

УДК 622.84:622.83:622.363.2

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КАЛИЙНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Б. Ю. ЗУЕВ,**

зав. лабораторией, канд. техн. наук,
b.zuev2010@yandex.ru

**Р. С. ИСТОМИН,**

старший научный сотрудник,
канд. техн. наук

**Е. П. ОБОЖИНА,**

научный сотрудник,
канд. техн. наук

Научный центр геомеханики и проблем горного производства,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Введение

Мировой опыт отработки месторождений калийных и калийно-магниевых солей даже при применении самых современных технологий свидетельствует о крайне высоком числе катастрофических событий, приводящих к потерям рудников [1–4]. К таким событиям чаще всего относятся прорывы подземных вод (соляных рассолов) в выработки рудников. В большинстве случаев основной причиной затопления рудников считают неполную или недостоверную геологическую информацию об условиях отработки продуктивных пластов [1, 4–6] и, как следствие, несоответствие принятых систем разработки. Однако даже наличие достаточно полной исходной информации не гарантирует безаварийного и длительного функционирования горнотехнических систем на стадиях отработки соляных месторождений из-за крайне сложных и не изученных в полной мере нелинейных процессов сдвижений, связанных с изменениями во времени состояния водозащитной толщи (ВЗТ) горных пород между горными выработками

Предложен метод усовершенствования моделирования на эквивалентных материалах на основе обеспечения большего подобия всех основных прочностных параметров горных пород и способа дискретного изменения мульды сдвижений на горизонте продуктивных пластов, обеспечивающий воспроизведение мульды сдвижений земной поверхности с учетом линейного масштаба моделирования. Основным результатом исследований является возможность прогноза развития нелинейных процессов сдвижения горных пород и установление детальных параметров сети трещин и отслоений, которые при определенных обстоятельствах могут образовывать сквозные водопроводящие каналы.

Ключевые слова: калийные месторождения, физическое моделирование, эквивалентные материалы, водозащитная толща, нелинейные геомеханические процессы, мульды сдвижений

DOI: 10.17580/gzh.2023.05.11

и водоносным горизонтом, при которых в ВЗТ могут образоваться сквозные водопроводящие каналы [7–10]. В общем виде зона водопроводящих трещин (ЗВТ) состоит из двух гидравлически связанных между собой систем техногенных трещин: трещин расслоения и сквозных нормальносекущих трещин [10–13]. Если верхняя граница ЗВТ достигнет нижней границы водного объекта, то по этим каналам вода начнет поступать в выработанное пространство [12].

Математические методы оценки процессов сдвижений обычно основываются на численном или аналитическом решении задачи в рамках механики сплошных сред. При этом оценивают развитие процесса сдвижения горного массива от горизонтов разработки продуктивных пластов до земной поверхности. В качестве модели массива применяют чаще всего упругие, пластические, вязкоупругие или вязкопластические модели [14–16]. Однако для более надежной оценки вероятности образования сквозных водопроводящих каналов в ВЗТ как системы секущих трещин и отслоений необходимы методы, позволяющие определять конкретные параметры всей системы нарушения сплошности ВЗТ и ее эволюцию в процессе разработки рудника и его длительной эксплуатации.

Одним из наиболее эффективных методов исследования подобных нелинейных процессов является моделирование на эквивалентных материалах (ЭМ). Однако традиционный метод моделирования на ЭМ основан на применении материалов, не обеспечивающих надежного моделирования процессов сдвижений вследствие ограниченных возможностей при

необходимости достижения совокупного подобия прочностных параметров на сжатие, растяжение и изгиб, играющих важную роль при исследовании процессов сдвижений [16–23].

Методика и результаты исследований

Авторами на примере исследования процессов сдвижений во всей толще массива на различных горизонтах (от 0 до 350 м) при разработке и эксплуатации месторождения предлагается использовать усовершенствованную методику моделирования на ЭМ, позволяющую обеспечить более полное прочностное подобие всех моделируемых горных пород и воспроизведение эволюции параметров мульды сдвижений земной поверхности, полученных по данным многолетних натуральных наблюдений.

Методика основана на новых подходах к подбору ЭМ, играющих ключевую роль при оценке всех моделируемых геомеханических процессов с учетом их специфики. Разработку рецептуры изготовления ЭМ вели с учетом основных факторов, определяющих физическую суть процессов сдвижений, в ходе которых могут возникать и развиваться системы трещин, происходить расслоение и отслоение пластов пород, т. е. процессов разрушений с воспроизведением прочностного подобия на сжатие, изгиб пластов горных пород, подобия зон их контакта, а также деформационного подобия. Эти подходы базируются на новой методологии моделирования самого широкого круга геомеханических процессов – от реологических до динамических [24–26], в основе которой лежит необходимость выполнения комплексного критерия подобия, схематично представленного на **рис. 1** [27].

При воспроизведении геомеханических процессов в горных породах при отработке шахтных полей для оценки процессов деформирования пластов горных пород, формирующих мульду сдвижений, определяющими критериями являются прочность на растяжение и изгиб и модули деформации:

$$\begin{aligned} (R_{p,m}) &= (R_{p,n})\alpha_v^{-1}\alpha_1^{-1}; \\ (R_{и,m}) &= (R_{и,n})\alpha_v^{-1}\alpha_1^{-1}; \\ E_m &= E_n\alpha_v^{-1}\alpha_1^{-1}, \end{aligned}$$

где $(R_{p,m})$, $(R_{и,n})$ – прочность на растяжение и изгиб в модели и натуре соответственно; E_m , E_n – модули деформации материалов в модели и натуре соответственно; α_v – соотношение удельных весов (или плотностей) материалов модели и натуре; α_1 – линейный масштаб моделирования.

Для учета контактных условий между пластинами горных пород определяющими критериями являются сцепления и углы внутреннего трения в зоне контактов пластов:

$$\begin{aligned} C_m &= C_n\alpha_v^{-1}\alpha_1^{-1}; \\ \text{tg}\varphi_m &= \text{tg}\varphi_n, \end{aligned}$$

где C_m – сцепление в материале модели; C_n – сцепление в горной породе в натуре;

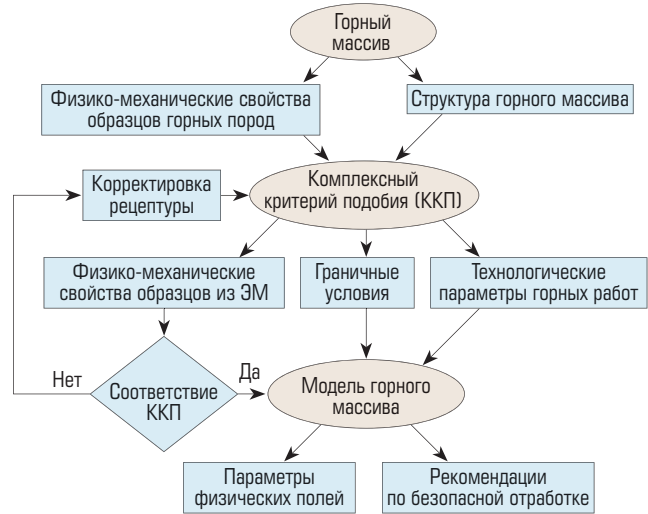


Рис. 1. Принципиальная схема моделирования геомеханических процессов на эквивалентных материалах

φ_m , φ_n – угол внутреннего трения в материале модели и горной породе в натуре соответственно.

Выбор масштаба моделирования зависит от соотношения моделируемой глубины горного массива и максимального вертикального размера модели. При воспроизведении всей толщи массива суммарной мощностью 350 м и максимальных размеров модели 1,6 м линейный масштаб моделирования составит 1:220.

Методика воспроизведения всей толщи массива и ВЗТ базируется на исходных натуральных данных о типовых физико-механических параметрах горных пород, критериях подобия и основана на методах послойного изготовления моделей на специальных стендах [4, 17, 22].

В качестве базовых типов ЭМ, удовлетворяющих критериям подобия, приняты материалы из мелкодисперсного кварцевого песка и двух типов связующих смол ДЭГ-1 и ЭД-20, составляющих 0,5–1,2 % от суммарной массы ЭМ. Параметры ЭМ приведены в **табл. 1**.

Таблица 1. Параметры ЭМ

Горная порода	$R_{сж.н}$, МПа	$R_{сж.м}$, МПа	$R_{раст.н}$, МПа	$R_{раст.м}$, МПа	E_n , ГПа	E_m , ГПа
Карналлит	20–21,5	0,12–0,22	1,4–1,8	0,01–0,02	14–19	1,5–3
Каменная соль	11,5–21	0,12–0,22	1,4–1,8	0,01–0,02	12–22	1,5–3
Сильвинит	15–21,5	0,15–0,22	1,4–1,8	0,01–0,02	14–22	1,5–3
Мергель	11,5–21,5	0,12–0,22	1,4–1,8	0,01–0,02	12–22	1,5–3
Осадочные породы	12–17	0,12–0,17	1,0–1,8	0,007–0,02	12–19	1,5–3

Примечание. $R_{сж.н}$, $R_{сж.м}$ – прочность на одноосное сжатие пород в натуре и материала в модели соответственно, $R_{раст.н}$, $R_{раст.м}$ – прочность на растяжение пород в натуре и материала в модели соответственно, E_n , E_m – модуль упругости пород в натуре и материала в модели соответственно.



Рис. 2. Виды оснасток:

a – технологическая оснастка для насечки слоев ЭМ в модели;
б – специальная оснастка для моделирования процессов деформирования всей толщи массива

Для воспроизведения заданных соотношений прочностей различных горных пород на сжатие и изгиб был разработан специальный способ «ослабления» прочности на изгиб различных пластов ЭМ путем нанесения специальных насечек различной длины при изготовлении модели непосредственно на испытательном стенде. В основе этого способа – применение специально разработанной конструкции с разрезными пластинами (рис. 2), обеспечивающими нанесение насечек различной частоты с необходимыми шириной и глубиной. С помощью данного способа была послойно изготовлена вся толщина моделируемого массива.

Данный способ позволяет увеличить соотношение $R_{сж}/R_{изг}$ ($R_{сж}$, $R_{изг}$ – прочности материалов на одноосное сжатие и изгиб) для отдельных слоев массива с 5 до 100, что с запасом перекрывает все необходимые соотношения основных типов солей и вмещающих их горных пород.

Авторами предлагается новая методика исследования процессов деформирования на физической модели, основанная на решении «обратной» задачи воспроизведения заданной эволюции процессов сдвига земной поверхности по данным натурных реперов и экстраполяции этих процессов при сохранении темпов прироста вертикальных оседаний земной поверхности, обусловленных процессами деформирования и разрушения целиков [28–30].

Основная идея новой методики моделирования процессов эволюции деформационных процессов во всей толще массива – от земной поверхности до горизонтов разработки продуктивных пластов – состоит в мелкодискретном моделировании формирования мульды сдвижений и ее корректировке в режиме реального времени на горизонте разработки продуктивных пластов с целью обеспечения соответствия известным натурным данным об эволюции параметров дневной мульды сдвижений с учетом линейного масштаба моделирования.

Для обеспечения дискретного смещения пород на уровне продуктивных пластов была изготовлена специальная оснастка: ряд тонких металлических пластин, металлические шпильки с регулировочными гайками, специальные швеллеры с креплением на основных рамах стенда (см. рис. 2, б). Параметры вспомогательной оснастки приведены в табл. 2.

При корректном воспроизведении физико-механических параметров всей толщи горных пород и закономерностей формирования исходной дневной мульды сдвижений с учетом

Таблица 2. Параметры технологической оснастки

Размер пластин, см	Длина шпильки, см	Диапазон регулирования, м	Шаг регулирования, мм	Суммарная несущая способность, кг
23×24×0,5	35	–10+200	0,1	2000

ее изменения во времени, даже при отсутствии надежных исходных данных о деформировании и разрушении элементов системы разработки, появляется возможность воспроизвести процессы деформирования всех моделируемых пластов. Такой методический подход позволяет определить критические параметры изменения мульды сдвижений, при которых могут сформироваться системы секущих трещин и отслоений, образующих сквозные водопроводящие каналы [31, 32].

В методике моделирования использовали как визуальный, так и инструментальный контроль параметров сдвижений в режиме реального времени. Для реализации более грубого контроля использовали систему натянутых нитей или лазерного луча, расположение которых соответствовало определенным рядам реперных марок, а оценку смещений выполняли на основе определения их отклонения от первоначального положения по мерным линейкам и фотографиям модели с помощью Hasselblad H5D-200MS с максимальным разрешением съемки 200 Мпикс. Более точный метод был основан на сравнении двух последовательных снимков при помощи программного обеспечения (ПО) Tema Motion 2D. На основании этих данных проводили корректировку величин шагов дискретного опускания плит.

Данная регистрирующая аппаратура и специализированное ПО потенциально позволяют зафиксировать образование трещин в ВЗТ на начальном этапе их формирования, установить механизм их образования и спрогнозировать прорастание трещин в процессе эволюции процессов сдвижений.

На рис. 3 показана фотография модели до образования трещин, на рис. 4 отображены закономерности ряда этапов эволюции исходной натурной мульды сдвижений и соответствующие им кривые, полученные при дискретном моделировании мульды сдвижений на горизонте отработки продуктивных пластов в процессе их выемки. На рис. 5 приведены идентичные типы закономерностей, но являющиеся прогнозной оценкой развития мульды сдвига земной поверхности при сохранении темпов ее изменения.

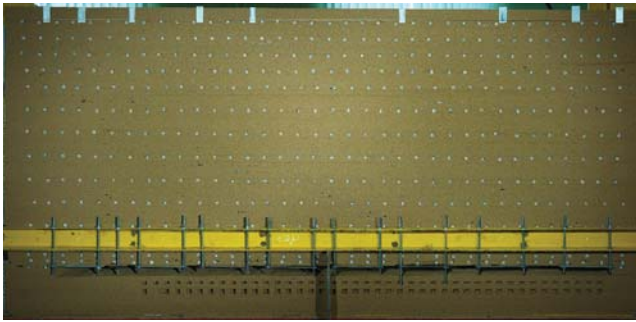


Рис. 3. Фотография модели до формирования мульды сдвижений

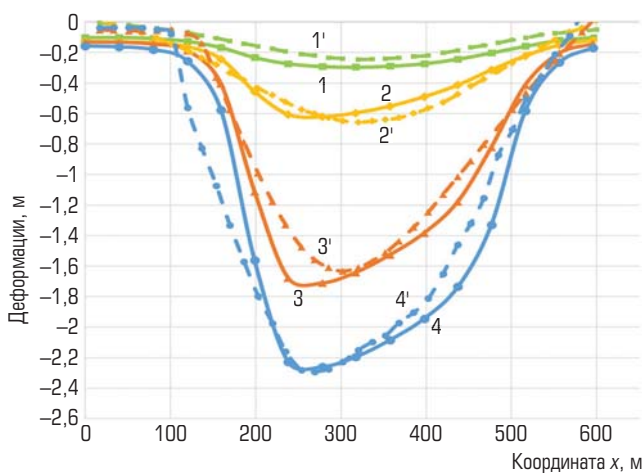


Рис. 4. Основные этапы развития мульды сдвижений от начала наблюдений до текущего момента времени по натурным данным (n) и их воспроизведение в модели (n')

Анализ полученных закономерностей показывает, что методика дискретного моделирования позволила с погрешностью, не превышающей 10–12 %, обеспечить воспроизведение исходной мульды сдвижений земной поверхности на всех этапах, включая прогнозные.

На **рис. 6** показана общая фотография модели на момент образования сквозного водопрводящего канала в ВЗТ, на **рис. 7** приведены укрупненные фрагменты области ВЗТ с элементами массива с непрерывной сетью секущих трещин и отслоений.

Таким образом, в результате моделирования установлен факт формирования сквозного водопрводящего канала в ВЗТ в виде пересекающихся отслоений и секущих трещин, что соответствует кривой $8'$ на **рис. 5** и фотографиям модели на **рис. 6** и **7**.

Заключение

1. Предложенная методика моделирования нелинейных геомеханических процессов сдвижений горных пород при разработке

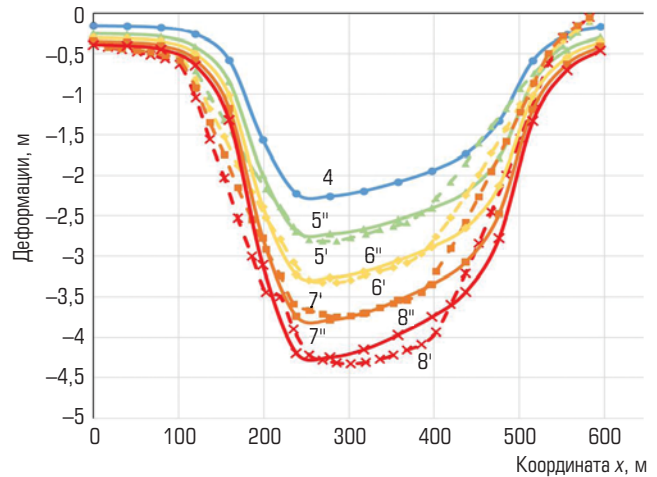


Рис. 5. Прогноз развития дневной мульды сдвижений (4) при экстраполяции изменения натуральных данных при сохранении темпов ее развития (n'') и ее воспроизведение в модели (n')

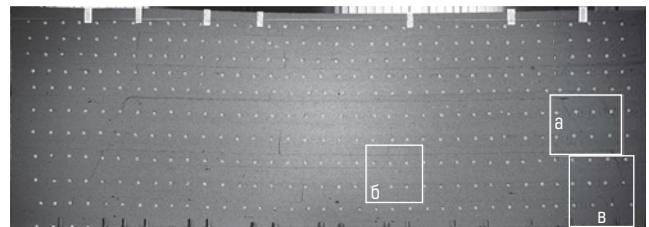


Рис. 6. Общая фотография модели с сетью секущих трещин и отслоений на момент образования сквозного водопрводящего канала

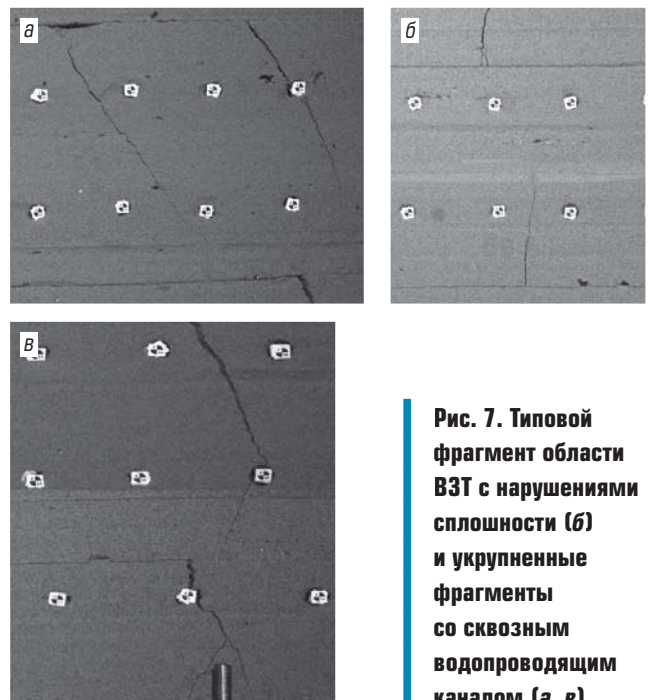


Рис. 7. Типовой фрагмент области ВЗТ с нарушениями сплошности (б) и укрупненные фрагменты со сквозным водопрводящим каналом (а, в)


и эксплуатации калийных месторождений позволяет воспроизводить и исследовать конкретные параметры сети трещин и расщелиний горных пород при эволюции мульды сдвижений.

2. В отличие от традиционных методов моделирования, разработанная методика обеспечивает большее подобие по основным прочностным параметрам горных пород, что имеет существенное значение для развития процессов сдвижения (прочность на сжатие, растяжение, изгиб), а также позволяет решать «обратные» задачи определения параметров деформирования всей толщи пород при наличии надежных данных о мульде сдвижений земной поверхности.

3. Предложенные подходы к исследованию процессов сдвижений позволяют осуществлять прогноз опасности

возникновения водопроводящих каналов, опираясь на фактические параметры мульды сдвижений без учета математических реологических моделей. В случае изменения темпов развития мульды сдвижений методика моделирования позволяет оперативно корректировать условия для решения «обратной» задачи, и таким образом на любых этапах связать текущее состояние мульды с фиксируемыми на модели изменениями параметров секущих трещин и отслоений.

Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2023, № 5, pp. 75–80
DOI: 10.17580/gzh.2023.05.11

Physical simulation of nonlinear geomechanical processes in potash ore mining

Information about authors

B. Yu. Zuev¹, Head of Laboratory, Candidate of Engineering Sciences, b.zuev2010@yandex.ru

R. S. Istomin¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences

E. P. Obozhina¹, Researcher, Candidate of Engineering Sciences

¹Research Center for Geomechanics and Mining Practice Problems, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

Experience of mining potash and potash–magnesium salt is reflective of extremely high number of accidents and deprivations of mines even when most advanced technologies are used. Difficult maintenance of long-term accident-free performance of geotechnical systems through all mining phases at rock salt deposits is connected with the extremely complex and yet understudied nonlinear processes of rock displacements governed by alteration of impermeable strata in-between stoping and aquifers. These nonlinear displacements induce through-the-thickness permeable cracks in the impermeable strata. Generally, the zone of permeable cracks is composed of two hydraulically interconnected systems of induced fractures: exfoliation joints and through-the-thickness dip joints. When the upper boundary of the permeable fracture zone reaches the lower boundary of a body of water, these channels become available for water flow to underground openings. One of the most efficient ways to study such nonlinear processes is modeling using equivalent materials. However, this method has some constraints connected with the requirements to ensure integrated similarity of the compression, tension and bending strengths which are critical in the research of rock movement processes. This article offers a modification of modeling using equivalent materials based on the better similarity achieved in strength parameters of rocks and the method of discrete change of a movement trough at the level of productive strata, which ensures simulation of the movement trough on ground surface with regard to the linear scale of modeling. The main research finding is the forecast of nonlinear displacement processes in rock mass and the refinement of jointing and exfoliation parameters which, given certain conditions, can initiate through-the-thickness permeable channels.

Keywords: potash ore deposits, physical simulation, equivalent materials, impermeable strata, nonlinear geomechanical processes, movement trough.

References

- Laptev B. V. Historiography of accidents in salt mining. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 2011. No. 12. pp. 41–46.
- Solovev V. A., Sekuntsov A. I. Potash mining: Practical course. Perm: Izdatelstvo Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta, 2013. 265 p.
- Baturin E. N., Menshikova E. A., Blinov S. M., Naumov D. Yu., Belkin P. A. Problems of

the development of the world largest potash deposits. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2012. No. 6.

- Zubov V. P. Applied technologies and current problems of resource-saving in underground mining of stratified deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2018. No. 6. pp. 77–83. DOI: 10.17580/gzh.2018.06.16
- Karpov G. N., Kovalski E. R., Nosov A. A. Longwall recovery room erecting method for flat coal seam mining. *GIAB*. 2022. No. 6-1. pp. 54–67.
- Nosov A. A., Karpov G. N., Kovalski E. R. Features of the technology of forming an artificial mass in the roof rocks above the recovery room. *Ugol*. 2023. No. 3. pp. 69–74.
- Zubov V. P., Phuc L. Q. Development of resource-saving technology for excavation of flat-lying coal seams with tight roof rocks (on the example of the Quang Ninh coal basin mines). *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. pp. 795–806.
- Deshkovskiy V. N., Danilova A. F., Novokshonov V. N. Displacement of rocks as a result of its additional pillar system development in conditions of the Starobin deposit of potash salts. *GIAB*. 2012. No. 11. pp. 80–86.
- Baryakh A. A., Gubanova E. A. On flood protection measures for potash mines. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 240. pp. 613–620.
- Gusev V. N., Ilyukhin D. A., Aleksenko A. G. Determining of the parameters of water conducting fracture zone through values of undermined strata horizontal deformations values. *Journal of Mining Institute*. 2013. Vol. 204. pp. 69–73.
- Gusev V. N., Ilyukhin D. A., Zhuravlev A. E. Assessment of the degree of disturbance of the undermined strata by technogenic water conducting fractures according to geomechanical monitoring in the excavations of Yakovlevski mine. *Journal of Mining Institute*. 2013. Vol. 204. pp. 74–81.
- Gusev V. N., Rozhnov E. S. Subsidence and deformations of layers of the massif of rocks with formation of technogenic water spending cracks. *Journal of Mining Institute*. 2011. Vol. 190. pp. 274–277.
- Can Mei, Qing Fang, Haowei Luo, Jiangang Yin, Xudong Fu. A Synthetic Material to Simulate Soft Rocks and Its Applications for Model Studies of Socketed Piles. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 2017. ID 1565438. DOI: 10.1155/2017/1565438
- Tennison L. O. Estimation procedure of deformation in rocks composing impermeable strata at the edge of a movement trough. *GIAB*. 2011. No. 3. pp. 317–328.
- Asanov V. A., Pankov I. L., Evseev A. V., Lobanov S. Yu., Lomakin I. S. Experimental and theoretical research of long term stability of load-carrying elements of the room-and-pillar system of potash beds. *Vestnik Permskogo nauchnogo tsentra UrO RAN*. 2017. No. 1. pp. 8–14.
- Baryah A. A., Asanov V. A., Toksarov V. N., Anikin V. V. The method of the evaluation of the potential hazard of the discontinuity of a waterproof layer at the mined areas of potassium mines. *GIAB*. 2011. No. 9. pp. 19–24.
- Glushikhin F. P., Kuznetsov G. N., Shklyarskiy M. F. et al. Modeling in geomechanics. Moscow: Nedra, 1991. 240 p.
- Fuqiang Gao, Hongpu Kang, Jinfu Lou, Jianzhong Li, Xiaoqing Wang. Evolution of Local Mine Stiffness with Mining Process: Insight from Physical and Numerical Modeling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2019. Vol. 52. pp. 3947–3958.

19. Hongwei Wang, Ruiming Shi, Chunsheng Lu, Yaodong Jiang, Daixin Deng et al. Investigation of sudden faults instability induced by coal mining. *Safety Science*. 2019. Vol. 115. pp. 256–264.
20. Zubov V. P., Fedorov A. S. Development system for seam “mine-breakage face”: advantages, disadvantages, directions of perfection. *GIAB*. 2019. Special issue 7. Industrial safety of enterprises of mineral resource complex in XXI century-2. pp. 272–277.
21. Bagautdinov I. I., Belyakov N. A., Sevryukov V. V., Rasskazov M. I. Hardening soil model in prediction of plastic deformation zone in soft rock mass of Yakovlevo iron ore deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2022. No. 12. pp. 16–21. DOI: 10.17580/gzh.2022.12.03
22. Pavlovich A. A., Korshunov V. A., Bazhukov, A. A., Melnikov N. Ya. Estimation of Rock Mass Strength in Open-Pit Mining. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 239. pp. 502–509.
23. Marysyuk V. P., Sabyanin G. V., Andreev A. A., Vilner M. A. Mechanism of deformation in rock mass surrounding intersection of mine shaft and salt bed. *Gornyi Zhurnal*. 2021. No. 2. pp. 21–26. DOI: 10.17580/gzh.2021.02.02
24. Verbilo P. E., Vilner M. A. Study of the jointed rock mass uniaxial compression strength anisotropy and scale effect. *GIAB*. 2022. No. 6-2. pp. 47–59.
25. Zubov V. P., Kovalski E. R., Antonov S. V., Pachgin V. V. Improving the safety of mines in developing Verkhnekamsk potassium and magnesium salts. *GIAB*. 2019. No. 5. pp. 22–33.
26. Trushko V. L., Gospodarikov A. P., Sozonov K. V. Calculation of stress state in ore and backfill during mining in Yakovlevskoe iron ore deposit. *GIAB*. 2019. No. 5. pp. 111–123.
27. Zuev B. Yu., Zubov V. P., Fedorov A. S. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals. *Eurasian Mining*. 2019. No. 1. pp. 8–12. DOI: 10.17580/em.2019.01.02
28. Gaofeng Song, Zhenwei Wang, Kuo Ding. Evaluation of the face advance rate on ground control in the open face area associated with mining operations in Western China. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2020. Vol. 17, No. 2. pp. 390–398.
29. Minghe Ju, Dapeng Wang, Jingcheng Shi, Jianchun Li, Qiangling Yao et al. Physical and numerical investigations of bedding adhesion strength on stratified rock roof fracture with longwall coal mining. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2021. Vol. 7, Iss. 1. 24. DOI: 10.1007/s40948-020-00209-2
30. Hongtao Liu, Linfeng Guo, Guangming Cao, Xidong Zhao, Pengfei Wang et al. Comprehensive Study of Strata Movement Behavior in Mining a Longwall Top Coal Caving Panel of a Composite Coal Seam with Partings. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, Iss. 15. 5311. DOI: 10.3390/app10155311
31. Karev V. I., Kovalenko Yu. F., Khimulia V. V., Shevtsov N. I. Parameter determination of the method of directional unloading of the reservoir based on physical modelling on a true triaxial loading setup. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 258. pp. 906–914.
32. Kovalskii E. R., Gromtsev K. V. Development of the technology of stowing the developed space during mining. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 254. pp. 202–209.

УДК 622.83:622.273.132

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕЛИКОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СИСТЕМОЙ ПОДЭТАЖНОГО ОБРУШЕНИЯ



М. А. ВИЛЬНЕР¹,
научный сотрудник,
канд. техн. наук,
Vilner_MA@pers.spmi.ru



А. А. СТРЕШНЕВ²,
начальник
Службы прогноза
и предотвращения
горных ударов



В. С. ОНУПРИЕНКО²,
главный инженер

¹ Научный центр геомеханики и проблем горного производства, Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия
² Кировский филиал АО «Апатит», ПАО «ФосАгро», Кировск, Россия

Известно, что целик между буродоставочными выработками является одним из основных элементов подэтажной системы разработки и представляет собой область массива в пределах одного подэтажа, ограниченную по периметру выработками. Отмечено, что в настоящее время общепринятой для определения параметров целика является методика сравнения его несущей способности с действующими напряжениями; при этом не учитывается большое число факторов, характерных для условий апатит-нефелиновых месторождений. Кроме того, механизм разрушения целика в структурно нарушенных массивах не всегда соответствует теории разрушения опорного ядра. В связи с этим обоснована актуальность исследования зависимостей формирования напряженно-деформированного состояния целика с целью дальнейшей разработки алгоритма подбора его оптимальных параметров.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, апатит-нефелиновая руда, целик, система подэтажного обрушения, численное моделирование
DOI: 10.17580/gzh.2023.05.12

Введение

Разработка месторождений по системе с подэтажным обрушением подразумевает оставление в пределах отработываемого подэтажа целиков между буродоставочными

выработками [1, 2]. Под целиком подразумевается нетронутая область рудопородного массива, ограниченная по периметру подготовительными (буродоставочными) выработками