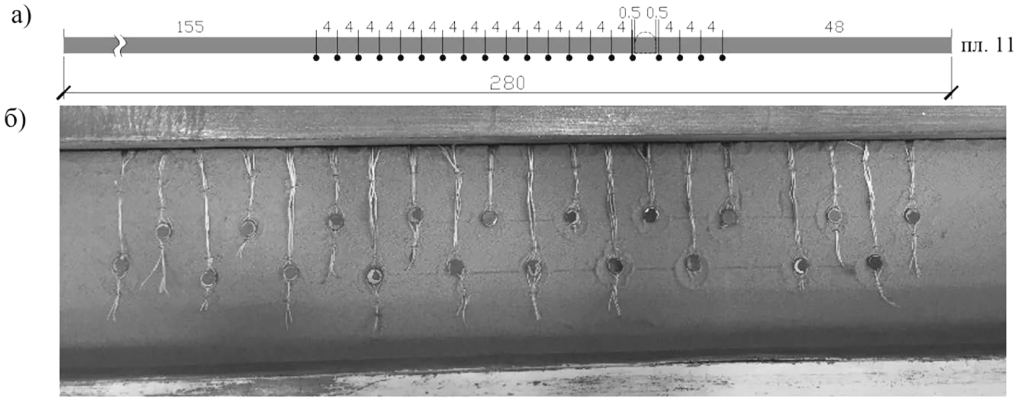

Рис. 2. Схема расположения датчиков для определения напряжений: а — расчётная схема; *б* — экспериментальная модель

Fig. 2. Layout of sensors for determining voltages: a — design diagram; *b* — experimental model

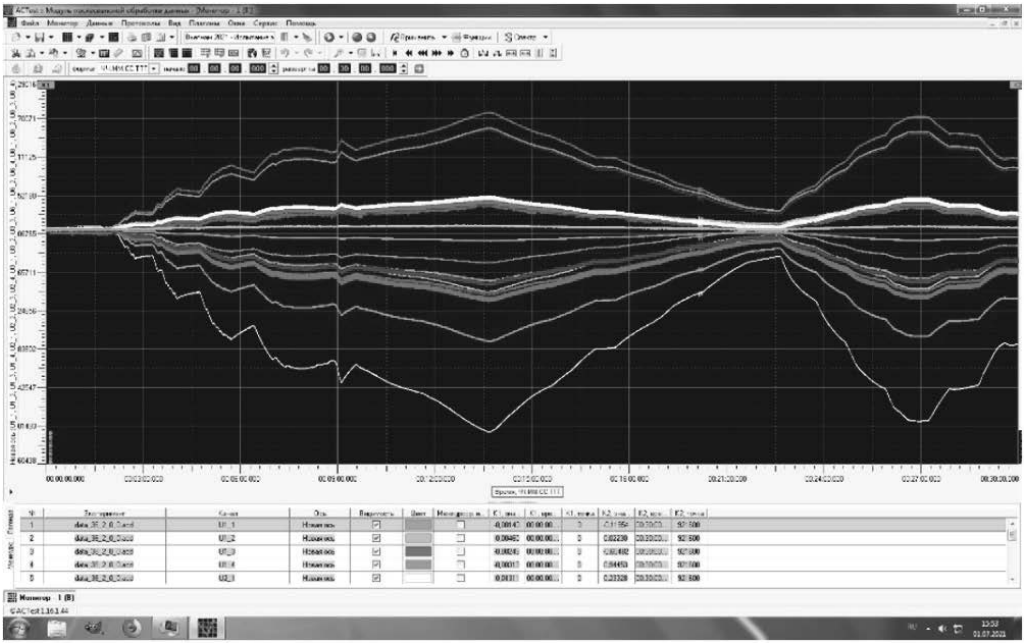

Рис. 3. Интерфейс ПО типа «ACTest Pro» для обработки сигналов датчиков МГД-3
Fig. 3. "ACTest Pro" type software interface for processing signals from MGD-3 sensors

Система моделирования состоит из системы создания пригрузки от пневматического цилиндра и компрессора, силовой рамы высокой жесткости и лабораторной системы мониторинга давления.

В таблице представлены механические и физические характеристики эквивалентных материалов и моделируемых ими пород и пласта.

Весь процесс моделирования состоит из шести этапов:

1) сборка испытательного стенда, включая силовую раму высокой жесткости, подбор физических материалов, автоматический смесительный бак, электронные весы, систему мониторинга, мониторы и другие важные инструменты;

2) изготовление эквивалентных материалов и закатка моделей из них

Характеристики материалов, используемых в физической модели
Characteristics of materials used in the physical model

Горная порода	Прочность на растяжение (МПа)	Сцепление (МПа)	Угол внутреннего трения (град.)	Прочность на одноосное сжатие (МПа)		Объемный вес (кг/м³)	
				Прототип	Модель	Прототип	Модель
Песчаник	1,6	3,2	34	83,2	0,64	2780	1853
Алевролит	0,9	2,1	30	50,6	0,39	2550	1700
Аргиллит	1,2	1,8	26	16,5	0,21	2250	1500
Уголь	0,4	1,5	19	14,5	0,21	1450	967

(послойно, по очереди снизу вверх), причем все слои моделируемых пород разделены порошком миканита;

3) приложение через пневмоцилиндр на верхнюю жесткую раму вертикальной пригрузки ступенями по 0,1 МПа для моделирования различной нагрузки по принятой схеме нагружения, с жестким ограничением смещения на нижней и боковых стенках стенда (рамы) при сохранении свободного состояния модели в поперечном направлении к модели. (4) Последовательная отработка угольного пласта в направлении от левой стороны модели до границы целика угля, для моделирования влияния зависания жесткой основной кровли на краевой части угольного пласта. На каждом этапе ширина захвата забоя составляет 50 мм (5 м). Во время работы система мониторинга должна работать постоянно для записи данных до завершения процедуры испытания.

Результаты и обсуждение

На рис. 4 показано формирование консольной балки и обрушение консоли труднообрушающейся основной кровли над краевой частью угольного пласта, примыкающей к выработанному пространству.

Результаты моделирования показывают, что средняя величина шага обрушения основной кровли составляет 25 м, а место разлома находится в 5 м (соответствует 1,5 мощностям пласта) от кромки пласта и границы выработанного пространства с образованием вертикальных трещин в основной кровле [27–30].

Анализ результатов моделирования показал, что прежде обрушения консоли основной кровли, даже в случае консолей разной длины, пиковое напряжение формируется на расстоянии 6–10 м от кромки угольного забоя на границе с выработанным пространством. Так, при консоли длиной 10 м пик напряжения достигает максимума 45,5 МПа на расстоянии 8 м от кромки выработанного пространства. Когда консоль составляет 15–20 м, пик максимального напряжения возрастает до 48,8 МПа на расстоянии от выработанного пространства 11 м. Очевидно, что в большинстве случаев зона высокого напряжения распределяется в краевой части массива, прилегающей к границе выработанного пространства. Однако после обрушения свободно зависающей консоли пород кровли пик напряжения перемещается глубоко

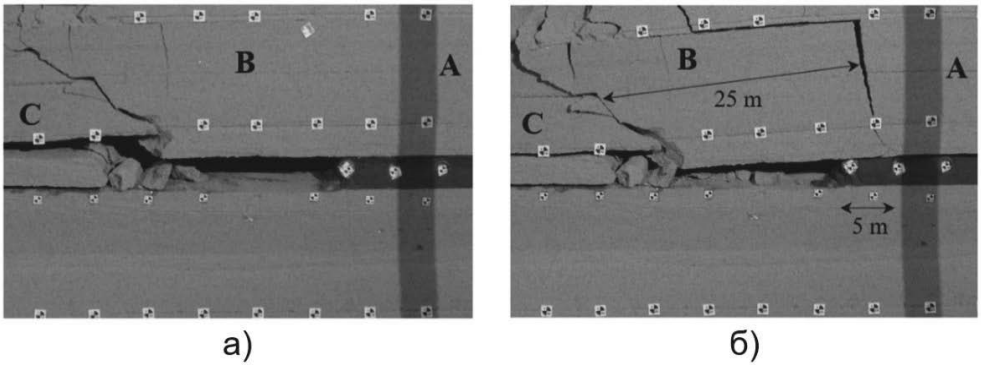

Рис. 4. Процессы смещения и разрушения жесткой основной кровли: а — формирование консоли и изгиб кровли; *б —* обрушение консоли

Fig 4. The processes of displacement and destruction of a hard main roof: a — the formation of the console and the bending of the roof; *b —* the collapse of the console

в угольный массив на расстояние 20 м от границы выработанного пространства, а на расстоянии 10 м от краевой части напряжение падает ниже начального значения. Соответствующий положению максимума давления коэффициент концентрации напряжений также составляет очень высокие значения (k = 4,5 — 4,8).

Рассматривая данные моделирования, можно сделать вывод, что опускание и поворот консоли основной кровли приводит к сжатию на краевой части массива и образованию множественных трещин. При максимальном повороте консольной балки и при ее разрушении один ее конец опирается на обрушившуюся породу в выработанном пространстве и воспринимает почти всю нагрузку от вышележащих слоев пород кровли. Таким образом, в краевой части пласта угля после

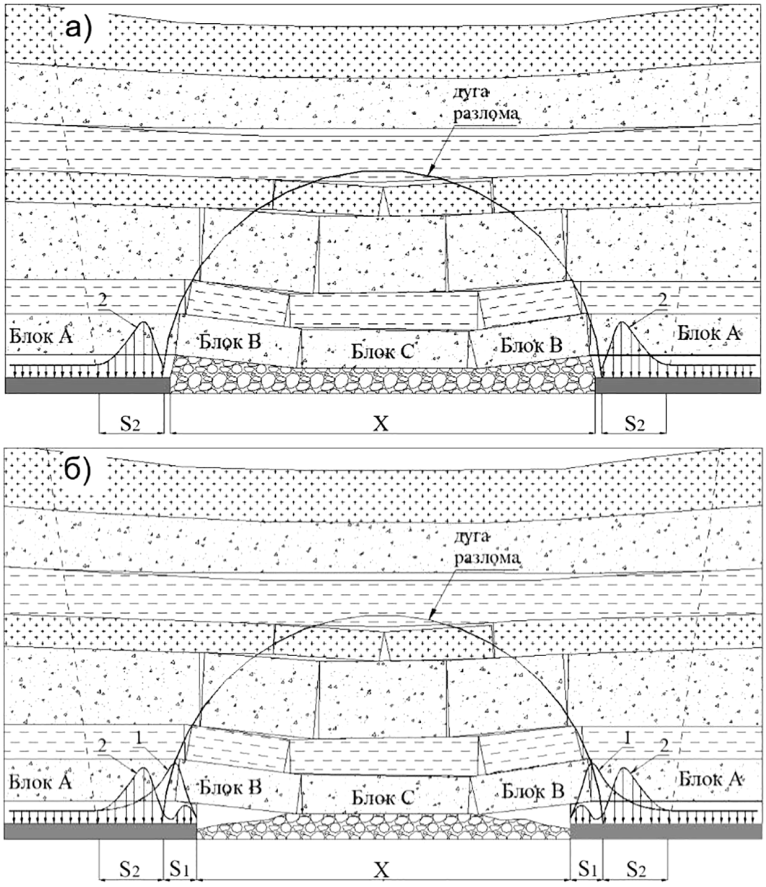

Рис. 5. Характер обрушения основной кровли вне зоны влияния лавы: а, б — арочная конструкция обрушения кровли при обычной кровле и труднообрушающихся породах кровли; *1, 2 —* графики опорного давления перед и после обрушения основной кровли; S_1 и S_2 — поля внешнего и внутреннего напряжений; X — ширина выработанного пространства

Fig. 5. Sheme of the collapse of the main roof outside the zone of influence of longwall face: a, b — arched roof collapse structure with a ordinary roof and hard-crumbling roof rocks; *1, 2 —* graphs of the abutment pressure before and after the collapse of the main roof; S_1 and S_2 — fields of external and internal stresses; X — the width of the goaf

излома основной кровли нагружение будет очень невелико.

Можно видеть, что наличие в кровле труднообрушающихся пород оказывает большое влияние на параметры зоны опорного давления, сформировавшейся в краевой части массива угля. С учетом механизма обрушения и смещений основной кровли в выработанном пространстве, распределение опорного давления над краевой частью угольного пласта и закон его развития, по результатам моделирования, представлены на рис. 5. Распространение трещин в слоях горных пород ограничено внутри «свода разлома», где и формируется свод опорного давления, воздействующий вне зоны «свода разлома». При удалении от обрушившегося свода и сдвижения слоев пород кровли характеристики распределения опорного давления и закон его образования в краевой части массива угля определяются мощностью пласта, глубиной работ и физико-механическими свойствами пород кровли. Очевидно, что при отсутствии труднообрушающихся пород в кровле плоскость разлома будет лежать прямо на границе с выработанным пространством и в краевой части угольного пласта, без изменения параметров зоны опорного давления (рис. 5, а). Напротив, когда в основной кровле присутствуют труднообрушающиеся породы, опускание и изгиб консоли основной кровли образуют область трещиноватости глубоко в угольном пласте. Процесс развития включает следующее: прежде всего, краевая часть пласта не разрушается сжатием, пик напряжений находится в области упругого сжатия, затем следуют пластические деформации в краевой части угольного пласта и перемещение пика напряжений в глубину массива угля, что напрямую связано с образованием «свода разлома» и с образованием передней зоны опорного давления в её третьей стадии (см. рис. 5).

Распределение передней зоны опорного давления на третьем этапе ее деформации разрушения состоит из «поля внутренних напряжений», где давление напрямую связано с обрушением горных пород в своде разлома, и «поля внешних напряжений» с локальным пластическим разрушением на границе с областью упругого сжатия. Диапазон распределения опорного давления и соответствующее значение напряжения достигают постоянного установившегося значения, начиная с третьего этапа (рис. 5, б; кривая *2*).

Заключение

Результаты моделирования показывают, что влияние основной кровли на параметры зоны опорного давления в краевой части угольного пласта является определяющим и проходит различные стадии в своём формировании. Основные выводы состоят в следующем:

1. Наличие в кровле труднообрушающихся пород оказывает определенное характерное влияние на процессы деформирования и разрушения нижележащих слоев кровли; учет такого наличия позволяет лучше выявить взаимосвязь между процессами, происходящими в краевой части пласта, и процессами в зоне формирования опорного давления над краевой частью угольного пласта. Результаты исследований показали, что существует четкое разделение распределения напряжений в краевой части массива угля в периоды до и после обрушения консоли основной кровли, в котором изменение параметров зоны опорного давления имеет характер, определяемый перемещением

и обрушением труднообрушающихся пород основной кровли. Было показано, что диапазон сочетаний структур и строения кровли влияет на параметры опорного давления в краевой части массива угля.

2. По результатам исследований можно прогнозировать распределение опорного давления и нагрузку от слоев пород кровли, определить параметры опорного давления в краевой части угольного пласта и точнее прогнозировать изменение характера движения пород кровли.

Вклад авторов

Ле Куанг Фук — генерация идеи исследования; постановка задачи исследования; анализ результатов исследования и подготовка данных; написание текста статьи

Дмитриев П. Н. — выполнение работы по систематизации материала;

Тхан Ван Зуи — получение данных для анализа;

Ли Юньпэн — получение данных для анализа.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zuev B. Y.*, *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, vol. 1(8), pp. 8–13.
2. *Зуев Б. Ю.*, *Зубов В. П.*, *Смычник А. Д.* Определение статических и динамических напряжений в физических моделях слоистых и блочных горных массивов // Горный журнал. — 2019. — № 7. — С. 61–66.
3. *Мешков А. А.*, *Попов А. Л.*, *Попова Ю. В.*, *Смолин А. В.*, *Шабаров А. Н.* Прогноз опасных явлений в пределах рабочих угольных пластов для шахтного поля «им. В. Д. Ялевского» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2020. — № 2. — С. 22–33. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-22 — 33.
4. *Wang Z.*, *Yin L.*, *Chen J.*, *Ma K.* Research on distribution law of advanced abutment pressure in deep soft rock working face // Grotech Geol Eng. 2019, vol.37, pp. 4089–4097. DOI: 10.1007/s10706-019-00895-0.
5. *Li A.*, *Ma Q.*, *Ma L.*, *Kang L.*, *Mu Q.*, *Chen J. B.* Coal mine abutment pressure distribution based on a strain-softening model // Frontiers in Physics. 2020, vol. 8, Article 263. DOI: 10.3389/fphy.2020.00263.
6. *Zhu S.*, *Feng Y.*, *Jiang F.*, *Liu J.* Mechanism and risk assessment of overall-instability-induced rockbursts in deep island longwall panels // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018, vol. 106, pp. 342–349. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.04.031.
7. *Wang Z.*, *Yin L.*, *Chen J.*, *Ma K.* Research on distribution law of advanced abutment pressure in deep soft rock working face // Geotechnical and Geological Engineering. 2019, vol. 37(5), pp. 4089–4097. DOI: 10.1007/s10706-019-00895-0.
8. *Guo Z.*, *Li W.*, *Yin S.*, *Yang D.*, *Ma Z.* An innovative technology for monitoring the distribution of abutment stress in longwall mining // Energies. 2021, vol. 14(2), 475, 22p. DOI: 10.3390/en14020475.
9. *Eremin M.*, *Esterhuizen G.*, *Smolin I.* Numerical simulation of roof cavings in several Kuzbass mines using finite-difference continuum damage mechanics approach // International journal of mining science and technology. 2020, vol. 30(2), pp. 157–166.
10. *Xie J. L.*, *Xu J. L.* Effect of key stratum on the mining abutment pressure of a coal seam // Geosciences Journal. 2017, vol. 21(2), pp. 267–276. DOI:10.1007/s12303-016-0044-7.
11. *Yu B.*, *Zhang L.* Study on the abutment pressure distribution in top coal caving // Arabian Journal of Geosciences. 2020, vol. 13(4), pp. 1–10.

12. *Zhang B.*, *Sun D.*, *Zheng R.* Evolution Law of Coal Seam Abutment Pressure under the Influence of Shallow Buried Complex Strata: A Case Study // Shock and Vibration. 2021, vol. 2021, 13 p. DOI: 10.1155/2021/6670175.

13. *Wang F.*, *Jie Z.*, *Ma B.*, *Zhu W.*, *Chen T.* Influence of Upper Seam Extraction on Abutment Pressure Distribution during Lower Seam Extraction in Deep Mining // Advances in Civil Engineering. 2021, vol. 2021, Article ID 8331293, 9 p. DOI: 10.1155/2021/8331293.

14. *Du B.*, *Liu C.*, *Yang J.*, *Wu F.* Abutment pressure distribution pattern and size optimization of coal pillar under repeated mining: a case study // Arabian Journal of Geosciences. 2020, vol. 13(23), pp. 1–14. DOI: 10.1007/s12517—020—06281-y.

15. *Zhou K.*, *Dou L.*, *Gong S.*, *Li J.*, *Zhang J.*, *Cao J.* Study of rock burst risk evolution in front of deep longwall panel based on passive seismic velocity tomography // Geofluids. 2020, vol. 2020, Article ID 8888413, 14 p. DOI: 10.1155/2020/8888413.

16. *Li X.*, *Gong S.*, *Dou L.*, *Chai Y.* Detection of stress redistribution in a complex isolated coal pillar with active SVT technology // Arabian Journal of Geosciences. 2020, vol. 13(18), pp. 1–12. DOI: 10.1007/s12517-020-05975-7.

17. *Wang J.*, *Ning J. G.*, *Jiang L.*, *Jiang J. Q.*, *Bu T.* Structural characteristics of strata overlying of a fully mechanized longwall face: a case study // Journal of the southern african institute of mining and metallurgy. 2018, vol. 118(11), pp. 1195–1204. DOI: 10.17159/2411—9717/2018/v118n11a10.

18. *Yang Z.*, *Cheng Z.*, *Li Z.*, *Li C.*, *Wang L.*, *Yin S.*, *Zhang J.* Movement Laws of Overlying Strata above a Fully Mechanized Coal Mining Face Backfilled with Gangue: A Case Study in Jiulishan Coal Mine in Henan Province, China // Advances in Civil Engineering. 2021, vol. 2021, Article ID 9939886, 20 p. DOI: 10.1155/2021/9939886.

19. *Phuc Q. L.*, *Dung T. L.*, *Thang D. P.*, *Tuan A. N.* Strata movement when extracting thick and gently inclined coal seam from a physical modelling analysis: a case study of Khe Cham basin, Vietnam // Sustainable Development Of Mountain Territories. 2019, vol. 4(42), pp. 561–567. DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11—4-560—566.

20. *Li J.*, *Huang Y.*, *Zhang J.*, *Li M.*, *Qiao M.*, *Wang F.* The influences of key strata compound breakage on the overlying strata movement and strata pressure behavior in fully mechanized caving mining of shallow and extremely thick seams: a case study // Advances in Civil Engineering. 2019, vol. 2019, Article ID 5929635, 11 p. https://doi.org/10.1155/2019/5929635.

21. *Nguyen V. D., Nguyen P. H.*, *Do M. T.* Experimental Study on the Efficacy of Water Infusion for Underground Mining of a Coal Seam // Special Issue “Business Performance and Socio-environmental Sustainability”. 2019, vol. 9, 14 p. DOI: 10.3390/app9183820.

22. *Валиев Н. Г.* О, *Беркович В. Х.*, *Пропп В. Д.*, *Кокарев К. В.* Проблемы отработки предохранительных целиков при эксплуатации рудных месторождений // Известия вузов. Горный журнал. — 2018. — №2. — С. 4–9. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-2-4—9.

23. *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.

24. *Калинин С. И.*, *Роут Г. Н.*, *Игнатов Ю. М.*, *Черданцев А. М.* Обоснование суточной добычи угля из лавы длинной 400 метров в условиях шахты им. ВД Ялевского // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2018. — №5. — С. 27–34. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-5-27—34.

25. *Протосеня А. Г.*, *Иовлев Г. А.* Прогноз пространственного напряженно-деформированного состояния физически нелинейного грунтового массива в призабойной зоне тоннеля // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2020. — № 5. — С. 128–139. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0—128—139.

26. *Кучеренко А. В.*, *Филимонов К. А.*, *Зорков Д. В.*, *Цибаев С. С.* Особенности проявления горного давления в пластовых выработках шахты имени В. Д. Ялевского // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2020. — № 11. — С. 79–95. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11—0-79—95.

27. *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.

28. *Серяков В. М.*, *Красновский А. А.* Оценка напряженно-деформированного состояния массива при заполнении вывалов пород в кровле выработки фенольными смолами // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2020. — Т. 7. – № 1. — С. 144–148. DOI:10.15372/FPVGN2020070122.

29. *Kazanin O. I.*, *Yaroshenko V. V.* Decrease in coal losses during mining of contiguous seams in the near-bottom part at Vorkuta deposit // Journal of Mining Institute. 2020, vol. 244, pp. 395–401. DOI:10.31897/PMI.2020.4.1.

30. *Zubov V. P.*, *Nikiforov A. V.* Features of development of superimposed coal seams in zones of disjunctive geological disturbances // International journal of applied engineering research. 2017, vol. 12, pp. 765–768. ГИАБ

REFERENCES

1. Zuev B. Y., 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, vol. 1(8), pp. 8–13.

2. Zuev B. Y., Zubov V. P., Smychnik A. D. Determination of static and dynamic stresses in physical models of layered and block rock masses. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 7, pp. 61–66. [In Russ].

3. Meshkov A. A, Popov A. L., Popova Yu. V., Smolin A. V., Shabarov A. N. Forecast of hazardous phenomena within the working coal seams for the mine field named after. VD Yalevskogo. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 2, pp. 22—33. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0—22—33. [In Russ].

4. Wang Z., Yin L., Chen J., Ma K. Research on distribution law of advanced abutment pressure in deep soft rock working face. *Grotech Geol Eng*. 2019, vol.37, pp. 4089–4097. DOI: 10.1007/s10706-019-00895-0.

5. Li A., Ma Q., Ma L., Kang L., Mu Q., Chen J. B. Coal mine abutment pressure distribution based on a strain-softening model. *Frontiers in Physics*. 2020, vol. 8, Article 263. DOI: 10.3389/fphy.2020.00263.

6. Zhu S., Feng Y., Jiang F., Liu J. Mechanism and risk assessment of overall-instability-induced rockbursts in deep island longwall panels. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018, vol. 106, pp. 342–349. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.04.031.

7. Wang Z., Yin L., Chen J., Ma K. Research on distribution law of advanced abutment pressure in deep soft rock working face. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019, vol. 37(5), pp. 4089–-4097. DOI: 10.1007/s10706-019-00895-0.

8. Guo Z., Li W., Yin S., Yang D., Ma Z. An innovative technology for monitoring the distribution of abutment stress in longwall mining. *Energies*. 2021, vol. 14(2), 475, 22 p. DOI: 10.3390/en14020475.

9. Eremin M., Esterhuizen G., Smolin I. Numerical simulation of roof cavings in several Kuzbass mines using finite-difference continuum damage mechanics approach. *International journal of mining science and technology*. 2020, vol. 30(2), pp. 157–166.

10. Xie J. L., Xu J. L. Effect of key stratum on the mining abutment pressure of a coal seam. *Geosciences Journal*. 2017, vol. 21(2), pp. 267–276. DOI:10.1007/s12303-016-0044-7.

11. Yu B., Zhang L. Study on the abutment pressure distribution in top coal caving. *Arabian Journal of Geosciences*. 2020, vol. 13(4), pp. 1–10.

12. Zhang B., Sun D., Zheng R. Evolution Law of Coal Seam Abutment Pressure under the Influence of Shallow Buried Complex Strata: A Case Study. *Shock and Vibration*. 2021, vol. 2021, 13 p. DOI: 10.1155/2021/6670175.

13. Wang F., Jie Z., Ma B., Zhu W., Chen T. Influence of Upper Seam Extraction on Abutment Pressure Distribution during Lower Seam Extraction in Deep Mining. *Advances in Civil Engineering*. 2021, vol. 2021, Article ID 8331293, 9 p. DOI: 10.1155/2021/8331293.

14. Du B., Liu C., Yang J., Wu F. Abutment pressure distribution pattern and size optimization of coal pillar under repeated mining: a case study. *Arabian Journal of Geosciences*. 2020, vol. 13(23). pp. 1–14. DOI: 10.1007/s12517—020—06281-y.

15. Zhou K., Dou L., Gong S., Li J., Zhang J., Cao J. Study of rock burst risk evolution in front of deep longwall panel based on passive seismic velocity tomography. *Geofluids*. 2020, vol. 2020, Article ID 8888413, 14 p. DOI: 10.1155/2020/8888413.

16. Li X., Gong S., Dou L., Chai Y. Detection of stress redistribution in a complex isolated coal pillar with active SVT technology. *Arabian Journal of Geosciences*. 2020, vol. 13(18), pp. 1–12. DOI: 10.1007/s12517-020-05975-7.

17. Wang J., Ning J. G., Jiang L., Jiang J. Q., Bu T. Structural characteristics of strata overlying of a fully mechanized longwall face: a case study. *Journal of the southern african institute of mining and metallurgy*. 2018, vol. 118(11), pp. 1195–1204. DOI: 10.17159/2411—9717/2018/v118n11a10.

18. Yang Z., Cheng Z., Li Z., Li C., Wang L., Yin S., Zhang J. Movement Laws of Overlying Strata above a Fully Mechanized Coal Mining Face Backfilled with Gangue: A Case Study in Jiulishan Coal Mine in Henan Province, China. *Advances in Civil Engineering*. 2021, vol. 2021, Article ID 9939886, 20 p. DOI: 10.1155/2021/9939886.

19. Phuc Q. L., Dung T. L., Thang D. P., Tuan A. N. Strata movement when extracting thick and gently inclined coal seam from a physical modelling analysis: a case study of Khe Cham basin, Vietnam. *Sustainable Development Of Mountain Territories*. 2019, vol. 4(42), pp. 561–567. DOI: 10.21177/1998-4502-2019-11—4-560—566.

20. Li J., Huang Y., Zhang J., Li M., Qiao M., Wang F. The influences of key strata compound breakage on the overlying strata movement and strata pressure behavior in fully mechanized caving mining of shallow and extremely thick seams: a case study. *Advances in Civil Engineering*. 2019, vol. 2019, Article ID 5929635, 11 p. https://doi.org/10.1155/2019/5929635.

21. Nguyen V. D., Nguyen P. H., Do M. T. Experimental Study on the Efficacy of Water Infusion for Underground Mining of a Coal Seam. *Special Issue "Business Performance and Socio-environmental Sustainability"*. 2019, vol. 9, 14 p. DOI: 10.3390/app9183820.

22. Valiev N. G. O, Berkovich V. H., Propp V. D., Kokarev K. V. Problems of development of safety pillars during the exploitation of ore deposits. News of the higher educational institutions. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 2, pp. 4–9. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-2-4—9. [In Russ].

23. Zuev B. Y. Methodology for modeling non-linear geomechanical processes in block and layered rock masses on models from equivalent materials. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 250, pp. 542–552. [In Russ].

24. Kalinin S. I. Rout G. N., Ignatov Y. M., Cherdantsev A. M. Justification of the daily production of coal from a lava 400 meters long in the conditions of the mine. VD Yalevskogo. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2018, no. 5, pp. 27–34. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-5-27—34. [In Russ].

25. Protosenya A. G., Lovlev G. A. Forecast of the spatial stress-strain state of a physically nonlinear soil massif in the bottomhole zone of the tunnel. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2020, no. 5, pp. 128–139. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0—128—139. [In Russ].

26. Kucherenko A. V., Filimonov K. A., Zorkov D. V., Tsibaev S. S. Ground pressure-related phenomena in in-seam roadways in Yalevsky mine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2020, no. 11, pp. 79–95. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11—0-79—95. [In Russ].

27. Zubov V. P. State and directions of improvement of systems for the development of coal seams at promising coal mines of Kuzbass. *Zapiski Gornogo instituta*. 2017, T. 225, pp. 292–297. DOI: 10.18454/PMI.2017.3.292. [In Russ].

28. Seryakov V. M., Krasnovsky A. A. Assessment of stress-strain state of the rock mass when filling rock inrush in the mine roof with phenol resins. *Fundamental and applied issues of mining sciences*. 2020, T. 7, no. 1, pp. 144–148. DOI:10.15372/FPVGN2020070122. [In Russ].

29. Kazanin O. I., Yaroshenko V. V. Decrease in coal losses during mining of contiguous seams in the near-bottom part at Vorkuta deposit. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 244, pp. 395–401. DOI:10.31897/PMI.2020.4.1.

30. Zubov V. P., Nikiforov A. V. Features of development of superimposed coal seams in zones of disjunctive geological disturbances. *International journal of applied engineering research*. 2017, vol. 12, pp. 765–768.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ле Куанг Фук[1] — аспирант РМПИ, https://orcid.org/0000-0002-5570-8706, e-mail: lequangphuc68@gmail.com;
Дмитриев Павел Николаевич[1] — канд. техн. наук, доц. каф. РМПИ, http://orcid.org/0000-0003-0266-2916, e-mail: Dmitriev_PN@pers.spmi.ru;
Тхан Ван Зуи[1] — аспирант РМПИ, https://orcid.org/0000-0003-3300-2793, e-mail: thanvanduy@gmail.com;
Ли Юньпэн[1] — аспирант РМПИ, https://orcid.org/0000-0003-2677-2757, e-mail: yunpengli@mail.ru;
[1] Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2, Россия.
Для контактов: *Ле Куанг Фук*, e-mail: lequangphuc68@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Le Quang Phuc[1], postgraduate student of the department of construction of of Development of Mineral Deposits, https://orcid.org/0000-0002-5570-8706, e-mail: lequangphuc68@gmail.com;
Dmitriev P. N.[1], Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Development of Mineral Deposits, http://orcid.org/0000-0003-0266-2916, e-mail: Dmitriev_PN@pers.spmi.ru;
Than Van Duy[1], postgraduate student of the department of construction of of Development of Mineral Deposits, https://orcid.org/0000-0003-3300-2793, e-mail: thanvanduy@gmail.com;
Li Yunpeng[1], postgraduate student of the department of construction of of Development of Mineral Deposits, https://orcid.org/0000-0003-2677-2757, e-mail: yunpengli@mail.ru;
[1] Saint Petersburg Mining University, 199106, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2, Russia.
Corresponding author: *Le Quang Phuc*, e-mail: lequangphuc68@gmail.com.

Получена редакцией 14.01.2022; получена после рецензии 30.05.2022; принята к печати 10.05.2022.
Received by the editors 14.01.2022; received after the review 30.05.2022; accepted for printing 10.05.2022.