

ПОДАТЛИВОЕ КРЕПЛЕНИЕ ВЫРАБОТОК, ПРОЙДЕННЫХ В СОЛЯНЫХ ПОРОДАХ

Беликов А.А., Беляков Н.А.

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург

Ключевые слова: соляные породы, междукамерные целики, глубокое заложение, податливое крепление, тросовая крепь, численное моделирование.

Аннотация. В работе представлены передовые методы податливого крепления выработок, пройденных в породах, склонных к проявлению реологических свойств. Рассмотрены крепи как для одиночной горной выработки, так и для междукамерных целиков. Оценка эффективности крепи междукамерных целиков осуществлялась численным методом в ПО Abaqus CAE на примере системы разработки по пласту АБ на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей. Численная реализация модели выполнена методом конечных элементов в программном комплексе Simulia Abaqus с использованием вязко-упруго-пластической геомеханической модели сильвинита. Параметрическое обеспечение реологической модели выполнено на основе результатов инструментальных наблюдений за деформациями междукамерных целиков. Прогноз напряженно-деформированного состояния закреплённого целика показал положительный эффект податливой крепи по увеличению его несущей способности.

COMPLIANT ATTACHMENT OF WORKINGS IN SALT ROCKS

Belikov A.A., Belyakov N.A.

Saint-Petersburg mining university of Empress Catherine II, Saint-Petersburg

Key words: salt rocks, interchamber pillars, deep burial, yielding fastening, rope fastener, numerical modeling.

Abstract. The paper presents advanced methods for pliable fastening of workings in rocks prone to exhibiting rheological properties. Supports for both single mine workings and inter-chamber pillars are considered. The effectiveness of inter-chamber pillar support was assessed using a numerical method in Abaqus CAE software using the example of a development system for the AB formation at the Verkhnekamskoye potassium-magnesium salts deposit. The numerical implementation of the model was carried out using the finite element method in the Simulia Abaqus software package using a viscoelastic-plastic geomechanical model of sylvinitite. The parametric support of the rheological model was carried out on the basis of the results of instrumental observations of the deformations of the interchamber pillars. The forecast of the stress-strain state of the fixed pillar showed the positive effect of pliable support in increasing its load-bearing capacity.

Введение. Реологические свойства соляных пород имеют ключевую роль в прогнозе устойчивости горных выработок. Под воздействием напряжений на контуре появляются как не зависящие от времени упругие деформации, так и зависящие от него деформации ползучести [1, 2]. В работах [3, 4] отображена необходимость применения мер по сохранению несущей способности междукамерных целиков на соляных месторождениях. В ряде случаев деформация междукамерных целиков может привести к возникновению гидравлически связанной системы трещин в водозащитной толще (ВЗТ) [5-7]. Прорыв воды в выработанное пространство водорастворимых руд может привести к лавинообразно развивающейся аварии на предприятии с последующим образованием карстовых провалов на поверхности [8-10]. В случае с одиночной горной выработкой подобный рост напряжений на контуре горной выработки может привести к потере устойчивости крепи. Роль податливой крепи заключается в том, чтобы обеспечить контролируемое смещение породного контура, а не полностью предотвратить его [11, 12].

Различные конструкции узла податливости определяют механизм деформаций податливой крепи. Основной принцип подобной опоры заключается в рассеивании энергии деформации и снижение уровня напряжений [13-15]. Одним из способов проектирования податливой крепи является размещение сжимаемого слоя между жесткой крепью и породным

контуром [16-18]. При деформации границы выемки происходит сжатие слоя без деформации крепи.

В рамной крепи такой сжимаемый слой может быть выполнен из стальных цилиндров, расположенных между горным массивом и балкой крыши. В монолитной бетонной крепи конструкция представляет собой опору, взаимодействующую с горной массой. Пластичные элементы заделаны в бетонную облицовку, а сближение поперечных сечений обеспечивается за счет радиальных смещений породного контура. Материал пластичных элементов зависит от ожидаемых смещений границы выемки. Жесткая оболочка при строительстве разделяется на сегменты с открытыми зазорами в ней. Эти зазоры заполнены сильно сжимаемыми элементами. Жестким материалом обычно является торкрет-бетон, а пластичным – сталь, древесина, золошлак [19] или вспененные материалы (пенобетон) [20].

Пластичные элементы деформируются при сжатии без потери устойчивости жестких элементов крепи. Мощность деформируемого слоя напрямую определяет величину податливости.

Конструкция и принцип работы податливой крепи

Одна из наиболее перспективных конструкций податливой крепи выработки большого сечения представлена в работе [14]. Опора выполнена в виде торкрет-оболочки с открытыми пазами. Щели заполнены высокосжимаемыми элементами из пенобетона. Такая опора может работать в двух режимах – жестком и податливом. В жестком режиме несущая способность зависит от прочности торкрет-бетона, а деформационные свойства пенобетона определяют режим податливости крепи: реакции крепи и величину податливости.

Податливые элементы размещены по всему периметру крепи выработки, в том числе и в зонах концентрации напряжений. Такими зонами являются арочные и инверсионные соединения в подковообразном сечении и в эллиптической боковине. Расстояние между ними позволяет избежать предельных напряжений в жестких участках крепи. На рисунке 1 представлена предлагаемая конструкция податливой крепи.

Посредством численного моделирования в работе [14] определено, что подобная конструкция позволяет снизить нагрузку на крепь и значительно продлить срок её службы относительно аналогичной крепи без узлов податливости. Однако, избыток подобных податливых элементов приводит к потере устойчивости всей конструкции крепи, что требует не только численного моделирования, но и экспериментальных тестирований в производственных условиях [15-19].

Узел податливости может быть представлен в виде фрикционного элемента – опорные элементы соединены фрикционно-стопорными замками и могут скользить друг относительно друга [14, 20]. В таком случае величина податливости определяется геометрией узла и зависит от длины участка, относительно которого реализовано смещение. Одним из наиболее очевидных вариантов исполнения фрикционного узла податливости является проскальзывание зажатого тросового анкера. Подобная тросовая крепь также может быть реализована в камерах большого сечения, однако, не будет обладать значительными преимуществами перед описанным выше вариантом [21, 22]. Учитывая актуальность проблемы сохранения целостности водозащитной толщи, перспективной областью применения тросовой крепи является повышение несущей способности междукамерных целиков [23].

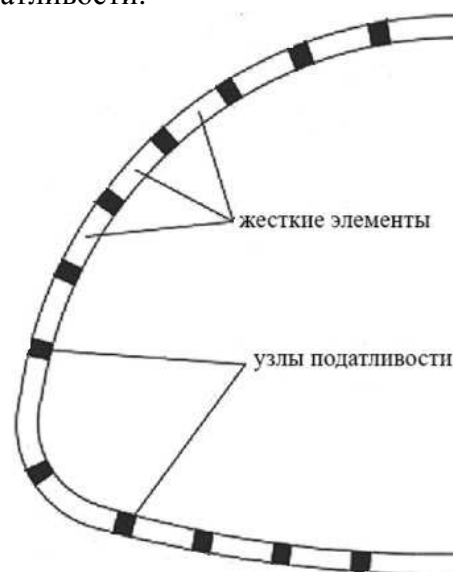


Рис. 1. Конструкция податливой крепи камеры большого сечения

Авторами получен патент на способ податливого крепления междукамерных целиков в соляных породах (патент РФ № 2788185) [23]. Податливая тросовая крепь устанавливается на междукамерные целики с целью увеличения их несущей способности посредством создания отпора поперечному деформированию целиков. Отпор крепи возникает вследствие натяжения канатов, концы которых продеты через насквозь пробуренные скважины. Канат закреплён таким образом, что на поверхности целика в выработке находится узел податливости, а натяжение каната передаётся на горизонтально установленные с противоположных сторон на поверхности целика арматурные стержни. Описанная конструкция работает как «стяжка» с возможностью определения реакции крепи в податливом режиме работы и величины податливости, а также несущей способности. Предварительное натяжение каната создаётся в процессе крепления узла податливости, она обеспечивает обжатие всех элементов крепи и моментальное включение её в работу. Реакция крепи в податливом режиме работы зависит от регулировки узла податливости. Величина податливости равна длине зажатой петли каната в узле податливости. Несущая способность крепи ограничена несущей способностью каната. На рисунке 2 представлена конструкция яруса крепления междукамерного целика и узла податливости. Узел податливости состоит из трубы с продетой через неё петли каната. На боковой поверхности трубы соосно выполнены отверстия, в которые установлен клин. Клинораспорный анкер установлен с возможностью съёма на клин, и закрепляет узел податливости на поверхности целика.

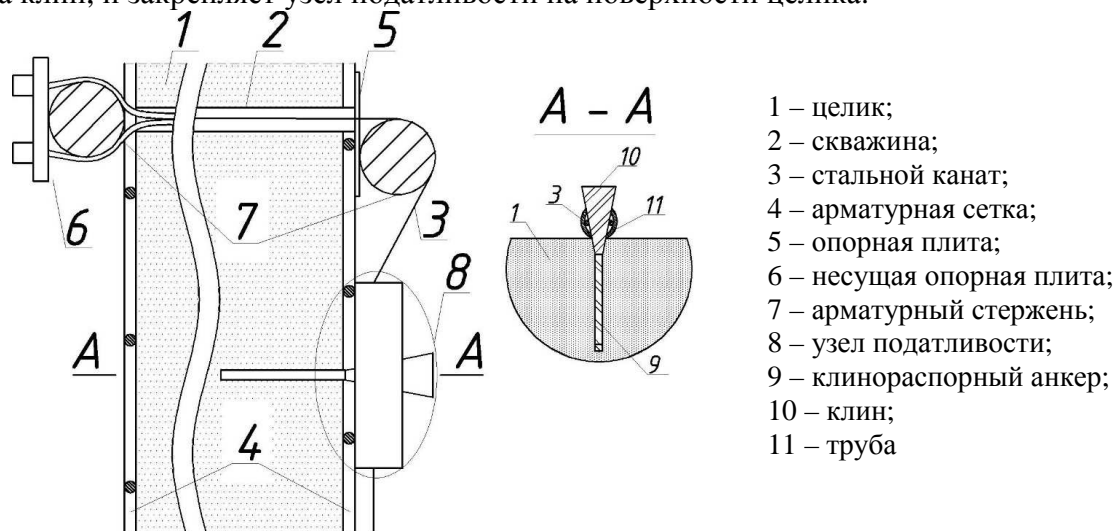


Рис. 2. Конструкция яруса крепления

Крепь работает следующим образом. Нагруженные междукамерные целики с течением времени деформируются, расширяясь [21, 22, 24], что приводит к увеличению натяжения канатов. При достижении заданного усилия происходит реализация податливости крепи посредством проскальзывания каната в узле податливости. По мере исчерпания податливости происходит затухание скорости роста поперечных деформаций и напряжений в целике. После исчерпания податливости нагрузка в полной мере передаётся на канаты – крепь работает жёстко: с увеличением величины натяжения каната увеличивается отпор крепи. При достижении нагрузки на крепь, превышающей её несущую способность, канаты пластически деформируются и рвутся, что сопровождается исчезновением отпора крепи.

Характерный график изменения напряжения в канате и схематическое представление соответствующей деформации закреплённого целика отображено на рисунке 3. Участок изменения скорости увеличения напряжения в канате указывает на возникновение пластических деформаций. Продолжительность податливого режима работы крепи определяется величиной податливости и скоростью деформации целика при соответствующем отпоре крепи [25-27]. Прочность стального каната, зависящая от его сечения и свойств стали [28, 29], в наибольшей степени влияет на длительность жесткого режима работы крепи и ограничивает максимальное значение величины реакции крепи в

податливым режиме работы. Выбор максимального диаметра каната ограничивается конструктивными особенностями крепи: продеванием обоих концов каната через скважину, и огибанием петлёй каната арматурного стержня.

В зависимости от высоты целика и необходимых сроков поддержания его несущей способности возможно применение нескольких ярусов крепления. На рисунке 4 представлен вариант с тремя ярусами крепления.

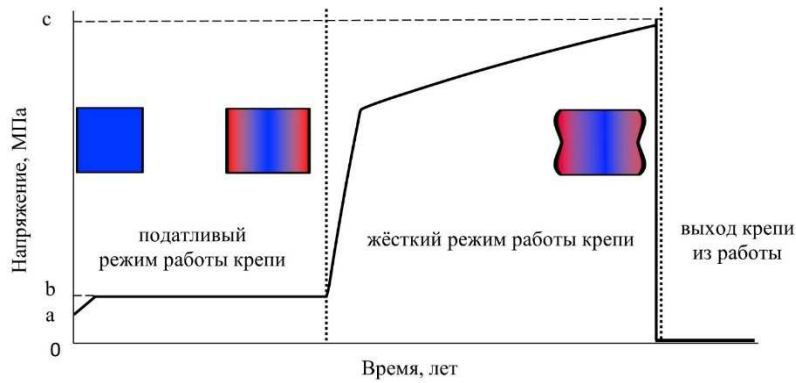


Рис. 3. Характерный график изменения осевых напряжений в стальном канате: а – предварительное натяжение; б – реакция крепи в податливом режиме работы; с – разрывное усилие каната

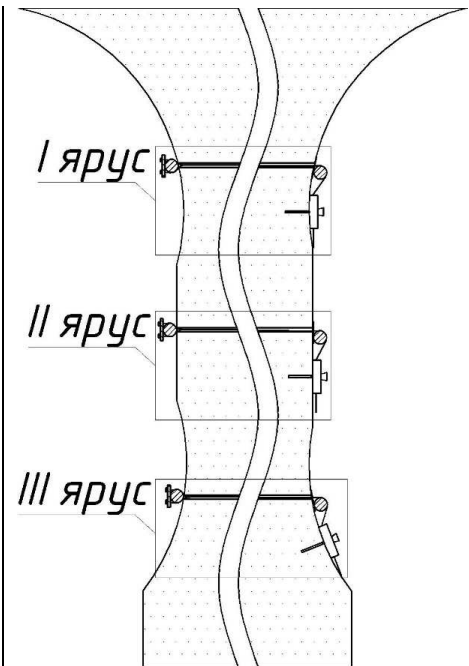


Рис. 4. Конструкция податливой крепи с тремя ярусами

Численное моделирование работы податливой тросовой крепи

Рассмотрим систему разработки сильвинитового пласта АБ на руднике БКРУ-4 Верхнекамского месторождения калийных солей, а именно: разработка пласта на глубине 350 м с шириной и высотой междукammerных целиков 5 м [24]. Величина смещения породного контура незакрепленного целика составляет 0,226 м за 100 лет.

Данная система разработки позволяет применить три яруса крепления. Крезь состоит из каната диаметром 12 мм, выполненного из стали марки 50 с предел текучести 330 МПа; арматурной сетки, выполненной из стали марки А500 с диаметром продольной и поперечной арматуры 16 мм и шагом 200 мм; арматуры диаметром 80 мм, выполненной из стали марки А500.

Прогноз геомеханических процессов, протекающих в междукammerном целике выполнялся в программном комплексе Simulia Abaqus методом конечных элементов [23, 25]. Численная модель выполнена в постановке плоской деформации – 2D с дискретизацией рассматриваемой области на четырёхугольные элементы второго порядка. Использование вязко-упруго-пластической модели поведения сильвинита обусловлено возникающими во временной перспективе геомеханическими процессами в соляных породах междукammerных целиков [2, 4, 26]. Для описания поведения соляных пород была использована модель Друкера – Прагера, где скорость относительной деформации ползучести зависит от эквивалентного напряжения ползучести согласно (1).

$$\dot{\epsilon}_{cr} = (A(\sigma_{cr})^n [(m+1)\epsilon_{cr}]^m)^{\frac{1}{m+1}}, \quad (1)$$

где $\dot{\epsilon}_{cr}$ – скорость относительной деформации ползучести; σ_{cr} – эквивалентное напряжение ползучести; ϵ_{cr} – относительная деформация ползучести; A , m , n – параметры ползучести материала, заданные как функции от температуры и напряженного состояния.

Подбор параметров модели производился на основе результатов инструментальных наблюдений, выполненных на подземных наблюдательных станциях, расположенных в выработках по пласту АБ [23, 24].

Величина смещений породного контура целика в период податливого режима принимается 0,11 м. Величина предварительного натяжения каната и сопротивления крепи в податливом режиме принимается 30 кН. По результатам численного моделирования определено время работы представленной крепи в податливом режиме 12 лет, в жёстком режиме – 16 лет, построены графики горизонтальных смещений боковой поверхности закреплённого и незакреплённого целика (рис. 5) и оседаний (рис. 6). Полученные графики показывают уменьшение поперечных и продольных деформаций, накапливаемых на расчетном временном периоде, что свидетельствует об улучшении состояния устойчивости междукammerных целиков в породах, склонных к проявлению реологических свойств.

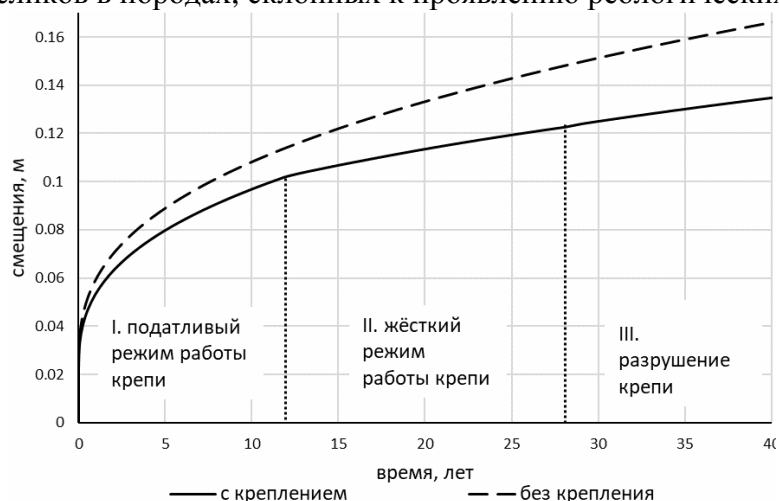


Рис. 5. Горизонтальные смещения боковой поверхности целика

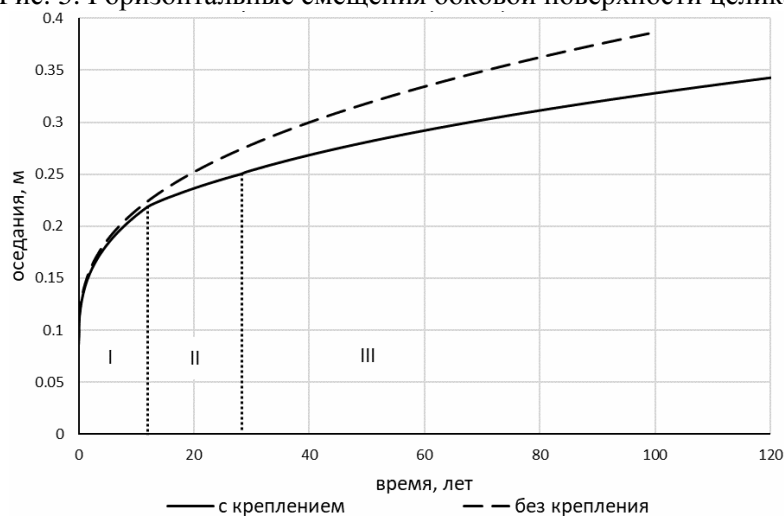


Рис. 6. Вертикальные смещения целика

Заключение. Разработка податливого крепления горных выработок, пройденных в породах, склонных к проявлению реологических свойств является одним достаточно перспективным направлением, особенно обращая внимание на рост глубин разработки полезных ископаемых и постоянно растущий спрос на калийно-магниевые удобрения. Использование податливых крепей позволяет в значительной степени повысить срок эксплуатации выработки и устойчивость междукammerных целиков.

Описанные результаты указывают на то, что представленный способ крепления междукammerных целиков в соляных породах может быть использован в качестве мер по обеспечению целостности водозащитной толщи и по уменьшению потерь полезного ископаемого при камерной системе разработки. Методика прогноза целостности ВЗТ при использовании описанного способа податливого крепления междукammerных целиков является перспективным направлением развития исследований.

Список литературы

1. Кашников Ю.А., Ермашов А.О., Ефимов А.А. Геолого-геомеханическая модель участка Верхнекамского калийного месторождения // Записки Горного института. – 2019. – Т. 237. – С. 259-267. – DOI: 10.31897/PMI.2019.3.259.
2. Барях А.А., Губанова Е.А. О мерах охраны калийных рудников от затопления // Записки Горного института. – 2019. – Т. 240. – С. 613-620. – DOI: 10.31897/PMI.2019.6.613.
3. Habibi R., Moomivand H., Ahmadi M., Asgari A. Stability analysis of complex behavior of salt cavern subjected to cyclic loading by laboratory measurement and numerical modeling using LOCAS (case study: Nasrabad gas storage salt cavern) // Environmental Earth Sciences. 2021, vol. 80(8), pp. 1-21. DOI: 10.1007/s12665-021-09620-8.
4. Барях А.А., Девятков С.Ю., Денкевич Э.Т. Математическое моделирование развития процесса сдвижения при отработке калийных руд длинными очистными забоями // Записки Горного института. – 2023. – Т. 259. – С. 13-20. DOI: 10.31897/PMI.2023.11.
5. Piyukhin D., Gusev V. The use of the finite element method for ensuring efficient and safe extraction of minerals // Key Engineering Materials. 2017, vol. 743, pp. 411-416. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.743.411.
6. Kiyani V., Esmaili A., Alijani F., Samani S., Vasić L. Investigation of drainage structures in the karst aquifer system through turbidity anomaly, hydrological, geochemical and stable isotope analysis (Kiyani springs, western Iran) // Environ Earth Sciences 2022, vol. 81(22), p. 517. DOI: 10.1007/s12665-022-10627-y.
7. Мустафин М.Г., Кологривко А.А., Васильев Б.Ю. Анализ точности построения цифровых моделей рельефа на основе данных периодического воздушного лазерного сканирования горнопромышленного объекта // Горный журнал. – 2023. – № 2. – С. 56-62. – DOI: 10.17580/gzh.2023.02.09.
8. Васильева М.А., Волчихина А.А., Морозов М.Д. Оборудование и технологии для проведения работ по дозакладке выработанного пространства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 6. – С. 133-144. – DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_133.
9. Паньков И.Л., Морозов И.А. Деформирование соляных пород при объемном многоступенчатом нагружении // Записки Горного института. – 2019. – Т. 239. – С. 510-519. – DOI 10.31897/PMI.2019.5.510.
10. Котлов С.Н., Целищев Н.А., Сотник Е.А., Гилязов Д.Х. Геолого-гидрогеологические факторы формирования водопритоков в горные выработки Яковлевского рудника // Горный журнал. – 2023. – № 5. – С. 108-113. – DOI: 10.17580/gzh.2023.05.16.
11. Jifeng H., Zhongping G., Jinbo L., Lijuan Zh., Study on triaxial creep test and theoretical model of cemented gangue-fly ash backfill under seepage-stress coupling // Construction and Building Materials. 2021, vol. 273. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121722.
12. Протосеня А.Г., Катеров А.М. Развитие напряженно-деформированного состояния комбинированной крепи вертикального ствола, пройденного в соляном массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-1. – С. 100-113. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_100.
13. Протосеня А.Г., Кумов В.В. Влияние порового давления на устойчивость забоя при строительстве тоннелей щитовыми проходческими комплексами в смешанных забоях // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 20. – С. 131-141. – DOI: 10.26160/2658-3305-2023-20-131-141.
14. Дементьева А.В., Карасев М.А. Конструкции податливых крепей в соляных породах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 10-1. – С. 136-144. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_136.
15. Wagner H.N.R., Niewöhner G., Pototzky A., Hühne C. On the imperfection sensitivity and design of tori-spherical shells under external pressure // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2021, vol. 191, p. 104321. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2021.104321.
16. Ali H.Q., Wagner H.N.R., Akalin C., Tabrizi I.E., Hühne C., Yildiz M. Buckling and fracture analysis of thick and long composite cylinders with cutouts under axial Compression: An experimental and numerical campaign // Composite Structures. 2023, vol. 324, p. 117530. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.117530.
17. Zhang Y., Xiong X., Musa M., Lyu X. Analysis of a compressive strength model for FRP-confined damaged concrete columns based on the Drucker-Prager yield criterion // Structural Concrete. 2022, vol. 24, pp. 721-735. DOI: 10.1002/suco.202100584.
18. Fabre G., Pellet F. Creep and time-dependent damage in argillaceous rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2006, vol. 43(6), pp. 950-960. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.02.004.
19. Frenelus W., Peng H., Zhang J. Creep Behavior of Rocks and Its Application to the Long-Term Stability of Deep Rock Tunnels // Applied Sciences (Switzerland). 2022, vol. 12 (17), pp. 1-35. DOI: 10.3390/app12178451.
20. Baryakh A.A., Samodelkina N.A., Konosavsky P.K. Prevention of freshwater breakthrough into potassium mines // Procedia Structural Integrity. 2021, vol. 32(C), pp. 17-25. DOI: 10.1016/j.prostr.2021.09.004.
21. Fei W., Jie L., Quanle Z., Cunbao L., Jie C., Renbo G. A triaxial creep model for salt rocks based on variable-order fractional derivative // Mechanics of Time-Dependent Materials. 2021, vol. 25(1), pp. 101-118. DOI: 10.1007/s11043-020-09470-0.
22. Асанов В.А., Паньков И.Л., Кузьминых В.С., Морозов И.А. Методические аспекты определения прочностных, деформационных и энергетических характеристик соляных пород при прямом растяжении

- породных образцов в лабораторных условиях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 4. – С. 58-68. – DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.05.
23. Беликов А.А., Беляков Н.А. Методика прогноза напряженно-деформированного состояния междукамерных целиков, закрепленных податливой тросовой крепью // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – №4. – С. 20-34. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_20.
 24. Ермашов А.О. Геомеханическое обоснование расчетов оседания земной поверхности при добыче калийно-магниевого руд (на примере Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей): Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Пермь: Горный институт УрО РАН, 2015. – 20 с.
 25. Протосеня А.Г., Катеров А.М. Обоснование параметров реологической модели соляного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 3. – С. 16-28. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_16.
 26. Taheri S.R., Pak A. Casing Failure in Salt Rock: Numerical Investigation of its Causes // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020, no. 59, pp. 3903-3918. DOI: 10.1007/s00603-020-02161-9.
 27. Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г., Кухтинский А.Э., Шустов Д.В. О связи коэффициентов трещиностойкости и геофизических характеристик горных пород месторождений углеводородов // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 83-90. – DOI: 10.31897/PMI.2020.1.83.
 28. Shammazov I., Dzhemilev E., Sidorkin D., Improving the Method of Replacing the Defective Sections of Main Oil and Gas Pipelines Using Laser Scanning Data // Applied Sciences. 2023, vol. 13(48). DOI: 10.3390/app13010048.
 29. Abdelwahab A., Chishegorov D., Ivanov S., Mikhailov A. Influence of the main operational factors on the working capacity of a mining hydraulic excavator // E3S Web of Conferences. 2021, vol. 326, p. 00007. doi.org/10.1051/e3sconf/202132600007.

References

1. Kashnikov Yu.A., Ermashov A.O., Efimov A.A. Geological and geomechanical model of the section of the Verkhnekamskoye potash deposit // Journal of Mining Institute. 2019, vol. 237, pp. 259-267. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.259.
2. Baryakh A.A., Gubanova E.A. On measures to protect potash mines from flooding // Journal of Mining Institute. 2019, vol. 240, pp. 613-620. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.613.
3. Habibi R., Moomivand H., Ahmadi M., Asgari A. Stability analysis of complex behavior of salt cavern subjected to cyclic loading by laboratory measurement and numerical modeling using LOCAS (case study: Nasrabad gas storage salt cavern) // Environmental Earth Sciences. 2021, vol. 80(8), pp. 1-21. DOI: 10.1007/s12665-021-09620-8.
4. Baryakh A.A., Devyatkov S.Yu., Denkevich E.T. Mathematical modelling of displacement during the potash ores mining by longwall faces // Journal of Mining Institute. 2023, vol. 259, p. 13-20. DOI: 10.31897/PMI.2023.11.
5. Ilyukhin D., Gusev V. The use of the finite element method for ensuring efficient and safe extraction of minerals // Key Engineering Materials. 2017, vol. 743, pp. 411-416. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.743.411.
6. Kiyani V., Esmaili A., Alijani F., Samani S., Vasić L. Investigation of drainage structures in the karst aquifer system through turbidity anomaly, hydrological, geochemical and stable isotope analysis (Kiyani springs, western Iran) // Environ Earth Sciences 2022, vol. 81(22), p. 517. DOI: 10.1007/s12665-022-10627-y.
7. Mustafin M.G., Kologrivko A.A., Vasiliev B.Yu. Analysis of the accuracy of building digital terrestrial models based on periodic airborne laser scanning of a mining object // Mining Journal. 2023, no. 2, pp. 56-62. DOI: 10.17580/gzh.2023.02.09.
8. Vasilyeva M.A., Volchikhina A.A., Morozov M.D. Re-backfill technology and equipment // Mining information and analytical bulletin. 2021, no. 6, pp. 133-144. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_133.
9. Pankov I.L., Morozov I.A. Salt Rock Deformation under Bulk Multiple-Stage Loading // Journal of Mining Institute. 2019, vol. 239, pp. 510-519. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.510.
10. Kotlov S.N., Tselishchev N.A., Sotnik E.A., Gilyazev D.Kh. Geological and hydrogeological factors of initiation of water inflow in Yakovlevo Mine // Mining Journal. 2023, no. 5, pp. 108-113. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.16.
11. Jifeng H., Zhongping G., Jinbo L., Lijuan Zh., Study on triaxial creep test and theoretical model of cemented gangue-fly ash backfill under seepage-stress coupling // Construction and Building Materials. 2021, vol. 273. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121722.
12. Protosenja A.G., Katerov A.M. Development of stress and strain state of combined support for a vertical shaft driven in salt massif // Mining information and analytical bulletin. 2022, no. 6-1, pp. 100-113. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_100.
13. Protosenya A.G., Kumov V.V. The effect of pore pressure on the stability of the face during the construction of tunnels by shield tunneling complexes in mixed faces // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2023, no. 20, pp. 131-141. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-20-131-141.
14. Demytyeva A.V., Karasev M.A. Design of yielding support systems in salts // Mining information and analytical bulletin. 2022, no. 10-1, pp. 136-144. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_136.
15. Wagner H.N.R., Niewöhner G., Pototzky A., Hühne C. On the imperfection sensitivity and design of tori-spherical shells under external pressure // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2021, vol. 191, p. 104321. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2021.104321.

16. Ali H.Q., Wagner H.N.R., Akalin C., Tabrizi I.E., Hühne C., Yildiz M. Buckling and fracture analysis of thick and long composite cylinders with cutouts under axial Compression: An experimental and numerical campaign // Composite Structures. 2023, vol. 324, p. 117530. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.117530.
17. Zhang Y., Xiong X., Musa M., Lyu X. Analysis of a compressive strength model for FRP-confined damaged concrete columns based on the Drucker–Prager yield criterion // Structural Concrete. 2022, vol. 24, pp. 721-735. DOI: 10.1002/suco.202100584.
18. Fabre G., Pellet F. Creep and time-dependent damage in argillaceous rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2006, vol. 43(6), pp. 950-960. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.02.004.
19. Frenelus W., Peng H., Zhang J. Creep Behavior of Rocks and Its Application to the Long-Term Stability of Deep Rock Tunnels // Applied Sciences (Switzerland). 2022, vol. 12 (17), pp. 1-35. DOI: 10.3390/app12178451.
20. Baryakh A.A., Samodelkina N.A., Konosavsky P.K. Prevention of freshwater breakthrough into potassium mines // Procedia Structural Integrity. 2021, vol. 32(C), pp. 17-25. DOI: 10.1016/j.prostr.2021.09.004.
21. Fei W., Jie L., Quanle Z., Cunbao L., Jie C., Renbo G. A triaxial creep model for salt rocks based on variable-order fractional derivative // Mechanics of Time-Dependent Materials. 2021, vol. 25(1), pp. 101-118. DOI: 10.1007/s11043-020-09470-0.
22. Asanov V.A., Pankov I.L., Kuzminyh V.S., Morozov I.A. The methodical aspects of strength, deformation and energy characteristic determination of salt rocks under direct tensile loading of rock specimens in laboratory conditions // PNRPU Mechanics Bulletin. 2018, no. 4, pp. 58-68. DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.05.
23. Belikov A.A., Belyakov N.A. Methodology for predicting the stress-strain state of inter-chamber pillars secured with a pliable cable support // Mining information and analytical bulletin. 2023, no. 4, pp. 20-34. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_20.
24. Ermashov A.O. Geomechanical substantiation of calculations of subsidence of the earth's surface during the extraction of potassium-magnesium ores (on the example of the Verkhnekamskoye deposit of potassium-magnesium salts): Abstract of the diss. ... cand. of tech. sc. – Perm, Mining Institute of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2015. – 20 p.
25. Protosenya A.G., Katerov A.M. Substantiation of rheological model parameters for salt rock mass // Mining information and analytical bulletin. 2023, no. 3, pp. 16-28. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_16.
26. Taheri S.R., Pak A. Casing Failure in Salt Rock: Numerical Investigation of its Causes // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020, no. 59, pp. 3903-3918. DOI: 10.1007/s00603-020-02161-9.
27. Kashnikov Yu.A., Ashikhmin S.G., Kukhtinskii A.E., Shustov D.V. The relationship of fracture toughness coefficients and geophysical characteristics of rocks of hydrocarbon deposits. Journal of Mining Institute. 2020, vol. 241, pp. 83-90. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.83.
28. Shammazov I., Dzhemilev E., Sidorkin D., Improving the Method of Replacing the Defective Sections of Main Oil and Gas Pipelines Using Laser Scanning Data // Applied Sciences. 2023, vol. 13(48). DOI: 10.3390/app13010048.
29. Abdelwahab A., Chishegorov D., Ivanov S., Mikhailov A. Influence of the main operational factors on the working capacity of a mining hydraulic excavator // E3S Web of Conferences. 2021, vol. 326, p. 00007. doi.org/10.1051/e3sconf/202132600007.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Беликов Артем Артурович – аспирант	Belikov Artem Arturovich – postgraduate student
Беляков Никита Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений	Belyakov Nikita Andreevich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of construction of mining enterprises and underground structures
s205046@stud.spmi.ru	

Получена 11.12.2023