Оригинальная статья / Original Paper

https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-74-78

Цифровая база параметров технологии формирования монолитных закладочных массивов на основе консолидации солеотходов

П.О. Зубков[1] ✉, И.Л. Никифорова[2]
[1] *Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация*
[2] *Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, г. Москва, Российская Федерация*
✉ zubkov_p@ipkonran.ru

Резюме: Формирование монолитных закладочных массивов на основе консолидации солеотходов предусмотрено инновационной геотехнологией, направленной на решение экологических и технологических проблем горнодобывающей и химической промышленности. Ключевым элементом данной геотехнологии является цифровая база данных, обеспечивающая контроль и оптимизацию параметров процесса закладки.
В статье представлена цифровая база, обеспечивающая интеграцию с системами моделирования, которая позволяет прогнозировать свойства закладочных массивов, а также включает инструменты визуализации данных и статистического анализа. Для эффективного управления предлагается использование современных систем управления базами данных с защитой от несанкционированного доступа. Создание цифровой базы данных параметров закладочных массивов открывает возможности для комплексного мониторинга процессов консолидации, включая подбор гранулометрического состава смеси, контроль физико-механических характеристик и прогнозирование свойств массива во времени. Учет таких параметров, как плотность, влажность, пористость, время упрочнения, прочность и модуль деформации, позволяет оптимизировать технологические процессы и обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики закладки.
Дальнейшее развитие технологии предполагает интеграцию с системами автоматизированного проектирования и системами управления производством, что повысит автоматизацию и точность процессов. Внедрение такой системы способствует оптимизации ресурсов, повышению безопасности и снижению экологической нагрузки в горнодобывающих регионах.

Ключевые слова: закладка, закладочные массивы, консолидация, цифровизация, база данных, геотехнология

Для цитирования: Зубков П.О., Никифорова И.Л. Цифровая база параметров технологии формирования монолитных закладочных массивов на основе консолидации солеотходов. *Горная промышленность*. 2025;(5S):74–78. https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-74-78

Digital database of parameters for monolithic backfill formation technology based on salt waste consolidation

P.O. Zubkov[1]✉, I.L. Nikiforova[2]
[1] *Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*
[2] *All-Russian Scientific-research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky, Moscow, Russian Federation*
✉ zubkov_p@ipkonran.ru

Abstract: Formation of monolithic backfill structures based on salt waste consolidation represents an innovative geotechnology aimed at addressing environmental and technological challenges in the mining industry. A key component of this technology is a digital database that enables monitoring and optimization of the backfilling process parameters.
The article presents a digital database that ensures integration with modelling systems and enables prediction of the backfill properties. It also includes tools for data visualization and statistical analysis. Efficient data management requires modern DBMS solutions with robust access security. Creation of a digital database of backfill parameters opens up opportunities for comprehensive monitoring of the consolidation processes, including selection of the particle size distribution of the mixture, control of physical and mechanical characteristics, and prediction of the backfill mass properties over time. Accounting for such

parameters as density, moisture content, porosity, setting time, strength, and deformation modulus makes it possible to optimize technological processes and ensure the required operational characteristics of the backfill.
Further technological development envisions integration with CAD and production management systems, enhancing process automation and precision. Implementing this system will optimize resource utilization, improve safety, and reduce environmental impact in mining regions.

Keywords: backfill, backfill masses, consolidation, digitalization, database, mining system

For citation: Zubkov P.O., Nikiforova I.L. Digital database of parameters for monolithic backfill formation technology based on salt waste consolidation. *Russian Mining Industry.* 2025;(5S):74–78. (In Russ.) https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-5S-74-78

Введение

Формирование монолитных закладочных массивов на основе консолидации солеотходов является одной из перспективных технологий, способных одновременно решать задачи повышения безопасности горных работ, рационального использования техногенных отходов и минимизации экологического ущерба. В условиях роста объемов солевых хвостов и шламов, образующихся в горнодобывающей и химической промышленности, проблема их безопасного размещения и переработки приобретает стратегическое значение.

Традиционные методы утилизации солеотходов (складирование на поверхностных полигонах, гидроотвалы) сопровождаются высоким риском вторичного загрязнения почв и водных ресурсов, а также значительными затратами на их содержание. Использование данных отходов в качестве закладочного материала позволяет снизить нагрузку на окружающую среду, сократить объемы складируемых отходов и одновременно обеспечить эффективное заполнение выработанного пространства подземных рудников, что повышает устойчивость горных массивов и снижает вероятность аварийных обрушений.

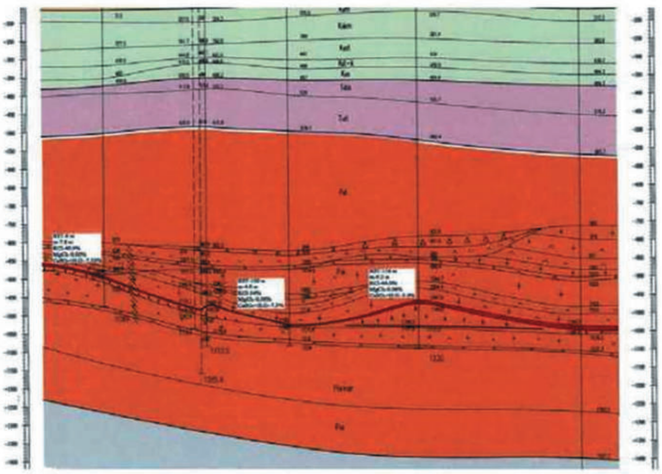


Рис. 1
Общая схема геологического строения соленосной толщи Гремячинского месторождения

Fig. 1
A general diagram of the geological structure of the salt-bearing strata at the Gremyachinskoe deposit

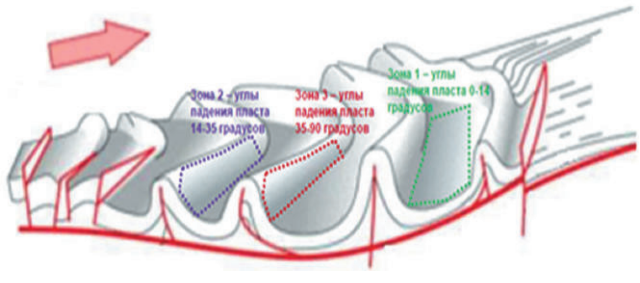


Рис. 2
Выкопировка с фактического сводного разреза по главному северо-западному вентиляционному штреку

Fig. 2
An extract from the actual composite section along the main north-western ventilation drift

В современных условиях развитие технологий закладки требует интеграции с цифровыми системами управления и контроля, обеспечивающими автоматизацию процессов, оперативное прогнозирование свойств закладочных массивов и повышение их качества. Создание цифровой базы данных с возможностью интеграции в системы автоматизированного проектирования и системы управления производством позволит обеспечить полный цикл мониторинга – от подбора состава смеси до контроля ее консолидации в подземных условиях.

Гремячинское месторождение калийных солей характеризуется достаточно сложными горно-геологическими, гидрогеологическими, геомеханическими, газодинамическими и горнотехническими условиями разработки, что связано с большой глубиной залегания – около 1000 м (рис. 1), крайней неоднородностью структуры и литологического состава продуктивного пласта и вмещающих пород. Кроме этого, месторождение характеризуется сложной морфологией продуктивной толщи (рис. 2).

Решение задачи

Формирование монолитных закладочных массивов на основе консолидации солеотходов представляет собой перспективную геотехнологию, обеспечивающую актуальное решение проблемы горнодобывающей промышленности, связанную с промышленной безопасностью горных работ и охраной окружающей среды [1; 2]. Цифровая база показателей этой технологии позволяет оптимизировать параметры технологических процессов, повысить эффективность и обеспечить надежное прогнозирование результатов.

Цифровая база данных, предназначенная для управления процессом консолидации солеотходов, должна содержать комплексную информацию о физико-механических свойствах используемых материалов. В первую очередь требуется контроль гранулометрического состава компонентов смеси – процентного содержания частиц различных размеров с определением среднего и критического диаметра, оказывающих непосредственное влияние на плотность и прочность формируемого закладочного массива. Практика показывает, что правильный подбор грану-

Таблица 1
Контролируемые физико-механические характеристики

Table 1
The controlled physical and mechanical characteristics

Характеристики	Солеотходы	Закладочная смесь	Закладочный массив
Гранулометрический состав	+		
Плотность	+		
Влажность	+		
Время упрочнения		+	
Растекаемость		+	
Угол откоса, град		+	
Рассолонасыщение		+	
Плотность породы		+	
Пористость			+
Прочность			+
Модуль деформации			+
Удельное сцепление			+
Угол внутреннего трения			+
Модуль деформации			+
Сопротивление разрыву			+

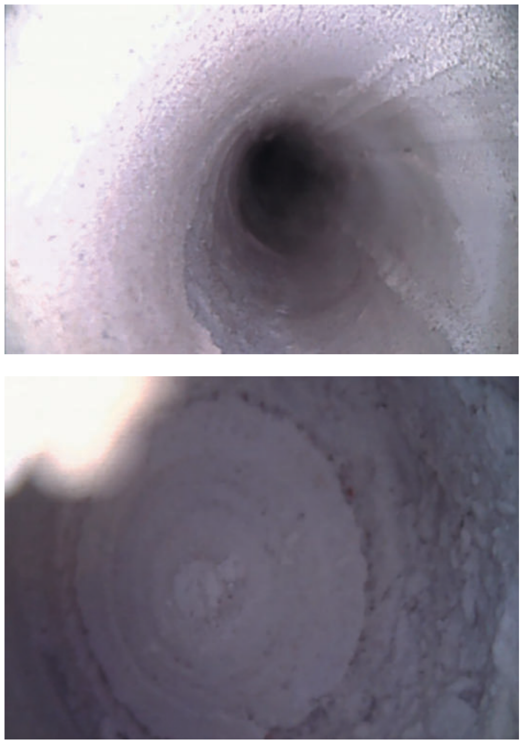
а)
б)


Рис. 3
Фотографии, сделанные видеоэндоскопом из закладочной скважины:
а – вход в закладочный массив;
б – забой скважины

Fig. 3
Photographs taken with a video endoscope from inside of the backfill borehole:
a – entry into the backfill mass;
б – borehole bottom

лометрического состава способствует повышению степени уплотнения и уменьшению пористости, что положительно сказывается на конечной прочности массива [3; 4].

Данные по гранулометрии рекомендуется представлять в виде гистограмм или таблиц с указанием средних, минимальных и максимальных значений. Для корректного проектирования процесса консолидации важен учет параметров технологического процесса, включая давление подачи смеси, которое определяет степень уплотнения солеотходов и напрямую связано с показателями плотности и прочности получаемого массива [3].

Не менее значимым параметром является положительность консолидации – время, необходимое для достижения требуемой прочности. Данный показатель зависит от давления подачи, гранулометрического и вещественного состава, а также от температуры смеси в момент укладки. Экспериментальные исследования показывают, что изменение температуры твердения существенно влияет на кинетику кристаллизационных процессов и, как следствие, на развитие прочностных характеристик закладочного материала [5].

Проектирование цифровой базы данных должно предусматривать также фиксацию схемы укладки солеотходов и описание используемых средств (послойная укладка, уплотнение вибрацией и др.), поскольку способ укладки определяет равномерность консолидации и распределение напряжений в массиве [6; 7].

Инструментально-исследовательская база

Для исследования различных процессов в подземном руднике требуются соответствующие измерительные приборы. Для определения пустот рекомендованы ультразвуковое обследование и видеоэндоскоп (рис. 3).

Фиксация обрушений и трещин в скважинах, пробуренных в закладочном массиве, имеет принципиальное значение для обеспечения надежности и безопасности буровзрывных работ. В отличие от скальных пород закладочный массив характеризуется пониженной прочностью, неоднородной структурой и высокой трещиноватостью, что обусловливает повышенную вероятность деформации стенок скважин и потери их эксплуатационной пригодности [8; 9].

Обрушения скважин в закладочном массиве возникают преимущественно вследствие недостаточной связности материала, наличия пустот или повышенной влажности. Подобные дефекты затрудняют или делают невозможной зарядку скважины взрывчатыми веществами, увеличивают риск утечек и неполного срабатывания зарядов. Фотографическая фиксация позволяет документировать состояние устья и ствола скважины, выявлять характер обрушений, а также оценивать масштабы разрушений. Эти данные необходимы для принятия технических решений: закрепления устья, применения обсадных труб или бурения дополнительных скважин [1].

Трещинообразование в закладочном массиве является не менее распространённым явлением. Мелкие трещины могут привести к утечке взрывчатых веществ, нарушению герметичности зарядов и изменению характера действия взрыва. Систематическая фотофиксация трещин обеспечивает раннее выявление дефектов и возможность оценки их развития во времени. При этом использование масштабирующих элементов на фотоснимках (линейка, рейка)

1 Design and Installation of Monitoring Wells. January 16, 2018. SESDGUID-101-R2. 33 p. Available at: https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-01/documents/design_and_installation_of_monitoring_wells.pdf (accessed: 21.08.2025).

Рис. 4
Система дистанционного контроля расстояния (ДИСКОНТР)

Fig. 4
The remote distance control system (DISCONTR)

Рис. 5
Процесс измерения прочностных характеристик закладочного массива с применением аппаратуры «Березка» (также использовалась дублирующая аппаратура «АНЧ-1»)

Fig. 5
The process of measuring the strength properties of the backfill mass using the Berezka device, as well as the ANCh-1 backup device

и видеодиагностика внутренних стенок ствола позволяют достоверно оценить состояние массива. Полученные данные интегрируются в буровые журналы и паспорта буровзрывных работ, что обеспечивает объективность отчетности и способствует выработке корректирующих мер [10; 11].

Таким образом, фотографическая фиксация обрушений и трещин в скважинах, пробуренных в закладочном массиве, является неотъемлемым элементом производственного контроля.

Для различного рода деформаций, таких как конвергенция почвы, деформация кровли, усадка массива и горизонтального смещения пород, рекомендуется использование маркшейдерских реперов для контроля деформации, датчиков специально разработанных ДИСКОНТР (рис. 4).

Система «ДИСКОНТР» предназначена для контроля расстояния от датчиков до поверхности и передачи этого расстояния на центральный блок с сохранением на внешний носитель и передачи этого расстояния на центральный блок с сохранением на внешнем носителе. Для экономии заряда встроенных аккумуляторов в датчики измерения расстояния, из-за сложности доступа к ним, внедрена система энергосбережения на датчиках расстояния. После передачи данных датчики входят в режим экономии до следующей передачи данных. Центральный блок находится в постоянной работе в режиме ожидания данных с датчиков.

Для исследования расслоения закладочного массива после высыхания требуются электрометрическая аппаратура, питающие и приемные электроды (рис. 5).

При изучении прочностных характеристик закладочного массива, целика, кровли и почвы выработок необходим отбор кернового материала из консолидированных солеотходов для контрольных исследований. Для исследования влияния увлажненного закладочного массива на целик и почву, а также для изучения динамики потери влаги используются влагомеры.

Цифровая база должна быть интегрирована с системами моделирования процесса закладки, позволяющей прогнозировать свойства закладочного массива на заданный временной период.

Для эффективного управления данными необходимо использовать современную систему управления базами данных (СУБД), обеспечивающую надежное хранение и быстрый поиск информации по различным параметрам, таким как визуализация данных, графическое их представление, инструменты для статистической обработки результатов, обеспечивающие безопасность и защиту данных от несанкционированного доступа.

Обсуждение результатов

Создание цифровой базы данных параметров закладочных массивов открывает воз-можности для комплексного мониторинга процессов консолидации, включая подбор гранулометрического состава смеси, контроль физико-механических характеристик и прогнозирование свойств массива во времени. Учет таких параметров, как плотность, влажность, пористость, время упрочнения, прочность и модуль деформации, позволяет оптимизировать технологические процессы и обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики закладки.

Важным элементом производственного контроля выступает инструментально-исследовательская база, включающая ультразвуковые средства, видеоэндоскопы, электрометрическую аппаратуру, влагомеры и маркшейдерские реперы. Их использование обеспечивает достоверное определение дефектов и характеристик закладочного массива в подземных условиях. Особое значение имеет фото- и видеофиксация обрушений и трещин в скважинах закладочного массива, которая позволяет своевременно выявлять деформации, предотвращать аварийные ситуации.

Интеграция цифровой базы данных с системами автоматизированного проектирования и управления производством обеспечивает создание единого контура управления закладочными процессами. Это позволяет повысить эффективность, надёжность и предсказуемость технологических решений, а также обеспечить устойчивое и безопасное развитие горных работ.

Заключение

Цифровая база параметров технологии формирования монолитных закладочных массивов на основе консолидации солеотходов является важным инструментом для оптимизации параметров технологических процессов, повышения эффективности и обеспечения безопасности горных работ. Создание и развитие такой базы данных требует комплексного подхода, включающего в себя сбор и обработку информации, разработку математических моделей и создание эффективной системы управления геотехнологическими процессами. Дальнейшее развитие этой технологии предполагает интеграцию с системами автоматизированного проектирования и управления производством.

Список литературы / References

1. Татарников В.И. Применение технологий разработки месторождений калийных солей с управляемым воздействием на формируемый закладочный массив. В кн.: *Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: материалы 6-й конференции Международной научной школы академика РАН К.Н. Трубецкого, посвященная 300-летию Российской академии наук, г. Москва, 17–21 июня 2024 г.* М.: ИПКОН РАН; 2024. С. 264–266.
2. Татарников В.И. Влияние добавок отходов переработки руд фосфорита на механические характеристики консолидирующегося закладочного массива при освоении Гремячинского месторождения. В кн.: *Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: сборник материалов 16-й Международной научной школы молодых ученых и специалистов, г. Москва, 23–27 октября 2023 г.* М.: ИПКОН РАН; 2023. С. 191–194.
3. Thanayamwatte P., Sivakugan N., To P. Hydraulic backfill consolidation in underground mine stopes. I*nternational Journal of Geosynthetics and Ground Engineering.* 2024;10(3):50. https://doi.org/10.1007/s40891-024-00560-4
4. Belem T., El Aatar O., Bussière B., Benzaazoua M. Gravity-driven 1-D consolidation of cemented paste backfill in 3-m-high columns. *Innovative Infrastructure Solutions.* 2016;1(1):37. https://doi.org/10.1007/s41062-016-0039-2
5. Pan Z., Zhou K., Wang Y., Lin Y., Saleem F. Comparative analysis of strength and deformation behavior of cemented tailings backfill under curing temperature effect. *Materials.* 2022;15(10):3491. https://doi.org/10.3390/ma15103491
6. Bai E., Guo W., Tan Y., Yang D. The analysis and application of granular backfill material to reduce surface subsidence in China's northwest coal mining area. *PLoS ONE.* 2018;13(7):e0201112. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201112
7. Yubero M.T., Olivella S., Gens A., Bonet E., Lloret A., Alfonso P. Analysis of the process of compaction movements of deposits of crushed salt tailings. *Engineering Geology.* 2021;293:106290. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106290
8. Hawkins J.W., Evans R.S. Uses of the borehole camera in hydrologic investigations related to coal mining. In: Proceedings America Society of Mining and Reclamation. 2004, pp. 847–859. https://doi.org/10.21000/JASMR04010847
9. Wang C.-Y., Law K.T. Review of borehole camera technology. *Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao / Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering.* 2005;24(19):3440–3448.
10. Brent G.F., Smith G.E. The detection of blast damage by borehole pressure measurement. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy.* 2000;100(1):17–24. Available at: https://www.saimm.co.za/Journal/v100n01p017.pdf (accessed: 29.06.2025).
11. Смирнов А.В. Обобщение натурных исследований процесса деформирования породного массива в окрестности протяженных выработок. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал.* 2015;(5):75–80.
Smirnov A.V. The generalization of field investigations of rock massif deformation in the neigborhood of extended mine workings. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Gornyy Zhurnal.* 2015;(5):75–80. (In Russ.)

Информация об авторах

Зубков Павел Олегович – младший научный сотрудник отдела проблем моделирования и управления горнотехническими системами, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: zubkov_p@ipkonran.ru

Никифорова Ирина Львовна – главный специалист, Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: nikiforova495@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 19.08.2025
Поступила после рецензирования: 06.10.2025
Принята к публикации: 08.10.2025

Information about the authors

Pavel O. Zubkov – Junior Research Associate, Department of Challenges in Modelling and Management of Mining Systems, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: zubkov_p@ipkonran.ru

Irina L. Nikiforova – Chief Specialist, All-Russian Scientific-research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky, Moscow, Russian Federation; e-mail: nikiforova495@mail.ru

Article info

Received: 19.08.2025
Revised: 06.10.2025
Accepted: 08.10.2025