

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ВОЗДУХОНАСЫЩЕНИЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

М. С. Песочинский[✉], А. Н. Анушенков

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский федеральный университет», Институт горного дела, геологии и геотехнологий,
г. Красноярск, Российская Федерация

✉ grice007@yandex.ru

Аннотация. Описано создание и внедрение методики мониторинга уровня воздухомасывщения закладочных смесей в реальном времени. Исследования проводились с использованием специально разработанной установки, воспроизводящей процессы аэрации и транспортировки. Комплекс оборудования, включающий насос вытеснения, трубопроводы, донный аэратор, а также контрольно-измерительные приборы, позволил провести анализ влияния воздуха на вязкость, плотность и потери напора. Математическое моделирование дополнило экспериментальные данные, что обеспечило возможность определения оптимальных параметров работы систем аэрации. Результаты показали, что увеличение содержания воздуха в смеси до 5 % приводит к значительному снижению вязкости, улучшению текучести и снижению гидравлических потерь. Разработанная методика демонстрирует способность оперативно адаптировать свойства смесей к изменяющимся условиям эксплуатации, что способствует сокращению затрат и увеличению производительности. Кроме того, оптимизация расхода материалов и энергии повышает экологическую устойчивость технологического процесса. Полученные данные формируют научную основу для дальнейшего внедрения предложенной методики в строительной и горнодобывающей отраслях. Это открывает перспективы повышения эффективности технологических операций, обеспечивая надежность, устойчивость и экономическую рентабельность производственных процессов.

Ключевые слова: реологические свойства, закладочные смеси, воздухомасывщенность, трубопровод, подземная выработка

Для цитирования: Песочинский МС, Анушенков АН. Разработка методики контроля уровня воздухомасывщения закладочных смесей в реальном времени. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(2):33-40. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-2-33-40>.

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR REAL-TIME MONITORING OF AIR SATURATION LEVELS IN GROUTING MIXTURES

M. S. Pesochinskiy[✉], A. N. Anushenkov

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Siberian Federal University»,
Institute of Mining, Geology and Geotechnology,
Krasnoyarsk, Russian Federation

✉ grice007@yandex.ru

Abstract. This article focuses on the development and implementation of a methodology for real-time monitoring of air saturation levels in grouting mixtures. The research utilized a specially designed setup replicating aeration and transportation processes. The equipment ensemble, including a displacement pump, pipelines, mainline and bottom aerators, and precision measuring instruments, facilitated a comprehensive analysis of the impact of air on viscosity, density, and pressure losses. Mathematical modeling complemented the experimental findings, enabling the determination of optimal parameters for aeration system operation. The results demonstrate that increasing the air content in the mixture to 5% significantly reduces viscosity, improves flowability, and decreases hydraulic losses. The developed methodology exhibits the capability to adapt mixture properties dynamically to changing operational conditions, thereby reducing costs and enhancing productivity. Furthermore, optimizing the use of materials and energy contributes to the environmental sustainability of the process. The findings establish a scientific foundation for the broader application of the proposed methodology in construction and mining industries. This innovation offers promising opportunities for improving the efficiency of technological operations while ensuring reliability, resilience, and economic feasibility in production processes.

Keywords: rheological properties, backfill mixtures, air saturation, pipeline, underground excavation.

For citation: Pesochinskiy MS, Anushenkov AN. Development of a methodology for real-time monitoring of air saturation levels in grouting mixtures. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(2):33-40. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-2-33-40>.

Введение

Контроль содержания воздуха в твердеющих смесях является важным аспектом, определяющим их успешную транспортировку и укладку в подземных горных условиях. Реологические характеристики твердеющих смесей (плотность, текучесть и вязкость) непосредственно зависят от этих показателей и оказывают значительное влияние на качество финальной укладки и эффективность перемещения.

Воздухововлекающие добавки, как указывается в исследовании [1], оказывают положительное влияние на реологические характеристики смесей, обеспечивая равномерное распределение частиц цемента. Установлено, что при содержании воздуха на уровне 3,5 % наблюдается значительное улучшение прочностных свойств смесей, что повышает устойчивость закладочных материалов. Кроме того, выявлено, что реология и прочность смесей зависят от таких факторов, как доля твердых частиц, соотношение компонентов и свойства агрегатов [2]. Хотя в литературе отмечается возможность влияния крупнофракционного заполнителя на водоудерживающую способность смеси, результаты настоящего исследования показали, что текучесть значительно возрастает при увеличении содержания воздуха и доли мелких фракций, тогда как роль крупных фракций требует дальнейшего изучения.

Кроме этого, на основании проведенных исследований [3] установлено, что воздухововлекающие добавки (АЕА) способны значительно повысить текучесть закладочных смесей. Эффект достигается за счет формирования микроскопических пузырьков воздуха, которые уменьшают межчастичное трение. При этом содержание АЕА в пределах 0,9 % оптимально снижает сопротивление транспортировке, минимизируя риск засорения трубопроводов, а также улучшает характеристики текучести и расширяемости смеси. Однако избыток пузырьков может привести к снижению прочностных свойств материала. Таким образом, основной сложностью остается установление оптимального соотношения, позволяющего одновременно улучшить реологию смеси и сохранить ее необходимые прочностные параметры.

Согласно проведенным исследованиям [4], применение вторичных материалов, таких как зольные осадки и щелочно-активированные шлаки, позволяет добиться значительного сокращения затрат, одновременно улучшая прочностные характеристики смеси. Формирование гелей С-А-S-H, обусловленное использованием щелочно-активированных связующих, способствует повышению механической прочности за счет уменьшения пористости и создания более плотной структуры. Дополнительно, использование методов статистической оптимизации, включая метод поверхностей отклика, обеспечивает возможность точной настройки состава материала, что позволяет достичь баланса между текучестью, прочностью и стоимостью, минимизируя затраты без ущерба для эффективности.

В последние годы предложено множество подходов к контролю воздухомыщения, их практическая применимость в реальных условиях по-прежнему ограничена недостаточной точностью и надежностью. Один из наиболее применяемых

методов контроля воздухомыщения базируется на измерении давления, однако его возможности ограничиваются косвенным характером данных. Давление в системе изменяется под влиянием не только содержания воздуха, но и таких параметров, как вязкость и плотность смеси, что снижает достоверность полученных результатов.

В условиях лаборатории оптический контроль показывает высокую эффективность. Но его внедрение в эксплуатацию сталкивается с существенными преградами, вызванными сложностью оборудования и влиянием окружающей среды. Ультразвуковой метод, позволяющий анализировать смесь на разных глубинах трубопровода, требует применения сложных датчиков, которые подвержены загрязнению и поломкам, что ограничивает его надежность в рабочих условиях. Существующие ограничения настоятельно требуют разработки инновационных подходов, обеспечивающих максимально точный и надежный контроль уровня воздухомыщения в режиме реального времени.

Проведенные исследования, включающие применение гидродинамических аэраторов и устройств для регулировки подачи воздуха и воды, раскрыли важнейшие аспекты влияния аэрации на такие реологические свойства закладочных смесей, как вязкость и текучесть, а также на параметры их транспортировки, включая расход и снижение напора. Эти эмпирические данные предоставляют фундамент для создания высокоэффективных систем мониторинга, способных значительно повысить эффективность транспортировки и гарантировать стабильное качество смеси на всех этапах процесса [5–7].

Настоящее исследование направлено на разработку подхода к контролю уровня воздухомыщения, необходимого для эффективной транспортировки и укладки закладочных смесей. Реализация данной методики позволяет как расширить понимание влияния аэрации на ключевые реологические параметры, так и разработать практические рекомендации, ориентированные на повышение продуктивности процессов в горных выработках. Вклад статьи заключается в дополнении и углублении существующих методов контроля воздухомыщения с акцентом на их адаптацию и использование в условиях реального производственного цикла.

Обеспечение контроля за уровнем воздухомыщения в закладочных смесях в режиме реального времени представляет собой фундаментальную задачу, от решения которой зависят реологические параметры, эффективность перемещения и качество укладки в подземных условиях. Управляемый при помощи аэраторов и мониторинговых систем процесс аэрации оказывает глубокое влияние на такие характеристики, как вязкость, плотность и текучесть, тем самым определяя стабильность и надежность укладочных работ [8]. Современные горнодобывающие предприятия, предъявляющие высокие требования к точности и надежности процессов, особенно нуждаются в разработке подобных методик [9].

Внедрение указанной методики открывает возможность существенно улучшить транспортные свойства закладочных смесей, снижая их вязкость и увеличивая текучесть, а также предотвращая появление таких проблем, как засоры трубо-

проводов и неравномерное распределение материалов. Эти аспекты критически важны для поддержания устойчивости горных выработок и снижения рисков их деформации [10–12]. Более того, применение динамических систем контроля насыщения воздухом позволяет оперативно адаптироваться к изменяющимся условиям транспортировки, что способствует минимизации потерь давления и значительному повышению эффективности всей системы.

Таким образом, создание данной методики становится ключевым фактором оптимизации технологических процессов, связанных с укладкой закладочных смесей. Это решение не только способствует снижению эксплуатационных затрат и повышению экологической устойчивости, но и значительно увеличивает общую производительность горнодобывающих предприятий.

Цель исследований: разработка методики контроля уровня воздухоматериального насыщения закладочных смесей в реальном времени.

Методы исследований

В рамках экспериментального исследования использовалась специально разработанная установка, воспроизводящая процессы аэрации и транспортировки закладочных смесей. Она включала насос вытеснения, резервуары для смешивания и накопления, трубопроводную систему с контрольно-измерительными приборами, а также магистральные и донные аэраторы. Для регистрации параметров применялись пьезометры, манометры, расходомеры и ультразвуковые скоростемеры.

Исследование предусматривало следующие этапы: дозирование компонентов смеси, их смешивание в шаровой мельнице, аэрацию с использованием аэраторов в резервуарах, транспортировку смеси по трубопроводу и измерение ключевых параметров: плотности, расхода, перепада давления, скорости потока и объема воздуха. По завершении каждого цикла аэрированные пробы смеси извлекались из накопительного резервуара для последующего анализа.

Лабораторная установка, сконструированная авторами самостоятельно, демонстрирует высокий уровень проработки и глубину исследования. Она представляет собой комплексный инженерный объект, включающий насос вытеснения, магистральные и донные аэраторы, а также систему измерения расхода и давления, что позволяет точно контролировать условия эксперимента. Для изучения вязкости и сдвигового напряжения использовался ротационный вискозиметр Rheotest RN 4.1, что позволило выявить корреляцию между градиентом скорости и напряжением сдвига при различных уровнях насыщения воздухом. Прочностные свойства исследовались на кубических образцах, которые после затвердевания в нормальных условиях в течение 3–180 суток подвергались испытаниям на сжатие. Структура затвердевших образцов анализировалась посредством рентгеноструктурного метода, что позволило оценить влияние аэрации на формирование микроструктуры материала.

Обработка данных в аналитической части исследования проводилась с использованием статистических методов, что позволило систематизировать результаты экспериментов. На основе этих данных были разработаны математические модели, которые иллюстрируют, как уровень воздухоматериального насыщения влияет на ключевые параметры смеси, включая ее прочность и реологические свойства, предоставляя всестороннее представление о влиянии аэрации.

Для обеспечения надежности и воспроизводимости результатов исследований была применена комбинация стандартных аналитических методик, признанных в горнодобывающей отрасли, и авторской технологии аэрирования, защищенной патентом № 214953. Такой подход не только повысил точность выполненных испытаний, но и подтвердил их воспроизводимость. Анализ экспериментальных данных с использованием методов математической статистики продемонстрировал статистическую значимость обнаруженных закономерностей, что подчеркивает высокий потенциал разработанных подходов для их практического использования в промышленности.

Результаты исследования

Насыщенность твердеющих смесей воздухом оказывает значительное влияние на их основные реологические свойства, включая текучесть, плотность и вязкость. Этот показатель играет ключевую роль в обеспечении эффективности транспортировки и надежности укладки смесей, особенно в условиях подземных горных выработок, где стабильность материала критически важна [13]. Внесение изменений в содержание воздуха в смеси изменяет ее физические параметры: плотность, объемную и массовую концентрации, что непосредственно отражается на ее текучести и устойчивости в процессе перемещения.

Данные, полученные в ходе исследования и представленные в таблице, иллюстрируют зависимость указанных характеристик от уровня воздухоматериального насыщения. Увеличение объема воздуха приводит к снижению плотности и концентраций, что способствует улучшению текучести. Однако такие изменения требуют внимательного анализа и учета при проектировании систем транспортировки, чтобы избежать возможных сложностей и обеспечить устойчивость материала.

Таблица / Table

Изменение физического состояния аэрированной смеси / Change in the physical state of the aerated mixture

Показатель	Значение				
	0 (исходный)	2	3	4	5
Содержание воздуха, %	0	2	3	4	5
Объемная концентрация, %	0,585	0,562	0,525	0,498	0,40
Стандартная массовая концентрация, %	0,77	0,75	0,72	0,70	0,61
Плотность, кг/м ³	1 821	1 786	1 734	1 697	1 560

Приведенные результаты позволяют глубже понять, каким образом уровень воздухоматериального насыщения влияет на ключевые свойства смеси. Эти изменения оказывают существенное воздействие на ее реологические характеристики, включая плотность, текучесть и концентрации, что критически важно для эффективной транспортировки и укладки материала.

Изменения, воздействующие на реологические характеристики смеси:

1. *Влияние на плотность смеси:* с увеличением содержания воздуха наблюдается снижение плотности, что свидетельствует о повышении текучести и упрощении перемещения по трубопроводам. Однако такая динамика требует учета возможного влияния на прочностные свойства смеси, что делает оптимизацию параметров ключевой задачей.

2. *Роль объемной концентрации:* уменьшение объемной

концентрации при аэрации способствует улучшению распределения частиц, снижению гидравлического сопротивления и обеспечению стабильной скорости потока, что помогает предотвращать образование пробок в транспортных системах.

3. *Снижение стандартной массовой концентрации:* этот процесс отражает уменьшение удерживающей способности смеси, что может быть полезно для снижения энергозатрат при транспортировке, сохраняя при этом необходимую текучесть.

Полученные данные имеют не только теоретическое значение, но и практическую направленность, становясь основой для оптимизации транспортировки и укладки закладочных смесей, а также они открывают возможности для разработки новых подходов управления параметрами смесей в динамических условиях эксплуатации, что повышает общую эффективность процесса.

Влияние аэрации на реологические свойства смеси

Экспериментальные исследования в лабораторных условиях выявили существенное влияние содержания воздуха на ключевые характеристики твердеющих смесей, такие как текучесть и вязкость.

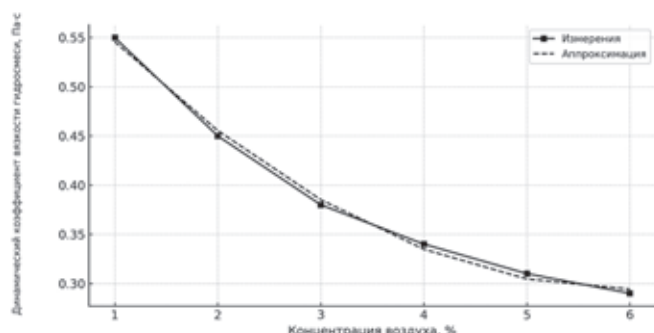


Рис. 1. Изменение динамического коэффициента вязкости (η) гидросмеси в зависимости от концентрации воздуха; соответствующее снижение концентрации твердой фазы от 0,562 до 0,216 % /

Fig. 1. Dependence of the dynamic viscosity coefficient (η) of the hydraulic mixture on air content, with a corresponding reduction in solids content from 0.562 to 0.216 %

Анализ данных, представленных на рисунке 1, позволяет установить устойчивую тенденцию к снижению динамического коэффициента вязкости гидросмеси при увеличении объемной доли воздуха до 5 %.

Такая зависимость указывает на существенное влияние аэрации на формирование реологических свойств исследуемой системы. В условиях насыщения воздушной фазой в объеме смеси возникают микропузырьки, нарушающие непрерывность жидкой среды и ослабляющие межчастичное взаимодействие, в результате чего наблюдается увеличение текучести, обусловленное частичной потерей структурной связанности.

Дополнительно после аэрации фиксируется рост доли частиц размером менее 0,08 мм, что может указывать на перераспределение агрегатов и измененную динамику взвешенной фазы, способствующую дальнейшему снижению вязкости. В соответствии с результатами экспериментов, при достижении 5 % воздушной составляющей вязкость снижается на 15–20 %, локально – до 25 %. Этот эффект сопровождается улучшением условий перемещения материала в трубопроводе. Таким образом, аэрация влияет не только на внутреннюю структуру смеси, но и на параметры, определя-

ющие устойчивость и эффективность ее транспортировки в замкнутых магистральных системах.

Обсуждение

Гидродинамические аэраторы, применяемые в ходе экспериментов, оказали значительное влияние на улучшение реологических параметров смеси за счет равномерного насыщения ее воздушными пузырьками. Основной принцип их действия заключается во введении мелкодисперсного воздуха в поток смеси, что способствует изменению ее структуры. Экспериментально установлено, что использование этих устройств на различных этапах транспортировки смеси позволяет поддерживать стабильность реологических свойств, обеспечивая снижение вязкости и повышение текучести, что, в свою очередь, улучшает эффективность перемещения смеси по трубопроводам.

Внедрение гидродинамических аэраторов в трубопроводные системы предполагает способность эффективно регулировать уровень насыщения смеси воздухом [14]. Такой подход может быть особенно полезным для поддержания текучести материала при прохождении сложных участков трубопровода. Аэрация, обеспечиваемая указанными приборами, не может способствовать улучшению качества смеси и ее транспортируемости, но позволит значительно сократить гидравлические потери, возникающие в процессе транспортировки.

Потери напора демонстрируют тенденцию к снижению с увеличением концентрации воздуха в смеси, что отражено на графиках, представленных на рисунках 2. При этом снижение наклона линейных участков кривых свидетельствует о влиянии воздухонасыщения. Пунктирные линии, проведенные в продолжение этих линейных участков до пересечения с осью, отображающей потери напора, позволяют определить координаты, соответствующие начальному уклону i_0 . Выявлено, что значения начального уклона i_0 возрастают по мере уменьшения концентрации воздуха, что подчеркивает значимость контроля данного параметра для оптимизации транспортировки смеси.

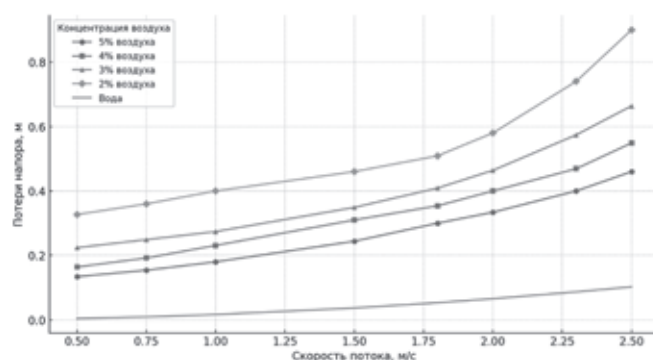


Рис. 2. Зависимость удельных потерь напора от средней скорости потока гидросмеси в трубопроводе для различных концентраций воздуха в смеси 1, 2, 3, 4; соответственно 5; 4; 3; 2; % /

Fig. 2. Graphical dependencies of specific head losses on the average flow velocity of the hydraulic mixture in the pipeline for various air concentrations in the mixture: 1 %, 2 %, 3 %, 4 %, and 5 %, respectively

На основании проведенного исследования разрабатываемая методика контроля включает последовательность этапов, направленных на мониторинг и управление уровнем возду-

хонасыщения в смеси, а также на регулирование ее ключевых реологических характеристик.

Проведенные эксперименты показали, что увеличение содержания воздуха в смеси приводит к значительному снижению ее вязкости и повышению текучести, что улучшает ее транспортные свойства. Например, при концентрации воздуха 5 % было зафиксировано уменьшение вязкости на 15 % по сравнению с первоначальным состоянием (0 % воздухом). Вязкость является одним из ключевых параметров, влияющих на успешность транспортировки закладочных смесей по трубопроводным системам [15]. Лабораторные исследования показали, что увеличение концентрации воздуха до 5 % приводит к значительному снижению этого показателя примерно на 25 %. Так, при насыщении смеси воздухом на 2 % наблюдалось уменьшение вязкости на 12 %, а при уровне 5 % снижение достигло уже 25 %.

Не менее значимым параметром, наряду с вязкостью, является скорость движения смеси в трубопроводе. Результаты проведенных исследований продемонстрировали, что повышение концентрации воздуха оказывает существенное влияние на увеличение скорости потока. В частности, при увеличении содержания воздуха с 2 до 5 % наблюдался рост скорости смеси на 12–15 %, что подтверждается данными, представленными в графическом формате.

Экспериментальные исследования, охватывающие работу магистральных и донных аэраторов, продемонстрировали, что последние обеспечивают наивысшую эффективность при достижении требуемого уровня воздухомыщения. Донные устройства создают мелкодисперсные пузырьки воздуха, что существенно улучшает реологические свойства смеси. Например, при концентрации воздуха 5 % использование донного аэратора позволило снизить вязкость смеси на 20 %. Это, в свою очередь, значительно ускорило транспортировку смеси по трубопроводам и минимизировало потери напора в системе.

Для эффективного контроля процесса были определены основные параметры:

1. *Концентрация воздуха* – фиксируется с применением специальных датчиков, регистрирующих колебания содержания газа в смеси, что дает возможность оперативно регулировать работу аэратора.

2. *Вязкость смеси* – контролируется с использованием реометров, которые позволяют оценивать изменения реологических свойств смеси на различных уровнях ее насыщения воздухом.

3. *Скорость потока смеси* – определяется через измерения, проводимые расходомерами и датчиками давления, регистрирующими скорость потока и уровень потерь напора.

4. *Настройка работы аэратора* – охватывает контроль подачи воздуха и воды, а также настройку оптимального режима функционирования устройства для поддержания заданной концентрации воздуха в смеси.

В связи с этим для достижения точного контроля уровня воздухомыщения смеси в режиме реального времени предложено использовать комплексное оборудование, включающее датчики и регуляторы, взаимодействующие для создания оптимальных условий транспортировки:

– *датчики давления* – фиксируют изменения в трубопроводной системе, анализируя потери напора, которые могут быть обусловлены изменениями концентрации воздуха в смеси;

– *расходомеры* – контролируют объемы перемещаемой смеси и подаваемого воздуха, что позволяет точно рассчитывать необходимое количество воздуха для поддержания заданной концентрации;

– *регуляторы расхода воздуха и воды* – настраивают параметры работы аэратора в динамическом режиме, обеспечивая поддержание требуемого уровня насыщения смеси воздухом на всех этапах ее перемещения.

На основе указанных параметров может быть разработана автоматизированная система контроля воздухомыщения смеси, способная в режиме реального времени адаптироваться к изменениям условий и поддерживать стабильные параметры, необходимые для эффективного транспортирования и качественной укладки смеси.

Контроль характеристик смеси осуществляется на различных стадиях, что позволяет отслеживать динамику изменений в реологических свойствах и уровне ее насыщения воздухом.

Стадии работы со смесью:

1. *Этап подготовки смеси.* На начальной стадии в закладочную смесь вводится воздух с использованием аэратора, причем его концентрация регулируется в зависимости от параметров смеси. Уровень насыщения фиксируется с помощью датчиков расхода и давления, а экспериментальные данные указывают, что концентрация воздуха на этом этапе может колебаться от 1 до 5 %, определяясь характеристиками смеси и режимом работы оборудования.

2. *Перемещение смеси через трубопроводы.* В процессе транспортировки смеси по трубопроводам, различающимся по диаметру и длине, уровень воздухомыщения подвержен изменениям, обусловленным воздействием таких факторов, как гидравлическое сопротивление, протяженность магистралей и давление в системе. Для наблюдения за этими изменениями на ключевых участках трубопровода устанавливаются датчики давления и расхода, обеспечивающие сбор данных в реальном времени.

3. *Процесс подачи смеси в горные выработки.* На этапе подачи смеси в подземные выработки требуется поддерживать оптимальную концентрацию воздуха, чтобы избежать образования пробок и обеспечить снижение вязкости материала. Для управления этим процессом применяются регуляторы расхода воздуха и воды, которые, ориентируясь на результаты измерений, динамически адаптируют объемы подачи компонентов, гарантируя стабильность работы системы.

Этапы регулирования и мониторинга воздухомыщения

Регулирование и контроль уровня воздухомыщения смеси осуществляется поэтапно, что позволяет обеспечить ее стабильные характеристики на всех стадиях процесса.

Этапы уровня воздухомыщения смеси:

1. *Начальный мониторинг и настройка системы.* На первом этапе, после подготовки смеси с заданной концентрацией воздуха, проводится контроль показателей при помощи датчиков давления и расхода. Полученные значения сравниваются с установленными параметрами, а данные отправляются в центральную систему управления для анализа и настройки дальнейших процессов.

2. *Динамическая корректировка в процессе транспортировки.* Во время перемещения смеси по трубопроводу система автоматически отслеживает изменения concentra-

ции воздуха и вязкости. При выявлении отклонений регуляторы расхода воздуха и воды адаптируют подачу компонентов. Например, если концентрация воздуха составляет 3 % и вязкость оказывается слишком высокой, подача воздуха увеличивается до 5 %, что позволяет снизить вязкость на 15–20 %, как подтверждается экспериментальными результатами.

3. *Финальный этап контроля перед укладкой.* Непосредственно перед подачей смеси в горные выработки проводится завершающая проверка ее параметров, таких как вязкость и текучесть. Если значения не соответствуют установленным требованиям, система автоматически регулирует подачу воздуха или воды, чтобы смесь оставалась в пределах оптимальных характеристик для безопасной и эффективной транспортировки.

Адаптивное управление подачей воздуха и воды для оптимизации условий транспортировки

Для поддержания стабильных параметров транспортировки смеси используется система регуляторов, интегрированная с датчиками давления, расхода и уровня насыщения воздухом. Эти регуляторы работают синхронно, обеспечивая управление вязкостью и воздухомасщением смеси в реальном времени.

Система регуляторов включает в себя:

– *регулятор подачи воздуха* – этот механизм контролирует объем воздуха, вводимого через аэратор, для поддержания заданной концентрации в смеси. Отклонения от оптимального уровня насыщения могут привести к значительному изменению вязкости и ухудшению транспортных свойств. Эксперименты подтвердили, что концентрация воздуха на уровне 5 % обеспечивает максимальную текучесть смеси и ее устойчивость в процессе транспортировки;

– *регулятор подачи воды* – управляет количеством воды, вводимой в смесь, что позволяет регулировать ее вязкость и текучесть. Увеличение содержания воды снижает вязкость, способствуя улучшению ее транспортируемости по трубопроводу и минимизации гидравлического сопротивления. Такая настройка повышает эффективность транспортировки смеси даже на сложных участках.

Реализация данной методики позволяет осуществлять всесторонний контроль параметров смеси на каждом этапе ее перемещения, что обеспечивает значительное улучшение реологических характеристик материала и существенно повышает производительность трубопроводных систем.

Создание системы контроля уровня воздухомасщения закладочных смесей в реальном времени предполагается ключевым этапом в повышении эффективности их транспортировки и укладки в условиях подземных горных выработок. Предложенная методика, основанная на использовании мониторинга параметров давления и расхода смеси, а также управлении подачей воздуха и воды через регуляторы, способствует результативности в улучшении реологических свойств материала и обеспечении его стабильной доставки на значительные расстояния.

Разработанный подход, сформированный с учетом выводов предыдущих исследований, обладает рядом таких значимых преимуществ, как:

– *оптимизация реологических характеристик смеси.* Точный контроль уровня насыщения воздухом способствует снижению вязкости и увеличению текучести. Это в свою оче-

ред, позволяет уменьшить потери напора и обеспечить более рациональное использование насосных мощностей;

– *увеличение производительности транспортировки.* За счет настройки работы трубопроводных систем сокращаются гидравлические потери, что обеспечивает надежность и стабильность подачи смеси в горные выработки.

Реализация контроля в динамическом режиме обеспечивает оперативную адаптацию к изменениям, возникающим в процессе транспортировки. Такой подход не только повышает уровень безопасности, но и предотвращает образование заторов и других потенциальных нарушений технологического процесса.

Рекомендации для дальнейших исследований

Несмотря на достигнутые успехи в проведенных экспериментах, контроль параметров воздухомасщения требует дальнейшего совершенствования для повышения точности и устойчивости функционирования систем. Анализ текущих данных позволяет определить основные направления, которые требуют более детального изучения и разработки усовершенствованных подходов.

Основные направления перспективной работы:

Инновационные подходы к созданию датчиков. Необходимо разработать новые сенсорные технологии, которые смогут с исключительной точностью фиксировать содержание воздуха в смеси на каждом этапе ее перемещения. Это обеспечит возможность более глубокого анализа изменений в реологических свойствах смеси и оперативного внедрения корректирующих решений, улучшая общую управляемость процессов.

Интегрированные системы автоматического регулирования. Предлагается внедрение полностью автоматизированных систем, способных не только отслеживать уровень воздухомасщения, но и в реальном времени вносить корректировки в параметры смеси. Это решение сведет к минимуму влияние человеческого фактора, обеспечивая высокую точность и надежность транспортировки.

Детальное исследование влияния аэрационных устройств. Расширение спектра исследований, направленных на изучение воздействия различных видов аэраторов, таких как донные и магистральные, на параметры смеси в реальных условиях эксплуатации. Это позволит оптимально настроить процессы аэрации в соответствии с характеристиками конкретных трубопроводных систем и транспортируемых составов.

Синхронизация с существующими технологическими платформами. Разработка рекомендаций по интеграции систем контроля воздуха с текущими технологиями, применяемыми в закладочных работах, включает настройку совместимости с насосными станциями, системами подачи и мониторинга. Такой подход обеспечит высокую степень взаимодействия и синергии между всеми компонентами технологического комплекса.

Выводы

1. Результаты исследования посвящены экспериментальной и теоретической проработке системы контроля степени воздухомасщения закладочных смесей, включая выбор технических средств, разработку критериев оценки и обоснование эффективности в контексте условий подземной транспортировки.

2. Продолжение исследований в указанных направлениях будет способствовать к созданию более продвинутых подходов управления и контроля технологическими процессами. Эти разработки не только повысят рентабельность и улучшат

эксплуатационные характеристики закладочных операций, но и оптимизируют транспортировку смесей в условиях подземных выработок, что существенно увеличит их общую эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Hefni M. Reinforcing Cemented Paste Backfill With Basalt Fiber: A Path Towards Sustainable Practice in Mine Backfilling. *Paper presented at the International Geomechanics Symposium*. Al Khobar, Saudi Arabia, October 2023. DOI: 10.56952/IGS-2023-0137.
2. Li Y, Fu J, Yang J, et al. Research on Slurry Flowability and Mechanical Properties of Cemented Paste Backfill: Effects of Cement-to-Tailings Mass Ratio and Mass Concentration. *Materials*. 2024;17(10):2222. DOI: 10.3390/ma17102222.
3. Liu X, Yang D, Wang W. Experimental Study on the Cross-Scale Relationship of Cemented Backfill under the Action of an Air-Entraining Agent. *Fractal and Fractional*. 2023;7(11):821. DOI: 10.3390/fractalfract7110821.
4. Zhang Y, Zhang S, Nie Q, Shen L, Wang W. Mechanical Properties and Microscopic Mechanism of a Multi-Cementitious System Comprising Cement, Fly Ash, and Steel Slag Powder. *Materials*. 2023;16(22):7195. DOI: 10.3390/ma16227195.
5. Должиков ПН, Пронский ДВ, Пронская НВ. Исследования тампонажно-закладочных ресурсосберегающих смесей для ликвидации выработанного пространства. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2023;4:590-8. [Dolzikhov PN, Pronskiy DV, Pronskaya NV. Research of resource-saving plugging and backfill mixtures for the elimination of mined-out spaces. *Bulletin of Tula State University. Earth Sciences*. 2023;4:590-8 (In Russ.)]
6. Шапошник ЮН, Шапошник СН. Рациональные технологии формирования закладочных массивов на подземных рудниках АО «Казцинк». Усть-Каменогорск, 2023: 69-74. [Shaposhnik YuN, Shaposhnik SN. Rational technologies for the formation of backfill massifs at underground mines of JSC Kazzinc. Ust-Kamenogorsk, 2023: 69-74 (In Russ.)]
7. Симон АА. Обоснование рациональных составов твердеющих закладочных смесей на рудниках Талнаха. *Перспектив Свободный – 2023: Мат-лы XIX Межд. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 24–29 апреля 2023 года*. Красноярск, 2023: 485-9. [Simon AA Justification of rational compositions of hardening filling mixtures at Talnakh mines. *Prospect Svobodny – 2023: Proceedings of the XIX International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, Krasnoyarsk, April 24-29, 2023*. Krasnoyarsk, 2023: 485-9 (In Russ.)]
8. Евсеев Т. А., Кириллин Д. С., Минеева В. А. Контролирование доставки закладочной смеси и оперативной ликвидации забутки трубопроводов в условиях подземного рудника «Интернациональный» *Молодежь и научно-технический прогресс в современном мире: Сб. мат-лов XII Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 20–21 апреля 2023 года*. Москва, 2023: 30-5. [Evseev T. A., Kirillin D. S., Mineeva V. A. Controlling the delivery of backfill mixture and prompt elimination of pipeline backfill in the conditions of the Internatsionalny underground mine. *Youth and scientific and technological progress in the modern world: Collection of materials from the XII All-Russian scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists, Moscow, April 20–21, 2023*. Moscow, 2023: 30–5. (In Russ.)]
9. Li S, Yang J, Enmark G. Air entrainment and transport in a bottom outlet controlled by a cylindrical gate. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 2023;1136(1):012033. DOI: 10.1088/1755-1315/1136/1/012033.
10. Kabiri-Samani A, Jafarinasab N, Khozani Z. Relationship between two-phase flow in bottom outlet and air-core vortices at intake. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*. 2023;177(4):521-31. DOI: 10.1680/jwama.21.00055
11. Wu K, Feng Y, Xu Y. Research on Method for Detecting Pipeline Blockages Based on Fluid Oscillation Theory. *Energies*. 2022;15(15):5373. DOI: 10.3390/en15155373.
12. Kelly DA, Garden M, Sharif K, Campbell D, Gormley M. A Novel Approach to Detecting Blockages in Sewers and Drains: The Reflected Wave Technique. *Buildings*. 2024; 14:3138. doi: 10.3390/buildings14103138.
13. Волчихина АА, Васильева МА. Комплексный подход увеличения длины транспортирования твердеющей закладочной смеси. *Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: Мат-лы 19-й Межд. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики, Тула, 09–10 ноября 2023 года*. Тула, 2023:104–110. [Volchikhina AA, Vasilyeva MA. Integrated approach to increasing the transportation length of hardening backfill mixture. *Socio-economic and environmental problems of the mining industry, construction and energy: Proceedings of the 19th International Conference on Problems of Mining, Construction and Energy, Tula, November 09-10, 2023*. Tula, 2023:104-10. (In Russ.)]
14. Орехов ГВ. Гидромеханический способ аэрации открытых водных объектов в условиях городской застройки. *Градостроительство и архитектура*. 2022;3(48):62-71. [Orekhov GV. Hydromechanical method of aeration of open water bodies in urban development conditions. *Urban development and architecture*. 2022;3(48):62-71 (In Russ.)]. DOI: 10.17673/Vestnik.2022.03.09.
15. Wang W, Yu B, Xu W, et al. Pipeline Transport Performance of Paste Backfill Slurry in Long-Distance Underground Backfilling: A Review. *Minerals*. 2024;14(12):1238. DOI: 10.3390/min14121238.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Максим Сергеевич Песочинский – аспирант кафедры подземной разработки месторождений Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет», Институт горного дела, геологии и геотехнологий, 660095, г. Красноярск, Российская Федерация, e-mail: grice007@yandex.ru

ABOUT THE AUTHORS

Maksim S. Pesochinskiy – PhD student at the Department of Underground Mining of Mineral Deposits, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Siberian Federal University», Institute of Mining, Geology and Geotechnology, 660095, Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: grice007@yandex.ru

Александр Николаевич Анушенков –

д-р техн. наук, заведующий кафедрой подземной разработки месторождений Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет»,
Институт горного дела, геологии и геотехнологий, 660095,
г. Красноярск, Российская Федерация,
e-mail: Aanushenkov@sfu-kras.ru

Alexander N. Anushenkov –

Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Underground Mining of Mineral Deposits, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Siberian Federal University”, Institute of Mining, Geology and Geotechnology, 660095, Krasnoyarsk, Russian Federation,
e-mail: Aanushenkov@sfu-kras.ru

Критерии авторства / Contribution:

авторы внесли равный вклад в проведение исследования и подготовку статьи. / The authors contributed equally to the research and preparation of the manuscript.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 04.03.2025.

Поступила после рецензирования: 04.04.2025.

Принята к публикации: 21.04.2025.

Article info

Received: 04.03.2025.

Revised: 04.04.2025.

Accepted: 21.04.2025.