

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 622.272.6

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-103-118

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ВЕДЕНИЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ РАБОТ ТВЕРДЕЮЩИМИ СМЕСЯМИ В ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Песочинский Максим Сергеевич, Анушенков Александр Николаевич,
Морин Андрей Степанович, Игнатова Ольга Сергеевна

Сибирский федеральный университет, Институт горного дела, геологии и геотехнологий

* для корреспонденции: grice007@yandex.ru



Информация о статье

Поступила:

11 декабря 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 июня 2025 г.

Принята к публикации:

30 июня 2025 г.

Опубликована:

28 августа 2025 г.

Ключевые слова:

Прочность гидросмеси,
напряжение сдвига, аэрация
закладочной смеси,
транспортабельность
закладочной смеси, донный
аэратор.

Аннотация.

Актуальность работы заключается в исследовании и анализе работы донного аэратора, противопоставленного магистральному, как способа повышения транспортабельности твердеющих смесей в подземные горные выработки и обеспечения равномерной укладки смеси в удаленных местах закладки. Проведены сравнительные эксперименты аэрации твердеющей смеси с использованием магистрального аэратора, а затем с использованием донного аэратора. Результаты экспериментов были представлены в виде графиков, наглядно показывающих кинетику твердения смесей, аэрированных в магистральном и донном аэраторах. Анализ показал, что скорость транспортирования и доля воздуха в смеси существенно влияют на равномерность распределения твердых частиц по сечению потока. Результаты численных экспериментов подтвердили возможность оптимизации расхода воды: при введении воздуха в смесь в строго определенной пропорции относительно массы воды экономия составляет 20 литров на кубометр. Для состава М80 ПЦ это эквивалентно снижению водосодержания на 4%. Изучение закладочных смесей позволило определить, что наиболее эффективным основным вяжущим компонентом для твердеющих гидросмесей выступает портландцемент марок М300 и М400, который активизирует процесс твердения. Ангидрит, применяемый как слабое вяжущее вещество, демонстрирует способность к уменьшению цементного расхода и улучшению текучести смесей, что особенно важно для высокомарочной закладки. В качестве инертного наполнителя наилучшим вариантом признан металлургический гранулированный шлак, обеспечивающий дополнительные преимущества. Представленные выводы имеют высокую практическую значимость, так как способствуют оптимизации технологических процессов, сокращению издержек и повышению надежности закладочных конструкций в горных выработках.

Для цитирования: Песочинский М.С., Анушенков А.Н., Морин А.С., Игнатова О.С. Исследование способа ведения закладочных работ твердеющими смесями в подземных горных выработках // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 4 (170). С. 103-118. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-103-118, EDN: YRELTХ

Введение

Под твердеющими смесями понимают гидросмеси каких-либо измельченных твердых материалов (твердая фаза) с капельной жидкостью (жидкая фаза). Гидросмесь для закладки выработанного пространства

представляет собой механическую смесь совместно измельченной твердой инертной массы и цемента с технологической водой. В зависимости от степени измельчения и концентрации твердой фазы формируются различные виды гидросмесей (Таблица 1). Они

Таблица 1. Основные виды гидросмесей

Table 1. Main types of hydraulic mixtures

Виды гидросмесей	Размер частиц, мм	Характеристика
Структурированные	0 – (0,05 – 0,074)	Тончайшие
Неструктурированные:	-	-
тонкодисперсные	(0,05 – 0,074) – (0,1 – 0,15)	Тонкие
мелкодисперсные	(0,1 – 0,15) – (2-3)	Мелкие
крупнодисперсные	> (2-3)	Крупные
Полидисперсные	> 0	Смешанные

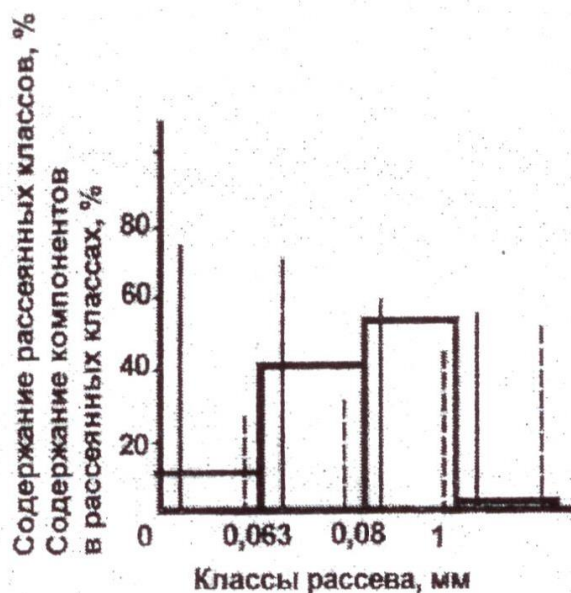


Рис. 1. Гранулометрический состав ЛТС марки АШЦ. Составлено автором

Fig. 1. Granulometric composition of LTS brand AshTs. Compiled by the author

существенно отличаются друг от друга по своим физико-механическим свойствам и закономерностям движения по трубопроводам.

Структурированные гидросмеси

Характерным для этих гидросмесей является существование их в покое. Стабильность обусловлена наличием коагуляционных связей между частицами, что является следствием межмолекулярного взаимодействия, способного оказывать существенное начальное сопротивление сдвигу упругими деформациями структурной решетки. Структурированные гидросмеси характеризуются сплошной сетчатой структурой, занимающей весь объем дисперсной среды. Вследствие этого эти гидросмеси по своим механическим свойствам приближаются к твердым телам. Чем выше концентрация твердой фазы и чем мельче твердые частицы, тем прочнее становятся структурные связи. Структурообразованию способствует преимущественное содержание в гидросмеси частиц класса 0-0,004 мм [1]. Благодаря наличию взвешенных частиц структурированные гидросмеси по сравнению с несущей жидкостью имеют повышенную кажущуюся вязкость,

которая зависит от концентрации дисперсных частиц и их крупности, что также способствует стабильности гидросмесей. Структурированные гидросмеси характеризуются неньютоновскими свойствами и их реологическое поведение описывается уравнением Бингама-Шведова. Неструктурированные гидросмеси характерны тем, что они существуют в движении. В таких гидросмесях отсутствует силовое взаимодействие между частицами. При движении таких гидросмесей твердые частицы касаются стенок трубы и увеличивают трение между слоями жидкости, что поднимает значение вязкости гидросмеси.

Закладочные смеси при системах разработки с закладкой выработанного пространства

Производство закладочных работ, куда входят процессы приготовления гидросмесей – литых твердеющих смесей (ЛТС) – их транспортирование по трубопроводу и укладка в выработанные пустоты для формирования искусственного массива – является неотъемлемой технологической операцией при добыче руд системами разработки с закладкой

выработанного пространства. Закладка призвана обеспечить безопасную и эффективную эксплуатацию месторождения с наибольшей полнотой извлечения полезного ископаемого и управления горным давлением. Основным требованием к закладочным смесям является соблюдение параметров кинетики твердения закладки и ее текучести, обеспечивающих достижение нормативной прочности и

транспортировку по подземным трубопроводам с укладкой в выработках [2].

Необходимые в практике, применяемые реологические свойства закладочной смеси должны отвечать следующим требованиям: осадка конуса в пределах 10-13 см, предельное напряжение сдвига – не более 180 Па, коэффициент расслаивания – не более 1.3. При этом кинетика набора прочности должна

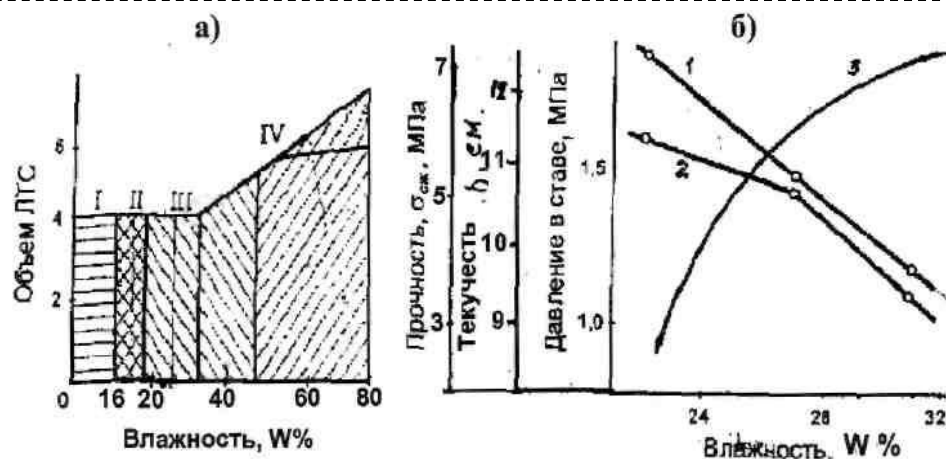


Рис. 2. Влияние водосодержания смеси на ее состояние текучести, прочности и давления в вертикальном стае. Составлено автором.

Fig. 2. The influence of the water content of the mixture on its state of fluidity, strength and pressure in the vertical column. Compiled by the author.

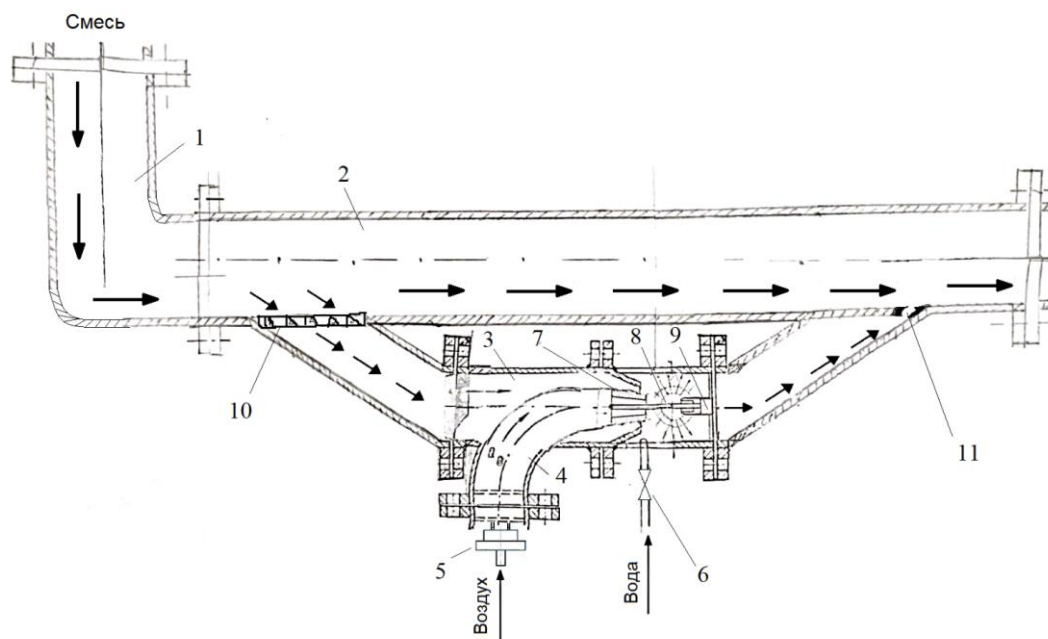


Рис. 3. Схема транспортирования азрированных смесей в горные выработки, за счет установки аэратора, где 1 – вертикальный участок трубопровода, 2 – горизонтальный участок трубопровода, 3 – трубчатая аэрационная камера, 4 – патрубок подводящий воздух, 5 – пневморегулятор, 6 – магистраль подачи воды, 7 – тангенциальное сопло, 8 – камера смешения, 9 – диффузор, 10 – грохот, 11 – полудиамеральное щелевое отверстие. Составлено автором

Fig. 3. Scheme of transporting aerated mixtures into mine workings, due to the installation of an aerator, where 1 – vertical section of the pipeline, 2 – horizontal section of the pipeline, 3 – tubular aeration chamber, 4 – air supply pipe, 5 – pneumatic regulator, 6 – water supply line, 7 – tangential nozzle, 8 – mixing chamber, 9 – diffuser, 10 – screen, 11 – semi-diametric slot hole. Compiled by the author

обеспечивать требование технологических процессов добычи.

В качестве основного вяжущего материала в твердеющих закладочных гидросмесьях используется портландцемент марок М300 или М400, который играет роль активизатора [3]. В качестве слабого вяжущего материала для высокомарочной закладки используется ангидрит, что позволяет снизить расход цемента и улучшить свойства текучести закладочных смесей [4]. Металлургический гранулированный шлак в этой смеси рассматривается как инертный наполнитель. Приготовленные в шаровой мельнице ЛТС представляют собой твердеющие тонкодисперсные гидросмеси при объемной концентрации твердого до 68% (Рис. 1).

Исходными данными по ЛТС являются рецептуры составов смесей, их реологические и прочностные характеристики в соответствии с РТПП09-2019. Анализ зависимости реологического состояния ЛТС от водосодержания показал, что смеси с содержанием твердого до 68%, приготовленные в шаровых мельницах, при течении проявляют свойства, характерные для ньютоновских сред, и характеризуются линейной зависимостью градиента среза от сопротивления сдвига. Начиная с концентрации около 75%, характер течения меняется и движение смеси наступает только после приложения определенной силы, характеризующей начальное напряжение сдвига.

Для течения таких гидросмесей характерно участие твердых частиц в турбулентном перемещении, и при средней скорости $U_{ср} \approx 1.25 - 1.5 U_{кр}$ обеспечивается примерно равномерное распределение твердых частиц по сечению потока, а гидросмесь приобретает свойства фиктивной однородной жидкости повышенной концентрации [5]. Состояние текучести сохраняется до критической скорости движения, при снижении которой смесь переходит в неустойчивое состояние, расслаивается и теряет подвижность.

Неустойчивые, расслаивающиеся смеси содержат тяжелые частицы, которые в покоящейся или в ламинарно-движущейся суспензии выпадают под действием сил гравитации в осадок. Течение таких смесей происходит, как правило, в турбулентном режиме, так как процессы взвешивания и переноса частиц отрицательной плавучести возможны только при наличии пульсации скоростей и давлений в несущей их жидкости. Таким образом, неустойчивые смеси в своем движении образуют класс так называемых взвесенесущих потоком.

Проведенная лабораторная установочная проверка (Рис. 2) показывает, что образующиеся смеси ангидритшлакоцементного состава

закладки по мере уменьшения водосодержания проходят широкий спектр состояний от жидких гидрозолей IV через структурированные смеси III, гели II к твердообразным системам I с признаками твердого тела. При этом в зависимости от концентрации составляющих компонентов или влажности состава происходит изменение текучести и прочности смесей и меняется давление в вертикальном ставе закладочного трубопровода (Рис. 2 (б)).

Из Рис. 2 (а) и (б) видно, что влажность ЛТС является критерием ее текучести, запаса потенциальной энергии потока в вертикальном ставе трубопровода и прочности формируемого массива, при этом необходимо заметить, что минимальная текучесть смесей (10 см по конусу ЦНИЛО) в существующих технологиях возведения закладочного массива обеспечивается влагосодержанием составов (более 28%), что негативно отражается на энергетических и прочностных свойствах ЛТС.

Магистральный и донный аэраторы

Для повышения эффективности доставки твердеющей смеси в подземные горные выработки необходимо увеличить текучесть смеси за счет понижения динамической вязкости и предельного напряжения сдвига, и доставка смеси до удаленных очистных выработок и укладка в них без избыточного увлажнения будут обеспечены [6].

Достигается данное техническое решение тем, что в способе трубопроводной доставки твердеющей смеси в подземные горные выработки, включающем загрузку смеси в пункте ее приготовления на поверхности, транспортирование смеси по трубопроводной магистрали, содержащей вертикальный и горизонтальный участки, выгрузку смеси у мест закладки горных выработок, восстановление реологических свойств смеси обеспечивают путем отделения части транспортируемой твердеющей смеси от исходного объема в трубчатую аэрационную камеру, образования в ней гидродинамической кавитации и последующим возвратом этой части в основной поток трубопроводной магистрали (Рис. 3).

При использовании магистрального аэратора смесь насыщают крупнодисперсными пузырьками воздуха, что неэффективно сказывается на реологических свойствах смеси.

При использовании донного аэратора смесь насыщают мелкодисперсными пузырьками воздуха, которые затем, расширяясь из-за перепада давления, взрываются и создают локальные волны давления, что приводит к дроблению, измельчению и турбулентному смешиванию компонентов смеси. Таким образом, снижается плотность и вязкость смеси, увеличивается скорость общего потока, что

приводит к более эффективному транспортированию смеси в горные выработки.

Способ доставки в подземные горные выработки твердеющей смеси через донный аэратор осуществляется следующим образом:

Приготовленную твердеющую смесь загружают в вертикальный участок трубопровода, которая, подвигаясь под

действием гидростатического давления, поступает в горизонтальный участок трубопроводной магистрали. В процессе продвижения по горизонтальному участку часть смеси подвергают аэрации для восстановления ее реологических свойств в трубчатой аэрационной камере. Для этого часть твердеющей смеси отделяют от исходного объема и направляют в

Таблица 2. Характеристики смесей М30

Table 2. Characteristics of M30 mixtures

Марка	Расход материалов, кг/м ³				Плотность γ , т/м ³	Контрольная характеристика прочности, МПа			
	Цемент	Ангидрид	Шлак	Вода		3 суток	7 суток	28 суток	180 суток
АШЦ (М30)	45-55 50	600-800 700	600-900 750	500- 550	1,3-1,8 1,55	0,4-0,5	0,7-0,9	1,4-1,7	2,6- 3,0

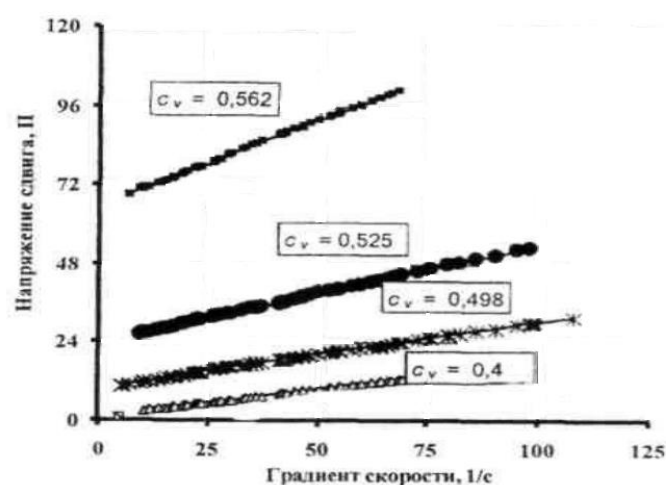


Рис. 4. Зависимость напряжения сдвига (τ) от градиента скорости (γ) для гидросмесей в диапазоне концентраций воздуха 2-5% при этом концентрация твердого C_v 0,562;0,526;0,498;0,40. Составлено автором

Fig. 4. Dependence of shear stress (τ) on the velocity gradient (γ) for hydraulic mixtures in the range of air concentrations of 2-5%, while the concentration of solid C_v is 0.562;0.526;0.498;0.40. Compiled by the author



Рис. 5. Зависимость вязкости (η) гидросмеси от концентрации воздуха в диапазоне 2-5% при концентрации твердого 0,562-0,216% соответственно. Составлено автором

Fig. 5. Dependence of viscosity (η) of the slurry on air concentration in the range of 2-5% with a solid concentration of 0.562-0.216%, respectively. Compiled by the author

трубчатую аэрационную камеру, где за счет сильного локального снижения давления смеси относительно давления насыщенного пара образуется гидродинамическая кавитация, то есть образование в ней мелкодисперсных пузырьков (каверн, пустот) воздуха. Далее смесь подают через диффузор и полудиаметральное щелевое отверстие, где соединяют с необработанной (неаэрированной) частью смеси и транспортируют дальше в горные выработки.

Прочностные характеристики смеси

Для сохранения прочностных характеристик смеси при транспортировании ее по трубопроводной магистрали в подземные горные выработки необходимо снизить содержание воды в смеси. Для снижения содержания воды в твердеющей смеси необходима аэрация при закачке определенного количества воздуха.

Были проведены исследования процесса транспортирования аэрированных ЛТС, целью которых является доказательство возможности обеспечения надежного транспортирования ЛТС с пониженным водосодержанием, при разрушении их структурной вязкости и снижении предельного напряжения сдвига способом аэрации, а также определение влияния основных параметров процесса аэрации ЛТС на реологические свойства, текучесть образующихся суспензий и их прочность.

Смеси типа ЛТС в данном случае рассматриваются как вязкопластические среды, которые подчиняются общему закону Шведова-Бингама и могут быть представлены в виде: $\tau = \eta \cdot (\partial v / \partial n) + \tau_0$, где τ – касательные напряжения сдвига смеси в точке потока с градиентом среза $\partial v / \partial n$; τ_0 – предельное напряжение сдвига, Па; η – структурная вязкость, Па·с [7].

Транспортирование характеризуется

условиями: $\tau_0 = \tau_{\phi} \pm \Delta \tau_0$; $\eta = \eta_{\phi} \pm \Delta \eta$, где τ_{ϕ} – фактическое предельное напряжение сдвига; $\Delta \tau_0$ – приращение предельного напряжения сдвига; η_{ϕ} – фактическая вязкость; $\Delta \eta$ – приращение вязкости. Реологическую модель смеси можно представить уравнением: $\tau = \tau_m + \eta_m \cdot (\partial v / \partial n)$, где τ_m – предельное напряжение сдвига при механическом воздействии; η_m – остаточная вязкость ЛТС с предельно-разрушенной структурой; $\partial v / \partial n$ – градиент скорости.

В процессе экспериментов должна быть определена зависимость напряжения сдвига смеси от градиента скорости сдвига для приведенных концентраций твердых частиц и воздушного содержания в объеме исследуемого типа закладки АШЦ состава М30 (Таблица 2) [8].

Зависимость прочностных характеристик смеси от содержания в ней воды и воздуха

При исследовании реологических характеристик закладочных аэрированных гидросмесей мы выявили, что прочность смеси напрямую зависит от содержания в ней воды и воздуха. В наших экспериментах мы уменьшили содержание воды, но при этом закачали воздух для повышения транспортабельности смеси. Избыток содержания воздуха ведет к потере прочности смеси, поэтому необходимо найти оптимальную концентрацию добавляемого воздуха.

Исследование производилось как на основе результатов экспериментов, полученных при измерении потерь напора, так и на основе данных, полученных с помощью ротационного вискозиметра.

В процессе экспериментов определялась зависимость напряжения сдвига от градиента скорости сдвига для различной воздухонасыщенности объема исследуемой

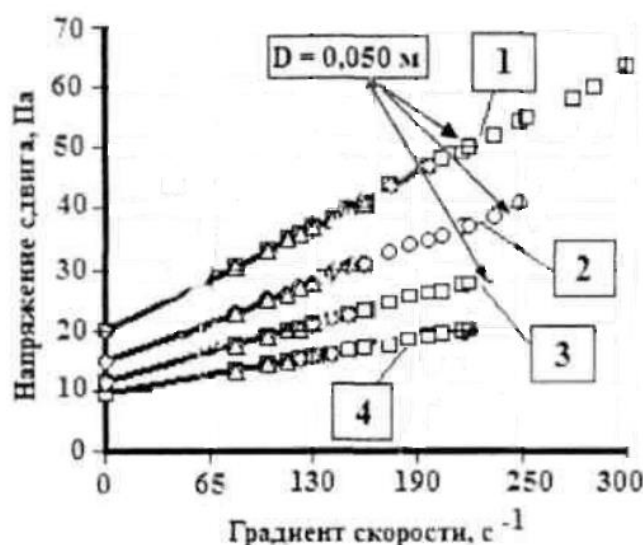


Рис. 6. Реологические характеристики гидросмесей в ламинарной области потока, полученные на трубных экспериментах 1,2,3,4- $C_v=2;3;4;5$, % воздуха соответственно. Составлено автором
Fig. 6. Rheological characteristics of hydraulic mixtures in the laminar flow region, obtained in pipe experiments 1,2,3,4- $C_v=2;3;4;5$, % air, respectively. Compiled by the author

гидросмеси. Графические зависимости (Рис. 4) показывают, что исследованные гидросмеси при течении в зазоре вискозиметра при концентрации воздуха менее 5% проявляют свойства неньютоновских жидкостей и соответствуют линейному уравнению $\tau = \tau_0 + \eta\gamma$, Па.

Коэффициент вязкости η в формуле определяется тангенсом угла наклона реологической кривой к оси абсцисс.

На Рис. 5 приведен график изменения динамического коэффициента вязкости гидросмеси.

Из графика видно, что вязкость уменьшается с ростом концентрации воздуха. Результаты замеров потерь напора при исследовании течения закладочных гидросмесей по трубопроводу позволяют определить реологические характеристики этих смесей, если учесть, что в общем виде напряжение сдвига пропорционально потерям напора и диаметру трубопровода, а градиент скорости сдвига пропорционален средней скорости потока и обратно пропорционален диаметру трубопровода [9].

На Рис. 6 приведены графики изменения напряжения сдвига в функции градиента

скорости сдвига в ламинарной области течения исследованных гидросмесей.

Из графиков видно, что угол наклона кривых течения уменьшается с ростом концентрации воздуха. В области ламинарного режима экспериментальные точки напряжений сдвига для гидросмесей с равной концентрацией ложатся на одну прямую, вид которой аналогичен графическим зависимостям, полученным для таких гидросмесей при исследовании на вискозиметре [10].

Полученные значения потерь напора в трубопроводах позволяют рассчитать эффективную вязкость гидросмесей как отношение напряжения сдвига (τ) к градиенту скорости сдвига (γ) при соответствующих значениях начального напряжения сдвига (τ_0).

Расчетные значения эффективной вязкости гидросмесей и значения начального напряжения сдвига приведены в Таблице 3, по данным которой на Рис. 6 построен график изменения эффективной вязкости как функции концентрации воздуха в гидросмеси.

Вязкость, замеренная на вискозиметре, больше значений, полученных в трубопроводах. Связь между вискозиметрическими и трубными

Таблица 3. Эффективная вязкость аэрированных гидросмесей на основе экспериментов на трубопроводе

Table 3. More effective viscosity of aerated slurries based on pipeline experiment

Объемная концентрация воздуха в гидросмеси, %	Напряжение сдвига, Па		Эффективность вязкость, $\eta_{\text{эф}}$ Па·с	Максимальный градиент скорости сдвига, С-1 в трубопроводе D, м
	τ_0	τ		
5 (36,7)	9,5	19,92	0,04651	112
4 (39,6)	11,5	28,82	0,07217	120
3 (44,0)	15	40,77	0,1006	128
2 (49,2)	20	63,14	0,13481	160

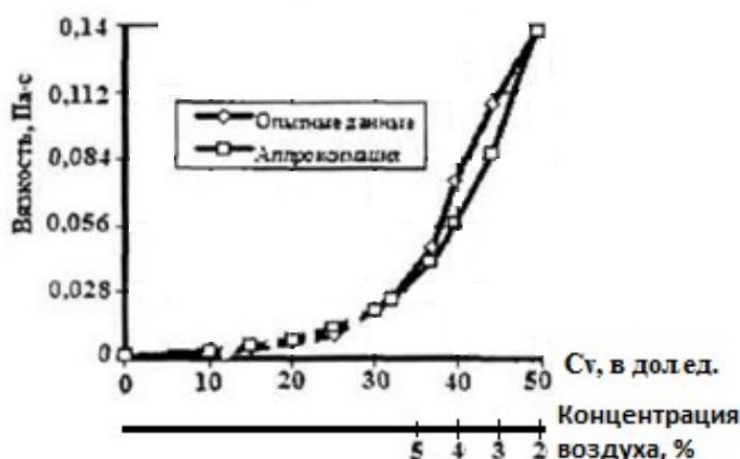


Рис. 7. График зависимости эффективной вязкости ($\eta_{\text{эф}}$) от концентрации воздуха % и (C_v) твердых частиц (эксперименты на трубопроводах) соответственно. Составлено автором

Fig. 7. Graph of effective viscosity (η_{eff}) versus air concentration % and (C_v) solid particles (experiments on pipelines), respectively. Compiled by the author

результатами можно выразить следующей формулой $\eta_{\text{труба}} = \alpha \cdot \eta_{\text{вискоз}}$, где $\eta_{\text{труба}}$ – коэффициент вязкости, полученный по результатам экспериментов на трубопроводах, $\eta_{\text{вискоз}}$ – то же, на основе замеров в вискозиметре, α – коэффициент пропорциональности. С увеличением концентрации расхождение в значениях вязкости, измеренной на приборе и в трубах, уменьшается. Коэффициент, пропорциональности выражается формулой: $\alpha = 40e^{-6.627Cv}$. [11]

Расхождение значений вязкости в вискозиметре и в трубах объясняется стесненными условиями и сложным характером течения гидросмеси в узком рабочем зазоре прибора, а также механическим взаимодействием отдельных частиц твердого материала между собой и стенками, ограничивающими внутренний и наружный цилиндры прибора. При пересчете вязкости гидросмеси, полученной при использовании

вискозиметра, на значения вязкости, соответствующие трубным экспериментам коэффициент α может быть использован как постоянная прибора или как поправка, учитывающая стесненный характер течения смеси [12].

Набор прочности в зависимости от воздухомаслянистости смеси

Лабораторные исследования предусматривали изучение свойств ПЦ составов М80 и их прочностных характеристик после аэрирования. Смесь готовилась при совместном перемешивании и домоле в шаровой мельнице с дальнейшим транспортированием и аэрированием в трубопроводе лабораторной установки и подачей аэрированной смеси в накопительный резервуар. Из накопительного резервуара готовая смесь отбиралась на исследования.

Для домолы и перемешивания в мельнице применялись цельбеспы, каждый весом 120 г. Их объем принимался из расчета 1/3 от объема



Рис. 8. Узел магистрального аэратора. Фотография выполнена автором в ходе эксперимента
Fig. 8. Main aerator assembly. Photograph taken by the author during the experiment

Таблица 4. Составы АЛТС, аэрированные в магистральном аэраторе

Table 4. ALTS compositions aerated in the main aerator

Расход материалов, кг/м ³			Плотность смеси $\gamma_{\text{тв}}$, т/м ³	Воздухомаслянистость смеси, %	Расплав по Суттарду, мм	Контрольная характеристика прочности, МПа, сутки				
Песок	Цемент	Вода л/м ³				3	7	28	90	180
1060	350	500	1,850	-	200	1,5	2,3	3,9	5,8	8
1080	360	500	1,786	2	210	1,3	2,1	3,6	5,6	7,8
1090	360	500	1,735	3	225	1,0	1,6	3,2	5,0	7,4
1040	360	500	1,697	4	239	0,8	1,2	2,0	3,3	4,6
1012	360	500	1,560	5	241	0,5	0,9	1,7	2,9	4,3

исследуемого состава смеси. При замешивании 30 литров смеси вес цильбеппсов составил 39 кг. Время замешивания во всех экспериментах составляло 10 минут. Сразу после окончания замеса производилось определение растекаемости смеси по Сутгарду, измерялась ее плотность. После насыщения смеси воздухом в магистральном аэраторе трубопровода (Рис. 8): замеры повторялись и подготавливались образцы кубики для испытания на прочность.

Исследуемые показатели – удельный расход материалов, плотность твердеющих смесей, их транспортабельность и контрольные характеристики прочности по срокам твердения – представлены в Таблице 4. Кинетика твердения составов ПЦ с воздухом насыщением в магистральном аэраторе представлена на Рис. 9. Испытания образцов на прочность представлены на Рис. 10.

Исследование песчано-цементных составов

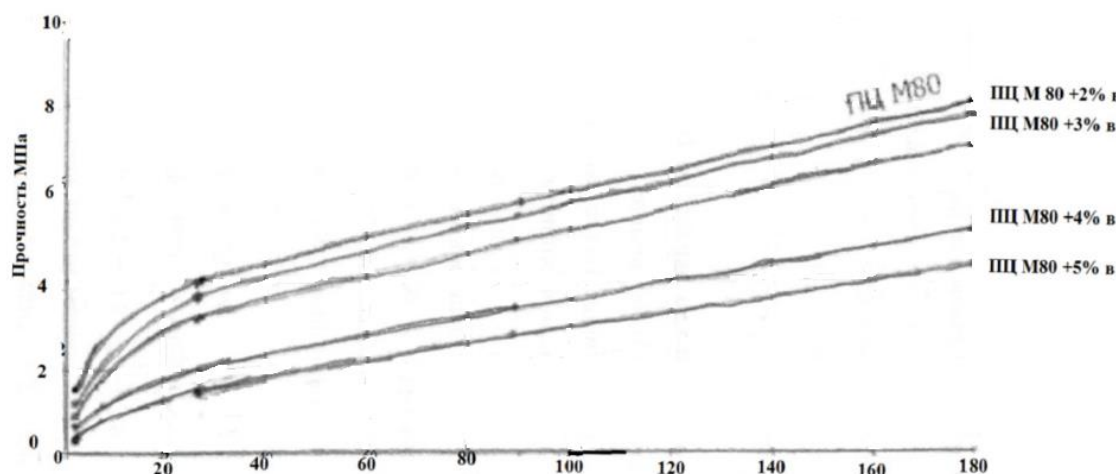


Рис. 9. Кинетика твердения песчано-цементных составов (ПЦ), аэрированных в магистральном аэраторе. Составлено автором

Fig. 9. Kinetics of hardening of sand-cement compositions (SC) aerated in the main aerator. Compiled by the author

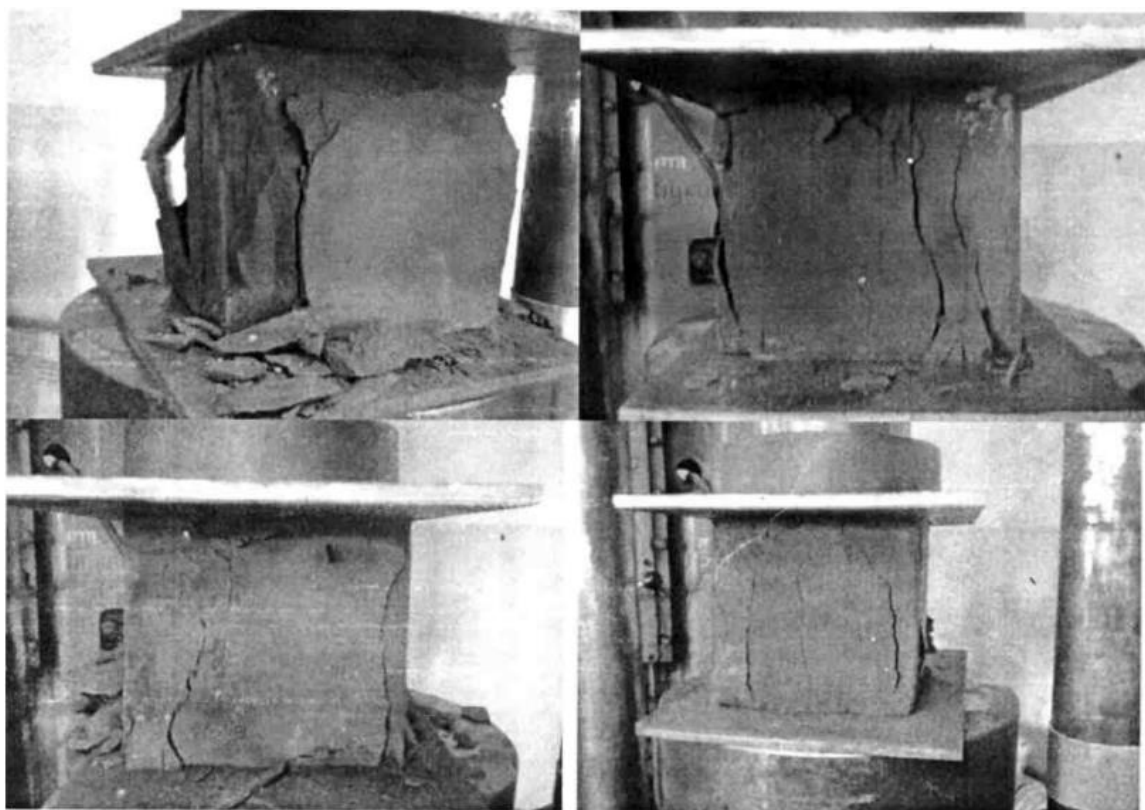


Рис. 10. Испытания образцов на прочность. Фотография выполнена автором в ходе эксперимента

Fig. 10. Strength testing of samples. Photograph taken by the author during the experiment



Рис. 11. Узел донного аэратора. Фотография выполнена автором в ходе эксперимента
 Fig. 11. Bottom aerator assembly. Photograph taken by the author during the experiment

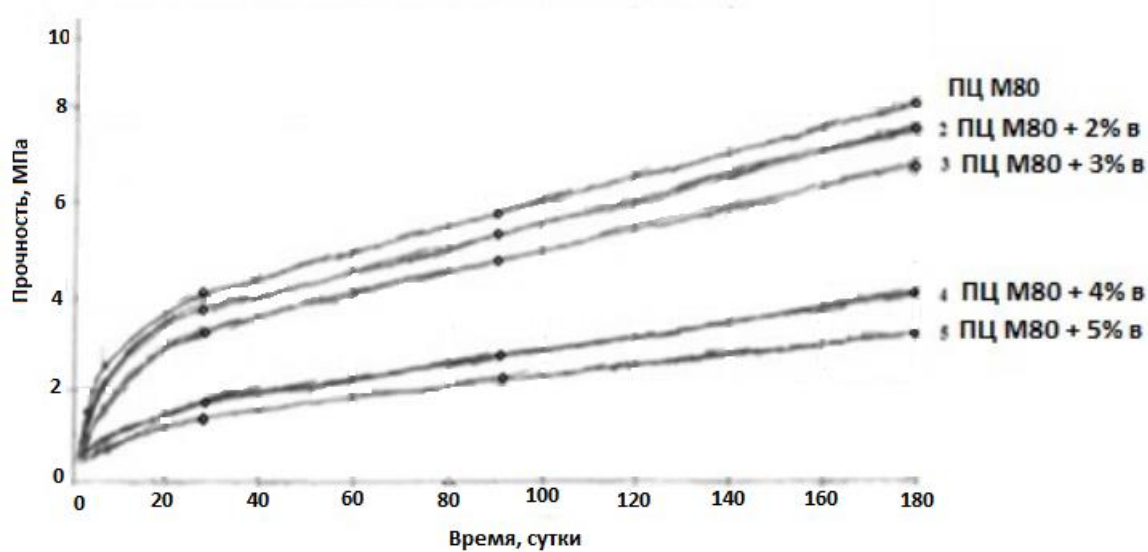


Рис. 12. Кинетика твердения песчано-цементных составов (ПЦ) при воздухомасировании в донном аэраторе. Составлено автором
 Fig. 12. Kinetics of hardening of sand-cement compositions (SC) with air saturation in the bottom aerator. Compiled by the author

Таблица 5. Составы АЛТС, аэрированные в донном аэраторе
Table 5. ALTS compositions aerated in the bottom aerator

Расход материалов, кг/м ³			Плотность смеси $\gamma_{\text{тв}}$ т/м ³	Воздухонасыщение смеси, %	Распływ по Сутгарду, мм	Контрольная характеристика прочности, МПа, сутки				
Песок	Цемент	Вода л/м ³				3	7	28	90	180
1080	350	500	1,850	-	195	1,6	2,4	4,0	5,8	8,0
1080	360	500	1,786	2	210	1,4	2,2	3,8	5,3	7,5
1060	360	500	1,735	3	225	1,0	1,7	3,1	4,8	7,0
1040	360	500	1,697	4	239	0,8	1,0	1,8	2,4	4,0
1012	360	500	1,560	5	241	0,6	0,8	1,8	2,2	3,2

Таблица 6. Сводная таблица результатов исследований аэрированных смесей ПЦ состава на прочность и подвижность при воздухомасности 1-5% от массы воды в составе

Table 6. Summary table of research results on aerated mixtures PC composition for strength and mobility at air saturation of 1-5% by weight water in the composition

№ п/п	Расход материалов, кг/м ³			Характеристика смесей до аэрации					
	Песок	Цемент	Вода л/м ³	r^o смеси, C°	Тонкость помола % класса - 0,08мм	Влажность смеси, %	Объемный вес, т/м ³	Размеры кубика, см	Подвижность смеси по Сутгарду, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1080	360	500	20	54	26	(1,850)	10x10x10	(195)
2	1080	360	500	19,6	54,1	26	1,786	-	196
3	1090	360	500	20	54,1	26,1	1,735	-	197
4	1040	360	500	20,4	53,9	26,0	1,697	-	197
5	1012	360	500	20,1	54,0	26,1	1,560	-	199
6	1070	360	500	21,0	54,2	26,0	1,845	-	199
7	1090	360	480	20,3	51,1	25,0	1,830	-	176
8	1090	360	480	20,1	52,1	25,1	1,820	-	176
9	1090	360	470	20,0	53,4	25,0	1,822	-	176
10	1090	360	470	21,1	54,0	24,3	1,830	-	175
11	1080	360	470	20,3	53,8	24,1	1,840	-	174
12	1090	360	470	20,0	54,2	24,2	1,840	-	174

Таблица 7. Характеристика смесей после аэрации

Table 7. Characteristics of mixtures after aeration

Воздухонасыщение смеси, %	Характеристика смесей после аэрации							
	Объемный вес, т/м³	Вязкость смеси, Па*с	Подвижность по Суттарду, мм	Контрольная характеристика прочности, МПа, сутки				
				3	7	28	90	180
11	12	13	16	17	18	19	20	21
0	(1,850)	0,594	(195)	1,5	2,3	3,9	5,8	8
2	1,786	0,516	210	1,3	2,1	3,6	5,6	7,8
3	1,795	0,2929	225	1,0	1,6	3,2	5,0	7,4
4	1,697	0,205	239	0,8	1,2	2,0	3,3	4,6
5	1,560	0,168	241	0,5	0,9	1,7	2,9	4,3
1	1,803	0,513	200	1,5	2,4	4	5,9	8
1	1,813	0,800	201	1,3	2,3	3,9	5,8	7,9
2	1,799	0,701	205	1,2	2,3	3,8	5,6	7,8
3	1,788	0,482	210	1,1	1,9	3,2	5,0	7,3
1	1,800	0,802	200	1,0	1,3	3,4	4,9	7,3
2	1,790	0,731	206	0,9	1,2	3,3	4,7	7,2
3	1,780	0,512	210	0,8	1,1	3,2	4,1	5,7

смеси М80 на прочность при их воздухонасыщении в донном аэраторе (Рис. 11) проводилось аналогично исследованиям прочностных характеристик составов, аэрированных в магистральном. Показатели исследования – расход материалов смеси, плотность твердеющих составов, их транспортабельность и контрольные характеристики набора прочности по срокам твердения – представлены в Таблице 5. По результатам сравнения анализов кинетики твердения смесей при воздухонасыщении их в магистральном аэраторе (Рис. 8, Таблица 4) и донном аэраторе (Рис. 11, Таблица 5) видно, что воздухосодержание в смесях ПЦ составов от 3% до 5% снижает их прочность по срокам твердения в 3, 7, 28, 90 и 180 дней практически в два раза, как при аэрации в магистральном аэраторе, так и в донном аэраторе соответственно. Только состав с содержанием 2% воздуха насыщения смеси соответствует требованием набора прочности по срокам твердения согласно регламенту при ведении закладочных работ [13].

Далее с целью уточнения влияния водосодержания, а также влажности аэрированных составов смесей на их

подвижность и прочность проведены дополнительные исследования смесей с пониженным содержанием воды в рецептуре их состава. Результаты представлены в сводных Таблицах 5 и 6, где показаны ранее изученные составы и вновь исследованные на предмет их подвижности и нормативной прочности при снижении водосодержания. Из таблицы видно, что со снижением водосодержания с 500 л/м³ до 480 л/м³ закладочной смеси при аэрировании составов воздухом 1;2% включительно происходит снижение показателей текучести исходных составов смеси по Суттарду, но аэрация обеспечивает ее транспортабельность. При этом показатели по Суттарду, мм до аэрации – 39 176, 175мм после аэрации – 201, 205мм при требуемой не менее 180мм. При этом вязкость смесей составила 0,800 и 0,710Па*с соответственно, а набор прочности составов по срокам твердения входит в рекомендуемые пределы прочности РТПП-09-2019, однако при воздухонасыщении 3% показатели прочности составов ниже требуемых РТПП-09-2019. При этом их текучесть соответствует требованиям транспортабельности, однако по требуемым коллективным показателям прочности и текучести согласно РТПП-09-2019 составы с

воздухонасыщением 3 и более % ограничиваются в применении [14, 15].

При снижении водосодержания до 470 л/м³ смеси, после аэрации 1; 2; 3% воздухом, смеси показали прочность ниже рекомендуемой РТПП-09-2019 при соответствии показателей их текучести 200, 206, 210 мм по Суттарду и вязкости 0,802; 0,731; 0,512 Па·с для самотечного транспорта по трубам. На основании анализа сводных показателей текучести, вязкости и прочности исследуемых М80-ПЦ составов смеси можно сделать вывод, что рационально использовать аэрацию твердеющих смесей можно при их насыщении воздухом до 2% включительно от массы водосодержания состава, при этом возможно снижение расхода воды на 1м³ смеси на 20 литров, в частности, в исследуемом М80 ПЦ составе, это соответствует 4% от его водосодержания согласно его рецептуре по РТПП-09-2019 [16].

Заключение

На основании анализа сводных показателей текучести, вязкости и прочности, исследуемых М80-ПЦ составов смеси, можно сделать вывод, что рационально использовать аэрацию твердеющих смесей при их насыщении воздухом до 2% включительно от массы водосодержания состава, при этом возможно снижение расхода воды на 1м³ смеси на 20 литров, в частности, в исследуемом М80 ПЦ составе, это соответствует 4% от его водосодержания согласно его рецептуре по РТПП-09-2019.

Увеличение прочности и текучести смеси – одна из главных задач при транспортировании твердеющих смесей в подземные горные выработки. Для решения этой задачи необходимо подобрать оптимальную концентрацию воды и воздуха при закачке их в смесь в процессе аэрирования. Только при правильном выборе состава закладочной смеси, правильном ее изготовлении, оптимального содержания воды и воздуха в ней, а также используя именно донный аэратор для обновления реологических свойств смеси, предельная длина транспортирования ЛТС увеличится и обеспечится равномерность укладки в удаленных горных выработках. При этом критическая скорость транспортирования ЛТС должна соответствовать предельному режиму, разделяющему устойчивый (без заиливания) и неустойчивый режимы движения смеси по горизонтальным участкам трубопровода. Также должно соблюдаться предельное динамическое равновесие между потоком смеси и перемешиванием твердых частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Песочинский М. С., Анушенков А. Н.,

Мацицкий А. Л. Повышение эффективности трубопроводной доставки твердеющей смеси в подземные горные выработки. Научная статья. Сборник трудов конференции «Перспектив Свободный-2022». Красноярск : СФУ, 2022.

2. Kuzmenko O., Dychkovskiy R., Petlovanyi M., Buketov V., Howaniec N., Smolinski A. Mechanism of interaction of backfill mixtures with natural rock fractures within the zone of their intense manifestation while developing steep ore deposits // Sustainability. 2023. Vol. 15. P. 4889. DOI: 10.3390/SU15064889.

3. Kou Y., Jiang H., Ren L., Yilmaz E., Li Y. Rheological properties of cemented paste backfill with alkali-activated slag // Minerals. 2020. Vol. 10. P. 288. DOI: 10.3390/min10030288

4. Голованчиков А. Б., Тябин Н. В. К вопросу об аномалии вязкости суспензий. // Реология и процессы в аппаратах химической промышленности. Волгоград, 1977. С. 69–76.

5. Ходаков Г. С. Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование // Рос. Хим. Журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева), т. XLVII. 2003. № 2. С. 33–44.

6. Покровская В. Н. Трубопроводный транспорт в горной промышленности. М. : Недра, 1985.

7. Анушенков А. Н. Разработка комплексов приготовления и транспорта твердеющих смесей для закладки горных выработок. Красноярск : ГУЦМиЗ, 2006.

8. 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.

9. Бронников Д. М., Цигалова М. Н. «Закладочные работы в шахтах»: Справочник. М. : Недра, 1989. С. 273–282.

10. Анушенков А. Н., Бритвин Д. С. Исследование аварийных участков забутованных закладочных трубопроводов в условиях рудника «Октябрьский» // Электронный сборник материалов международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив свободный-2017». Подземные горные работы. Красноярск : СФУ, 2017.

11. Филимонов В. В., Христолюбов 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.

12. 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.

13. 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.

14. Rodriguez J. M., Meneses R., Orus R. J. Active vibration control for electric vehicle compliant drivetrains. Industrial Electronics Society, IECON 2013, 39th Annual Conference of the IEEE. 2013. Pp. 2590–2595.

15. Голик В. И., Разоренов Ю. И., Каргинов К. Г., Носырев М. Б. Активация вяжущих для твердеющих смесей. Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2018. № 1. С. 8–14.

16. Поветкин В. В., Керимжанова М. Ф., Орлова Е. П., Букаева А. З. Совершенствование оборудования для транспортировки гидросмеси в обогащательном производстве // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 6. С. 161–169.

© 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

Морин Андрей Степанович, д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Горные машины и комплексы». AMorin@sfu-kras.ru, 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: AMorin@sfu-kras.ru

Игнатова Ольга Сергеевна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Горные машины и комплексы», 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: ignatova.ol@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Песочинский Максим Сергеевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Анушенков Александр Николаевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Морин Андрей Степанович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Игнатова Ольга Сергеевна – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

ON THE ISSUE OF STACKING WORKS WITH HARDENING MIXTURES IN UNDERGROUND MINING WORKINGS

Maksim S. Pesochinskiy, Aleksandr N. Anushenkov,
Andrey S. Morin, Olga S. Ignatova

Siberian Federal University, Institute of mining, Geology and geotechnologies

* for correspondence: grice007@yandex.ru



Article info

Received:

11 December 2024

Accepted for publication:

22 June 2025

Accepted:

30 June 2025

Published:

28 August 2025

Keywords: Strength of hydraulic mixture, shear stress, aeration of the filling mixture, transportability of the filling mixture, bottom aerator

Abstract.

The relevance of this study lies in the investigation and analysis of the performance of the bottom aerator, compared to the mainline aerator, as a method to improve the transportability of hardening mixtures in underground mine workings and to ensure uniform placement of the mixture in remote backfill areas. Comparative experiments on the aeration of hardening mixtures were conducted using both the mainline aerator and the bottom aerator. The experimental results were presented in the form of graphs clearly illustrating the hardening kinetics of mixtures aerated by the two methods. Analysis revealed that transportation speed and air content in the mixture significantly influence the uniform distribution of solid particles across the flow cross-section. Numerical experiments confirmed the potential for optimizing water consumption: introducing air into the mixture in a precisely defined ratio relative to the water mass allows saving 20 liters per cubic meter. For the M80 PC mixture, this corresponds to a 4% reduction in water content. The study of backfill mixtures identified Portland cement of grades M300 and M400 as the most effective primary binder for hardening hydraulic mixtures, serving as an activator of the hardening process. Anhydrite, used as a secondary binder, was found to reduce cement consumption and improve the flowability of mixtures, which is particularly critical for high-strength backfill. Metallurgical granulated slag was identified as the optimal inert filler, providing additional benefits. The presented findings hold significant practical importance as they contribute to the optimization of technological processes, cost reduction, and enhanced reliability of backfill structures in underground mining operations.

For citation: Pesochinskiy M.S., Anushenkov A.N., Morin A.S., Ignatova O.S. On the issue of stacking works with hardening mixtures in underground mining workings. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 4(170):103-118. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-103-118, EDN: YRELTX

REFERENCES

1. Pesochinsky M.S., Anushenkov A.N., Matsitsky A.L. Increasing the efficiency of pipeline delivery of hardening mixture to underground mine workings. Scientific article. Collection of conference proceedings "Svobodny Avenue-2022". Krasnoyarsk: SFU; 2022.
2. Kuzmenko O., Dychkovskiy R., Petlovanyi M., Buketov V., Howanec N., Smolinski A. Mechanism of interaction of backfill mixtures with natural rock fractures within the zone of their intense manifestation while developing steep ore deposits. *Sustainability*. 2023; 15:4889. DOI: 10.3390/SU15064889.
3. Kou Y., Jiang H., Ren L., Yilmaz E., Li Y. Rheological properties of cemented paste backfill with alkali-activated slag. *Minerals*. 2020; 10:288. DOI: 10.3390/min10030288.
4. Golovanchikov A.B., Tyabin N.V. On the issue of anomalies in the viscosity of suspensions. Rheology and processes in chemical industry apparatus. Volgograd, 1977. Pp. 69–76.
5. Khodakov G.S. Rheology of suspensions. The theory of phase movement and its experimental justification. *Russ. Chem. Journal (Journal of the Russian Chemical Society named after D.I. Mendeleev)*. vol. 1, p. XLVII. 2003; 2:33–44.
6. Pokrovskaya V.N. Pipeline transport in the mining industry, M.: Nedra; 1985.
7. Anushenkov A.N. Development of complexes for the preparation and transport of hardening mixtures for backfilling mine workings. Krasnoyarsk: GUTSMiZ; 2006.
8. Anushenkov A.N., Stovmanenko A. u., Volkov E.P. "Fundamentals of the processes of production and transportation of filling mixtures during underground mining of mineral deposits: textbook. manual – Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2015.

9. Bronnikov D.M., Tsigalova M.N. "Filling work in mines": Directory. M.: Nedra; 1989. Pp. 273–282.
10. Anushenkov A.N., Britvin D.S. Study of emergency sections of backfill pipelines in the Oktyabrsky mine // Electronic collection of materials of the international conference of students, graduate students and young scientists "Free Avenue-2017". Underground mining. Krasnoyarsk: SFU; 2017.
11. Filimonov V.V., Khristolubov E.A., Eremenko A.A. Justification of technological solutions for modernizing methods for developing ore bodies by systems without and with backfilling of mined-out space at the Tashtagol deposit. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2018; 2:57–65.
12. Lyashenko V.I., Franchuk V.P. Increasing the efficiency of activation of the components of the hardening filling mixture in vibration pipeline transport installations. *News of higher educational institutions. Mining magazine*. 2017; 4:92–100.
13. Szponder D.K., Trybalski K. The determination of physical-chemical and mineralogical properties of fly ash used in the mining industry. 22nd World Mining Congress & Expo. Istanbul. 2011; 2:629–639.
14. Rodriguez J.M., Meneses R., Orus R.J. Active vibration control for electric vehicle compliant drivetrains. Industrial Electronics Society, IECON 2013, 39th Annual Conference of the IEEE. 2013. Pp. 2590–2595.
15. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Karginov K.G., Nosyrev M.B. Activation of binders for hardening mixtures. *News of higher educational institutions. Mining magazine*. 2018; 1:8–14.
16. Povetkin V.V., Kerimzhanova M.F., Orlova E.P., Bukaeva A.Z. Improvement of equipment for transporting slurry in the processing industry. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2018; 6:161–169.

© 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, Dr. Sc. in Engineering, 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

Andrey S. Morin, Dr. Sc. in Engineering, head of Department «Mining machinery and equipment», Siberian Federal University, Institute of mining, Geology and geotechnologies, 95, Krasnoyarskiy Rabochiy Avenue, Krasnoyarsk, 660025, Russia, e-mail: AMorin@sfu-kras.ru

Olga S. Ignatova, C. Sc. in Engineering, head of Department «Mining machinery and equipment», Siberian Federal University, Institute of mining, Geology and geotechnologies, 95, Krasnoyarskiy Rabochiy Avenue, Krasnoyarsk, 660025, Russia, e-mail: ignatova.ol@mail.ru

Contribution of the authors:

Maksim S. Pesochinskiy – formulation of a research task, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, data collection and analysis, conclusions, writing a text.

Aleksandr N. Anushenkov – formulation of a research task, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, data collection and analysis, conclusions, writing a text.

Andrey S. Morin – formulation of a research problem, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, data collection and analysis, conclusions, writing a text.

Olga S. Ignatova – setting a research task, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of research, data collection and analysis, conclusions, writing a text.

All authors have read and approved the final manuscript.

