



ГЕОМЕХАНИКА

УДК 539.3; 622.281.74+51-74

А.Л. ПОЛЯКОВ, канд. техн. наук, доц.
директор¹
E-mail: alphinxx@list.ru

С.Н. ЛОПАТИН, канд. физ.-мат. наук
старший преподаватель кафедры теоретической и прикладной механики²
E-mail: lopatinsn@tut.by

М.С. МОЗГОВЕНКО
научный сотрудник¹
E-mail: MozgovenkoMaksim@yandex.by

М.А. РАЧКОВСКИЙ
стажер младшего научного сотрудника НИЛ прикладной механики²
E-mail: rachkovs.maksim@gmail.com

¹НПУП «Институт горного дела», г. Солигорск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 25.05.2023.

О ВЛИЯНИИ ОЧИСТНЫХ РАБОТ НА ХАРАКТЕР ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДЕМОНТАЖНЫХ ВЫРАБОТОК

В работе приводятся результаты численного моделирования геомеханического поведения системы «лава — демонтажная выработка — вмещающий массив калийных пород» при ведении очистных работ. Численное моделирование включает в себя прогноз механического поведения системы на всех этапах существования системы: от естественного напряженно-деформированного состояния (НДС) нетронутого массива до проходки и закрепления демонтажной выработки, а также поэтапного ведения очистных работ. Результаты численных экспериментов верифицированы с использованием данных натурных исследований конвергенции кровли и почвы демонтажной выработки и боковых стенок данной выработки. В результате выполненных исследований установлено, что очистные работы начинают оказывать значительное влияние на демонтажную выработку при расстоянии порядка 40 м и менее до забоя лавы. Кроме того, в работе описан алгоритм численного моделирования геомеханического поведения рассматриваемой геотехнической системы.

Ключевые слова: демонтажная выработка, очистные работы, конвергенция, метод конечных элементов, компьютерное моделирование, напряженно-деформированное состояние массива с подземным сооружением

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-4-65-97-105>

Введение. Технологические схемы отработки пластов полезного ископаемого длинными очистными забоями на сегодня являются одним из наиболее распространенных способов добычи

полезного ископаемого на Старобинском месторождении калийных солей. Такой способ отработки пластов полезного ископаемого обуславливает определенную специфику в геомеханическом

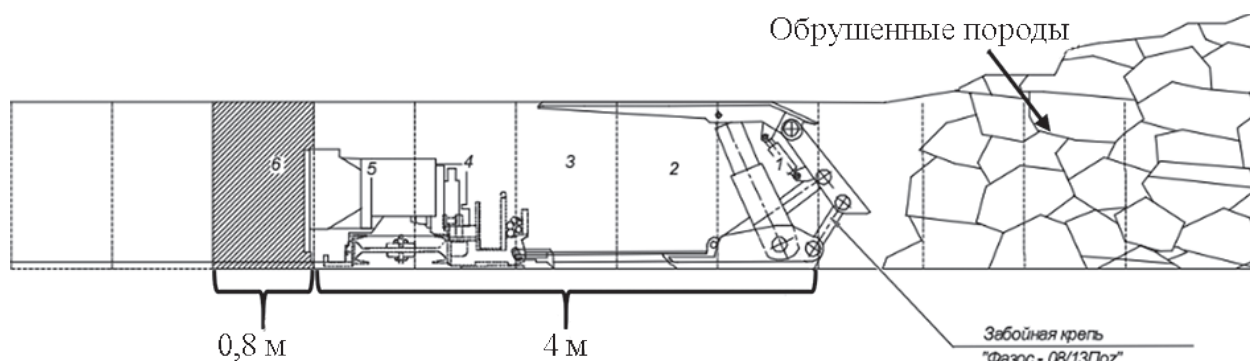


Рисунок 1 — Схема ведения очистных работ
Figure 1 — Scheme of longwall mining

состоянии и поведении обрабатываемой породной толщи, деформировании и устойчивости выработок различного назначения. Для установления оптимальных параметров технологических схем отработки пластов длинными очистными забоями (лавами) требуется выполнение большого комплекса натурных, лабораторных и модельных исследований [1, 2].

Сегодня технологии компьютерного моделирования убедительно подтвердили свою эффективность в качестве одного из базовых инструментов при изучении геомеханических процессов и явлений, в том числе и при рассмотрении процессов, сопровождающих ведение горных работ лавами [3–7]. Следует отметить, что такие технологические схемы отработки калийных пород, как «длинные очистные столбы» требуют построения специальных алгоритмов и расчетных схем, учитывающих специфику геомеханических процессов во вмещающем массиве, обусловленных использованием именно данных схем отработки пластов полезного ископаемого [8–12].

Постановка задачи о влиянии очистных работ на демонтажную выработку. Рассмотрим задачу изучения напряженно-деформированного состояния (НДС) многослойного породного массива в окрестности демонтажной выработки при применении технологической схемы отработки пород длинными очистными забоями, изображенной на рисунке 1.

Численная модель строится для геотехнической системы, включающей обрабатываемую лаву в целом, демонтажную выработку и вмещающий многослойный массив горных пород (рисунок 2). Как показано на рисунке 2, почва лавы и демонтажной выработки находится на глубине 572 м. Отработка лавы осуществляется поэтапно с мощностью стружки 0,8 м. В качестве мер охраны демонтажной выработки используются компенсационные щели [13].

Алгоритм выполнения компьютерного моделирования учитывает процессы обрушения пород в лаве, происходящие под влиянием проходческих работ в среднем каждые 4 м. Для безопасности ведения очистных работ используется забойная крепь «Фазос-08/13Поэ» с поддерживающим дав-

лением 0,8 МПа (см. рисунок 1). Физико-механические свойства пород представлены в таблице.

Алгоритм численного решения задачи. Численная модель сформулированной модельной задачи решается с использованием метода конечных элементов. Алгоритм решения включает в себя следующие этапы [14]:

- решение задачи определения естественного НДС рассматриваемой области породного массива;
- решение задачи определения НДС породного массива при проходке и креплении демонтажной выработки;
- решение серии задач определения НДС рассматриваемой геотехнической системы при поэтапном приближении забоя лавы к контуру демонтажной выработки.

Вид компьютерной модели рассматриваемой геотехнической системы на каждом из этапов схематично представлен на рисунке 3. На каждом из этапов задача решается в упругой постановке с использованием закона Гука для изотропной среды в качестве математической модели, описывающей механическое поведение каждого элемента геотехнической системы [3]. На втором и третьем этапах задача решается в полных напряжениях и дополнительных перемещениях [1]. Кроме того, следует отметить, что в данном случае при решении задачи учитывается изменение физико-механических свойств обрушающихся пород на каждой итерации численного решения.

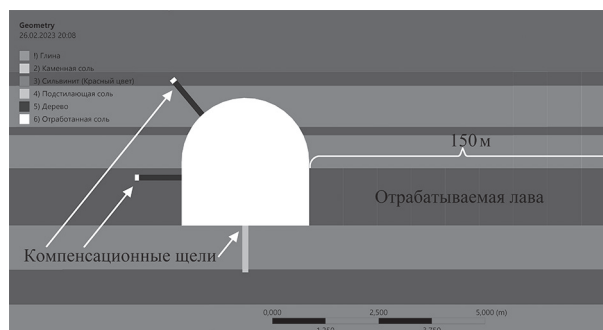


Рисунок 2 — Компьютерная модель геотехнической системы «лава — демонтажная выработка — вмещающий массив калийных пород»
Figure 2 — Computer model of the geotechnical system “lava — operational excavation — enclosing potash rock mass”

Таблица — Физико-механические свойства рассматриваемых пород и материалов
Table — Physical and mechanical properties of the rocks and materials under consideration

Порода (материал)	Плотность, (кг/м ³)	Модуль Юнга, (ГПа)	Коэффициент Пуассона	Предел на сжатие, (МПа)	Предел на растяжение, (МПа)	Угол внутреннего трения, (рад)	Коэффициент сцепления, (МПа)
Глина	2150	0,5616	0,4	6,30	1,0	0,81	1,25
Каменная соль	2300	1,75	0,28	30,0	1,0	1,21	2,74
Сильвинит	2300	1,64	0,29	32,0	1,0	1,22	2,83
Подстилаящая соль	2300	2,00	0,35	35,2	2,0	1,10	4,20
Дерево	540	9	0,085	—	—	—	—
Обрушенная порода	1150	0,075	0,29	—	—	—	—

При решении модельных задач рассматривается участок породного массива 400×180 м. Такой размер участка породного массива выбран исходя из характерных размеров сечений выработок, чтобы исключить влияние граничных условий на расчетную область. Граничные условия на каждом из этапов используются следующие [14]:

- литостатическое давление вышележащих горных пород:

$$P = \rho gh, \quad (1)$$

где ρ — средняя плотность пород; g — ускорение свободного падения; h — глубинная отметка верхней границы рассматриваемого участка породного массива;

- боковое горное давление, вычисляемое по формуле

$$P = \rho gh_i, \quad (2)$$

где h_i — глубинная отметка, значение которой варьируется в пределах рассматриваемого участка породного массива ($h(i) \in [482, 662]$);

- ограничение пространственных перемещений нижней грани выбранного участка породного массива в направлении всех координатных осей:

$$u_x = u_y = u_z = 0. \quad (3)$$

Следует отметить, что на всех этапах задача решается в поле силы тяжести, т. е. влияние собственного веса пород учитывается напрямую.

Результаты численного решения задачи.

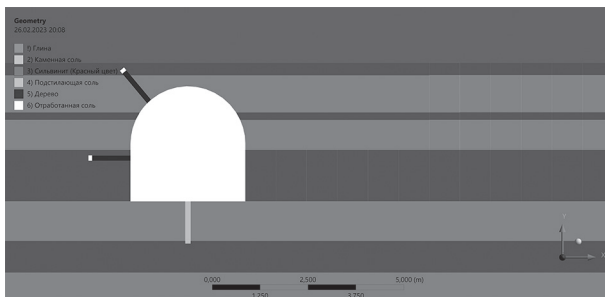
На рисунках 4 и 5 приведены некоторые результаты численного решения задачи. На рисунке 4 в качестве примера показаны картины распределения максимальных растягивающих и максимальных сдвиговых напряжений на различных этапах ведения очистных работ. Зоны предельного состояния



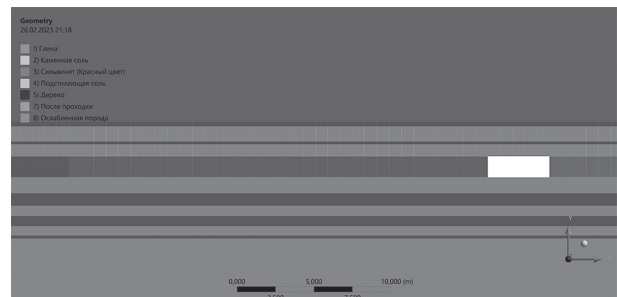
a



b



c



d

Рисунок 3 — Компьютерная модель рассматриваемой геотехнической системы на различных этапах моделирования:

a — этап расчета начального НДС; b — этап проходки демонстрационной выработки; c — после установки мер охраны демонстрационной выработки; d — этап ведения очистных работ

Figure 3 — Computer model of the considered geotechnical system at different modeling stages:

a — stage of initial SSS calculation; b — stage of operational excavation; c — after safety measures installation; d — stage of longwall mining

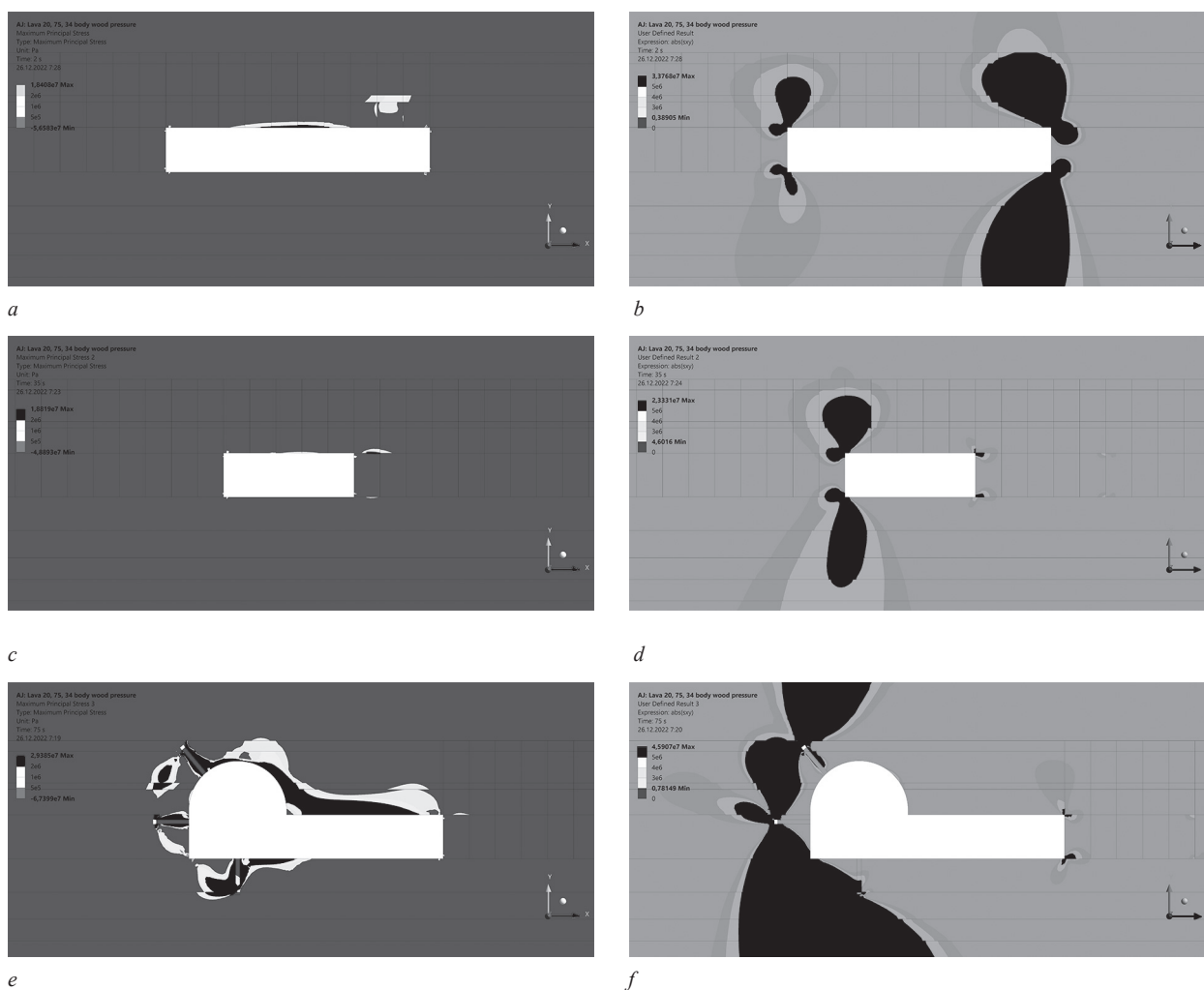


Рисунок 4 — Распределение некоторых компонент НДС в рассматриваемой геотехнической системе:

a — распределение максимальных растягивающих напряжений на расстоянии 143,8 м до демонтажной выработки; *b* — распределение максимальных сдвиговых напряжений на расстоянии 143,8 м до демонтажной выработки; *c* — распределение максимальных растягивающих напряжений на расстоянии 73,8 м до демонтажной выработки; *d* — распределение максимальных сдвиговых напряжений на расстоянии 73,8 м до демонтажной выработки; *e* — распределение максимальных растягивающих напряжений при вхождении лавы в демонтажную выработку; *f* — распределение максимальных сдвиговых напряжений при вхождении лавы в демонтажную выработку

Figure 4 — Distribution of some SSS components in the considered geotechnical system:

a — distribution of maximum tensile stresses at a distance of 143.8 m to the operational excavation; *b* — distribution of maximum shear stresses at a distance of 143.8 m to the operational excavation; *c* — distribution of maximum tensile stresses at a distance of 73.8 m to the operational excavation; *d* — distribution of maximum shear stresses at a distance of 73.8 m to the operational excavation; *e* — distribution of maximum tensile stresses at the lava intrusion into the operational excavation; *f* — distribution of maximum shear stresses at the lava intrusion into the operational excavation

выделены на рисунке 4 черным цветом. Средний размер зон предельного состояния, определенных по критерию максимальных главных напряжений [14, 15], составляет 7,5 см в кровле выработки при проходке и до 50 см при вхождении лавы в демонтажную выработку, в то время как средний размер зон предельного состояния, определенных по критерию максимальных касательных напряжений [14, 15], составляет 1,75–2,75 м при проходке выработки и до 8–10 м при входе лавы в демонтажную выработку. Формирование зон предельного состояния в процессе ведения горных работ является причиной обрушения породного массива при перемещении забойной крепи. Следует отметить, что предельное состояние, обусловленное сжимающими напряжениями, в рассматриваемой области породного массива не формируется. Для более полной оценки зон предельного состояния,

формирующихся в массиве под влиянием горных работ, можно использовать комплексный критерий предельного состояния, предложенный и обоснованный в работах [14, 15], который позволяет прогнозировать наступление предельных состояний в горных массивах с учетом типа обобщенного НДС в каждой точке рассматриваемого участка массива горных пород с использованием большинства общепринятых в геомеханике критериев предельного состояния. Однако в рассматриваемом случае предельное состояние наступает в результате сдвига и растяжения, поэтому для оценки зон предельного состояния в первом приближении достаточно использовать два вышеупомянутых критерия. Кроме того, следует отметить, что *основной целью настоящей работы* является определение характера деформирования демонтажной выработки под влиянием горных работ, а не оценка

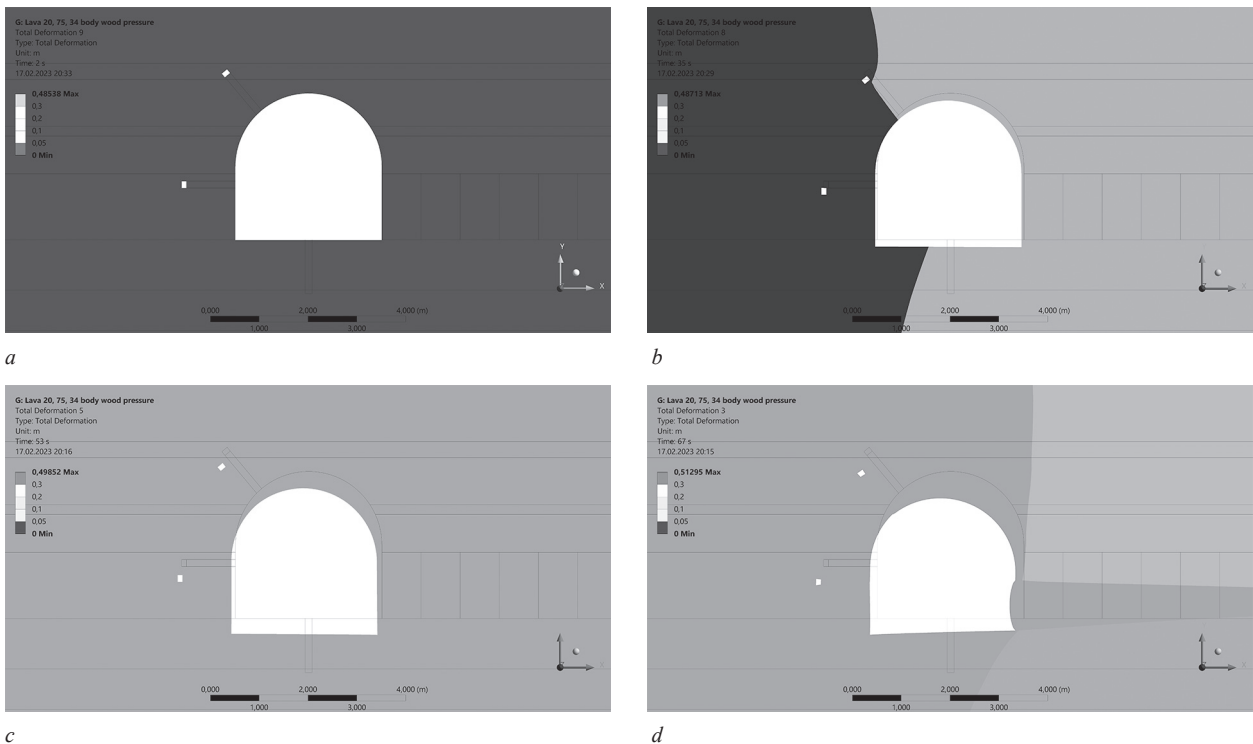


Рисунок 5 — Полные перемещения демонтажной выработки под воздействием очистных работ:

a — распределение полных перемещений на расстоянии 143,8 м до демонтажной выработки; *b* — распределение полных перемещений на расстоянии 73,8 м до демонтажной выработки; *c* — распределение полных перемещений напряжений на расстоянии 40,8 м до демонтажной выработки; *d* — распределение полных перемещений на расстоянии 13 м до демонтажной выработки

Figure 5 — Total displacements of the operational excavation under the influence of longwall mining:

a — distribution of total displacements at a distance of 143.8 m to the operational excavation; *b* — distribution of total displacements at a distance of 73.8 m to the operational excavation; *c* — distribution of total stress displacements at a distance of 40.8 m to the operational excavation; *d* — distribution of total displacements at a distance of 13 m to the operational excavation

предельного состояния самой выработки. Оценка предельного состояния приводится с целью демонстрации возможной схемы обрушения горных пород при проведении очистных работ.

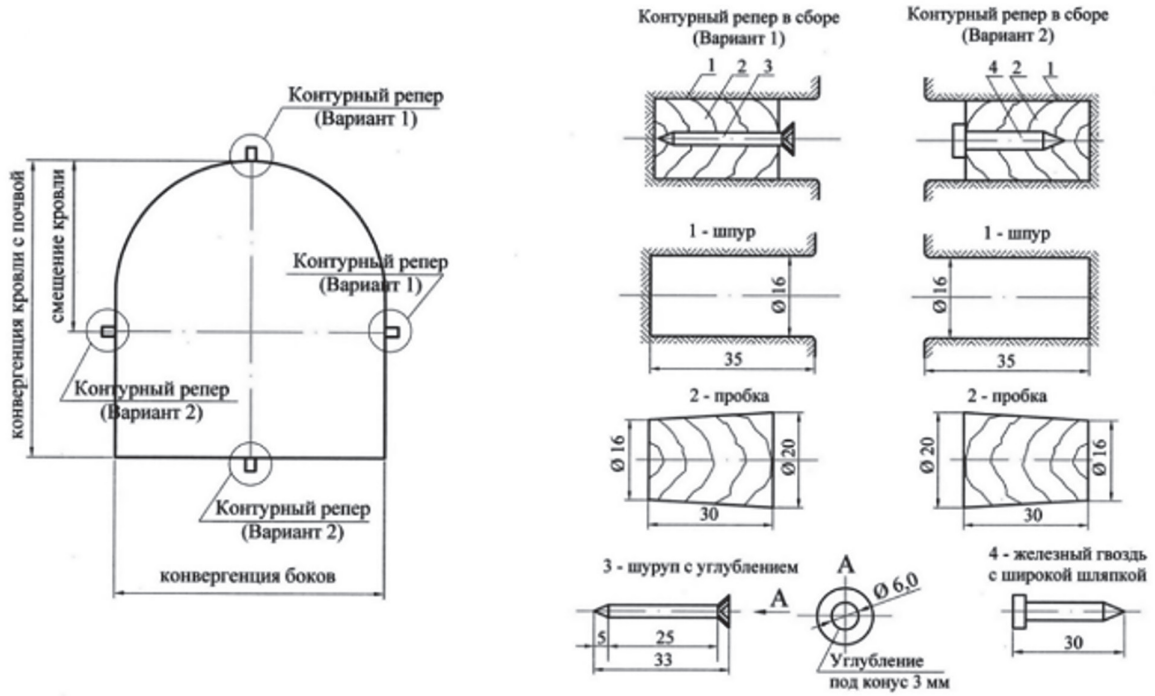
На рисунке 5 представлен характер деформирования демонтажной выработки на различных этапах ведения горных работ. Анализ картин деформирования по контуру выработки показывает, что при ведении очистных работ наблюдаются процессы накопления смещений кровли демонтажной выработки и пучение почвы. При этом величины смещения кровли вносят большой вклад в общую конвергенцию «кровля — почва», чем пучение пород в почве. Наибольшее по величине схождение стенок имеет место на уровне ведения горных работ в зоне установки замерных реперов (см. следующий раздел).

О данных натурных наблюдений. Для изучения проявлений горного давления в натуральных условиях в демонтажных выработках были установлены наблюдательные станции контурных реперов в кровле, боках и почве выработки. Наличие и количество реперов определялось пролетом и конфигурацией выработки в плане, применяемыми мерами охраны и крепления. Универсальная конструкция реперов показана на рисунке 6 *a*. Как видно из рисунка, контурные реперы, устанавливаемые в боках и почве выработки, представляют

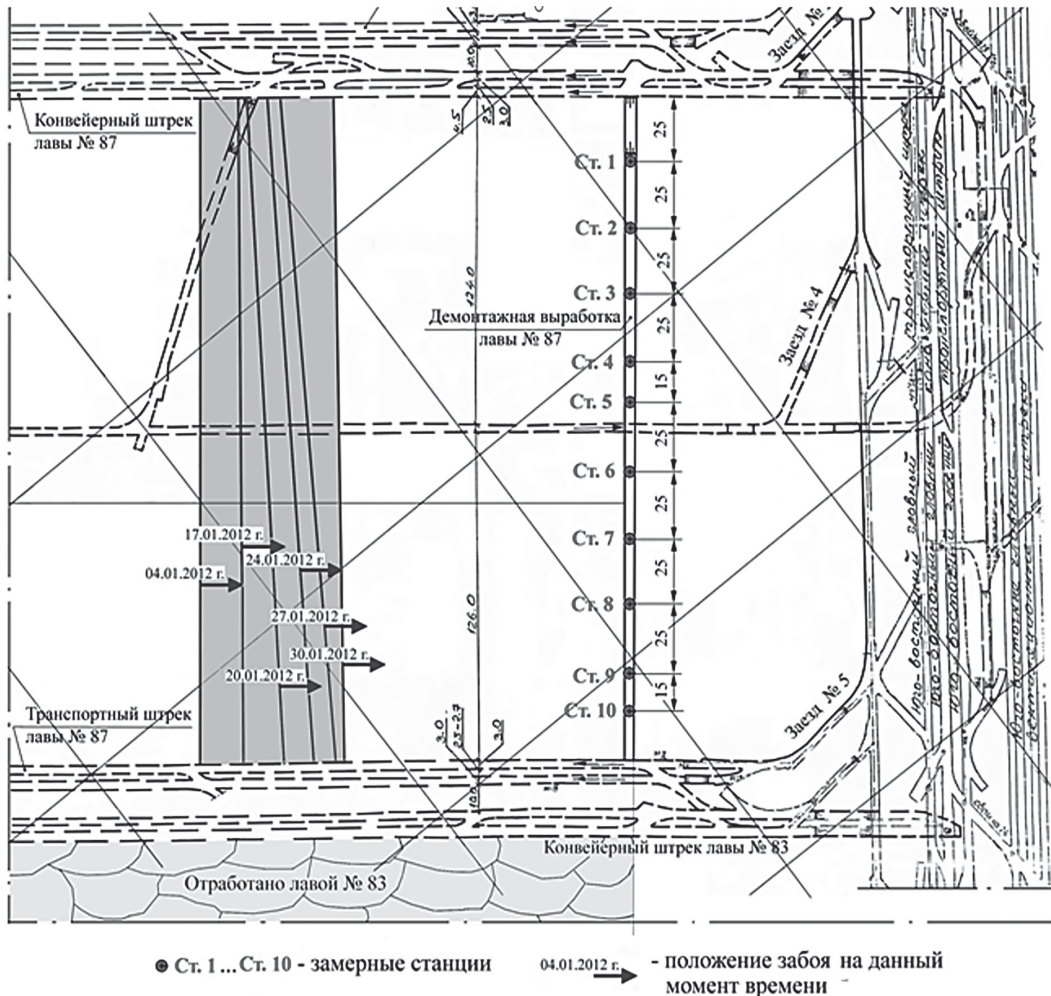
собой шурупы глубиной 35 мм и диаметром 16 мм, в которые забиваются деревянные пробки длиной 30 мм. В один из боковых реперов и в репер в почве забивается шуруп, в головке которого высверлено углубление под штангу дальномера. В пробки бокового репера и репера в кровле забивается гвоздь, имеющий плоскую шляпку для точного прицеливания с помощью луча дальномера.

Инструментальные наблюдения за характером деформирования демонтажной выработки были начаты от момента проведения выработки, когда забой лавы находился на расстоянии 130 м, т. е. за зоной влияния временного опорного давления (см. рисунок 6 *b*). Измерения по каждой станции выполнялись с момента ее установки вплоть до выполнения демонтажных работ, т. е. за весь срок службы демонтажной выработки.

Верификация численных результатов с использованием данных натурных наблюдений. Верификация построенной численной модели и алгоритмов компьютерного моделирования выполнялась с использованием данных натурных замеров конвергенции кровля–почва (рисунок 7 *a*) и стенок выработки (см. рисунок 7 *b*). Как видно из данных рисунков, имеет место хорошая качественная корреляция результатов численного моделирования с данными натурных наблюдений.



a

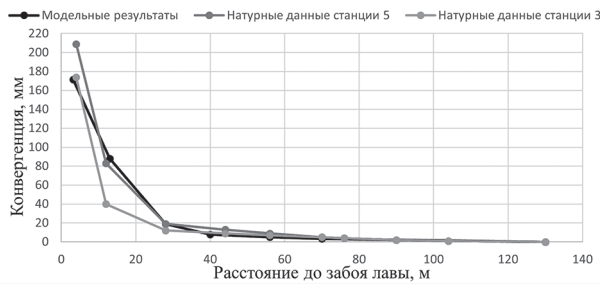


b

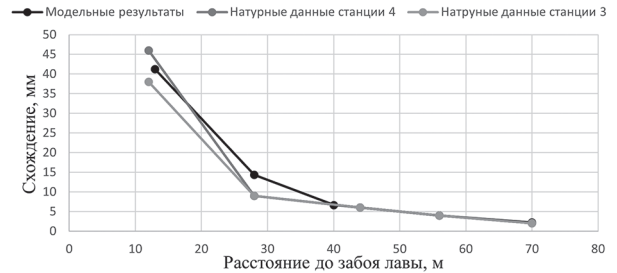
Рисунок 6 — Схема проведения натуральных замеров:

a — схема установки реперов в демонтажной выработке; b — схема размещения замерных станций в демонтажной выработке

Figure 6 — Scheme of full-scale measurements: a — scheme of installation of reference pegs in the operational excavation; b — scheme of placement of measuring stations in the operational excavation



а



б

Рисунок 7 — Сравнение результатов численного моделирования с данными натурных наблюдений: *а* — графики конвергенции кровли и подошвы демонтажной выработки; *б* — графики конвергенции (сближения) стенок демонтажной выработки
Figure 7 — Comparison of numerical modeling results with full-scale observation data: *а* — convergence graphs of the roof and floor of the operational excavation; *б* — convergence graphs of the side walls of the operational excavation

Относительная погрешность результатов численного моделирования при сравнении с данными замерной станции 5 составляет 23,6 % по конвергенции кровля–почва, 17,9 % по сближению стенок выработки. Замерная станция 5 выбрана для расчета погрешности в связи с тем, что она находится в середине демонтажной выработки, поэтому наиболее корректно сравнивать результаты решения модельной задачи в двухмерной постановке именно с данными этой станции. Натурные данные для замерной станции 3 приведены с целью демонстрации отличия результатов. При этом относительная погрешность на удалении забоя от демонтажной выработки на расстояние 70 м и больше является минимальной и не превышает 0,4 % по всем станциям. Следует отметить, что наибольшая погрешность результатов моделирования наблюдается при максимальном приближении забоя лавы к демонтажной выработке вследствие неравномерной интенсивности горных работ, а также анизотропии массива горных пород, которая учитывается при численном моделировании лишь косвенно путем явного задания слоистости.

Исходя из данных рисунков можно сделать вывод о том, что очистные работы начинают оказывать заметное влияние на характер деформирования демонтажной выработки при расстоянии от забоя лавы до данной выработки порядка 40 м и менее.

Выводы. Построена численная модель и разработан алгоритм компьютерного моделирования для решения модельной задачи определения НДС породного массива в окрестности демонтажной выработки и изучения характера деформирования контура демонтажной выработки при приближении фронта очистных работ. В результате выполненного комплекса модельных исследований установлено, что при проходе лавы во вмещающем массиве формируются зоны предельного состояния, главным образом, благодаря растягивающим и сдвиговым напряжениям, что и вызывает обрушение пород. Очистные работы влияют на геомеханическое состояние демонтажной выработки, создавая зоны предельного состояния в окрестности ее контура,

обусловленные сдвиговыми и растягивающими напряжениями.

Верификация проведенных модельных исследований с использованием данных натурных наблюдений по установленным замерным станциям показывает, что модельные результаты качественно повторяют геомеханическое поведение породного массива в окрестности контура демонтажной выработки. Таким образом, предлагаемая методика численного моделирования может использоваться для прогнозирования геомеханического состояния выработок вблизи очистных работ.

Список литературы

- Interactions of overburden failure zones due to multiple-seam mining using longwall caving / W. Sui [et al.] // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. — 2015. — Vol. 74, iss. 3. — Pp. 1019–1035. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0674-9>.
- Красько, Н.И. Моделирование динамики перераспределения горного давления, сопровождающей обрушение породных слоев кровли в очистном забое / Н.И. Красько, В.В. Назимко // Физика и техника высоких давлений. — 2003. — Т. 13, № 2. — С. 91–100.
- Журавков, М.А. Математическое моделирование деформационных процессов в твердых деформируемых средах (на примере задач механики горных пород и массивов) / М.А. Журавков. — Минск: БГУ, 2002. — 456 с.
- Компьютерное моделирование в геомеханике / М.А. Журавков [и др.]; под общ. ред. М.А. Журавкова. — Минск: БГУ, 2008. — 443 с.
- Моделирование обрушения кровли над выработанным пространством / П.В. Макаров [и др.] // Физическая мезомеханика. — 2008. — Т. 11, № 1. — С. 44–50.
- Abutment pressure distribution for longwall face mining through abandoned roadways / Y. Li [et al.] // International Journal of Mining Science and Technology. — 2019. — Vol. 29, iss. 1. — Pp. 59–65. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.11.018>.
- Сдвижкова, Е.А. Исследования геомеханических процессов на сопряжении подготовительной выработки с лавой в условиях шахты Комсомольская ГП Антрацит / Е.А. Сдвижкова, И.Н. Попович, И.В. Дудка // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. — 2014. — № 2. — Pp. 72–79.
- Peng, S.S. Longwall mining / S.S. Peng. — 3rd ed. — London: CRC Press, 2019. — 562 p.
- Palchik, V. Formation of fractured zones in overburden due to longwall mining / V. Palchik // Environmental geology. — 2003. — Vol. 44, iss. 1. — Pp. 28–38. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0732-7>.
- Bai, Q. A general review on longwall mining-induced fractures in near-face regions / Q. Bai, S. Tu // Geofluids. — 2019. — DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/3089292>.

11. Geo Mechanical Estimation of Danger of Gas-Dynamic Failure During Potash Deposits Mining / S. Andreiko [et al.] // *Procedia Engineering*. — 2017. — Vol. 191. — Pp. 954–961. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.266>.
12. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies* / ed. by W.A. Hustrulid, R.L. Bullock. — Littleton: SME, 2001. — 718 p.
13. Инструкция по охране и креплению горных выработок на Старобинском месторождении // ОАО «Беларуськалий». — Солигорск: СИПР, 2018. — 206 с.
14. Лопатин, С.Н. Предельное состояние массивов горных пород с подземными сооружениями: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.04 / С.Н. Лопатин. — Минск, 2023. — 181 с.
15. Zhuravkov, M.A. Complex limit state criterion for rock masses / M.A. Zhuravkov, S.N. Lapatsin, S. Ji // *Acta Mechanica Sinica*. — 2023. — Vol. 39, iss. 1. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s10409-022-22194-x>.

POLYAKOV Andrey L., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.
Director¹
E-mail: alpinxx@list.ru

LAPATSIN Siarhei N., Ph. D. in Phys. and Math.
Senior Lecturer of Theoretical and Applied Mechanics Department²
E-mail: lopatinsn@tut.by

MOZGOVENKO Maksim S.
Research Fellow¹
E-mail: MozgovenkoMaksim@yandex.by

RACHKOVSKIY Maksim A.
Junior Researcher Trainee of Applied Mechanics Laboratory²
E-mail: rachkovs.maksim@gmail.com

¹Unitary Enterprise “Institute of Mining”, Soligorsk, Republic of Belarus

²Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

Received 25 May 2023.

ON THE INFLUENCE OF LONGWALL MINING ON THE DEFORMATION OF THE OPERATIONAL EXCAVATIONS

The paper presents the results of numerical modeling of the geomechanical behavior of the system “lava — operational excavation — enclosing potash rock mass” during mining operations. Numerical modeling includes a forecast of the mechanical behavior of the system at all stages of the system existence: from the natural stress-strain state (SSS) of the rock mass to excavation and safety measures installation, as well as the longwall mining operations. The results of numerical experiments are verified using the data from field studies of convergence of the roof and floor of the operational excavation and the side walls of this excavation. As a result of the studies, it is established that longwall mining has a significant impact on the operational excavation at a distance of about 40 m or less. In addition, the paper describes an algorithm for numerical simulation of the geomechanical behavior of the considered geotechnical system.

Keywords: *operational excavation, longwall mining, convergence, finite element method, computer-aided modeling, stress-strain state of rock mass with an underground structure*

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2023-4-65-97-105>

References

1. Sui W., Hang Y., Ma L., Wu Z., Zhou Y., Long G., Wei L. Interactions of overburden failure zones due to multiple-seam mining using longwall caving. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 2015, vol. 74, iss. 3, pp. 1019–1035. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0674-9>.
2. Kras'ko N. I., Nazimko V.V. Modelirovanie dinamiki pereraspredeleniya gornogo davleniya, soprovozhdayushchey obrusheniye porodnykh sloev krovli v ochistnom zaboe [Modeling of rock pressure redistribution due to roof caving in vicinity of advancing longwall face]. *Physics and*

- high pressure technology*, 2003, vol. 13, no. 2, pp. 91–100 (in Russ.).
3. Zhuravkov M.A. *Matematicheskoe modelirovanie deformatsionnykh protsessov v tverdykh deformiruemyykh sredakh (na primere zadach mekhaniki gornyykh porod i massivov)* [Mathematical modeling of deformation processes in solid deformable media (on the example of problems of mechanics of rocks and mass)]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2002. 456 p. (in Russ.).
 4. Zhuravkov M.A., Kononov O.L., Bogdan S.I., Prokhorov P.A., Krupoderov A.V. *Kompyuternoe modelirovanie v geomekhanike* [Computer modeling in geomechanics]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2008. 443 p. (in Russ.).
 5. Makarov P.V., Smolin I.Yu., Evtushenko E.P., Trubitsyn A.A., Trubitsyna N.V., Voroshilov S.P. Modelirovanie obrusheniya krovli nad vyrabotannym prostranstvom [Simulation of roof collapse of the worked-out area]. *Physical mesomechanics*, 2008, vol. 11, no. 1, pp. 44–50 (in Russ.).
 6. Li Y., Lei M., Wang H., Li C., Li W., Tao Y., Wang J. Abutment pressure distribution for longwall face mining through abandoned roadways. *International journal of mining science and technology*, 2019, vol. 29, iss. 1, pp. 59–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.11.018>.
 7. Sdvizhova E.A., Popovich I.N., Dudka I.V. Issledovaniya geomekhanicheskikh protsessov na sopryazhenii podgotovitelnoy vyrabotki s lavoy v usloviyakh shakhty Komsomolskaya GP Antratsit [Studies of geomechanical processes at the interface of preparatory workings with lava in the conditions of the Komsomolskaya mine of GP Antratsit]. *Sovremennye resursoenergoberegayushchie tekhnologii gornogo proizvodstva*, 2014, no. 2, pp. 72–79 (in Russ.).
 8. Peng S.S. *Longwall mining*. London, CRC Press, 2019. 562 p.
 9. Palchik V. Formation of fractured zones in overburden due to longwall mining. *Environmental geology*, 2003, vol. 44, iss. 1, pp. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0732-7>.
 10. Bai Q., Tu S. A general review on longwall mining-induced fractures in near-face regions. *Geofluids*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/3089292>.
 11. Andreiko S., Baryakh A., Lobanov S., Fedoseev A. Geo mechanical estimation of danger of gas-dynamic failure during potash deposits mining. *Procedia engineering*, 2017, vol. 191, pp. 954–961. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.266>.
 12. *Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies*. Littleton, SME, 2001. 718 p.
 13. *Instruktsiya po okhrane i krepleniyu gornyykh vyrabotok na Starobinskom mestorozhdenii* [Instructions for the protection and fastening of mine workings at the Starobin deposit]. Soligorsk, SIPR Publ., 2018. 206 p. (in Russ.).
 14. Lapatsin S.N. *Predelnoe sostoyanie massivov gornyykh porod s podzemnymi sooruzheniyami*. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Limit state of rock masses with underground structures. Ph. D. Thesis]. Minsk, 2023. 181 p. (in Russ.).
 15. Zhuravkov M.A., Lapatsin S.N., Ji S. Complex limit state criterion for rock masses. *Acta mechanica sinica*, 2023, vol. 39, iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10409-022-22194-x>.