

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 622.83

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.7

Оценка деформаций повторно используемых подготовительных выработок на пологозалегающих угольных пластах

Никита Викторович Ягель^{1,2}, Иосиф Михайлович Закоршменный²,
Игорь Леонидович Харитонов³, Дмитрий Иванович Блохин²

¹ Инженерно-консультационный центр проблем фундаментостроения (ИКЦ ПФ); г. Москва, Россия;

² Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова
Российской академии наук (ИПКОН РАН); г. Москва, Россия;

³ Воркутауголь; г. Воркута, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях, когда мощность разрабатываемого пласта не позволяет сформировать выработку требуемого сечения без присечки вмещающих пород, целесообразно применять технологические схемы с повторным использованием подготовительных выработок. Исследования в области разработки эффективных способов оценки устойчивости повторно используемых подготовительных выработок в таких условиях залегания пластов в настоящее время остаются актуальными, в том числе и для шахт Печорского угольного бассейна. Задача описываемых исследований — получить картину изменений напряженно-деформированного состояния рассматриваемой геотехнической системы и оценить величины смещений приконтурных областей подготовительной горной выработки при различных положениях очистного забоя.

Материалы и методы. Для условий одной из действующих шахт Печорского угольного бассейна проведены численные эксперименты методом конечных элементов в программном комплексе Midas GTS NX. Для описания изменений геомеханического состояния описываемой геотехнической системы использован критерий Кулона – Мора. С целью оценки достоверности результатов моделирования выполнено сравнение с результатами инструментальных замеров изменений геометрических параметров сечения, проведенных по длине выработки.

Результаты. В ходе моделирования получены пространственные распределения результирующих деформаций рассматриваемой геотехнической системы. Произведена оценка величины смещений приконтурных областей подготовительной горной выработки по мере подвигания очистного забоя. Расчетные значения вертикальных и горизонтальных деформаций позволяют оценить соответствие применяемых способов крепления и охраны выработки требованиям обеспечения расчетного сечения горной выработки расчетным показателям и могут быть использованы для оценки эффективности принимаемых решений. Результаты модельных расчетов подтверждены данными шахтных инструментальных наблюдений.

Выводы. Результаты исследования демонстрируют, что предложенная геомеханическая модель массива горных пород в полной мере отражает основные особенности его строения и изменения контура подготовительной горной выработки в процессе ее эксплуатации и может быть применена для оценки эффективности различных способов ее поддержания при повторном использовании.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: угольные шахты, подготовительные выработки, геомеханические процессы, напряжения, деформации, численные методы, инструментальные наблюдения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ягель Н.В., Закоршменный И.М., Харитонов И.Л., Блохин Д.И. Оценка деформаций повторно используемых подготовительных выработок на пологозалегающих угольных пластах // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 1. Ст. 7. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.7

Автор, ответственный за переписку: Никита Викторович Ягель, nikita.zagel@gmail.com.

Assessment of contour deformations of reused mine workings

Nikita V. Yagel^{1,2}, Iosif M. Zakorshmeny², Igor L. Kharitonov³, Dmitry I. Blokhin²

¹ Engineering and Consulting Center for Foundation Problems; Moscow, Russian Federation;

² Melnikov Institute for Integrated Development of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences;
Moscow, Russian Federation;

³ Vorkutaugol; Vorkuta, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In conditions when the thickness of the mined seam does not allow to form the required cross-sectional excavation without cutting of the host rocks, it is advisable to apply technological schemes with reuse of preparatory work-

ings. Research in the field of development of effective ways to assess the stability of reused preparatory workings in such conditions of bedding of seams at present remains relevant, including for the mines of the Pechersk Coal Basin. The task of the described research is to obtain a picture of changes in the stress-strain state of the geotechnical system under consideration and to estimate the displacement values of the near-contour areas of the preparatory mine workings at different positions of the face.

Materials and methods. Were used to carry out numerical experiments using the finite element method in the Midas GTS NX software package for the conditions of one of the operating mines in the Pechersk coal basin. The Coulomb – Mohr criterion was used to describe changes in the geomechanical state of the mining system. To assess the reliability of simulation results, comparisons were made with instrumental measurements of geometric parameters along the length of workings.

Results. During the simulation, the spatial distributions of the resulting deformations in the geomechanical system under consideration were obtained. The estimation of the magnitude of displacements in adjacent areas of preparatory mine workings was made as the face moved. The calculated values of vertical and horizontal displacements allow us to assess compliance with the requirements for fastening and protecting workings, as well as design specifications for the mining area. These values can be used to evaluate the effectiveness of decision-making. The results of model calculations are supported by data from mine instrumental observations.

Conclusions. The results of the study demonstrate that the proposed geomechanical model of rock mass fully reflects the main features of its structure and changes in the contours of preparatory mining operations during its operation and can be used to assess the effectiveness of various methods for maintaining it during reuse.

KEYWORDS: coal mines, preparatory workings, geomechanical processes, stresses, deformations, numerical methods, instrumental observations

FOR CITATION: Yagel N.V., Zakorshmeny I.M., Kharitonov I.L., Blokhin D.I. Assessment of contour deformations of reused mine workings. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(1):7. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.7

Corresponding author: Nikita V. Yagel, nikita.yagel@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Стабильная работа угольных шахт может быть обеспечена только при своевременной подготовке фронта очистных работ, который создается проведением основных и подготовительных выработок [1, 2]. Способ проведения горной выработки, вид крепления и условия ее поддержания в процессе эксплуатации зависят от свойств вмещающих пласт пород, мощности разрабатываемого пласта и глубины ведения работ [2]. В условиях, когда мощность разрабатываемого пласта не позволяет сформировать выработку требуемого сечения без присечки вмещающих пород, целесообразно применять технологические схемы с повторным использованием подготовительных выработок. Такое решение сопровождается необходимостью применения способов снижения величины смещений контура выработок [3–5]. Поэтому оценка эффективности применения инженерных решений по поддержанию повторно используемых выработок особенно важна в постоянно усложняющихся горногеологических условиях.

Представлены результаты численных расчетов смещений контура повторно используемой подготовительной выработки для конкретных горногеологических условий разработки пологозалегающего угольного пласта. Оценка деформаций контура повторно используемой выработки необходима, так как после прохода лавы она предназначена для отвода исходящей струи. В связи с этим поддерживаемая выработка должна иметь определенное сечение для отвода расчетного количества воздуха, что снизит аэрологические риски при отработке выемочного участка [6].

Исследования выполнены для условий отработки пласта «Четвертый» шахты «Комсомольская» АО «Воркутауголь». Конвейерный бремсберг прой-

ден комбайновым способом и закреплен на всем протяжении основной арочной крепью типа АП–ЗП, устанавливаемой через 0,67 м с затяжкой кровли и боков выработки.

Усиление основной крепи производится:

- на расстоянии не менее 40 м до очистного забоя балками из специального взаимозаменяемого профиля (СВП), которые располагаются в две непрерывные нити, под каждую нить выполняется установка канатных анкеров АК-01 длиной 6 м, плотность их установки — 1,5 анкера на метр, схема установки крепи усиления представлена на рис. 1;
- за лавой путем установки «костров» из бруса размером $1,3 \times 4 \times 3$ м. Допустимое отставание «костров» за секциями механизированной крепи не более 4 м.

На рис. 2 показаны сопряжение лавы с конвейерным бремсбергом и элементы крепления, поддержания и усиления крепления конвейерного штрека по мере перемещения очистного забоя.

Поддержание сопряжения лавы с исследуемой выработкой обеспечивается деревянными стойками, устанавливаемыми под ближнюю к лаве непрерывную нить из балок СВП с плотностью установки 1 стойка на метр. Для предотвращения просыпания пород кровли в лаву производится полная затяжка кровли доской на трех секциях крепи на сопряжении лавы с выработкой.

Длина лавы — 152 м. Лава отрабатывается на глубинах 538–748 м. Угольный пласт имеет простое строение и состоит из крепкого полублестящего угля. Мощность пласта колеблется в пределах от 1,32 до 1,58 м, средняя — 1,5 м.

Задача описываемых исследований — получить картину изменений напряженно-деформированного

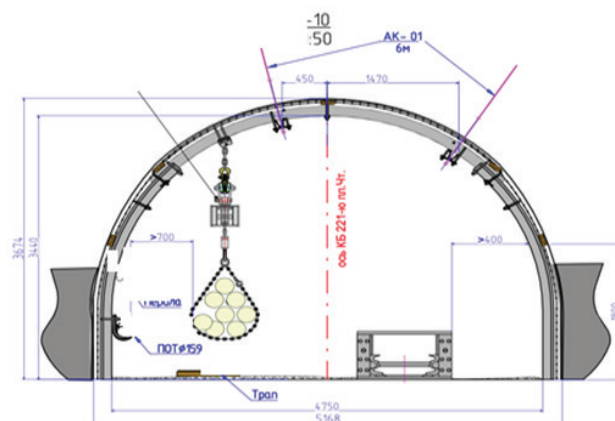


Рис. 1. Схема установки крепи усиления на конвейерном бремсберге

Fig. 1. Diagram of the installation of reinforcement support on the conveyor bremsberg

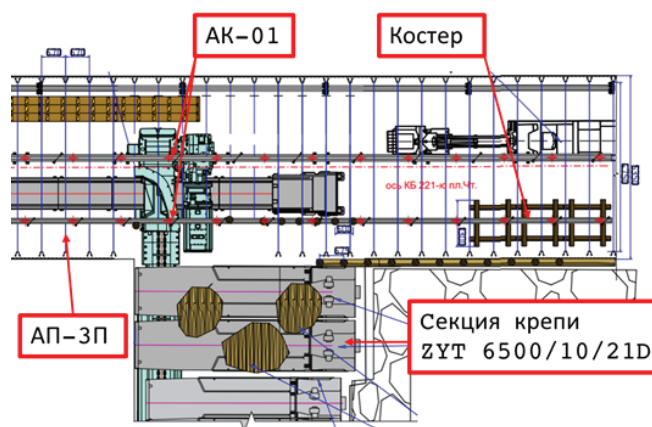


Рис. 2. Сопряжение лавы с конвейерным бремсбергом

Fig. 2. Longwall interface with the conveyor bremsberg

состояния (НДС) рассматриваемого участка углепородного массива и оценить величины смещений приконтурных областей подготовительной горной выработки при различных положениях очистного забоя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для решения многих задач прикладной геомеханики, в том числе и для выполнения расчетов по оценке влияния горных работ на существующие выработки различного назначения, эффективно используются подходы численного моделирования [7–10]. Одним из общепринятых подходов являются методы численного моделирования, основанные на использовании нелинейных моделей механики сплошных сред [11–14]. В частности, указанные подходы реализованы в программном комплексе (ПК) Midas GTS NX [15–17].

Рассматриваемая задача решается методом конечных элементов в ПК Midas GTS NX с использованием критерия разрушения Кулона – Мора [10, 18]. Критерий Кулона – Мора:

$$\tau = \sigma \cdot \tan(\varphi) + c$$

отличается своей простотой и может рассматриваться как приближение первого порядка к реальному описанию деформационных процессов в массиве горных пород. Такой подход позволяет дать достаточно реалистичное представление о характере распределения искомых параметров, в том числе при сложном геологическом строении массива.

Общий вид расчетной схемы участка углепородного массива, включающего горные выработки, показан на рис. 3.

Представленная на рис. 3 расчетная схема состоит из двух слоев вмещающих пород, общая толщина которых принимается равной $0,9L = 137$ м [3], где L — длина лавы. Давление вышележащих пород учитывается путем задания нагрузки на верхнюю границу модели [19]. При этом участок моделируемого выемочного столба $L_m = 200$ м. Общая высота модели $h = 144$ м. Расположение оконтуривающих выемочный участок подготовительных выработок и их крепление соответствуют натурным условиям. Вентиляционный бремсберг в процессе продвижения забоя погашается. Конвейерный бремсберг поддерживается и используется для проветривания действу-

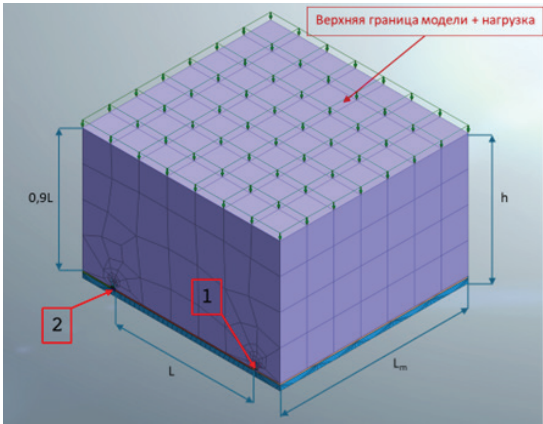


Рис. 3. Общий вид расчетной схемы: 1 — вентиляцион-
ный бремсберг; 2 — конвейерный бремсберг
Fig. 3. General view of the calculation scheme: 1 — ventila-
tion bremsberg; 2 — conveyor bremsberg

ющей лавы и в качестве вентиляционного бремсберга при отработке следующей лавы.

Табл. 1. Свойства пород
Table 1. Properties of rocks

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Модуль упругости, E , ГПа	Коэффициент Пуассона, $\nu \cdot 10^3$	Сцепление C , кПа	Угол внутреннего трения φ , °
Ослабленные аргиллиты	2200	1	250	1000	25
Песчаник	2600	14	200	6500	50
Уголь	1340	2	200	2600	50

Табл. 2. Этапы моделирования НДС углепородного массива в процессе эксплуатации подготовительной горной
выработки
Table 2. Stages of modeling the stress-strain state of a coal rock massif during the operation of a preparatory mine working

Название элемента	Этапы расчета					
	S.0	S.1	S.2	S.3	...	S.22
Уголь	ВКЛ.	—	—	—	—	—
Вмещающая порода	ВКЛ.	—	—	—	—	—
Конвейерный бремсберг	ВКЛ.	—	ВЫКЛ.	—	—	—
Вентиляционный бремсберг	ВКЛ.	—	ВЫКЛ. 1–20	ВКЛ. 1	...	ВКЛ. 20
Конвейерный бремсберг арочная крепь	ВЫКЛ.	—	ВКЛ.	—	—	—
Вентиляционный бремсберг арочная крепь	ВЫКЛ.	—	ВКЛ. 1–20	ВЫКЛ. 1	...	ВЫКЛ. 20
Конвейерный бремсберг анкерная крепь	ВЫКЛ.	—	ВКЛ.	—	—	—
Вентиляционный бремсберг анкерная крепь	ВЫКЛ.	—	ВКЛ. 1–20	ВЫКЛ. 1	...	ВЫКЛ. 20
Костер	ВЫКЛ	—	—	ВКЛ. 1	—	ВКЛ. 20
Забой*	ВКЛ.	—	—	—	—	—
Нагрузка**	ВКЛ.	—	—	—	—	—
Граничные условия	ВКЛ.	—	—	—	—	—
Замена***	—	—	—	ВКЛ. 1	...	ВКЛ. 20

Примечание: * — 10-метровые расчетные блоки, отображающие продвижение лавы; ** — задание нагрузки от вы-
шележащих пород к верхней границе модели, а также атмосферного давления; *** — изменение свойств расчетного
блока в модели с продвижением лавы.

Углепородный массив рассматривается как не-
однородный, изотропный (в пределах отдельных
породных слоев и пластов) и нелинейно деформиру-
емый. Значения используемых в расчетах деforma-
ционно-прочностных характеристик различных ком-
понентов рассматриваемой геотехнической системы
приведены в табл. 1.

Учитывая технологию отработки пласта «Чет-
вертый» шахты «Комсомольская» АО «Воркута-
уголь», рассмотрены следующие этапы модели-
рования НДС углепородного массива в процессе
эксплуатации подготовительной горной выработки
(модель делится на расчетные блоки, каждый эле-
мент технологической схемы является блоком, т.е.
под ВКЛ. и ВЫКЛ. подразумевается добавление
и исключение блока из расчета) (табл. 2):

- S.0 (IS — initial stage) — задание информации,
характеризующей условия залегания, свойства нена-
рушенного неоднородного массива горных пород;

- S.1 — обнуление деформаций массива, не подверженного техногенному влиянию (обязательная процедура для данного ПО);
- S.2 — в массиве пройдена подготовительная выработка (конвейерный бремсберг), закрепленная арочной крепью (размеры сечения и способ крепления соответствуют проекту);
- S.3–22 — моделируется перемещение очистного забоя. Перемещение забоя моделируется путем замены свойств, пройденных очистным забоем блоков массива (ослабленные аргиллиты в табл. 1). В процессе моделирования предусмотрен цикл технологических операций от установки крепи усиления основной крепи в конвейерном бремсберге вне зоны влияния лавы до усиления основной крепи за лавой, производится путем установки «костров».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 4 представлены пространственные распределения результирующих деформаций рассматриваемой геомеханической системы, полученные в ходе

моделирования и соответствующие вышеперечисленным этапам обработки угольного пласта.

Для применения полученных результатов с целью разработки инженерных решений по безаварийной эксплуатации повторно используемой горной выработки в течение всего срока службы необходимо выделить вертикальные и горизонтальные деформации. На рис. 5 приведен финальный этап моделирования геомеханического состояния исследуемого массива горных пород в зоне влияния очистного забоя и представлено распределение указанных составляющих деформаций массива, вмещающего повторно используемую подготовительную выработку, закрепленную основной крепью и крепью усиления. Полученные значения вертикальных и горизонтальных деформаций позволяют оценить соответствие применяемых способов крепления и охраны выработки требованиям обеспечения расчетного сечения горной выработки расчетным показателям и могут быть использованы для оценки эффективности принимаемых решений.

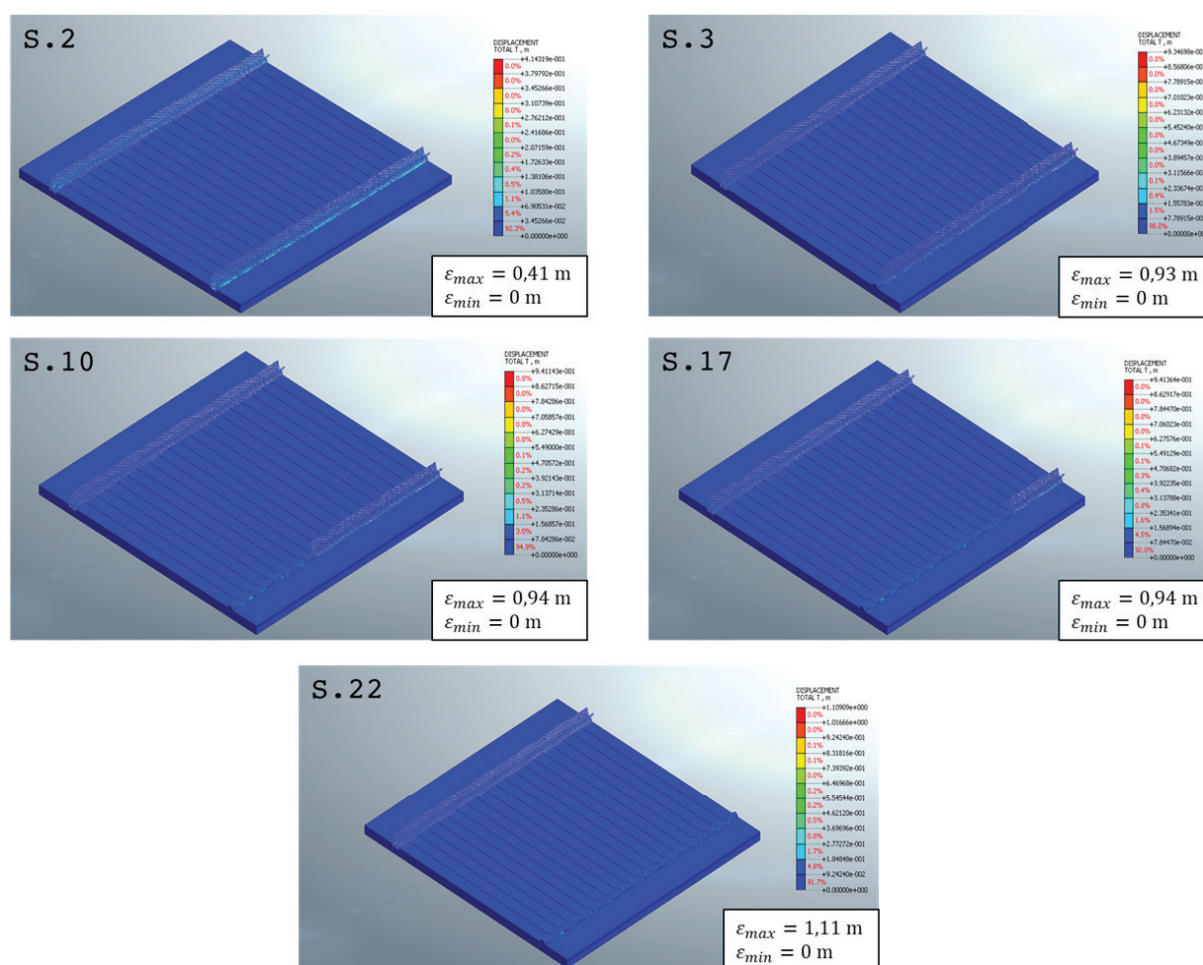


Рис. 4. Результирующие деформации массива, полученные на каждом этапе моделирования: ϵ_{max} — максимальное значение деформации, м; ϵ_{min} — минимальное значение деформации, м

Fig. 4. The resulting deformations of the array obtained at each stage of the simulation: ϵ_{max} — the maximum value of deformation, m; ϵ_{min} — the minimum value of deformation, m

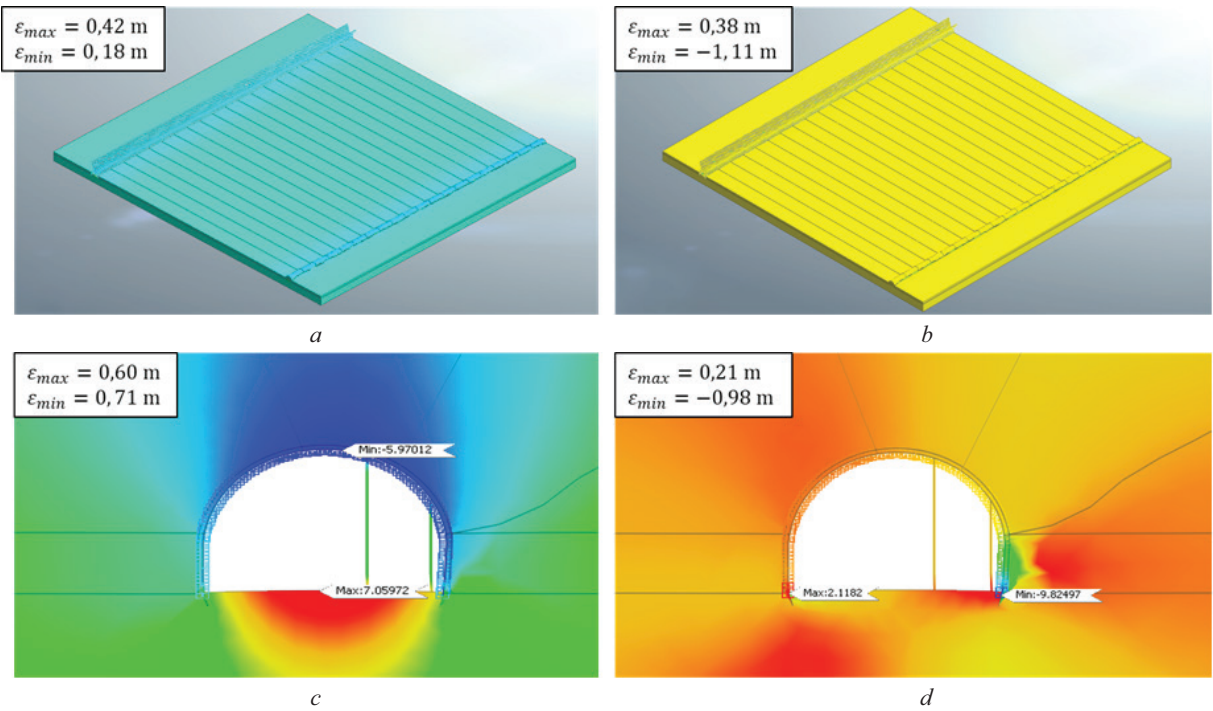


Рис. 5. Распределение деформаций: *a* — вертикальные деформации в пределах очистного забоя; *b* — горизонтальные деформации в пределах очистного забоя; *c* — вертикальные деформации вокруг выработки, закрепленной арочной крепью; *d* — горизонтальные деформации вокруг выработки, закрепленной арочной крепью

Fig. 5. Distribution of deformations: *a* — vertical deformations within the mining face; *b* — horizontal deformations within the mining face; *c* — vertical deformations around the workings with a fixed arch support; *d* — horizontal deformations around the workings with a fixed arch support

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки достоверности результатов моделирования проведено сравнение с инструментальными замерами изменений геометрических параметров сечения, выполненными по длине выработки на $N = 11$ измерительных станциях (пикетах). План рассматриваемого выемочного участка с расположением граничных пикетов в контролируемой выработке представлен на рис. 6.

На рис. 7 представлены значения параметров, характеризующих сечение выработки (H — высота; L — ширина) повторно используемого конвейерного бремсберга на 13.01.2023 и 20.04.2023 соответственно. То есть пикет 1 соответствует началу движения забоя, а пикет 11 завершению отработки выемочного столба. При сравнении результатов замеров с результатами моделирования исключены данные измерений в зонах нарушения горных пород [20].

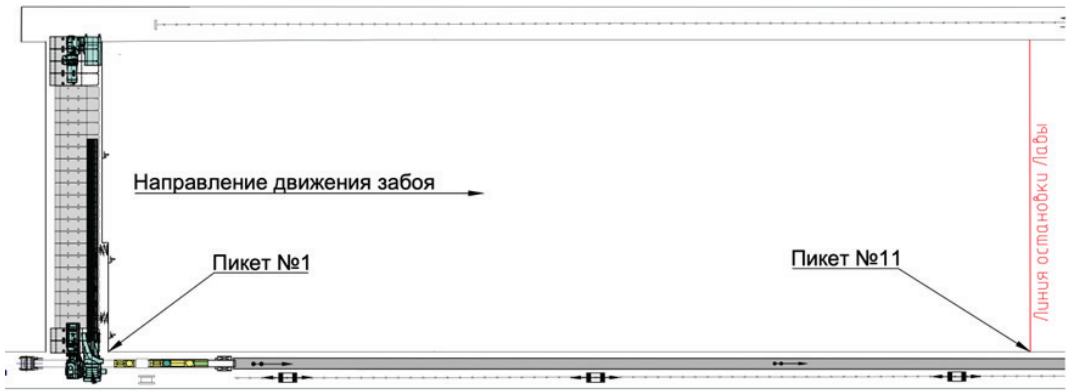


Рис. 6. План выемочного участка с расположением граничных пикетов в контролируемой выработке

Fig. 6. The plan of the excavation site with the location of the boundary pickets in the controlled workings

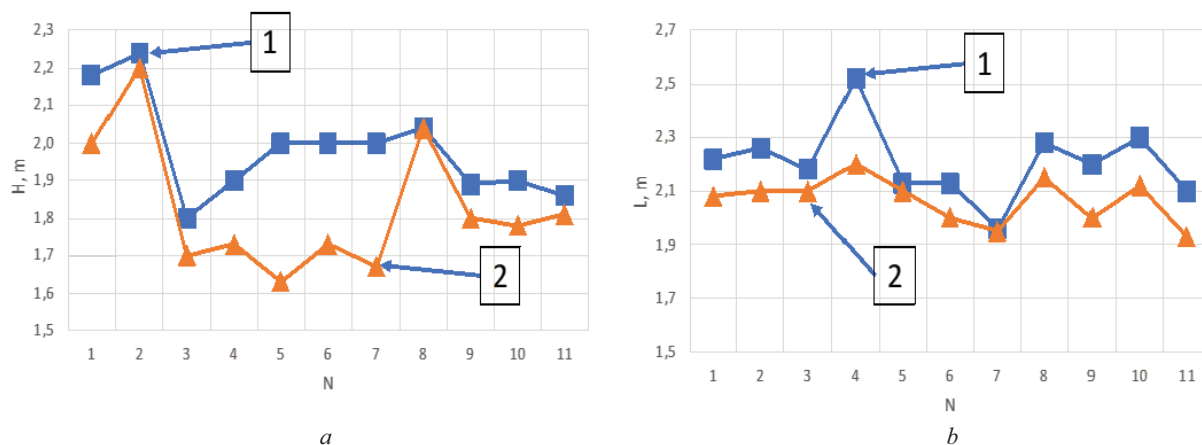


Рис. 7. Результаты инструментальных измерений геометрических параметров горной выработки: *a* — изменение высоты *H* выработки; *b* — изменение ширины *L* выработки; 1 — на 13.01.2023; 2 — 20.04.2023

Fig. 7. Results of instrumental measurements of geometric parameters of the mine: *a* — change in height *H* of the mine; *b* — change in width *L* of the mine; 1 — on 01/13/2023; 2 — 04/20/2023

Табл. 3. Сравнение деформаций

Table 3. Comparison of deformations

Геометрический параметр	Значения деформаций на основе инструментальных измерений, м	Значения деформаций на основе моделирования, м
Ширина <i>L</i>	0,13	0,11
Высота <i>H</i>	0,16	0,14

Сравнение результатов натурных исследований 13.01.2023 и 20.04.2023 и моделирования соответственно показано в табл. 3. Значения деформаций, полученных инструментальным способом, определялись как разница значений геометрического параметра (ширины *L* или высоты *H*) выработки для рассматриваемого временного интервала. В табл. 3 представлены значения деформаций сечения выработки, соответствующие пикету *N* = 11. Для сравнения с данными инструментальных измерений использованы значения деформаций, полученные на финальном этапе моделирования на границе расчетной области, которая соответствует пикету *N* = 11.

Как видно из табл. 3, по вертикали отклонение значений деформации не превышает 13 %, по горизонтали — 15 %. Таким образом, полученные результаты показывают удовлетворительную сходимость результатов моделирования с натурными исследованиями.

В заключение отметим следующее:

1. При отработке пластов, мощность которых не позволяет осуществить формирование подготовительных выработок без присечки боковых пород,

целесообразно применять технологические схемы отработки запасов выемочного участка с повторным использованием горных выработок.

2. Применение моделирования для оценки деформаций повторно используемой выработки дает возможность на стадии проектирования проанализировать изменение геомеханического состояния выработки на всем цикле ее функционирования, что позволяет сократить затраты материальных и трудовых ресурсов.

3. Для оценки достоверности результатов моделирования выполнено сравнение с инструментальными замерами деформаций в повторно используемой выработке, полученные результаты показали удовлетворительную сходимость результатов.

4. Результаты исследования демонстрируют, что предложенная геомеханическая модель массива горных пород в полной мере отражает основные особенности его строения и изменения контура подготовительной горной выработки в процессе ее эксплуатации и может быть применена для оценки эффективности различных способов ее поддержания при повторном использовании.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Казанин О.И. Перспективные направления развития технологий подземной угледобычи в РФ // Горный журнал. 2023. Т. 9. С. 4–11.
2. Каунг П.А., Зотов В.В., Гаджиев М.А., Артемов С.И., Гиреев И.А. Формализация процесса выбора технологий отработки месторождений полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 2. С. 124–138. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_124
3. Бажин Н.П., Мельников О.И., Пиховкин В.С., Райский В.В. Охрана подрабатываемых подготовительных выработок. М. : Недра, 1978.
4. Долгий И.Е., Соломойченко Д.А. Обеспечение устойчивости повторно используемых подготовительных выработок // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2014. № 8. С. 44–47.
5. Луганцев Б.Б., Чавкин А.И., Турук Ю.В. Сохранение горных выработок для повторного использования на больших глубинах // Маркшейдерия и недропользование. 2024. № 3 (131). С. 61–66. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_61_66
6. Баловцев С.В., Скопинцева О.В. Оценка влияния повторно используемых выработок на аэрологические риски на угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 2–1. С. 40–53. DOI: 10.25018/0236-1493-202121-0-40-53
7. Цытович Н.А., Тер-Мартirosян З.Г. Основы прикладной геомеханики в строительстве. М. : Высшая школа, 1981.
8. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Знаменский В.В., Мнушкин М.Г. Конечное-элементное моделирование задач геомеханики и геофизики // Вестник МГСУ. 2012. № 2. С. 52–65.
9. Соломойченко Д.А. Определение величин напряжений и деформаций в окрестностях подготовительных выработок // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2015. № 1. С. 68–71.
10. Захаров В.Н., Шляпин А.В., Трофимов В.А., Филиппов Ю.А. Изменение напряженно-деформированного состояния угленосного массива при отработке угольного пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 9. С. 5–24.
11. Brinkgreve R.B.J., Bakker H.L. Non-linear finite element analysis of safety factors // Proceedings of the 7th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics. 1991. Pp. 1117–1122.
12. Мирный А.Ю., Тер-Мартirosян А.З. Область применения современных механических моделей грунтов // Геотехника. 2017. № 1. С. 20–26.
13. Трофимов В.А., Кубрин С.С., Филиппов Ю.А., Харитонов И.Л. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния вмещающего массива и пологого мощного угольного пласта при завершении отработки выемочного столба // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 8. С. 42–56.
14. Блохин Д.И., Закоршменный И.М., Кубрин С.С., Кобылкин А.С., Поздеев Е.Э., Пушилилин А.Н. Численные исследования влияния изменений напряженно-деформированного состояния угленосного массива на устойчивость дегазационных скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 11. С. 17–32.
15. Zhuo H., Xie D., Sun J., Shi X. Mining hazards to the safety of segment lining for tunnel boring machine inclined tunnels // Frontiers in Earth Science. 2022. Vol. 9. P. 814672.
16. Хамидуллина Н.В., Олейников А.Д., Орел А.Г. Применение программного комплекса MIDAS для моделирования инженерных сооружений // Транспорт: наука, образование, производство : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 217–220. EDN AJPLZE.
17. Филиппов А.Н. Модели грунта, представленные в программном комплексе «Ли́ра-САПР» и «Midas GTS NX» // Научные исследования XXI века. 2021. № 2 (10). С. 153–157. EDN RUFZZW.
18. Жабко А.В. Критерии прочности горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 11–1. С. 27–45.
19. Mesutoğlu M., Özkan İ., Dono A.R. Determination by numerical modelling of stress-strain variations resulting from gallery cross-section changes in a longwall top coal caving panel // Konya Journal of Engineering Sciences. 2024. Vol. 12. Issue 1. Pp. 231–250.
20. Иофис М.А., Одинцев В.Н., Блохин Д.И., Шейнин В.И. Экспериментальное выявление пространственной периодичности наведенных деформаций массива горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2007. № 2. С. 21–27.

Поступила в редакцию 28 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 20 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 25 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Никита Викторович Ягель — аспирант; Инженерно-консультационный центр проблем фундаментостроения (ИКЦ ПФ); 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, стр. 12; Институт

проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН); 111020, г. Москва, Крюковский туп., д. 4; nikita.zagel@gmail.com;

Иосиф Михайлович Зако́ршменный — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник; **Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН);** 111020, г. Москва, Крюковский туп., д. 4; zakorshmennyi_i@ipkonran.ru;

Игорь Леонидович Харитонов — кандидат технических наук, первый заместитель генерального директора — технический директор; **Воркутауголь;** 169908, Республика Коми, г. Воркута, ул. Ленина, д. 62; il.kharitonov@vorkutaugol.ru;

Дмитрий Иванович Блохин — кандидат технических наук, старший научный сотрудник; **Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН);** 111020, г. Москва, Крюковский туп., д. 4; blokhin_d@ipkonran.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kazanin O.I. Promising Directions for the Development of Underground Coal Mining Technologies in the Russian Federation. *Mining Journal*. 2023; 9:4-11. (rus.).
2. Kaung P.A., Zotov V.V., Gadzhiev M.A., Artemov S.I., Gireev I.A. Formalization of the Process of Selecting Technologies for Mineral Deposit Development. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2022; 2:124-138. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_124 (rus.).
3. Bazhin N.P., Melnikov O.I., Pikhovkin V.S., Raisky V.V. *Protection of Undermined Development Workings*. Moscow, Nedra, 1978. (rus.).
4. Dolgiy I.E., Solomoichenko D.A. Ensuring the stability of reused development workings. News of Higher Educational Institutions. *Mining Journal*. 2014; 8:44-47. (rus.).
5. Lugantsev B.B., Chavkin A.I., Turuk Yu.V. Preservation of mine workings for reuse at great depths. *Mine Surveying and Subsoil Use*. 2024; 3(131):61-66. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_61_66 (rus.).
6. Balovtsev S.V., Skopintseva O.V. Assessing the impact of reused workings on aerological risks in coal mines. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2021; 2-1:40-53. DOI: 10.25018/0236-1493-202121-0-40-53 (rus.).
7. Tsytoovich N.A., Ter-Martirosyan Z.G. *Fundamentals of Applied Geomechanics in Construction*. Moscow, Higher School, 1981. (rus.).
8. Vlasov A.N., Volkov-Bogorodskij D.B., Znamenskij V.V., Mnushkin M.G. Finite Element Modeling of Problems of Geomechanics and Geophysics. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 2:52-65. (rus.).
9. Solomoichenko D.A. Determination of stress and strain values in the vicinity of development workings. News of higher educational institutions. *Mining magazine*. 2015; 1:68-71. (rus.).
10. Zakharov V.N., Shlyapin A.V., Trofimov V.A., Filippov Yu.A. Changes in the stress-strain state of the coal-rock massif during coal seam mining. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 9:5-24. (rus.).
11. Brinkgreve R.B.J., Bakker H.L. Non-linear finite element analysis of safety factors. *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*. 1991; 1117-1122.
12. Mirny A.Yu., Ter-Martirosyan A.Z. Application area of modern mechanical soil models. *Geotechnics*. 2017; 1:20-26. (rus.).
13. Trofimov V.A., Kubrin S.S., Filippov Yu.A., Kharitonov I.L. Numerical modelling of the stress-strain state of the host massif and a flat thick coal seam at the end of mining of an extraction column. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2019; 8:42-56. (rus.).
14. Blokhin D.I., Zakorshmenny I.M., Kubrin S.S., Kobylkin A.S., Pozdeev E.E., Pushilin A.N. Numerical studies of the influence of changes in the stress-strain state of the coal-rock massif on the stability of degassing boreholes. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2023; 11:17-32. (rus.).
15. Zhuo H., Xie D., Sun J., Shi X. Mining hazards to the safety of segment lining for tunnel boring machine inclined tunnels. *Frontiers in Earth Science*. 2022; 9:814672.
16. Khamidullina N.V., Oleynikov A.D., Orel A.G. Application of the MIDAS software package for modelling engineering structures. *Transport: science, education, production : collection of scientific papers of the international scientific and practical conference*. 2023; 217-220. EDN AJPLZE. (rus.).
17. Filippov A.N. Soil models presented in the Lira-SAPR and Midas GTS NX software packages. *Scientific research of the XXI century*. 2021; 2(10):153-157. EDN RUFZZW. (rus.).
18. Zhabko A.V. Strength criteria of rocks. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2021; 11-1:27-45. (rus.).
19. Mesutoğlu M., Özkan İ., Dono A.R. Determination by numerical modelling of stress-strain variations resulting from gallery cross-section changes in a longwall top coal caving panel. *Konya Journal of Engineering Sciences*. 2024; 12(1):231-250.

20. Iofis M.A., Odintsev V.N., Blokhin D.I., Sheinin V.I. Experimental detection of spatial periodicity of induced deformations of a rock mass. *Physical and Technical Problems of Mineral Development*. 2007; 2:21-27. (rus.).

Received August 28, 2024.

Adopted in revised form on September 20, 2024.

Approved for publication on September 25, 2024.

B I O N O T E S: **Nikita V. Yagel** — postgraduate student; **Engineering and Consulting Center for Foundation Problems**; build. 12, 6 2-st Institutskaya st., Moscow, 109428, Russian Federation; **Melnikov Institute for Integrated Development of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences**; 4 Kryukovsky tup., Moscow, 111020, Russian Federation; nikita.zagel@gmail.com;

Iosif M. Zakorshmeny — Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher; **Melnikov Institute for Integrated Development of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences**; 4 Kryukovsky tup., Moscow, 111020, Russian Federation; zakorshmenyi_i@ipkonran.ru;

Igor L. Kharitonov — Candidate of Technical Sciences, First Deputy General Director — Technical Director; **Vorkutaugol**; 62 Lenin st., Vorkuta, Komi Republic, 169908, Russian Federation; il.kharitonov@vorkutaugol.ru;

Dmitry I. Blokhin — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher; **Melnikov Institute for Integrated Development of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences**; 4 Kryukovsky tup., Moscow, 111020, Russian Federation; blokhin_d@ipkonran.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.