

Научная статья

УДК 622.272.6

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-167-174

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО НАСЫЩЕНИЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ, ТРАНСПОРТИРУЕМЫХ В ПОДЗЕМНЫЕ ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ****Песочинский Максим Сергеевич,  
Анушенков Александр Николаевич**

Сибирский федеральный университет

\* для корреспонденции: grice007@yandex.ru

**Информация о статье**

Поступила:

01 июля 2024 г.

Одобрена после  
рецензирования:

22 апреля 2025 г.

Принята к публикации:

30 апреля 2025 г.

Опубликована:

11 июня 2025 г.

**Ключевые слова:***мелкодисперсное насыщение,  
гидродинамическая  
кавитация, аэратор,  
закладочная смесь,  
трубопроводная магистраль.***Аннотация.**

Исследование посвящено критической задаче транспортировки твердеющих закладочных смесей в подземных горных выработках, от эффективности которой зависит не только устойчивость горных массивов, но и общий уровень производительности добычных операций. Особое внимание уделено основным проблемам, связанным с использованием традиционных технологий, среди которых чрезмерная вязкость материалов, усиленный износ оборудования вследствие абразивного воздействия и ограниченные возможности транспортировки на большие расстояния. Эти ограничения существенно сказываются на экономической оправданности и технологической устойчивости процессов. Цель работы заключалась в создании инновационного подхода к транспортировке смесей, предполагающего применение технологии мелкодисперсной аэрации. Использование аэратора, насыщавшего смесь мельчайшими пузырьками воздуха, обеспечило значительное снижение плотности и вязкости материала. Это позволило уменьшить сопротивление потоку, расширить расстояние доставки и сократить затраты на энергообеспечение. В ходе реализации метода удалось удвоить протяженность самотечного транспортирования без ущерба для нормативных показателей текучести смеси. Предложенная технология показала свою эффективность в минимизации эксплуатационных расходов, повышении надежности систем и обеспечении качественного заполнения выработанного пространства. Выводы исследования свидетельствуют о высокой перспективности применения мелкодисперсной аэрации в горнодобывающей отрасли, направленной на повышение технологической и экономической результативности.

**Для цитирования:** Песочинский М.С., Анушенков А.Н. Эффективность мелкодисперсного насыщения закладочных смесей, транспортируемых в подземные горные выработки // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 2 (168). С. 167-174. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-167-174, EDN: IKEBFC

**Введение**

Транспортировка твердеющих закладочных смесей в условиях подземных выработок представляет собой сложный и ключевой процесс, от которого напрямую зависят надежность и производительность горнодобывающего производства. Закладка пустот играет критическую роль в управлении горным давлением, обеспечивая устойчивость

подземных конструкций и создавая искусственные массивы, компенсирующие последствия извлечения полезных ископаемых. Однако реализация этого процесса сталкивается с рядом препятствий, существенно влияющих на его эффективность и экономическую целесообразность.

Среди наиболее острых проблем следует выделить ускоренный износ трубопроводов,

обусловленный высокой абразивностью твердых частиц, входящих в состав смесей. Это неизбежно влечет за собой значительное увеличение затрат на техническое обслуживание и замену оборудования. Не менее серьезным является риск засоров трубопроводной системы, возникающий вследствие изменения реологических свойств смесей в процессе транспортировки. Такие засоры не только приводят к утрате части смеси, но и существенно увеличивают временные и финансовые затраты на восстановление работоспособности системы, снижая общую производительность складочного процесса [1].

Недостаточная дальность транспортировки складочных смесей остается серьезным препятствием для оптимизации горных работ. При увеличении расстояний потери напора резко возрастают из-за высокой вязкости и плотности материала, что делает равномерное распределение смеси в удаленных выработках крайне затруднительным. Такое ограничение не только снижает эксплуатационный потенциал системы, но и создает риски для безопасности, так как несоответствие в укладке материала способно вызвать неконтролируемые изменения давления внутри горных массивов, нарушая их стабильность [2, 3].

Методы, применяемые в настоящее время, хотя и являются стандартом отрасли, не способны в полной мере удовлетворить требования современных горнодобывающих предприятий. Их ключевые недостатки включают ограниченную дальность доставки и недостаточную устойчивость смеси при транспортировке, что ограничивает использование таких технологий в сложных производственных условиях. Эти ограничения подчеркивают необходимость разработки инновационных решений, которые обеспечат надежность доставки, минимальные потери материала и снижение риска забутовки.

На этом фоне перспективным подходом становится использование технологии аэрации складочных смесей, которая ориентирована на уменьшение их плотности и вязкости. Применение данного метода позволяет не только увеличить расстояние транспортирования, но и значительно уменьшить износ трубопроводов, одновременно обеспечивая устойчивость смеси и надежность ее доставки. Благодаря таким преимуществам технология аэрации открывает новые возможности для эффективной закладки выработанного пространства, что делает ее внедрение особенно значимым для горнодобывающего сектора [4, 5, 6].

Цель исследования – разработка технологии эффективной доставки твердеющей смеси с восстановлением ее реологических свойств.

### **Существующие способы доставки и их недостатки**

Существующие подходы к транспортировке твердеющих складочных смесей делятся на две основные категории: методы, использующие гидростатическое давление, и технологии, основанные на механических устройствах. Несмотря на их широкое применение в горнодобывающей промышленности, оба подхода демонстрируют значительные ограничения, существенно снижая эффективность и надежность процессов закладки в подземных выработках [7, 8].

Методы, основанные на гидростатическом давлении, используют силу гравитации или давление, создаваемое высотой столба смеси, для перемещения материала через трубопроводы. Этот способ особенно эффективен на участках с перепадами высот, где естественный поток смеси возможен. Однако его применение сталкивается с рядом проблем, ограничивающих дальность и стабильность транспортировки. Так, повышенная плотность и значительная вязкость складочных смесей приводят к заметным потерям напора, особенно на горизонтальных участках трубопровода, что резко сокращает радиус доставки [9]. Более того, высокая вязкость способствует накоплению отложений на внутренних стенках труб, что постепенно сужает их рабочее сечение, увеличивая риск засорения системы. В некоторых случаях это приводит к полной остановке процесса транспортировки. Наконец, сложная конфигурация подземных сетей и значительные расстояния требуют поддержания стабильного гидростатического давления, что становится практически неосуществимым в условиях многослойных и разветвленных систем [10].

Для перемещения складочных смесей часто используются насосы и механические устройства подачи, которые позволяют транспортировать материал без привязки к перепадам высот, что делает этот подход универсальным. Однако даже такие системы сталкиваются с серьезными ограничениями [11]. Абразивные частицы, входящие в состав смеси, ускоряют износ механизмов, что приводит к частым поломкам оборудования, увеличению расходов на его обслуживание и снижению общей надежности процесса. Кроме того, по мере увеличения длины трубопровода возрастает сопротивление потоку, что снижает эффективность работы насосов. Это ограничивает радиус транспортировки и создает риск возникновения застойных зон, где смесь скапливается, увеличивая вероятность засоров и нарушения равномерности ее распределения [12, 13].

В обоих подходах ключевой проблемой остается недостаточная производительность, которая связана с необходимостью тщательно

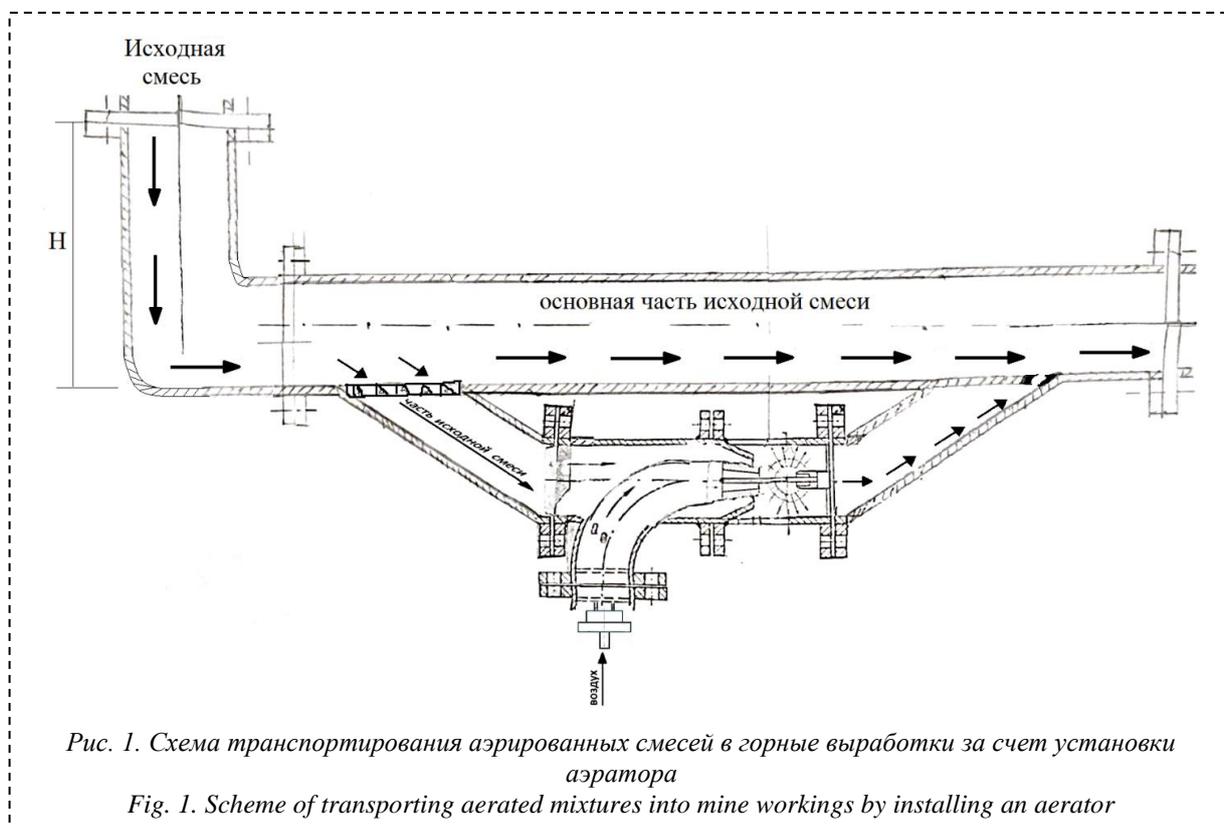
контролировать скорость перемещения смеси для предотвращения ее расслоения и блокировки трубопровода. Указанные недостатки ясно указывают на потребность в технологических инновациях, которые позволят снизить вязкость и плотность смесей, расширить радиус их транспортировки, уменьшить износ оборудования и полностью устранить риск засоров трубопроводов [14].

#### Предлагаемый метод

Аэрация твердеющих закладочных смесей является передовым методом, позволяющим существенно улучшить их текучесть за счет снижения сопротивления сдвигу и уменьшения динамической вязкости [15, 16, 17]. Этот подход направлен на достижение оптимальных реологических параметров, что упрощает процесс транспортировки смесей в горные выработки и способствует их равномерной укладке.

измельчают их и создают интенсивное перемешивание компонентов в условиях турбулентности. Итогом такого воздействия становится высокоомогенная структура смеси, свободная от избыточных межчастичных связей, которые ранее ограничивали ее подвижность.

Применение мелкодисперсного насыщения выгодно отличается от крупнодисперсного благодаря более равномерному распределению воздушных пузырьков внутри смеси. Мельчайшие пузырьки воздуха формируют обширные зоны контакта с частицами материала, что способствует заметному снижению сил трения и внутренней напряженности в структуре. В отличие от крупнодисперсного метода, где воздушные скопления имеют разрозненный характер, создавая крупные пузыри, мелкодисперсное насыщение исключает подобные недостатки, обеспечивая однородность смеси.



Ключевым элементом механизма мелкодисперсного насыщения выступает создание кавитационного эффекта внутри специальной трубчатой камеры аэрации. В рамках данного процесса определенный объем смеси отводится из основного потока в камеру, где через сопла подается сжатый воздух, формируя мельчайшие пузырьки. По мере продвижения смеси в трубопроводе эти пузырьки воздуха начинают увеличиваться в объеме и разрушаются, вызывая локальные импульсы давления. Эти импульсы активно разрушают крупные агрегаты частиц,

Аэрированная часть смеси обладает значительным запасом потенциальной энергии, обусловленным уменьшением ее плотности и вязкости [18, 19]. При введении этой смеси в основной поток достигается общий эффект снижения плотности и динамической вязкости, что существенно улучшает текучесть и увеличивает скорость ее движения по трубопроводу. Эти изменения в реологических характеристиках ведут к снижению сопротивления движению смеси, что позволяет увеличить дальность ее транспортировки. Применение технологии мелкодисперсного

насыщения не только повышает эффективность транспортных систем, но и способствует снижению расхода воды при сохранении прочностных характеристик смеси, что делает ее незаменимой в задачах закладки.

#### **Результаты исследования**

Проведенный анализ выявил, что длина горизонтального транспортирования закладочной смеси напрямую связана с величиной потерь напора, которые зависят от таких реологических характеристик, как вязкость и плотность. Уменьшение этих параметров значительно снижает сопротивление движению потока, что способствует увеличению дистанции транспортирования и улучшает общую эффективность работы закладочного комплекса.

Применение метода мелкодисперсной аэрации доказало свою высокую результативность в оптимизации реологических свойств закладочных смесей. Установленный на трубопроводе аэратор создает мелкодисперсные пузырьки воздуха, которые равномерно распределяются в объеме смеси. Это равномерное насыщение позволяет минимизировать внутреннее трение между частицами и снижает предельное напряжение сдвига. В результате значительно уменьшаются удельные потери напора, что обеспечивает более продолжительное транспортирование смеси. При этом ее укладка в отдаленных горных выработках осуществляется равномерно, без необходимости в дополнительных технологических вмешательствах.

Разработанная технология, включающая транспортировку аэрированных смесей с использованием магистрального аэратора, продемонстрировала высокую эффективность. Введение 2%-ного воздуходо насыщения позволило снизить вязкость смеси до 0,168 Па·с, что привело к увеличению предельной длины самотечного транспортирования в два раза по сравнению с исходным составом. При этом смесь сохраняет требуемую текучесть (205 мм по методу Суттарда), полностью соответствующую нормативам РТПП-09-2019 [20].

Необходимо подчеркнуть, что использование технологии мелкодисперсной аэрации существенно сокращает потребление сжатого воздуха, что достигается благодаря усовершенствованию конструкции аэратора и точной калибровке его параметров. В результате эта инновация обеспечивает не только значительное снижение издержек на энергоресурсы, но и существенное улучшение общей производительности технологических процессов, связанных с выполнением закладочных операций.

#### **Заключение**

Разработанный метод транспортировки твердеющих закладочных смесей, основанный на технологии мелкодисперсной аэрации с применением кавитационного режима, продемонстрировал свою высокую эффективность. Его применение позволяет существенно увеличить протяженность доставки, снизить эксплуатационные издержки и обеспечить более качественное заполнение выработанного пространства. Аэрация осуществляется в специально разработанной трубчатой камере, которая органично встраивается в существующие трубопроводные системы. В результате насыщения смеси мельчайшими пузырьками воздуха ее плотность и вязкость значительно снижаются, что способствует сокращению гидравлического сопротивления в трубах и многократному увеличению максимального расстояния транспортирования.

Практическая ценность данного подхода для горнодобывающей отрасли заключается в сочетании его технологической гибкости, экономической эффективности и высокой результативности. Простота интеграции аэрационной камеры в стандартные трубопроводные системы позволяет внедрять технологию без необходимости капитальных изменений существующей инфраструктуры, что существенно упрощает ее адаптацию под условия действующих предприятий. Снижение затрат на эксплуатацию трубопроводных систем достигается благодаря уменьшению потребления сжатого воздуха, что одновременно увеличивает предельную длину транспортировки закладочных смесей. Это сокращает необходимость использования дополнительных ресурсов для подачи материала в удаленные выработки. Более того, введение аэрации позволяет уменьшить содержание воды в составе смеси, что существенно снижает расходы на ее приготовление, делая процесс более экономичным. Ключевое преимущество метода заключается в способности обеспечивать равномерное заполнение выработанного пространства. Это критически важно для формирования устойчивого закладочного массива, который служит основой для безопасного выполнения горных работ. За счет снижения вязкости и плотности смеси ее текучесть и распределение по трубопроводу значительно улучшаются, что минимизирует риски засоров и расслоения материала, увеличивая надежность транспортирования.

Можно заключить, что метод мелкодисперсной аэрации представляет собой значительный шаг вперед в оптимизации технологических процессов, связанных с разработкой месторождений. Его использование позволяет одновременно улучшить

эксплуатационные характеристики закладочных смесей, сократить производственные издержки и обеспечить высокий уровень эффективности горнодобывающих операций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ляшенко В. И., Франчук В. П. Повышение эффективности и безопасности трубопроводного транспорта твердеющих закладочных смесей в глубокие шахты // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2021. №1. С. 15–26.
2. Мурко В. И., Спиридонова И. В., Селиванов И. Д. Оптимизация закладочной смеси для таштагольского рудника // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2024. № 1(1). С. 103–110. DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-103-110.
3. Анушенков А. Н. Разработка комплексов приготовления и транспорта твердеющих смесей для закладки горных выработок: монография. Красноярск : ГУЦМиЗ, 2006. 170 с.
4. Каплунов Д. Р., Юков В. А. Энергосбережение в процессах подземной добычи медных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 4. С. 5–17.
5. Feng J., Zhang Z., Guan W., Wang W., Xu X., Song Y., Liu H., Su H., Zhao B., Hou D. Review of the Backfill Materials in Chinese Underground Coal Mining. // Minerals. 2023. № 13. 473. DOI: 10.3390/min13040473.
6. Анушенков А. Н., Стовманенко А. Ю., Волков Е. П. «Основы процессов производства и транспортирования закладочных смесей при подземной разработке месторождений полезных ископаемых: учеб. пособие. Красноярск : СФУ, 2015.
7. Анушенков А. Н., Бритвин Д.С. Актуальность проблем очистки забитых закладочных трубопроводов в условиях рудника «Октябрьский» // Электронный сборник материалов международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектива-2016». Подземные горные работы. Красноярск : СФУ, 2016.
8. Ambrós W. M. Gravity Concentration in Urban Mining Applications. A Review // Recycling. 2023, № 8. 85. DOI: 10.3390/recycling8060085.
9. Тапсиев А. П., Анушенков А. Н., Усков В. А., Артеменко Ю. В., Плиев Б. З. Технология добычи полезных ископаемых // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2009. № 3. С. 84–85.
10. Филимонов В. В., Христоробов Е. А., Еременко А. А. Обоснование технологических решений по модернизации способов разработки рудных тел системами без и с закладкой выработанного пространства на Таштагольском месторождении // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 2. С. 57–65.
11. Ляшенко В. И., Франчук В. П. Повышение эффективности активации компонентов твердеющей закладочной смеси в установках вибрационного трубопроводного транспорта // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2017. № 4. С. 92–100.
12. Szponder D. K., Trybalski K. The determination of physico-chemical and mineralogical properties of fly ash used in mining industry // 22nd World Mining Congress & Expo. Istanbul, 2011. Vol. 2. Pp. 629–639.
13. Jin J., Qin Z., Zuo S., Feng J., Sun Q. The Role of Rheological Additives on Fresh and Hardened Properties of Cemented Paste Backfill // Materials. 2022. № 15. 3006. DOI: 10.3390/ma15093006.
14. Yang L., Jia H., Jiao H., Dong M., Yang T. The Mechanism of Viscosity-Enhancing Admixture in Backfill Slurry and the Evolution of Its Rheological Properties // Minerals. 2023. № 13. 1045. DOI: 10.3390/min13081045.
15. Xiao B., Wang J., Wu A., Guo R. Hydration and Hardening Properties of High Fly-Ash Content Gel Material for Cemented Paste Backfill Utilization // Gels. 2024. № 10. 623. DOI: 10.3390/gels10100623.
16. Murtada Mohammed Abdulredha, Siti Aslina Hussain, Luqman Chuah Abdullah. Overview on petroleum emulsions, formation, influence and demulsification treatment techniques // Arabian Journal of Chemistry. 2020. Vol. 13. Issue 1. Pp. 3403–3428.
17. Allen P. A., Dorrell R. M., Harlen O. G. [et al.] Mixing in density- and viscosity-stratified flows // Physics of Fluids. 2022. Vol. 34. № 096605. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0108337>.
18. Дмитрак Ю. В., Голик В. И., Франчук В. П., Ляшенко В. И. Повышение эффективности активации компонентов твердеющей закладочной смеси с использованием отходов горно-металлургического производства // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 10. С. 1023–1031. DOI: 10.32339/0135-5910-2021-10-1023-1031. EDN GNHFWT.
19. Rybak J., Gorbatyuk S. M., Kongar-Syuryun C., Khairutdinov A., Tyulyaeva Y., Makarov P. S. Correction to: Utilization of Mineral Waste: A Method for Expanding the Mineral Resource Base of a Mining and Smelting Company // Metallurgist. 2021. № 64. 1347.
20. Габараев Г. О., Разоронова Е. Ю., Стась В. П., Стась П. П. Механизм работы твердеющих закладочных смесей // Вектор ГеоНаук. 2020. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mehanizm-raboty-tverdeyuschih-zakladochnyh-smesey> (дата обращения: 26.12.2024).

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

**Песочинский Максим Сергеевич**, аспирант кафедры «Подземная разработка месторождений», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», Институт горного дела, геологии и геотехнологий, просп. Красноярский рабочий, 95, г. Красноярск, 660095, Россия, e-mail: grice007@yandex.ru

**Анушенков Александр Николаевич**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Подземная разработка месторождений», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», Институт горного дела, геологии и геотехнологий, просп. Красноярский рабочий, 95, г. Красноярск, 660095, Россия, e-mail: Aanushenkov@sfu-kras.ru

Заявленный вклад авторов:

Песочинский Максим Сергеевич – научный менеджмент, анализ данных, разработка алгоритма, оформление текста и графической информации, выводы.

Анушенков Александр Николаевич – научный менеджмент, анализ данных, разработка алгоритма, оформление текста и графической информации, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## Original article

### EFFICIENCY OF FINE SATURATION OF BACKING MIXTURES TRANSPORTED TO UNDERGROUND MINING WORKS

*Maksim S. Pesochinskiy, Aleksandr N. Anushenkov*

Siberian Federal University

\* for correspondence: e.kovrizhnykh@mail.ru



#### Article info

Received:

01 July 2024

Accepted for publication:

22 April 2025

Accepted:

30 April 2025

Published:

11 June 2025

**Keywords:** stability assessment, slope, side, numerical and analytical methods, geomechanics, substantiation.

#### Abstract.

The relevance of using modern software packages to justify the stability of open-pit slopes is driven by the need to improve safety, forecast accuracy, and the efficiency of mining operations. Despite this, many engineers do not consider such solutions mandatory, which is due to several factors. First, regulatory documents do not always require complex geomechanical calculations using numerical methods. Second, existing software packages are often highly complex and narrowly specialized, which limits their adoption. These factors result in the insufficient dissemination of more precise technologies for predicting rock mass behavior, which could significantly enhance control over the stability of pit slopes. The objective of this study is to explore the capabilities of modern software packages for more accurate justification of slope stability, demonstrated through the example of the Gorevsky lead-zinc deposit. The article examines the main reasons limiting the adoption of advanced mathematical methods in slope stability forecasting practice and analyzes various software solutions that allow for the consideration of lithological differences, rock mass heterogeneity, and the calculation of stability safety factors. Modeling and calculations of stable slope parameters were performed using various software packages. The study's results show that using modern software solutions significantly improves the accuracy of stability calculations, enhances the detail of rock mass models, and improves forecasting. This, in turn, increases mining safety, reduces risks, and enhances the economic efficiency of mining operations, highlighting the necessity of their widespread adoption in engineering practice.

**For citation:** Pesochinskiy M.S., Anushenkov A.N. Efficiency of fine saturation of backing mixtures transported to underground mining works. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 2(168):167-174. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-167-174, EDN: IKEBFC

## REFERENCES

1. Lyashenko V.I., Franchuk V.P. Increasing the Efficiency and Safety of Pipeline Transportation of Hardening Backfill Mixtures to Deep Mines. *News of Higher Educational Institutions. Mining Journal*. 2021; 1:15–26.
2. Murko V.I., Spiridonova I.V., Selivanov I.D. Optimization of Backfill Mixtures for the Tashtagol Mine. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(1):103–110. DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-103-110.
3. Anushenkov A.N. Development of Complexes for the Preparation and Transportation of Hardening Mixtures for Backfilling Mine Workings: Monograph. Krasnoyarsk: GUTSMiZ; 2006. 170 p.
4. Kaplunov D.R., Yukov V.A. Energy Saving in Underground Copper Ore Mining Processes. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2016; 4:5–17.
5. Feng J., Zhang Z., Guan W., Wang W., Xu X., Song Y., Liu H., Su H., Zhao B., Hou D. Review of the Backfill Materials in Chinese Underground Coal Mining. *Minerals*. 2023; 13:473. DOI: 10.3390/min13040473.
6. Anushenkov, A.N., Stovmanenko, A.Yu., Volkov, E.P. Fundamentals of Processes for the Production and Transportation of Backfill Mixtures during Underground Mining of Mineral Deposits: Textbook. Krasnoyarsk: SFU; 2015.
7. Anushenkov A.N., Britvin D.S. Relevance of Problems in Cleaning Backfilled Pipelines in the "Oktyabrsky" Mine. *Electronic Collection of Materials of the International Conference for Students, Graduate Students, and Young Scientists "Prospekt Svobodny-2016"*. Underground Mining. Krasnoyarsk: SFU; 2016.
8. Ambrós W.M. Gravity Concentration in Urban Mining Applications: A Review. *Recycling*. 2023; 8:85. DOI: 10.3390/recycling8060085.
9. Tapsiev A.P., Anushenkov A.N., Uskov V.A., Artemenko Yu.V., Pliev B.Z. Technology for Extracting Minerals. *Physical and Technical Problems of Mining*. 2009; 3:84–85.
10. Filimonov, V.V., Khristolyubov, E.A., Eremenko, A.A. Justification of Technological Solutions for Modernizing Methods for Developing Ore Bodies with and without Backfilling of Mined-Out Spaces at the Tashtagol Deposit. *Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2018; 2:57–65.
11. Lyashenko V.I., Franchuk V.P. Enhancing the Efficiency of Activating Components of Hardening Backfill Mixtures in Vibratory Pipeline Transport Systems. *News of Higher Educational Institutions. Mining Journal*. 2017; 4:92–100.
12. Szponder D.K., Trybalski K. The Determination of Physico-Chemical and Mineralogical Properties of Fly Ash Used in the Mining Industry. *22nd World Mining Congress & Expo*. Istanbul, 2011; 2:629–639.
13. Jin J., Qin Z., Zuo S., Feng J., Sun Q. The Role of Rheological Additives on Fresh and Hardened Properties of Cemented Paste Backfill. *Materials*. 2022; 15:3006. DOI: 10.3390/ma15093006.
14. Yang L., Jia H., Jiao H., Dong M., Yang T. The Mechanism of Viscosity-Enhancing Admixture in Backfill Slurry and the Evolution of Its Rheological Properties. *Minerals*. 2023; 13:1045. DOI: 10.3390/min13081045.
15. Xiao B., Wang J., Wu A., Guo R. Hydration and Hardening Properties of High Fly-Ash Content Gel Material for Cemented Paste Backfill Utilization. *Gels*. 2024; 10:623. DOI: 10.3390/gels10100623.
16. Murtada Mohammed Abdulredha, Siti Aslina Hussain, Luqman Chuah Abdullah. Overview on Petroleum Emulsions, Formation, Influence, and Demulsification Treatment Techniques. *Arabian Journal of Chemistry*. 2020; 13(1):3403–3428.
17. Allen P.A., Dorrell R.M., Harlen O.G., [et al.] Mixing in Density- and Viscosity-Stratified Flows. *Physics of Fluids*. 2022; 34:096605. DOI: 10.1063/5.0108337.
18. Dmitrak Yu.V., Golik V.I., Franchuk V.P., Lyashenko V.I. Improving the Efficiency of Activating Components of Hardening Backfill Mixtures Using Mining and Metallurgical Industry Waste. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical, and Economic Information*. 2021; 77(10):1023–1031. DOI: 10.32339/0135-5910-2021-10-1023-1031. EDN GNHFWT.
19. Rybak J., Gorbatyuk S.M., Kongar-Syuryun C., Khairutdinov A., Tyulyaeva Y., Makarov P.S. Correction to: Utilization of Mineral Waste: A Method for Expanding the Mineral Resource Base of a Mining and Smelting Company. *Metallurgist*. 2021; 64:1347.
20. Gabaraev G.O., Razorenova E.Yu., Stas V.P., Stas P.P. The Mechanism of Hardening Backfill Mixtures. *Vector GeoSciences*. 2020; 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mehanizm-raboty-tverdeyuschih-zakladochnyh-smesey> (accessed: 26.12.2024).

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). The authors declare no conflict of interest.

*About the authors:*

**Maksim S. Pesochinskiy**, postgraduate student, of the Department "Underground mining", Siberian Federal University, Institute of mining, Geology and geotechnologies, 95, Krasnoyarskiy Rabochiy Avenue, Krasnoyarsk, 660025, Russia, e-mail: grice007@yandex.ru

**Aleksandr N. Anushenkov**, doctor of technical science, head of Department "Underground mining", Siberian Federal University, Institute of mining, Geology and geotechnologies, 95, Krasnoyarskiy Rabochiy Avenue, Krasnoyarsk, 660025, Russia, e-mail: Aanushenkov@sfu-kras.ru

*Contribution of the authors:*

Maksim S. Pesochinskiy – scientific management, data analysis, algorithm development, text and graphic design, conclusions.

Aleksandr N. Anushenkov – scientific management, data analysis, algorithm development, text and graphic design, conclusions.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

