

На правах рукописи

Волчихина Александра Алексеевна



**ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СГУЩЕНИЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ
ГИДРОСМЕСЕЙ НА ФИНАЛЬНОМ УЧАСТКЕ
ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Васильева Мария Александровна

Официальные оппоненты:

Голик Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», кафедра горного дела, профессор;

Неверов Александр Алексеевич

доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория подземной разработки рудных месторождений, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово.

Защита диссертации состоится **16 сентября 2024 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.2 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. № 3321.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 16 июля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ
Евгений Ростиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время при добыче рудных полезных ископаемых на горнодобывающих предприятиях широко распространены системы разработки с закладкой выработанного пространства. Это позволяет увеличить объемы добываемой руды, предотвратить деформацию литосферы и обеспечить безопасность горных работ.

Развитие горных предприятий сопровождается тенденцией к проведению горных работ на большей глубине и вскрытию удаленных участков рудного поля, что требует транспортирования закладочной смеси на все большие расстояния. Так, на руднике Таймырский, ЗФ ГМК Норильский Никель, протяженность подземных выработок увеличилась на 1,5 км, что затрудняет проведение закладочных работ из-за потерь напора при перемещении смеси на горизонтальном участке. Гидравлическая смесь подается в выработанное пространство по системе трубопроводов благодаря напору, создаваемому на вертикальном участке. Потери напора при транспортировании смеси зависят от множества факторов, таких как участки местного сопротивления, геометрия трассы транспортирования и характеристики гидросмеси (концентрация и консистенция смеси, крупность и абразивность дисперсной фазы и проч.). Для повышения пластичности гидросмеси, определяющей возможную дальность ее подачи, на горных предприятиях нередко используют смеси с повышенным содержанием несущей среды. Однако использование смесей с низким содержанием наполнителя приводит к повышенной водоотдаче формируемого массива, снижению его прочностных характеристик, обводнению выработок, формированию пустот, что осложняет управление горным давлением. Повышение дальности транспортирования закладочных смесей возможно применением поэтапной технологии: транспортирование смеси с низким содержанием наполнителя до участка закладки с последующим сгущением и транспортировка сгущенной смеси к месту закладки. Однако поэтапная технология требует оборудование для ее реализации, поскольку конструктивные и функциональные параметры существующего оборудования ограничивают их применение.

Степень разработанности темы исследования

Результаты исследований увеличения дальности транспортирования и инерционного сгущения гидросмесей при закладке удаленных

выработок нашли отражение в работах: Александрова В.И., Анушенкова А.Н., Аралбекова М.А., Баумана А.В., Борзаковского Б.А., Бороховича А.И., Вяткина А.П., Голика В.И., Дмитрака Ю.В., Крупника Л.А., Ляшенко В.И., Покровской В.Н., Русакова М.И., Смолдырева А.Е., Стовманенко А.Ю., Трайниса В.В., Франчука В.П., Хайрутдинова М.М., Belem T., Mikanovic N., Ouattara D., Peschken P., Wang X., Yi Z., Xuan D. и др. Ими выполнены исследования по изучению влияния параметров гидросмеси на процесс гидротранспортирования в системе закладочных комплексов горных предприятий. Однако недостаточно изучен вопрос обоснованного выбора значений параметров технологического оборудования, позволяющего обеспечить увеличение дальности транспортирования закладочной смеси и прочностные характеристики формируемого закладочного массива, что требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Соответствие паспорту специальности

Тема исследования соответствует п. 14 «Критерии и технологические требования при создании новых и совершенствования применяемых горных машин с учетом особенностей условий их эксплуатации при разработке месторождений твердых полезных ископаемых» и п. 15 «Методы и средства повышения эксплуатационных характеристик и надежности горных машин и оборудования, в том числе за счет обоснования рациональных режимов их функционирования на открытых и подземных горных работах» области исследований паспорта научной специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины.

Объект исследования – процесс формирования сгущенного потока гидросмеси в инерционном сгустителе на финальном участке транспортирования.

Предмет исследования – взаимодействие частиц дисперсной фазы наполнителя с поверхностью отклоняющего гидродинамического профиля инерционного сгустителя.

Цель работы – обоснование параметров оборудования для сгущения закладочных гидросмесей на финальном этапе их транспортирования, обеспечивающих заданные прочностные характеристики формируемого закладочного массива.

Идея работы заключается в применении для сгущения закладочной смеси на финальном этапе транспортирования оборудования, обеспечивающего седиментацию дисперсной фазы и формиро-

вание потока гидросмеси повышенной концентрации за счет реализации механизма инерционного взаимодействия первичного потока с отклоняющим гидродинамическим профилем.

Основные задачи исследования:

1. Выполнить анализ и обобщение теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации и определить приоритетные направления совершенствования подземных геотехнологий с закладкой выработанного пространства и способы повышения эксплуатационных характеристик закладочных комплексов.

2. Разработать конструкцию сгустителя, реализующего инерционный принцип сгущения гидросмеси и обосновать модернизацию технологической схемы закладочного комплекса инерционным сгустителем для осуществления закладки удаленных выработок.

3. Выполнить имитационное моделирование движения потока гидросмеси в рабочей зоне инерционного сгустителя для оценки параметров, определяющих эффективность процесса осаждения дисперсной фазы гетерогенного потока при взаимодействии с отклоняющим гидродинамическим профилем.

4. Провести экспериментальные исследования по оценке влияния концентрации закладочной смеси на физико-механические свойства возводимого искусственного массива.

5. Разработать методику выбора геометрических параметров отклоняющего гидродинамического профиля рабочей камеры инерционного сгустителя, обеспечивающих формирование потока сгущенной закладочной смеси заданной концентрации.

Научная новизна работы:

1. Теоретически обосновано и подтверждено, что реализация механизма инерционного взаимодействия потока с гидродинамическим отклоняющим профилем способствует седиментации дисперсной фазы гидросмеси, формируя поток повышенной концентрации, значения которой зависят от скорости потока первичной гидросмеси на входе в рабочую камеру и гранулометрического состава дисперсной фазы.

2. Установлено, что концентрация формируемого потока находится в квадратичной зависимости от величины поперечного размера отклоняющего гидродинамического профиля, форма которого определяет характерные углы атаки и обтекания потока, а также

длины участка взаимодействия дисперсной фазы с поверхностью профиля.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Обоснован рациональный интервал скорости первичной гидросмеси на входе в рабочую камеру инерционного сгустителя для сгущения закладочной смеси заданной концентрации, определяемый на основании метода конечных элементов Эйлера-Лагранжа при имитационном моделировании.

2. Разработаны рекомендации по подбору значений конструктивных параметров отклоняющего гидродинамического профиля инерционного сгустителя для формирования гидравлической смеси с концентрацией не менее 50%, учитывающие влияние гранулометрического состава дисперсной фазы и входную скорость первичной гидросмеси, используемой для закладки выработанного пространства.

3. Обосновано влияние концентрации формируемого потока гидросмеси на качественные характеристики закладочного массива, а именно, на его прочностные характеристики, величину усадки и параметр водоотделения.

4. Результаты диссертационных исследований приняты к внедрению в деятельности АО «Гипроцветмет» при проработке технических решений в части проектирования технологических схем и регламентации производства закладочных работ на горнодобывающем предприятии (месторождение Кумроч в Усть-Камчатском муниципальном районе Камчатского края), что подтверждается актом об использовании результатов кандидатской диссертации от 03.05.2024 г.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач использовался комплексный подход к исследованию, включающий: научный анализ и обобщение опыта применения закладочных комплексов в технологиях подземной добычи полезных ископаемых; исследование процесса сгущения гидросмеси; имитационное моделирование инерционного сгущения, а также влияние крупности дисперсной фазы, входной скорости потока первичной гидросмеси и размеров отклоняющего гидродинамического профиля на концентрацию сгущенного потока гидросмеси; экспериментальное исследование прочностных характеристик образцов закладочных массивов в зависимости от концентрации закладочной смеси; сопоставление расчетных и экспериментальных данных.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Эффективность инерционного сгущения гидросмеси определяется входной скоростью потока и траекторией движения частиц, характеризующейся длиной участка взаимодействия L , углом атаки α в диапазоне 110° - 150° и углом обтекания φ в диапазоне 105° - 150° при взаимодействии с профилем, которые в свою очередь зависят от соотношения его продольного и поперечного размеров.

2. Сгущение закладочной гидросмеси до концентрации в пределах 50% позволяет до 2-х раз снизить величину водоотделения и вертикальной усадки формируемого искусственного массива, при этом прочность при одноосном сжатии повышается более чем на 1,5 МПа, в сравнении с гидросмесью концентрацией в пределах 10%.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена корректностью постановки цели и задач исследования; представленным объемом достоверной статистической информации; теория построена на известных, проверяемых фактах и согласуется с экспериментальными данными и результатами имитационного моделирования.

Апробация результатов. Результаты работы были доложены в рамках участия в ряде всероссийских и международных конференций: 10-я Международная научно – практическая конференция молодых ученых и студентов «Опыт прошлого – взгляд в будущее» (г. Тула, 2020), VIII Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики» IPDME-2021 (г. Санкт-Петербург, 2021), XVI Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых под эгидой ЮНЕСКО «Актуальные вопросы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2022), 19-я Международная конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики (г. Тула, 2023).

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследований, разработке программы и методики исследования, разработке модели инерционного сгустителя, проведение имитационного моделирования процесса инерционного сгущения, обработке и интерпретации экспериментальных данных, подготовке публикаций по выполненной работе и формировании практических рекомендаций по подбору геометрических параметров инерционного сгустителя в

зависимости от требуемой концентрации и исходных параметров гидросмеси.

Публикации. По теме исследования опубликовано 12 печатных работ, в том числе 5 статей - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), 2 статьи - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получены 2 патента РФ.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и 5 приложений. Материалы работы изложены на 182 страницах машинописного текста, включая 16 таблиц, 70 рисунков. Список цитируемой литературы включает 149 источников, из них 29 – на иностранных языках.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю к.т.н., доценту Васильевой Марии Александровне за научное руководство над работой и совместное заинтересованное обсуждение научных вопросов по исследуемой проблеме. За помощь в проведении исследований и ценные научные консультации специалистам ООО «Протех Инжиниринг», а именно: Бувичу Владимиру Владимировичу и Уразову Денису Владимировичу, НЦ «Геомеханики и проблем горного производства» и ОЦ «Цифровые технологии» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, а также д.т.н., профессору Михайлову Александру Викторовичу за конкретные практические рекомендации по интерпретации результатов исследований, коллективу кафедры транспортно-технологических процессов и машин, где автор сформировался как специалист в области горного транспорта, и лично заведующему кафедрой, к.в.н., профессору Афанасьеву Александру Сергеевичу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, указана цель, идея и основные задачи диссертационной работы, изложена научная новизна, приведена теоретическая и практическая значимость результатов исследования.

В первой главе представлен обзор и анализ геотехнологий, реализуемых с закладкой выработанного пространства. Проанализиро-

ван отечественный и зарубежный опыт применения технологий и оборудования для закладки выработанного пространства. Выполнен анализ направлений модернизации основного и вспомогательного оборудования закладочных комплексов для повышения эффективности осуществления закладки выработанного пространства. Выполнен обзор и анализ способов повышения дальности транспортирования закладочных смесей. Сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе представлены результаты теоретических исследований процесса сгущения и факторов, влияющих на формирование потока смеси с повышенным содержанием дисперсной фазы в рабочей камере разработанного сгустителя. Результаты мультифизического моделирования в программе Comsol Multiphysics 6.0 позволили оценить влияние свойств первичной гидросмеси на эффективность седиментации. Обоснованы режимы работы инерционного сгустителя, а также выделены факторы, интенсифицирующие процесс расслоения потока. По результатам теоретических исследований выполнено обоснование применения инерционного сгустителя на финальном участке транспортирования в зависимости от углов атаки и обтекания, характеризующих длину участка взаимодействия. Обоснован диапазон скорости первичной гидросмеси в сечении входного патрубка, крупности дисперсной фазы, размеров отклоняющего гидродинамического профиля и предельной высоты оборудования, позволяющие обеспечить формирование потока сгущенной закладочной смеси с концентрацией не менее 50%.

В третьей главе представлены результаты выполненных экспериментальных исследований по формированию образцов закладочных массивов и изменению их прочностных характеристик в зависимости от концентрации закладочной смеси. Обработка полученных результатов позволила выявить закономерности изменения показателя водоотделения, величины усадки и коэффициента остаточного заполнения при изменении концентрации закладочной смеси от 10% до 50% и времени, на протяжении которого происходил набор прочности закладочным массивом. На завершающем этапе экспериментального исследования рассмотрено снижение требуемой массы материала наполнителя закладочной смеси, необходимой для полного заполне-

ния заданного объема в зависимости от концентрации закладочной смеси.

В четвертой главе представлены результаты параметрического синтеза геометрических параметров конструкции, позволяющие определить ширину и высоту инерционного сгустителя в зависимости от диаметра подводящего трубопровода и необходимого расхода, оказывающие влияние на работу инерционного сгустителя. Определены эксплуатационные и капитальные затраты на монтаж и обслуживание инерционного сгустителя.

В заключении изложены основные научные результаты и практические рекомендации по результатам выполненных исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Эффективность инерционного сгущения гидросмеси определяется входной скоростью потока и траекторией движения частиц, характеризующейся длиной участка взаимодействия L , углом атаки α в диапазоне 110° - 150° и углом обтекания φ в диапазоне 105° - 150° при взаимодействии с профилем, которые в свою очередь зависят от соотношения его продольного и поперечного размеров.

Гидравлические смеси для закладки выработанного пространства по реологическим свойствам относятся к неньютоновским жидкостям и при преодолении предельного напряжения сдвига реализуют закон Оствальда-де Ваале. В выработанное пространство смесь поступает самотеком, перемещаясь под действием статического напора, создаваемого в вертикальном участке трубопроводной системы. При переходе к горизонтальному участку за счет влияния местных сопротивлений и потерь напора по длине трубопровода происходит снижение его кинетической энергии. Это определяет максимальную дальность подачи закладочной смеси заданных параметров.

Увеличению дальности транспортирования гидросмеси способствует применение вспомогательного оборудования, например, виброактиваторов, пневмоэжекторов и насосов. Однако применение дополнительного оборудования ограничено предельно-допустимой концентрацией гидросмеси, дороговизной при использовании на протяженных участках и необходимостью подвода дополнительной

энергии. В работе рассмотрено применение разработанного оборудования для сгущения гидросмеси на финальном участке транспортирования. Это позволит повысить дальность транспортирования закладочной смеси за счет использования первичной гидросмеси низкой концентрации.

Для исследования механизма седиментации гидросмеси и формирования сгущенного потока разработана имитационная модель инерционного сгустителя по методу Эйлера-Лагранжа (рисунок 1).

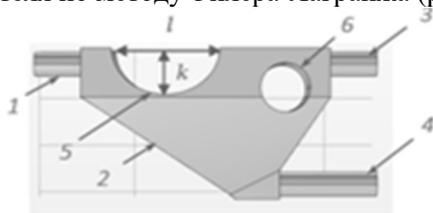


Рисунок 1 – Модель инерционного сгустителя (1 – впускной патрубок; 2 – рабочая камера; 3-4 – выпускной патрубок осветленной воды и сгущенной смеси; 5 – главный отклоняющий гидродинамический профиль; 6 – цилиндрический гидродинамический профиль; l – продольная длина профиля; k – поперечная длина профиля)

Конструкция инерционного сгустителя включает в себя рабочую камеру с отклоняющим и цилиндрическим гидродинамическими профилями, и три патрубка: для подачи гидросмеси, отведения сгущенного потока и осветленного потока несущей среды. Через впускной патрубок поток первичной гидросмеси поступает в рабочую камеру, где сталкивается с поверхностью отклоняющего гидродинамического профиля. Большая часть частиц дисперсной фазы под действием гравитационных и инерционных сил изменяет траекторию своего движения, теряет скорость и седиментирует на дно и стенки рабочей камеры, формируя сгущенный объем потока. Поток гидросмеси, с оставшимися во взвешенном состоянии частицами, восходящим потоком относится к цилиндрическому гидродинамическому профилю, где происходит остаточное осаждение. Осветленный поток несущей среды через выпускной патрубок направляется в обратную систему или на технологические нужды производства. Сгущенный

поток по дну рабочей камеры поступает к выпускному патрубку для дальнейшего поступления в выработанное пространство.

Процесс сгущения гидросмеси сопровождается изменением гидродинамических условий, которые приводят к увеличению коэффициента сопротивления осаждению дисперсной фазы за счет повышения плотности потока. Скорость движения частиц в потоке первичной гидросмеси оказывает решающее влияние на коэффициент сопротивления осаждению от времени. Коэффициент сопротивления осаждению частиц зависит от консистенции гидросмеси, гранулометрического состава дисперсной фазы и скорости осаждения.

Тонкие частицы дисперсной фазы гидросмеси наименее подвержены инерционному осаждению за счет невозможности преодоления сопротивления движению в гидросмеси. Данные частицы остаются во взвешенном состоянии т.к. скорость их осаждения значительно отличается от более крупных частиц, что ведет к увеличению содержания дисперсной фазы в патрубке осветленного потока несущей среды.

Применение инерционного сгустителя не требует подключения к системе электроснабжения, допускает использование первичной гидросмеси низкой концентрации и позволяет получить поток с повышенной концентрацией наполнителя непосредственно у выработанного пространства. При разработке конструкции инерционного сгустителя учтена необходимость получения смеси повышенной концентрации, обеспечивающей условие работы без заиливания рабочей камеры при диапазоне рациональных скоростей движения потока на входе.

Содержание дисперсной фазы в выпускных патрубках инерционного сгустителя определяется не только входной скоростью первичной гидросмеси и крупностью дисперсной фазы, но и характерной длиной участка взаимодействия L , изменяющейся при варьировании соотношения размеров отклоняющего гидродинамического профиля. Величина угла атаки потока – α и угла обтекания профиля – φ , характеризует формируемую траекторию движения потока при взаимодействии с отклоняющим гидродинамическим профилем (рисунок 2).

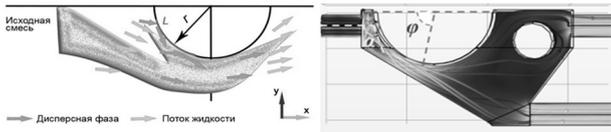


Рисунок 2 – Разделение взвесенесущего потока при инерционном осаждении дисперсной фазы главным отклоняющим гидродинамическим профилем

Влияние геометрии профиля на параметры потока и последующее инерционное осаждение, характеризуемое протяженностью участка взаимодействия, может быть оценено соответствующим углом атаки потока α . Результаты оценки их изменения в зависимости от параметров профиля представлены на рисунке 3.

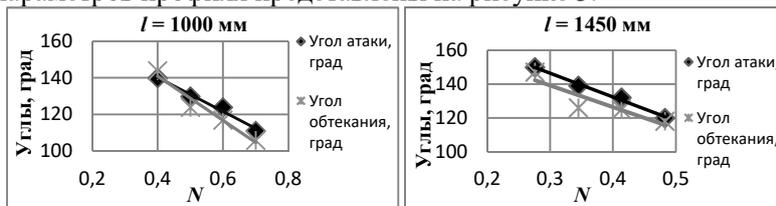


Рисунок 3 – Изменение углов взаимодействия с отклоняющим гидродинамическим профилем при различных соотношениях N

Номограмма, приведенная на рисунке 4, отражает формирование областей изменения концентрации потока и позволяет обоснованно выбрать размеры отклоняющего гидродинамического профиля для достижения соответствующей концентрации.

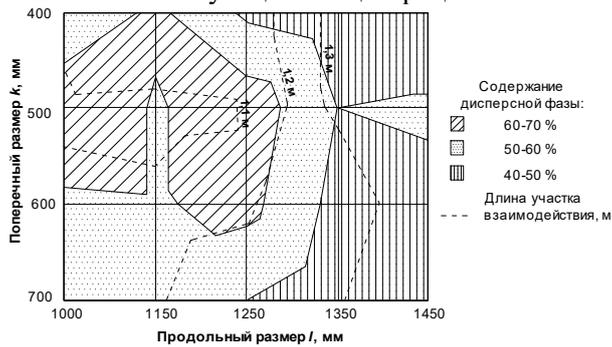


Рисунок 4 – Номограмма изменения концентрации сгущенного потока

Анализ картин движения потока выявил, что динамика увеличения характерной длины участка взаимодействия L прямо пропорционально зависит от величины угла обтекания φ и подчиняется закону (1):

$$L = 6,48\varphi + 342,95 \quad (1)$$

Увеличение продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля на 50% приводит к росту характерной длины участка взаимодействия L на 25%; увеличение поперечного размера отклоняющего гидродинамического профиля на 50% приводит к относительному снижению угла обтекания профиля φ в среднем на 26% и угла атаки на 13%, за счет изменения формы отклоняющего профиля. Таким образом, увеличение соотношения размеров отклоняющего гидродинамического профиля N на 14% сопровождается увеличением концентрации гидросмеси на 30%.

2. Сгущение закладочной гидросмеси до концентрации в пределах 50% позволяет до 2-х раз снизить величину водоотделения и вертикальной усадки формируемого искусственного массива, при этом прочность при одноосном сжатии повышается более чем на 1,5 МПа, в сравнении с гидросмесью концентрацией в пределах 10%.

В работе представлена методика экспериментального исследования на основании ГОСТа 21153.2-84 для определения прочностных характеристик сформированных экспериментальных образцов закладочных массивов, величины усадки и параметра водоотделения при наборе прочности. В ходе экспериментального исследования в лабораторных условиях воспроизводится процесс закладки выработанного пространства за фильтрующую перемычку твердеющей смесью.

Для проведения эксперимента подготовлено 15 образцов закладочных смесей на основе отходов обогащения железной руды. Образцы были разделены на группы, по принципу варьирования концентрации дисперсной фазы в смеси от 10% до 50% при постоянном содержании вяжущего – 10%, представленного цементом марки М500.

Получение экспериментальных образцов закладочных массивов выполнялось посредством заливки закладочных смесей в подготовленные формы.

Экспериментальные образцы закладочных массивов взвешивались и замерялись по высоте и массе ежедневно на протяжении 28 дней. Во время каждого замера отделившаяся от массива смесь фильтровалась и фиксировалась масса компонентов, позволяющая оценить величину потери материала при формировании закладочного массива. В результате оценки выявлено, что изменение массы формируемых образцов закладочных массивов и величины усадки массива от содержания наполнителя подчиняются линейному закону.

Увеличение массовой концентрации образцов закладочной смеси от 10% до 50% сопровождается снижением на 37% величины вертикальной усадки массива при снижении на 54% отделения несущей среды.

Исследование предела прочности при одноосном сжатии экспериментальных образцов закладочных массивов выполнено в Научном центре «Геомеханики и проблем горного производства» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

Определение величины разрушающей образец силы проводилось на испытательной машине ДРМБ-300. Подготовленные образцы закладочных массивов поочередно подвергались одноосному сжатию между стальными плитами на гидравлическом прессе.

На основании полученных результатов разрушающих сил, определены прочностные характеристики образцов и построен график изменения прочности образцов массива в зависимости от концентрации первичных закладочных смесей (рисунок 5).

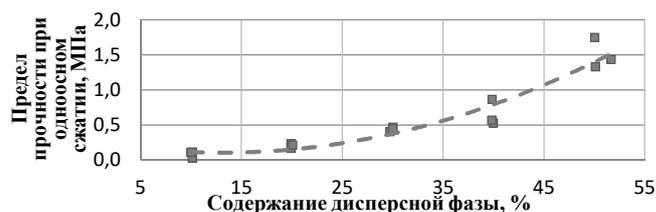


Рисунок 5 – Зависимость прочности экспериментальных образцов (возрастом 28 дней) от концентрации гидросмеси

В результате исследований установлено, что изменение прочности экспериментальных образцов закладочных массивов при уве-

личении концентрации от 10% до 50% увеличивается на 1,5 МПа и аппроксимируется экспоненциальной функцией (2):

$$\sigma = 0,039e^{0,0727C_n}, R^2 = 0,89, \quad (2)$$

где σ – предел прочности при одноосном сжатии, МПа; C_n – концентрация образца закладочной смеси, % по массе.

На основании полученных результатов была выполнена оценка изменения коэффициента остаточного заполнения K_0 выработки в зависимости от содержания наполнителя в гидросмеси (рисунок 6).

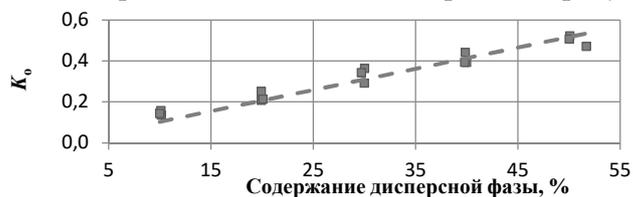


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента остаточного заполнения от содержания наполнителя в гидросмеси

Увеличение концентрации закладочной смеси сопровождается ростом коэффициента остаточного заполнения, и, как следствие, увеличением высоты формируемого массива. Изменение концентрации закладочных смесей от 10% до 50% по массе сопровождается изменением массы закладочной смеси, необходимой для полного заполнения формы (рисунок 7).

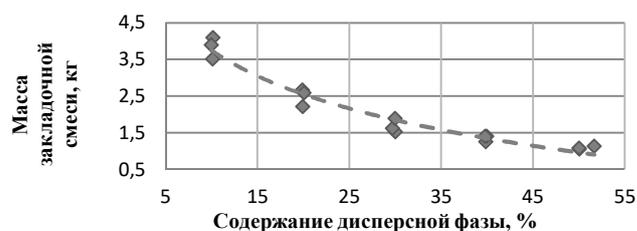


Рисунок 7 – Изменение потребной массы смеси для полного заполнения экспериментальной формы

Полученная зависимость изменения массы подготовленного образца закладочной смеси от ее концентрации аппроксимируется логарифмической функцией (3):

$$M_0 = -1,732 \ln(C_n) + 7,7402, R^2 = 0,96, \quad (3)$$

где M_0 – масса подготовленного образца закладочной смеси, кг; C_n – концентрация образца закладочной смеси, % по массе.

Анализ полученных результатов экспериментальных исследований подтверждает, что с увеличением концентрации гидросмеси возрастает коэффициент остаточного заполнения, что сопровождается снижением массы закладочной смеси необходимой для заполнения требуемого объема выработанного пространства. Таким образом, увеличение концентрации образцов закладочной смеси с 10% до 50% позволит снизить потребную массу закладочной смеси для полного заполнения пространства на 72%.

В результате выполненных исследований установлено, что применение закладочной гидросмеси с концентрацией 50% позволяет на 1,5 МПа увеличить прочность закладочного массива, снизить водоотделение на 54%, и на 37% уменьшить величину вертикальной усадки формируемого массива. Это доказывает эффективность применения оборудования для сгущения закладочной смеси на конечном участке транспортирования для повышения качества формируемого закладочного массива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предлагается новое решение актуальной научно-практической задачи – применение оборудования для инерционного сгущения закладочных гидросмесей на финальных участках транспортирования, обеспечивающее сгущение и заполнение выработанного пространства гидросмесью с концентрацией не ниже 50% при использовании в системе закладочного комплекса первичной гидросмеси низкой концентрации. По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований сделаны следующие выводы:

1. В результате выполненного анализа теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертационной работы обосновано, что применение дополнительного оборудования для интенсификации процесса транспортирования закладочных смесей к удаленным выработкам является приоритетным направлением совершенствования существующих систем закладочных комплексов. Перспективным решением задачи увеличения дальности транспортирования является сгущение первичной гидросмеси с низким со-

держанием наполнителя на финальном участке транспортирования перед закладываемым пространством.

2. Разработана конструкция сгустителя, реализующего инерционный принцип осаждения гидросмеси, механизм которого заключается в том, что первичный поток закладочной смеси поступает в рабочую камеру сгустителя, где за счет взаимодействия с отклоняющим гидродинамическим профилем происходит инерционное расслоение потока.

3. В результате имитационного моделирования процесса седиментации дисперсной фазы установлено, что факторами, определяющими интенсивность процесса сгущения, являются входная скорость потока гидросмеси и крупность дисперсной фазы. Определено, что формирование потока закладочной смеси с концентрацией около 50% осуществляется при скорости поступления потока первичной гидросмеси в рабочую камеру смесителя в интервале 0,7 – 3,4 м/с при рекомендованной входной скорости в 2 м/с.

4. Траектория движения потока гидросмеси при его разделении в рабочей камере, определяющая интенсивность гравитационно-инерционного осаждения дисперсной фазы, характеризуется длиной участка взаимодействия L , углом атаки – α в диапазоне 110° - 150° и углом обтекания – φ в диапазоне 105° - 150° при взаимодействии с профилем, которые в свою очередь зависят от соотношения его продольного и поперечного размеров.

5. Увеличение соотношения размеров отклоняющего гидродинамического профиля овального сечения N на 14% способствует увеличению концентрации гидросмеси на 30%; при этом увеличение продольного размера на 50% способствует увеличению характерной длины участка взаимодействия L на 25%, а увеличение поперечного размера на 50% способствует снижению угла обтекания потока на 26% и угла атаки на 13%.

6. Экспериментально установлено, что увеличение концентрации закладочной гидросмеси с 10 до 50% позволяет снизить водоотделение в 1,9 раз и в 1,7 раз уменьшить величину вертикальной усадки формируемого массива, при этом прочность закладочного массива увеличится на 1,5 МПа.

7. Разработана методика выбора значений основных конструктивных параметров отклоняющего гидродинамического профиля рабочей камеры инерционного сгустителя, обеспечивающих формирование потока сгущенной закладочной смеси заданной концентрации при изменении потребного расхода.

8. Результаты диссертации использованы при проработке технических решений и разработке технико-коммерческих предложений по проектированию технологических схем закладочных работ на горнодобывающих предприятиях АО «Гипроцветмет» (месторождение Кумроч, Усть-Камчатский муниципальный район Камчатского края).

9. Перспективное направление дальнейшего развития темы диссертации связано с уточнением рациональных параметров инерционного сгустителя в зависимости от консистенции гидросмеси, степени ее гидратации при разном содержании и крупности компонентов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК:

1. Васильева, М.А. Мобильный закладочный комплекс / М.А. Васильева, **А.А. Волчихина**, Г.А. Юсупов // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – №4. – С. 39-49. – DOI 10.25018/0236_1493_2021_4_7_39

2. Кускильдин, Р.Б. Разработка и апробация экспресс-методики испытаний стальных труб с полимерным покрытием на гидроабразивный износ / Р.Б. Кускильдин, М.А. Васильева, **А.А. Волчихина** // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – №3. – С. 3-10. – DOI 10.25018/0236_1493_2021_3_5_3

3. Васильева, М.А. Обоснование формы рабочей камеры магнитного перистальтического насоса / М.А. Васильева, **А.А. Волчихина**, В.А. Атрощенко, А.А. Зеленцова // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – СПб. Изд. ИП Жукова Е.В. – 2022. – № 15. – С. 93-98. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-15-93-98

4. Атрощенко, В.А. Влияние модернизации линейного участка гидротранспортной системы горного предприятия на энергоем-

кость процесса гидротранспортирования / В.А. Атрощенко, **А.А. Волчихина**, М.А. Васильева // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – СПб. Изд. ИП Жукова Е.В. – 2022. – № 17. – С. 196-202. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-17-196-202

5. Атрощенко, В.А. Исследование стойкости трубопроводов закладочных комплексов к гидроабразивному изнашиванию / В.А. Атрощенко, **А.А. Волчихина**, М.А. Васильева // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – СПб. Изд. ИП Жукова Е.В. – 2022. – №17-2. – С. 299-305. – DOI 10.26160/2658-3305-2022-17-299-305

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

1. Васильева, М.А. Оборудование и технологии для проведения работ по дозакладке выработанного пространства / М.А. Васильева, **А.А. Волчихина**, М.Д. Морозов // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 6. – С. 133-144. – DOI 10.25018/0236_1493_2021_6_0_133.

2. Васильева, М. А. Совершенствование механизма водоотделения при закладочных работах пространства / М.А. Васильева, **А.А. Волчихина**, Р.Б. Кускильдин // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 4. – С. 125-139. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_125.

Патенты:

1. Патент № 2773111 Российская Федерация, МПК G01N 3/56 (2022.02). Стенд для сравнительной оценки полимерных материалов на гидроабразивный износ. Заявка № 2021127092. Дата приоритета: 15.09.2021. Дата регистрации: 30.05.2022. Авторы: М.А. Васильева, Р.Б. Кускильдин, **А.А. Волчихина**, М.А. Серебров. Заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 9 с.

2. Патент № 214518 Российская Федерация, МПК F04B43/12 (2022.05). Магнитный перистальтический насос. Заявка № 2022117026. Дата приоритета: 24.06.2022. Дата регистрации: 01.11.2022. Авторы: М.А. Васильева, **А.А. Волчихина**, А.А. Зеленцова. Заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 6 с.