

## ВЛИЯНИЕ СВЯЗУЮЩЕГО НАПОЛНИТЕЛЯ НА ПЛОТНОСТЬ СУХОПРЕССОВАННЫХ БРИКЕТОВ ИЗ БЕНТОНИТОВОГО ГЛИНОПОРОШКА

*Титова Н.В.<sup>1</sup>, Климович В.В.<sup>2</sup>, Дешковский В.Н.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Проектное унитарное предприятие «Калийпроект», Солигорск, Беларусь;

<sup>2</sup>ООО «ПроТех Инжиниринг», Санкт-Петербург

**Ключевые слова:** бентонит, сухопрессованные брикеты, давление прессования, наполнитель, гидроизоляционный материал, плотность, калийные соли, агрессивные рассолы.

**Аннотация.** Представлены результаты опытных работ по изготовлению сухопрессованных бентонитовых брикетов, используемых в качестве активного гидроизоляционного материала в конструкциях гидроизоляционных перемычек. Актуальность исследования обусловлена тем, что типовые гидроизоляционные материалы на основе бентонитовой глины, широко применяемые в промышленном и гражданском строительстве, не проявляют требуемые характерные свойства набухания при гидратации под воздействием солевых растворов, содержащих преимущественно хлориды в высокой концентрации в подземных горных выработках соляных шахт. Гидроизоляционные перемычки в выработках калийных рудников важны для предотвращения проникновения вод и затопления, так как агрессивные воды приводят к растворению солей и образованию водопроводящих каналов. В лабораторных условиях была успешно опробована технология сухого прессования бентонитового глинопорошка марки ПБМА, изготовлены брикеты на основе чистого без примесей бентонитового глинопорошка и в смеси с наполнителем – кварцевый песок мелкозернистый (промытый, высушенный). Установлена зависимость давления прессования от процентного содержания бентонитового глинопорошка. Определено влияние фракционного состава наполнителя на плотность брикетов, изготовленных методом сухого прессования. Разработана технология производства бентонитовых блоков, обладающих свойством набухать при гидратации под воздействием солевых растворов.

## THE INFLUENCE OF BINDER FILLER ON THE DENSITY OF DRY-PRESSED BRIQUETTES MADE OF BENTONITE CLAY POWDER

*Tsitova N.V.<sup>1</sup>, Klimovich V.V.<sup>2</sup>, Deshkovsky V.N.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Design unitary enterprise "Kaliyproekt", Soligorsk, Belarus;

<sup>2</sup>LLC «Prostech Engineering», Saint-Petersburg

**Keywords:** bentonite, dry-pressed briquettes, pressing pressure, filler, waterproofing material, density, potassium salts, aggressive brines.

**Abstract.** The results of experimental work on the manufacture of bentonite briquettes by dry pressing, used as an active waterproofing material in the designs of waterproofing barriers, are presented. The relevance of the study is due to the fact that typical waterproofing materials based on bentonite clay, widely used in industrial and civil construction, do not exhibit the required characteristic swelling properties during hydration under the influence of salt solutions containing mainly chlorides in high concentrations in underground salt mine workings. Waterproofing barriers in potash mine workings are important to prevent water penetration and flooding, as aggressive waters cause salts to dissolve and create water-conducting channels. In laboratory conditions, the technology of dry pressing of bentonite clay powder of the PBMA brand was successfully tested, briquettes were produced based on pure bentonite clay powder without impurities and mixed with a filler - fine-grained quartz sand (washed, dried). Dependence of pressing pressure on percentage content of bentonite clay powder was established. The effect of the fractional composition of the filler on the density of briquettes made by dry pressing was determined. A technology has been developed for the production of bentonite blocks that have the property of swelling during hydration under the influence of salt solutions.

**Введение.** Еще до появления современных гидроизоляционных материалов повсеместно использовали бентонитовую глину в качестве гидроизоляции от поверхностных и грунтовых вод. Бентонит нашел широкое применение как модификатор вязкости, гелеобразователь и понизитель фильтрации в приготовлении буровых растворов для бурения скважин, как связующее в формовочных смесях и железорудных окатышах, а также как гидроизоляционный и адсорбционный материал в промышленном и гражданском

строительстве [1]. В настоящее время поиск новых направлений использования этого материала и изучение его свойств продолжают [2].

Материалы на основе бентонитовой глины применяют в горной промышленности при возведении гидроизоляционных перемычек для захоронения химических и ядерных отходов [3, 4] в отработанных рудниках. Исследования и практика показывают успешное применение бентонитовых материалов в шахтах [5].

В качестве одного из наиболее эффективных гидроизолирующих материалов в конструкциях, подобных запатентованной полезной модели «Активная шахтная гидроизоляционная перемычка» [6], рассматривают композиции на основе бентонитов, со свойственным характером набухающего и увеличивающегося в объеме в жидкой среде материала.

Гидроизоляционные перемычки в выработках калийных рудников играют важную роль в предотвращении проникновения, распространения вод и затопления. Это особенно важно при добыче калийных солей, так как контакт с агрессивными водами может привести к растворению солей и образованию водопроводящих каналов [7]. Одним из наиболее сложных и ответственных узлов в конструкциях гидроизоляционных перемычек калийных рудников является контакт между телом сооружения и приконтурными соляными породами. Предотвращение фильтрации минерализованных вод (агрессивных рассолов) по указанному контуру, является важным условием эксплуатации таких сооружений. Используемый в конструкциях гидроизоляционных перемычек для калийных рудников гидроизоляционный материал на основе бентонита будет подвергаться воздействию агрессивных рассолов, поэтому должен быть адаптирован к таким условиям.

Недропользователи в процессе эксплуатации рудников своевременно и заблаговременно, по мере накопления и осмысления поступающей дополнительной информации, принимают необходимые меры для предотвращения непредвиденных и аварийных ситуаций, связанных с поступлением высоконапорных вод (агрессивных рассолов) в подземные горные выработки калийных и соляных рудников в случае нарушения водозащитных отложений [8].

Поскольку в шахтных натуральных условиях гидроизоляционная перемычка будет находиться под значительным гидростатическим, а в определенных случаях, и под гидродинамическим давлением поступающего рассола, конструкция сооружения должна сохранять устойчивость и рассчитываться с учетом воздействия набухания бентонитового материала.

Большинство гидроизоляционных материалов для нужд горной промышленности на основе бентонитовой глины изготавливают по специальным заказам потребителей данных материалов. Широко применяемые в промышленном и гражданском строительстве бентонитовые материалы не проявляют требуемые характерные свойства набухания под воздействием агрессивных рассолов, содержащих хлориды в высокой концентрации [9, 10].

**Материалы и методы исследований.** Предстояло выполнить комплекс исследований и определить:

- 1) способность образцов бентонитового глинопорошка к набуханию под воздействием минерализованных вод (рассолов – водных растворов хлоридов) и под воздействием пресной воды;
- 2) способность образцов бентонитового материала предотвращать фильтрацию жидкости в ограниченном пространстве при набухании под воздействием рассолов;
- 3) влияние связующего наполнителя на плотность сухопрессованных гидроизоляционных брикетов из бентонитового глинопорошка.

Ранее проведенными исследованиями установлена способность к набуханию некоторых марок бентонитового глинопорошка и определена активность процесса набухания в зависимости от солевого состава воздействующей жидкости. После набухания образуется плотный, однородный гель, способный в замкнутом пространстве существенно уменьшать фильтрацию жидкости [10].

В лабораторных условиях проведены опытные работы по изготовлению бентонитовых брикетов методом сухого прессования с целью – разработать активный гидроизоляционный материал для защиты калийных рудников от проникновения рассолов. В качестве эталона в экспериментах по разработке рецептуры и опытных работах по прессованию брикетов использован кальциевый бентонит марки ПБМА производства ЗАО «Керамзит» (п. Мирный, Россия).

Основным требованием для производства бентонитовых брикетов является соответствие двум условиям одновременно:

- 1) плотность брикетов в сухом состоянии  $1,7 \text{ г/см}^3$  и более;
- 2) начальная влажность менее 10% (бентонитовый глинопорошок в воздушно-сухом состоянии).

Оба требования одновременно достижимы только при сухом прессовании бентонита.

**Результаты.** Бентонитовый глинопорошок насыпной плотностью  $0,85 \text{ г/см}^3$  в воздушно-сухом состоянии спрессовывали в цилиндрические образцы-брикеты с помощью гидравлического пресса ПММ-125 (одностороннее прессование). Площадь поверхности прессования  $34,2 \text{ см}^2$ , давление прессования регулировали до формирования спрессованного образца-брикета правильной геометрической формы диаметром 66 мм с максимальными параметрами плотности.

Навеску формовочного материала массой 120 г засыпали в форму (металлический цилиндр: высота – 94,5 мм, внутренний диаметр – 66 мм) на высоту 41 мм. На поверхность материала в форму помещали штамп, к которому прилагали нагрузку с помощью нажимной плиты гидравлического пресса. Спрессованный образец-брикет извлекали из формы выдавливанием штампом (табл. 1).

С увеличением нагрузки прессования получили уменьшение высоты образцов-брикетов с повышением их плотности. Силовые характеристики пресса ПММ-125 не позволили получить брикеты большего диаметра методом сухого прессования для формовочного материала на основе 100 % бентонитового глинопорошка.

Далее эксперименты выполнены на формовочных смесях из бентонитового глинопорошка и речного промытого и высушенного кварцевого песка фракционного состава 0-3 мм и 0-4 мм (табл. 2.). С увеличением массовой доли песка в формовочной смеси возможно снижение нагрузки прессования для получения приемлемой геометрии и качества поверхностей брикетов [11], но при этом снижается способность сухопрессованных бентонитовых блоков к набуханию и развитию давления набухания в замкнутом пространстве под воздействием жидкости.

Изучена формуемость и определены наиболее оптимальные составы сухих смесей с массовым содержанием песка от 40 до 50%, что в том числе обеспечивает приемлемые характерные свойства набухания сухопрессованных бентонитовых блоков под воздействием минерализованных вод [9, 10].

Табл. 1. Плотность спрессованных образцов-брикетов из 100 % бентонита без примесей

| Образец<br>номер | Нагрузка,<br>кН | Давление прессования,<br>МПа | Высота образца,<br>см | Плотность образца,<br>$\text{г/см}^3$ |
|------------------|-----------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| 1                | 50              | 14,6                         | 2,45                  | 1,41                                  |
| 2                | 80              | 23,3                         | 2,3                   | 1,51                                  |
| 3                | 100             | 29,2                         | 2,2                   | 1,58                                  |
| 4                | 120             | 35                           | 2,15                  | 1,62                                  |
| 5                | 140             | 40,9                         | 2,15                  | 1,61                                  |
| 6                | 160             | 46,7                         | 2,1                   | 1,66                                  |
| 7                | 180             | 52,6                         | 2,1                   | 1,66                                  |
| 8                | 200             | 58,4                         | 2,05                  | 1,7                                   |
| 9                | 220             | 64,3                         | 2,05                  | 1,67                                  |
| 10               | 240             | 70,1                         | разрушен              | разрушен                              |

Табл. 2. Плотность спрессованных образцов-брикетов из различных составов с наполнителем

| Нагрузка, кН | Давление прессования, МПа | Плотность образца, г/см <sup>3</sup> |                                 |                                 |                                 |
|--------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|              |                           | 50% бентонит + 50% песок 0-4 мм      | 50% бентонит + 50% песок 0-3 мм | 60% бентонит + 40% песок 0-4 мм | 60% бентонит + 40% песок 0-3 мм |
| 80           | 23,3                      | 1,68                                 | 1,73                            | 1,73                            | 1,69                            |
| 100          | 29,2                      | 1,71                                 | 1,78                            | 1,74                            | 1,71                            |
| 120          | 35                        | 1,81                                 | 1,81                            | 1,79                            | 1,78                            |
| 140          | 40,9                      | 1,76                                 | 1,82                            | 1,81                            | 1,83                            |
| 160          | 46,7                      | 1,81                                 | 1,83                            | 1,85                            | 1,88                            |
| 180          | 52,6                      | 1,83                                 | 1,87                            | 1,86                            | 1,88                            |
| 200          | 58,4                      | разрушен                             | разрушен                        | разрушен                        | разрушен                        |

Фракционный состав используемого кварцевого песка в значительной степени влияет на качество поверхностей спрессованного бентонитового брикета. Проблемы прессования брикетов на основе формовочных смесей с песком крупностью 0-4 мм были связаны с частицами крупных фракций 3-4 мм. Образцы крошились и скалывались. Наличие крупных фракций размером 3-4 мм в составе формовочной смеси создает дополнительные трещины, сколы на ребрах и гранях брикетов.

Особое внимание в ходе экспериментов уделено физическому состоянию спрессованных брикетов. Благодаря оптимизации режимов прессования была достигнута сохранность геометрической формы образцов, гладкость рабочих поверхностей без видимых дефектов и трещин после извлечения из пресс-формы. Полученные брикеты приобрели высокую плотность и прочность, что обеспечило им приемлемые свойства для транспортировки и хранения.

Результаты исследований показывают, что использование кварцевого песка фракционным составом 0-3 мм в формовочной смеси для изготовления брикетов привело к улучшению их качества. Спрессованные образцы-брикеты получились однородными по составу, без видимых нарушений и сколов.

По результатам определения плотности полученных образцов-брикетов при сухом прессовании построены графики зависимости плотности образцов от давления прессования (рис. 1).

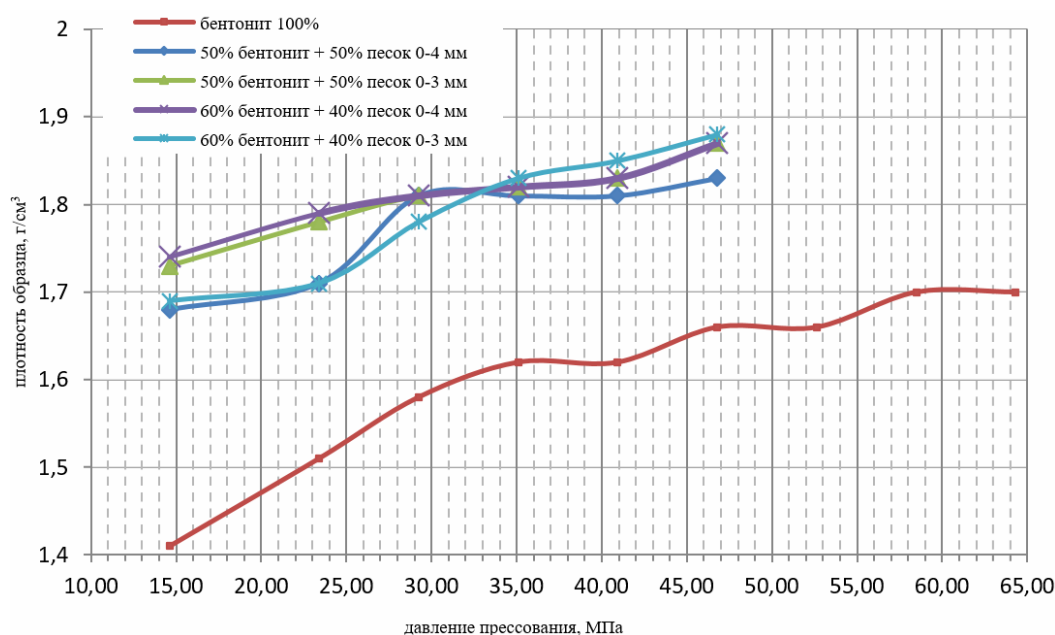


Рис. 1. Плотность образцов-брикетов в зависимости от состава формовочной смеси и давления прессования

Для достижения плотности  $1,7 \text{ г/см}^3$  спрессованного образца-брикета из 100% бентонитового глинопорошка ПБМА потребовалось приложить нагрузку прессования 200 кН, а для достижения такой же плотности брикета из формовочной смеси с наполнителем достаточно приложить нагрузку прессования 80-100 кН, что более приемлемо для условий промышленного производства. Плотность спрессованных бентонитовых образцов-брикетов с наполнителем из кварцевого песка составила от 1,68 до  $1,73 \text{ г/см}^3$  при нагрузке прессования 80 кН и увеличивалась до  $1,88 \text{ г/см}^3$  при нагрузке прессования 180 кН, дальнейшее увеличение нагрузки прессования привело к разрушению образцов (дефект расслоения после прессования при выталкивании).

**Выводы.** Для достижения качества и эксплуатационных характеристик гидроизоляционных блоков и брикетов, получаемых путем сухого прессования с приложением возможно меньшей нагрузки прессования рекомендуется использование формовочных смесей на основе бентонитового глинопорошка и кварцевого песка. При прессовании брикетов, состав формовочной смеси и давление прессования напрямую влияет на плотность готовых изделий. Рекомендуемый диапазон давления прессования от 30 до 50 МПа для получения высокой плотности брикетированных изделий из сухой формовочной смеси бентонитового глинопорошка с наполнителем.

В качестве связующего наполнителя хорошо зарекомендовал себя речной промытый и высушенный кварцевый песок с диапазоном фракций 0-3 мм. Оптимальный объем связующего наполнителя в формовочной смеси составляет по массе от 40 до 50%, при котором сохраняются требуемые характерные свойства гидратации и набухания сухопрессованных бентонитовых брикетов под воздействием минерализованных вод.

При использовании строительного материала на основе бентонита для возведения гидроизоляционных сооружений или их узлов благодаря пластичности таких составов, происходит герметизация сопрягаемых элементов конструкций, заполнение трещин, дефектов поверхности [12].

Промышленное производство строительных материалов из бентонита для использования в условиях калийных шахт не развито в силу ограниченности спроса. В то же время при широком развитии технологии прессования для изготовления кирпича, облицовочной плитки и других изделий представляется возможным при наличии рецептуры формовочной смеси, требуемых эксплуатационных характеристик производство бентонитовых изделий.

#### Список литературы

1. Майер Р.А., Якимов Г.Д., Шангина Н.Н., Самойлов С.А. Применение бентонитовой глины в качестве гидроизоляционного материала // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2024. – Т. 21, №2. – С. 380-390. – doi.org/10.20295/1815-588X-2024-02-380-390.
2. Павел Сёмин, «Компания «Бентонит»: Мы создали ряд решений из бентонитовых глин для надёжной и долговременной гидроизоляции пунктов финального захоронения РАО, но развиваемся во многих направлениях применения этой уникальной смектитовой породы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.atomic-energy.ru/interviews/2024/06/13/146670>.
3. Баймдик Ю. Подземные водозащитные сооружения в условиях сдвижения породного массива – вызов производству строительных работ // Глюкауф Майнинг Репорт. – 2015. – № 2. – С. 36-41.
4. Gruner M., Rum-phorst K., Sitz P. Design and Emplacement of Bentonite Barriers // Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository: International Conference 16-18 June 2008, Prague / Czech Technical University in Prague – P. 13-1–13-9.
5. Corina A.N., Wollenweber J., Fischer H., Van der Valk K., Castelein K., Moghadam A., Heerens G-J. Evaluation of Bentonite Application for the Abandonment of Deep Geo-energy Wells // Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, vol. 56, pp. 301-317. doi.org/10.1007/s00603-022-03052-x.
6. Патент №10525 Респ. Беларусь. Активная шахтная гидроизоляционная перемычка / В.Н. Дешковский, С.Г. Шутин – Заявка №u20140241 от 25.06.2014; опубл. 28.02.2015 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. – №1.
7. Асанов В.А., Евсеев А.В. Влияние рассолов на механические свойства соляных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – №2. – С. 363-366.
8. Барях А.А., Санфиоров И.А., Дягилев Р.Н. Мониторинг последствий затопления калийного рудника // Горный журнал. – 2013. – №6. – С. 34-39.

9. Титова Н.В., Шутин С.Г., Шаповалов В.И. Использование бентонитового материала при возведении гидроизоляционных сооружений в подземных горных выработках калийных шахт // Актуальные направления современных научных исследований и их роль в развитии общества, экономики и государства: Материалы конференции. – СПб.: Изд-во СПбЦСА, 2024. – С. 16-26.
10. Титова Н.В., Шемет С.Ф., Климович В.В., Шутин С.Г. Особенности набухания бентонитовых глин различного происхождения в конструкциях гидроизоляционных шахтных перемычек // Горная механика и машиностроение. – 2023. – №3. – С. 85-92.
11. Вознесенский Е.А., Карпенко Ф.С., Крупская В.В., Закусин С.В. Ключевые геотехнические характеристики глинистых материалов для инженерных барьеров безопасности ПГЗРО на участке «Енисейский» // Радиоактивные отходы. – 2024. – №3(28). – С. 43-58. – doi.org/10.25283/2587-9707-2024-3-43-58.
12. Муртазаев С-А.Ю., Сайдумов М.С., Саламанова М.Ш., Гацаев З.Ш. Перспективы использования бентонитовых глин в составах бетонных композитов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2020. – Т. XVI, №4(22). – С. 70-76. – doi.org/10.34708/GSTOU.2020.49.91.010.

## References

1. Mayer R.A., Yakimov G.D., Shangina N.N., Samoilov S.A. Use of bentonite clay as a waterproofing material // Bulletin of the St. Petersburg University of Railway Engineering. 2024, vol. 21, no. 2, pp. 380-390. doi.org/10.20295/1815-588X-2024-02-380-390.
2. Pavel Semin, «Bentonite Company»: We have created a number of bentonite clay solutions for reliable and long-term waterproofing of the final disposal sites of radioactive waste, but we are developing in many areas of application of this unique smectite rock [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.atomic-energy.ru/interviews/2024/06/13/146670>.
3. Baimdik Yu. Underground water protection structures under conditions of rock mass displacement – a challenge for construction work // Gluckauf Mining Report. 2015, no. 2, pp. 36-41.
4. Gruner M., Rum-phorst K., Sitz P. Design and Emplacement of Bentonite Barriers // Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository: International Conference 16-18 June 2008, Prague / Czech Technical University in Prague – P. 13-1–13-9.
5. Corina A.N., Wollenweber J., Fischer H., Van der Valk K., Castelein K., Moghadam A., Heerens G-J. Evaluation of Bentonite Application for the Abandonment of Deep Geo-energy Wells // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2023, vol. 56, pp. 301-317. doi.org/10.1007/s00603-022-03052-x.
6. Patent No. 10525 Republic of Belarus. Active mine waterproofing bulkhead / V.N. Deshkovsky, S.G. Shutin – Application No. u20140241 from 25.06.2014; publ. 28.02.2015 // Official Bulletin / Nat. Center for Intellectual Property. – 2015. – No. 1.
7. Asanov V.A., Evseev A.V., Influence of brines on the mechanical properties of salt rocks // Mining information and analytical bulletin. 2010, no. 2, pp. 363-366.
8. Baryakh A.A., Sanfirov I.A., Dyagilev R.N. Monitoring the consequences of flooding of a potash mine // Mining Journal. 2013, no. 6, pp. 34-39.
9. Titova N.V., Shutin S.G., Shapovalov V.I. Use of bentonite material in the construction of waterproofing structures in underground workings of potash mines // Current trends in modern scientific research and their role in the development of society, economy and state: Conference materials. – SPb.: Publ. house SPbCSA, 2024. – P. 16-26.
10. Titova N.V., Shemet S.F., Klimovich V.V., Shutin S.G. Features of swelling of bentonite clays of various origins in the structures of waterproofing mine bulkheads // Mining mechanics and mechanical engineering. 2023, no. 3, pp. 85-92.
11. Voznesensky E.A., Karpenko F.S., Krupskaya V.V., Zakusin S.V. Key geotechnical characteristics of clay materials for engineering safety barriers of the waste disposal plant at the Yenisei site // Radioactive waste. 2024, no. 3(28), pp. 43-58. doi.org/10.25283/2587-9707-2024-3-43-58.
12. Murtazaev S-A.Yu., Saidumov M.S., Salamanova M.Sh., Gatsaev Z.Sh. Prospects for the use of bentonite clays in concrete composites // Bulletin of GSNTU. Technical Sciences. 2020, vol. XVI, no. 4(22), pp. 70-76. doi.org/10.34708/GSTOU.2020.49.91.010.

## Сведения об авторах:

|                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Титова Наталья Владимировна</b> – ведущий инженер научно-исследовательского отдела технологии горных работ   |
| <b>Климович Владислав Викторович</b> – эксперт лаборатории геомеханики                                          |
| <b>Дешковский Василий Николаевич</b> – кандидат технических наук, руководитель лаборатории – главный геомеханик |
| <a href="mailto:ntitova@bmci.by">ntitova@bmci.by</a>                                                            |

## Information about authors:

|                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Tsitova Natalia Vladimirovna</b> – lead engineer of the mining technology research Department                   |
| <b>Klimovich Vladislav Viktorovich</b> –expert of the laboratory of geomechanics                                   |
| <b>Deshkovsky Vasily Nikolaevich</b> – candidate of technical sciences, head of the laboratory – chief geomechanic |

Получена 10.02.2026