

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Волчихина Александра Алексеевна



ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СГУЩЕНИЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ ГИДРОСМЕСЕЙ НА
ФИНАЛЬНОМ УЧАСТКЕ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Васильева М.А.

Санкт-Петербург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗАКЛАДКЕ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА	9
1.1 Подземные геотехнологии с применением закладки выработанного пространства	11
1.1.1 Реализация механической закладки	12
1.1.2 Реализация пневматической закладки	13
1.1.3 Реализация гидравлической закладки	14
1.2 Опыт проведения работ по закладке выработанного пространства на отечественных и зарубежных предприятиях	20
1.3 Закладочные смеси, их характеристики и свойства.....	23
1.3.1 Основные характеристики дисперсной фазы гидросмеси	24
1.3.2 Применение пластификаторов и дополнительных реагентов	26
1.4 Закладочные комплексы как взаимосвязанная система горного оборудования.....	27
1.4.1 Мельницы, измельчители, дробилки.....	28
1.4.2 Дозаторы и смесители.....	30
1.4.3 Трубопроводные системы закладочных комплексов	35
1.4.4 Сгустители	41
1.5 Способы увеличения дальности подачи закладочных смесей.....	46
1.6 Выводы по главе 1	50
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГУЩЕНИЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ	52
2.1 Влияние свойств гидросмеси на процесс сгущения	52
2.1.1 Влияние крупности дисперсной фазы гидросмеси	54
2.1.2 Влияние критической скорости потока гидросмеси.....	56
2.1.3 Влияния концентрации гидросмеси	57
2.2 Разработка конструкции инерционного сгустителя	57
2.2.1 Инерционный сгуститель: основные узлы, функции, принцип работы	58
2.3 Разработка цифровой модели работы инерционного сгустителя.....	60
2.3.1 Механизм формирования сгущенного потока и отделения осветленного потока несущей среды в рабочей камере	61
2.4 Обоснование рациональных режимов работы инерционного сгустителя.....	65
2.4.1 Исследование влияния крупности частиц дисперсной фазы на процесс сгущения гидросмеси	69
2.4.2 Исследование влияния размеров рабочей камеры на концентрацию потока в сечениях выпускных патрубков	70

2.5 Исследование интенсивности гидроабразивного изнашивания оборудования	75
2.6 Выводы по главе 2	80
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАКЛАДОЧНОГО МАССИВА ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАКЛАДОЧНОЙ ГИДРОСМЕСИ	83
3.1 Описание методики проведения эксперимента.....	85
3.2 Подготовка форм и экспериментальных образцов	86
3.3 Оценка показателя водоотделения и величины вертикальной усадки экспериментальных образцов закладочных массивов.....	88
3.4 Прочностной анализ экспериментальных образцов закладочных массивов	93
3.5 Выводы по главе 3.....	100
ГЛАВА 4 ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ ИНЕРЦИОННОГО СГУСТИТЕЛЯ.....	101
4.1 Обоснование размеров рабочей камеры инерционного сгустителя.....	101
4.2 Рекомендации по интеграции инерционного сгустителя.....	112
4.3 Оценка капитальных и эксплуатационных затрат при внедрении инерционного сгустителя в трубопроводную системы закладочного комплекса.....	114
4.4 Выводы по главе 4.....	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	122
СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ А Характеристики гидросмеси на выпускных патрубках инерционного сгустителя	140
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Результаты проведения экспериментального исследования	155
ПРИЛОЖЕНИЕ В Технические и геометрические характеристики инерционного сгустителя	174
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертации	179
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Патенты.....	181

ВВЕДЕНИЕ

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.

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

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.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины по пунктам 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 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».

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.

Положения, выносимые на защиту

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).

В полном объеме диссертация заслушана и одобрена на Междисциплинарном экспертном совете ученых Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II 03 мая 2024 г.

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

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 12 печатных работах (пункты списка литературы № 12-13, 29-32, 37-41, 73), в том числе в 5 статьях - 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, в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получены 2 патента (Приложение Д).

Структура диссертации

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.

ГЛАВА 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗАКЛАДКЕ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА

Большая часть полезных ископаемых за счет условий залегания добывается подземным способом на глубине более десятка метров [127]. Для горнодобывающих предприятий особая важность представлена в рациональном использовании недр и земельных площадей, внедрении в производство безотходных и ресурсосберегающих технологий, повышении рентабельности действующих рудников за счет усложнения горно-геологических условий при добыче подземным способом [26, 126]. Наиболее распространенными системами разработки при добыче руды с большой глубины являются системы разработки с закладкой выработанного пространства (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Блок-схема процессов очистных работ

Закладочные работы включают процессы [9, 10, 25, 62]:

- приготовление закладочного материала;
- транспортировка;
- размещение в выработанном пространстве

Закладка позволяет более эффективно и безопасно добывать полезные ископаемые, размещать под землей отходы горного производства, обрабатывать пожароопасные участки, исключить образование зон повышенного горного давления, создаваемого вышележащими породами, распределив давление по поверхности закладочного массива, что в свою очередь снизит риск обрушения вмещающих пород, приводящего к просадке земной поверхности, сохранив ненарушенными территории и горные породы, окружающие выработку [8, 11, 17, 21].

Закладка выработанного пространства широко используется при отработке:

- сложных по форме рудных залежей;

- залежей под населенными пунктами, охраняемыми или промышленными территориями.

При применении закладки очистные работы проводятся поэтапно [9, 25, 26]:

- транспортировка закладочного материала в выработанное пространство;
- последовательно-параллельное заполнение выработки закладочным материалом.

Закладочные системы применимы в любых горно-геологических и горнотехнических условиях:

- различная мощность и угол падения рудных тел;
- любая морфология рудных залежей;
- различная крепость и устойчивость руд.

При использовании систем разработки с закладочными работами на месторождении до 25% затрат приходится на проведения закладочных работ [69]. Сравнительно высокая себестоимость добычных работ с закладкой выработанного пространства компенсируется более полным извлечением полезного ископаемого при снижении его потерь, увеличении устойчивости пластов, а также обеспечении селективной выемки полезного ископаемого. Помимо того, что для разных систем разработки применяются различные закладочные смеси, то и в целях снижения затрат, предприятия применяют возведение комбинированных массивов, представленных твердеющей закладкой у основания – формирование несущей части массива, и заполняющим слоем – сухой или гидравлической закладкой [22, 113, 120].

Существует 5 способов закладки выработанного пространства: сухая, гидравлическая, твердеющая, ледяная и блочная. Наиболее распространены первые три, в то время как ледяная и блочная закладки применяются только в специальных условиях, таких как вечная мерзлота или при необходимости установки блоков в выработанном пространстве [9, 10, 25, 26, 119].

Существует пять основных закладки [8]:

- сухая;
- гидравлическая;
- твердеющая;
- ледяная;
- блочная.

Наиболее распространены первые три способа, в то время как ледяная и блочная закладки применяются в особых условиях: ледяная закладка – в условиях вечной мерзлоты, а блочная закладка – при необходимости установки блоков в выработанном пространстве.

1.1 Подземные геотехнологии с применением закладки выработанного пространства

В геомеханике, закладочные работы представляют собой уравнивание возникающих напряжений в массиве, снижение горного давления за счет замещения естественного массива искусственным. Применяемые закладочные материалы делятся на две группы: •

- Не взаимодействующие: Компоненты не изменяют своего состояния при смешивании. Сюда относятся сухая и гидравлическая закладки.
- Взаимодействующие: Компоненты изменяют свое состояние (физическое или химическое) при смешивании. Сюда относятся твердеющая закладка, закладка солеотходами и ледяная закладка.

Доставка закладочного материала в выработанное пространство может осуществляться механическим, пневматическим или самотечным способом [16]. Слой сухого закладочного материала может быть представлен отбитой породой, породами от проходки выработок, а также обезвоженными хвостами обогащения. Сухой закладочный материал (отбитая порода, порода из выработок, хвосты обогащения) образует нескрепленный податливый массив с неоднородной плотностью и значительной усадкой (15-30%) [112].

Гидравлическая закладочная смесь образует более плотный массив по сравнению с сухой закладкой. Она позволяет ускорить возведение закладочного массива. Закладочная смесь представляет собой смесь твердых частиц с водой. Основными компонентами гидравлической закладочной смеси являются: пески, отходы обогатительных фабрик, породы отвалов крупностью до 60 мм и вода [7, 148]. Массив, сформированной гидравлической закладочной смесью, может обладать несдренированными зонами, опасными по прорыву, образованными за счет наличия пылевидных и глинистых частиц. Однако и в этом случае искусственный массив не допускает больших площадей обнажений.

Искусственный массив из твердеющей закладочной смеси обладает способностью сохранять форму и свойства, а также воспринимать нагрузки. В отличие от массива из сухой или гидравлической закладки, твердеющая смесь содержит вяжущее вещество, которое при гидратации связывает все компоненты в монолит. Применение твердеющей закладки имеет ряд преимуществ:

- повышение безопасности добычи;
- минимизация потерь и разубоживания руды;
- отработка запасов в охранных целиках;
- сохранение земной поверхности и поверхностных сооружений.

Однако существуют и недостатки:

- значительный расход вяжущего;
- высокие трудозатраты;
- увеличение себестоимости добычи.

Применение твердеющей закладочной смеси для закладки является дорогостоящим способом, однако дает небольшой процент усадки закладочного массива по отношению к другим способам, обеспечивает минимальные потери компонентов, а также обеспечивает целостность налегающих пород, обеспечивая безопасность ведения добычных работ [77].

Существует 4 основных метода возведения закладочного массива с использованием гидравлической или твердеющей закладочной смеси: литой, инъекционный, полураздельный и гидрозакладочный [4, 117]. Предел прочности сформированного искусственного массива при использовании твердеющей смеси варьируется в пределах 1,5-10 МПа [114]. Кроме того, важными характеристиками искусственного массива являются: предел прочности на изгиб, сжатие, растяжение и другие, а подбор закладочной смеси и технологии возведения определяются на основе этих свойств и условий работы. При разработке горных массивов нужно учитывать, что их прочностные характеристики меняются в 2,5-3 раза в зависимости от глубины. Для отечественных рудников формируются массивы с прочностью 2,7-8 МПа [101, 114].

1.1.1 Реализация механической закладки

Механическая закладка представляет собой возведение искусственного массива закладочным материалом, доставленным механическим способом транспортирования в выработку с помощью различных машин: ленточной, барабанной, или дисковой метательной машиной, погрузочно-доставочной машиной, скреперной установкой или конвейером. Возведение искусственного массива при механической закладке происходит при использовании сухого материала, оставшегося после добычных работ, а также обезвоженные хвосты обогащения [10, 25, 54].

Схема механической закладки выработанного пространства применяется на Естюнинском месторождении Высокогорского ГОКа НПРО «Урал» [19, 103]. Данная система разработки горизонтальными слоями применяется для любых залежей за исключением маломощных, при добыче ценных устойчивых или средней устойчивости руд. Отработка ведется блоками без оставления межблочных целиков (рисунок 1.2).

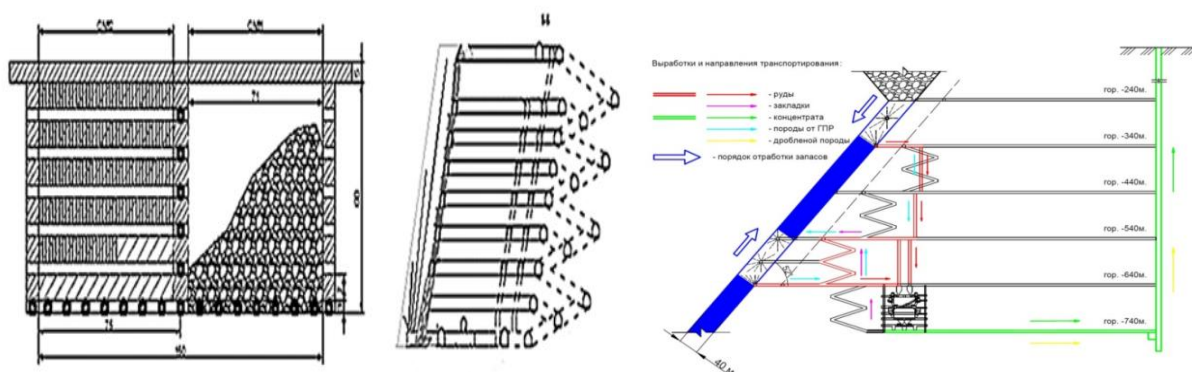


Рисунок 1.2 – Схема отработки Естюнинского месторождения НПРО «Урал» [53]

Этажи этажно – камерной системы разработки на Естюнинском месторождении обрабатываются последовательно в восходящем порядке с закладкой сухим закладочным материалом. Обогащительная фабрика, на которой происходит подготовка закладочного материала, а именно его измельчение, располагается на поверхности. В качестве сухого закладочного материала используется пустая порода от проходки выработок и хвосты обогащения, доставляемые к выработке с поверхностной обогащительной фабрики по трубопроводу [105].

Метательная закладка выработанного пространства чаще применяется при разработке соляных, реже угольных и рудных месторождений. В основном, установки используют при забутовке горизонтальных выработок и возведении буювых полос, а также в сочетании с гидравлической закладочной смесью, транспортируемой самотеком, для подбутовки бортов и потолочин.

Механический метод транспортирования предпочтителен благодаря простоте оборудования, возможности использования крупнокусковых материалов и применения скреперных установок, а также небольшим затратам энергии и возможности организации работ при изменяющихся расстояниях доставки материала. Однако этот метод имеет ряд недостатков, таких как дороговизна, трудоемкость, большие габариты и вес оборудования, пылеобразование в подземных выработках, высокий процент усадки искусственного массива, небольшая дальность метания, значительная величина износа ленты и образование большого количества пустот. В итоге, механическая закладка, хоть и применима для любого сухого материала с крупностью не более 100-120 мм, как самостоятельный метод закладки выработанного пространства, широкого применения в угольной и горнорудной отраслях промышленности не находит [10].

1.1.2 Реализация пневматической закладки

Пневматическая закладка – это процесс транспортирования закладочного материала с использованием сжатого воздуха для последующего поступления материала в выработку.

Закладочный материал вводится в трубопровод закладочной машиной и транспортируется воздушным потоком в выработанное пространство во взвешенном состоянии [10, 25]. Скорость витания при пневматическом транспорте является эквивалентом критической скорости движения гидравлической смеси, ниже которой, частицы дисперсной фазы будут отделяться от потока и осаждаться [98].

Пневматическая закладка используется с материалом крупностью 5-80 мм, содержащего неабразивную породу и глину до 10-15% от общей массы. Оборудование закладочных комплексов при пневматической закладке, представленное закладочными машинами, дробильными машинами и классификаторами, располагается рядом с выработкой, а материал транспортируется к ней по трубопроводу или ленточному конвейеру. Переносные пневмозакладочные машины, позволяют перемещать материал по трубопроводу на расстояние до 50-80 м или при помощи эжекторных машин забрасывать материал в выработанное пространство на расстояние до 15-20 м.

Одним из главных требований, которые предъявляются к закладочному материалу, является прочность формируемого массива, характеризующая возможность управление кровлей. Исследования пневматической закладки выработок сухим материалом привели к выводу, что величина усадки сформированного закладочного массива напрямую зависит от гранулометрического состава материала. Пневматическая закладка материалом с средневзвешенным диаметром твердых частиц 1-5 мм приводит к формированию массива с величиной усадки до 15%. При увеличении диаметра частиц до 30 мм, величина усадки массива составляет уже 20-30% [115]. Таким образом, пневматическая закладка с сухим материалом может вызвать неоднородную плотность из-за величины усадки закладочного массива до 30%, что представляет собой один из главных недостатков пневматической закладки [16]. Пневмозакладка характеризуется большим пылеобразованием, расходом воздуха, значительным износом труб и машин, высоким расходом сжатого воздуха, усадкой закладочного массива и требует использование только малоабразивного материала. При этом преимущества пневматической закладки заключаются в более удобном управлении транспортированием при высокой производительности до 610 т/ч, возможности вместить частицы большого размера, а также обеспечить закладку удаленных выработок. Пневматическая закладка выработанного пространства неэффективна из-за недостатков, рассмотренных ранее, и не применяется на горных предприятиях.

1.1.3 Реализация гидравлической закладки

Гидравлическая закладка представляет собой использование смеси закладочного материала и несущей среды – воды с дальнейшим транспортированием в выработанное пространство (рисунок 1.3-1.4). Гидросмесь подается сверху через закладочные окна,

восстающие, вертикальные или наклонные скважины. Трубопровод или желоб помещается в камеру, и смесь подается по нему в подготовленное выработанное пространство, где образуется конус в месте поступления закладочного материала, высота которого зависит от размера частиц и плотности смеси.

Гидравлическая закладка является наиболее используемой на месторождениях с подземной добычей, демонстрируя наименьший процент величины усадки закладочного массива, приводящий к высокой плотности массива, но при этом, требующий большого объема материалов наполнителя и несущей среды. Основное оборудование комплекса гидравлической закладки включает в себя: смесители – сгустители, насосное оборудование, трубы для доставки с поверхности и распределения закладочного материала под землей.

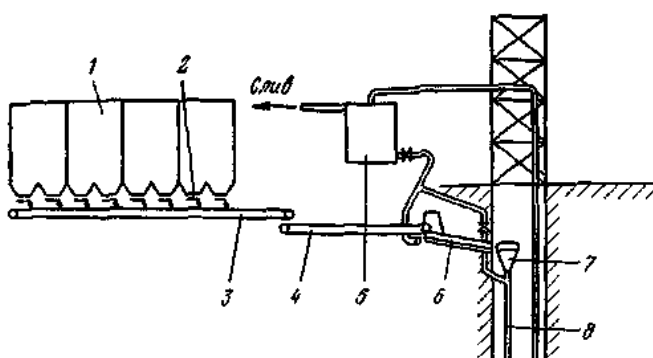


Рисунок 1.3 – Технологическая схема подготовки закладочного материала для гидравлической закладки [23]: 1 – аккумулярующие бункеры; 2 – питатели; 3 – ленточный конвейер; 4 – весоизмеритель; 5 – бункер с водой; 6 – смесительный наклонный желоб; 7 – приемный бункер закладочного трубопровода – 8

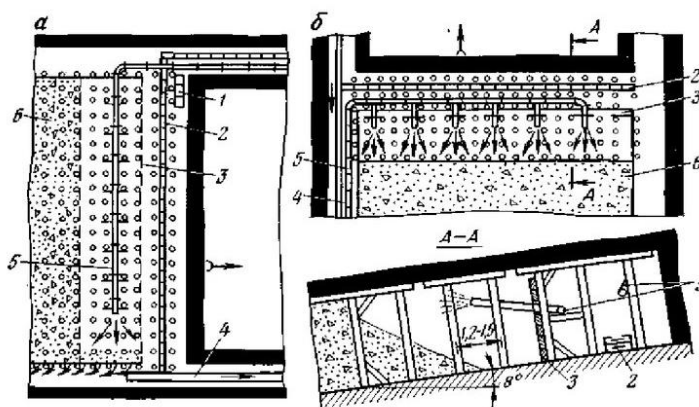


Рисунок 1.4 – Схемы возведения закладочного массива при гидравлической закладке [23]:

а – при отработке по простиранию; б – при отработке по восстаю; 1 – комбайн; 2 – забойный конвейер; 3 – ограждение; 4 – конвейер подготовительной выработки; 5 – трубопровод; 6 – закладочный массив

Закладочная смесь для гидравлической закладки формируется на поверхности. Компоненты закладочной смеси аккумулируются в бункере для обеспечения бесперебойного потока закладочной смеси при необходимости на производстве.

Гидравлическая закладка имеет следующие достоинства:

- возможность доставки закладочного материала к труднодоступным участкам выработки;
- низкие требования к закладочному материалу и отсутствие электромеханического оборудования;
- возведение устойчивого закладочного массива с высокими значениями прочностных характеристик;
- высокая производительность закладки (до 500 м³/ч);
- отсутствие необходимости устройства дополнительных участков перегрузки смеси;
- возможность использования транспортных выработок в качестве аккумулирующих емкостей.

Однако гидравлическая закладка обладает некоторыми недостатками, а именно:

- высокий расход несущей среды;
- расслоение закладочной смеси при транспортировании;
- значительный показатель усадки закладочного массива;
- значительный износ оборудования закладочного комплекса и трубопровода.

Реализация гидравлической закладки происходит с применением не только смесей, состоящих из наполнителя и несущей среды, но на настоящий момент все чаще применяются твердеющие закладочные смеси на основе твердофазного наполнителя, вяжущего материала и несущей среды (рисунок 1.5) [10, 25].

Твердеющие смеси применяются при необходимости быстрого возведение массива с необходимой прочностью не менее 1-3 МПа. Наиболее применяемыми компонентами закладочного материала являются: песок, обеспечивающий наименьшую величину усадки, и песчано-породная смесь с содержанием песка 25-35% для заполнения пор между кусками дробленой породы.

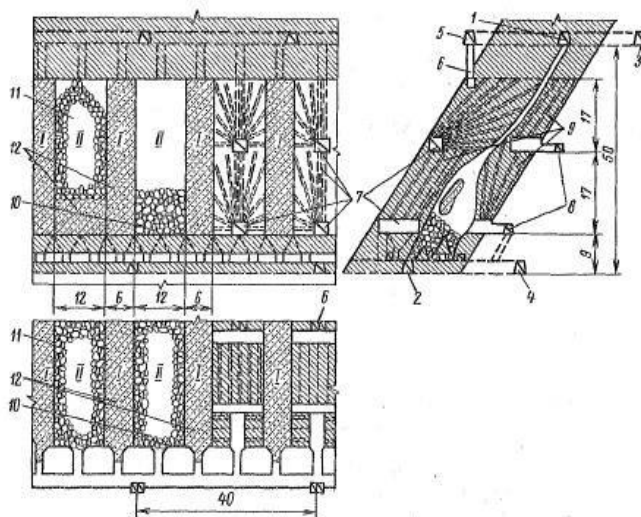


Рисунок 1.5 – Технологическая схема с гидравлической закладкой твердеющими смесями на Тасеевском руднике: I и II – камеры первой и второй очереди при обработке рудной зоны; 1 – вентиляционный штрек; 2-4 – откаточный штрек; 5 – закладочно-вентиляционный штрек; 6 – закладочная сбойка; 7 – буровые подэтажные выработки; 8 – подэтажные штреки; 9 – руда в целике; 10 – отбитая руда; 11 – сухой закладочный материал; 12 – твердеющая закладочная смесь

Твердеющие смеси могут поступать в выработанное пространство для дальнейшего формирования закладочного массива и набора прочности разными способами. При литом способе возведения закладочного массива используется вяжущий материал на основе шлаков и цемента, твердофазный наполнитель и несущая среда, (рисунок 1.6). Особенностью инъекционной смеси является ее консистенция, обеспечивающая взвешенное состояние частиц в несущей среде.

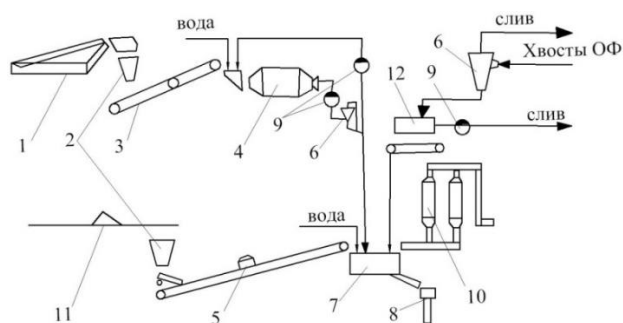


Рисунок 1.6 – Технологическая схема закладочного комплекса по подготовке смеси для возведения закладочного массива литым способом: 1 – склад для гранулированного доменного шлака; 2 – загрузочные бункеры; 3 – конвейер; 4 – шаровая мельница; 5 – весы; 6 – гидроциклоны; 7 – смеситель; 8 – трубопровод; 9 – насос; 10 – цементный склад; 11 – склад заполнителя; 12 – вакуум-фильтр

Состав инъекционной смеси оптимизируют для обеспечения прочности закладочного массива, транспортабельности по трубопроводам и низких затрат на приготовление. Снижение водоцементного отношения позволяет снизить расход вяжущего материала.

Недостатками способа являются высокие капитальные затраты на компоненты смеси и ее подготовку и транспортировку.

Однако литой способ возведения закладочного массива является наиболее распространенным на подземных рудниках и может быть использован в различных горно-геологических условиях. Данный способ позволяет обеспечить полную автоматизацию процесса и создание высокопрочного массива, но он также имеет свои недостатки, которые следует учитывать при выборе технологии возведения закладок [10, 25].

Инъекционный способ возведения закладочного массива включает подачу по трубопроводам гидравлического вяжущего материала в предварительно заполненное дробленой породой выработанное пространство (рисунок 1.7).

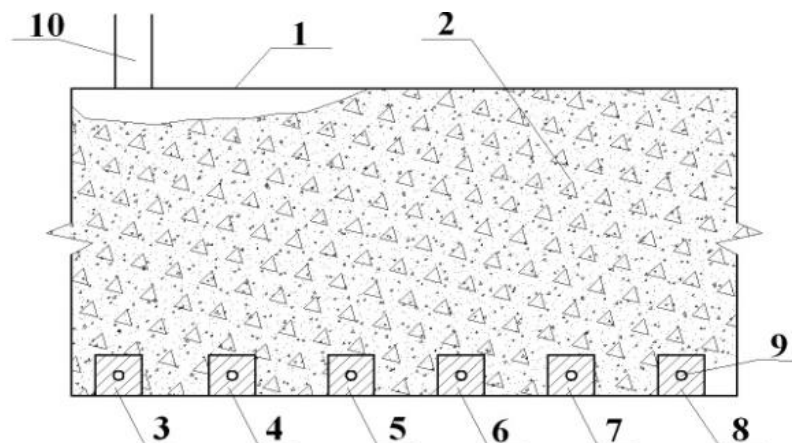


Рисунок 1.7 – Технологическая схема инъекционного способа возведения массива:

- 1 – камера; 2 – гравийная смесь; 3-8 – заезды в камере; 9 – участок трубы трубопровода;
10 – восстающий

Раствор проникает в пустоты дробленой породы и превращает ее в монолит определенной, заранее назначенной прочности [4]. Для достижения требуемого эффекта при инъекции мелких пустот необходимо принятие специальных мер: введение пластифицирующих добавок, применение домолы цемента, использование турбулентных смесителей для получения раствора коллоидного типа (рисунок 1.8).

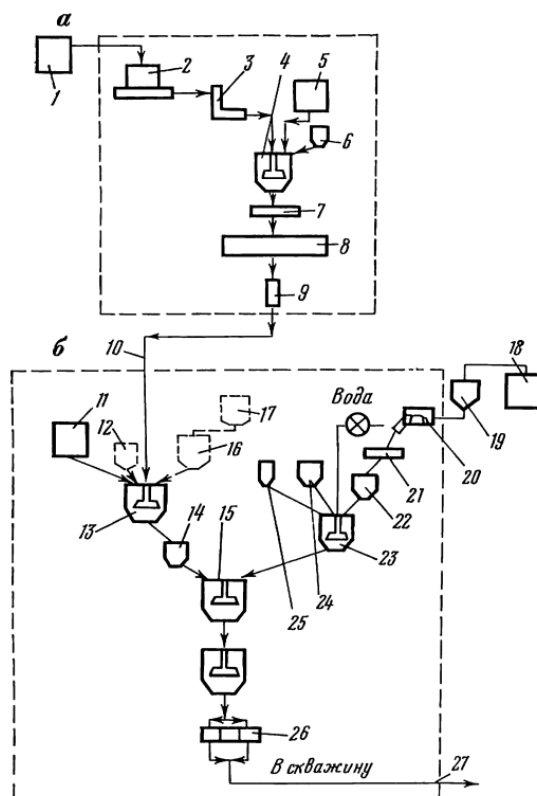


Рисунок 1.8 – Схема установки для приготовления цементно-глинистых инъекционных растворов: а – цех приготовления глинистых растворов; б – цех приготовления цементных и цементно-глинистых растворов; 1 – склад глины; 2 – глиномялка; 3 – весы; 4, 13, 15, 23 – смеситель; 5 – бак для воды; 6 – дозатор для реагента-пептизатора; 7, 21 – сито; 8 – бак-накопитель; 9 – насос; 10, 27 – трубопровод; 11 – емкость для воды; 12 – дозатор для реагента-стабилизатора; 14, 22 – дозаторы; 16 – дозатор для суспензии бентонита; 17 – бак для едкого натра; 18 – склад цемента; 19 – бункер; 20 – шнековый питатель; 24 – дозатор для пластифицирующей добавки реагента-стабилизатора; 25 – дозатор; 26 – инъекционный насос двойного действия

Для инъекционного способа возведения закладочного массива, с целью снижения затрат на расход цемента, применяют пески, молотый шлак, золу, суглинки, глины, лессы.

Преимущества инъекционного способа перед литым: более благоприятные условия трубопроводной транспортировки смеси, возможность использования породы от обрушения без необходимости выдачи на поверхность и дополнительного дробления [9]. Недостаток: сложность управления распределением вяжущего, что приводит к формированию закладочного массива неравномерной прочности [26].

При полураздельном способе вяжущий раствор и крупнокусковой наполнитель подаются к месту работ отдельно и смешиваются непосредственно перед закладкой. Способ включает две технологические линии:

- приготовление и транспортировка вяжущего раствора;

- подготовка и транспортировка крупнокускового материала сжатым воздухом, конвейерами или погрузочно-доставочными машинами. Смешивание производится перед подачей в выработанное пространство путем соединения компонентов в трубопроводе или при сбрасывании компонентов в выработку. Преимущества метода:

- полнота закладки под кровлю благодаря пневмотранспорту;
- снижение затрат на расход вяжущего и подготовку наполнителя за счет использования крупнокускового материала.

При использовании данного способа отпадает необходимость в дополнительном дроблении породы, ее сбрасывают в выработанное пространство, не выдавая на поверхность. Недостатками являются – двойная система транспортирования закладочных материалов при низком качестве перемещения. В целом полураздельный способ формирования закладочного массива является более эффективным и экономичным в использовании техники на месторождении.

Заключительным способом возведения закладочного массива на основе твердеющей смеси является гидрозакладочный. Данный способ основан на подготовке смеси на основе наполнителя в виде отходов обогащения, дробленной породы, песка или шлаков и вяжущего материала с последующим транспортированием в несущей среде по трубопроводу к выработанному пространству.

1.2 Опыт проведения работ по закладке выработанного пространства на отечественных и зарубежных предприятиях

Гидравлическая закладка твердеющими смесями была впервые протестирована на шахте «Центральная» в Кузбассе в 1937 году по инициативе И.Н. Казанина. Этот метод разработки предусматривал установку бетонных столбов с изогнутыми бетонными перекрытиями. Состав твердеющей смеси включал песок, горелые отвалы породы и цемент М 250-300. Смеси подготавливались на поверхности и транспортировались через трубы на глубину до 50 м для последующей укладки в выработку.

Спустя год возведенные столбы сохранили свои прочностные характеристики, позволив и дальше использовать твердеющие смеси. В результате в последующие годы гидравлическая закладка на основе твердеющих смесей получила широкое распространение на рудниках цветной металлургии.

В результате исследования месторождений в России с подземной добычей полезного ископаемого установлено, что большинство из них функционируют на глубинах более 500 метров с использованием камерных и слоевых систем разработки. При такой глубине и системах разработки сохранение прочностных характеристик массива является одним из основных условий успешного и бесперебойного функционирования предприятия. Для

обеспечения прочности массива при добыче полезных ископаемых рекомендуется использовать закладочные смеси на основе цемента, которые набирают прочность после укладки в выработанное пространство [3, 8-10, 25, 42].

При проведении закладки принято использовать твердеющие смеси с крупным наполнителем. Применение крупных наполнителей для увеличения прочности закладочного массива требует большого количества дорогостоящего вяжущего материала, такого как цемент. Перемещение таких смесей повышает риск забутки, интенсивного гидроабразивного изнашивания и повреждения трубопроводов. Для предотвращения этих проблем все чаще применяют твердеющие закладочные смеси на месторождениях [9, 25, 26, 42, 62, 66].

Твердеющие закладочные смеси в настоящий момент применяются на таких предприятиях, как: ТОО «Казцинк» (Малеевский рудник, Тишинский рудник), ООО «Тасеевское» (Тасеевское месторождение) и ПАО «Гайский ГОК» [10, 71].

На Малеевском руднике ТОО «Казцинк» применяется камерная система разработки месторождения с закладкой выработанного пространства. Твердеющая закладочная смесь представлена цементом, молотым граншлаком, отходами обогащения и водой. Закладочная смесь до выработки транспортируется самотечным способом по трубопроводу (рисунок 1.9) [70, 71].

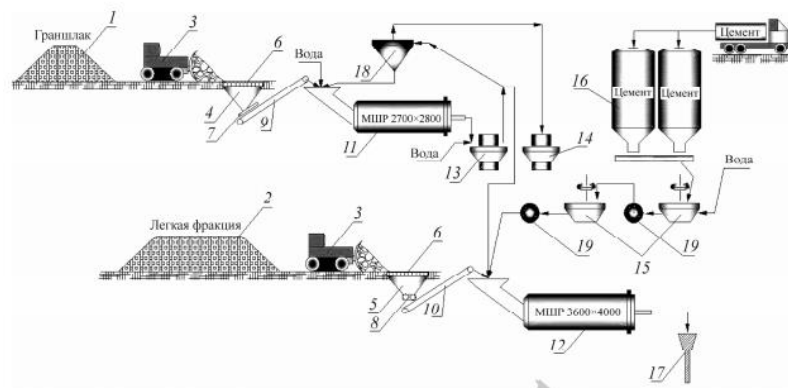


Рисунок 1.9 – Технологическая схема подготовки закладочной смеси на Малеевском руднике [70]: 1, 2 – отвалы; 3 – бульдозер; 4, 5 – приемные бункеры; 6 – колосниковая решетка; 7 – шибера; 8 – питатель; 9, 10 – ленточные конвейеры; 11 – мельница МШР2700×2800; 12 – мельница МШР 3600×4000; 13, 14 — насосы; 15 – устройство дозирования и приготовления цементного молока «ХАННИ»; 16 – расходные бункеры цемента; 17 – закладочная скважина; 18 – гидроциклон ГЦ-350; 19 – перекачной насос

Подготовка закладочной смеси на Малеевском руднике представляет собой поэтапное измельчение компонентов смеси на мельнице с подачей воды для получения готовой смеси перед поступлением в трубопровод диаметром 168 мм для транспортирования к выработке самотеком.

На Тишинском руднике применяется камерная система разработки месторождения с закладкой выработанного пространства. Производительность закладки выработанного пространства составляет 110-120 м³/ч по отношению к 500 м³/ч на Малеевском руднике [70, 71].

Закладочная смесь на рудниках «Фалу» и «Кристенберг» (Швеция) представлена песком, щебнем и цементным раствором, в соотношении Т:Ж 1:2. Технология закладки включает очистку поверхности выработанного пространства, установку опалубки вокруг закладываемой области, подготовку цементного раствора с добавлением песка и щебня, поступления закладочной смеси в выработку, уплотнение закладываемой массы, удаление опалубки и проверку качества закладки.

Отработка запасов на Казском месторождении (АО ЕВРАЗ) ведется с применением системы разработки этажного принудительного обрушения с отбойкой руды глубокими скважинами (рисунок 1.10) [56].

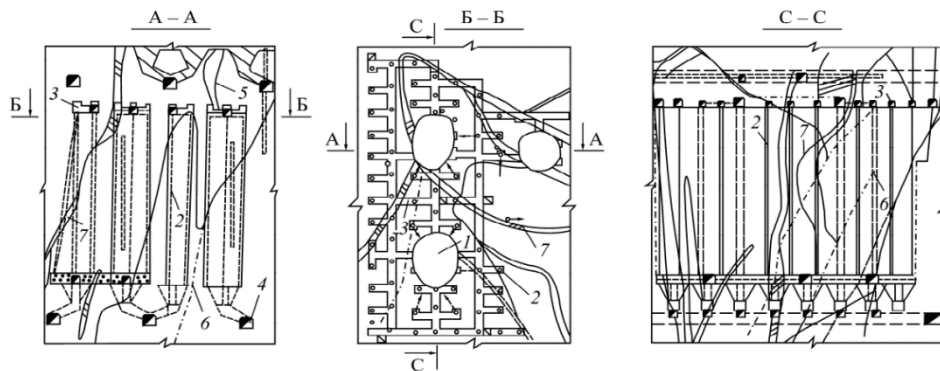


Рисунок 1.10 – Система этажного принудительного обрушения [56]: 1 – компенсационные камеры; 2 – пучковые скважинные заряды ВВ; 3 – буровые выработки; 4 – орт; 5 – сближенные горизонтальные скважинные заряды ВВ; 6 – тектонические трещины; 7 – геологические зоны; А-А – сечение вкрест простирания рудного тела; Б-Б – сечение по буровому горизонту; С-С – сечение по простиранию рудного тела

Выпуск руды из блока проводится через рудовыпускные воронки. Смесь для закладочных работ формируется на поверхностном закладочном комплексе. Состав смеси представлен молотым граншлаком, отходами обогащения, портландцементом и водой. Для снижения затрат на производство твердеющих смесей применяют гранулированные доменные шлаки в качестве вяжущего компонента и хвосты обогащения вместо наполнителя [56].

На Таштагольском месторождении (АО ЕВРАЗ) отработка камер ведется через одну, что позволяет достичь высокой интенсивности очистных работ при оставлении целиков и формировании искусственного массива с прочностью 6-8 МПа (рисунок 1.11).

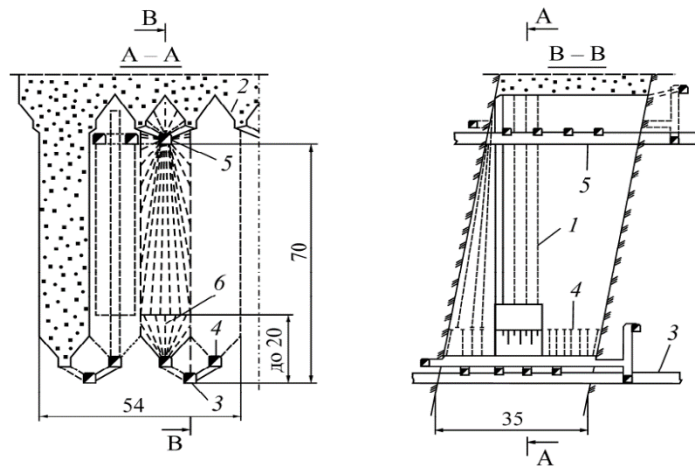


Рисунок 1.11 – Этажно-камерная система разработки с закладкой выработанного пространства на Северо-Западном участке Таштагольского месторождения: 1 – скважины; 2 – закладка; 3 – откаточный орт; 4 – траншейный орт подсечки; 5 – выработки бурового горизонта; 6 – веера подсечки; А-А – сечение вкрест простирания рудного тела;

В-В – сечение по простиранию рудного тела

Система разработки с закладкой выработанного пространства позволяет отрабатывать запасы руд в охранных целиках с лучшими качественными показателями извлечения руды, при низких показателях потери полезного ископаемого и разубоживания руды.

Твердеющий материал является дорогостоящим, однако дает небольшой процент усадки закладочного массива по отношению к другим способам, обеспечивает минимальные потери компонентов, а также обеспечивает целостность налегающих пород, обеспечивая безопасность ведения добычных работ [4, 77]. Выбор конкретной гидравлической смеси и ее применение зависит от условий и характеристик рудника, поэтому они могут отличаться для разных месторождений.

1.3 Закладочные смеси, их характеристики и свойства

Закладка выработок на рудном месторождении включает несколько этапов. Перед началом работ необходимо проанализировать характеристики горных пород, такие как прочность, пористость, влажность и твердость. Это позволяет выбрать оптимальный состав закладочной смеси и добавок к ней. Подготовка твердеющей смеси для закладки выработанного пространства представляет с собой соединение трех основных компонентов, а именно: наполнителя, вяжущего материала и несущей среды [10, 26].

Твердеющая закладочная смесь обычно включает вяжущий материал, который при химической реакции с водой обеспечивает связующее действие между компонентами, образуя монолитное соединение. Прочность закладки обычно колеблется от 1,5 до 10 МПа, что обеспечивает устойчивость к динамическим нагрузкам, вызванным взрывными работами [114].

При этом в момент смешивания компонентов смеси происходит химическая реакция между ними с дальнейшим затвердеванием закладочной смеси.

Вязущий материал позволяет смеси выдерживать огромные нагрузки, противостоять химическим воздействиям и ускорять процесс набора прочности закладочным массивом. Прочность вяжущего материала достигает 7 МПа и более в зависимости от состава. Основными используемыми вяжущими материалами в закладочных смесях являются: цементные растворы, хвосты обогащения, шлаки производств, гипс, известь, зола [25, 122, 124].

Наполнители формируют жесткий каркас закладочного массива. Для твердеющей закладочной смеси используют крупные наполнители, такие как гравий, щебень, отходы горно-обогатительного производства и отсева дробильно-сортировочных фабрик. Более мелким по крупности наполнителем могут выступать: песок, флотационные хвосты и шламы.

Важным элементом в составе закладочной смеси является несущая среда. Вода может быть добавлена для создания гидроизоляционной барьерной структуры. Избыточное использование воды может привести к непредсказуемым реакциям с минералами стенок выработок, и к затруднениям в закладке выработки. К основным свойствам несущей среды относят: концентрацию несущей среды в смеси, уровень pH и температуру. Изменение или нарушение любого из вышеперечисленных свойств может привести к снижению качества массива и его долговечности.

Рудничные воды часто содержат высокие концентрации кислот или солей, которые могут вызывать коррозию цемента [145]. Эти примеси могут вызвать выщелачивание портландцемента, отрицательно влияя на целостность и прочностные характеристики закладочного массива. При работе с цементом применяют воду с кислотностью 4 и выше, содержанием сульфатов до 2,7 г/л в виде ионов SO_3 , и других солей до 5 г/л. Значение pH, которое определяет кислотность воды, важно для определения ее воздействия на вяжущие вещества. Уменьшение количества воды при смешивании закладочной смеси может привести к улучшению ее технических свойств, но добавление большого количества воды может привести к снижению качества закладочной смеси.

1.3.1 Основные характеристики дисперсной фазы гидросмеси

Дисперсная фаза закладочной смеси включает минеральную основу, вяжущий материал и наполнители. Твердые частицы, добавляемые в смеси, например, цемент, песок, керамические порошки, могут влиять на такие свойства смеси, как пластичность, твердость, прочность и гигроскопичность. Частицы твердого материала различаются формой, крупностью, плотностью и другими физико-механическими характеристиками, определяющими условия их перемещения в потоке несущей среды [5].

Зависимость свойств твердого компонента закладочной смеси от их состава и условий изготовления хорошо изучена. Например, повышение содержания цемента увеличивает прочность на сжатие и скорость затвердевания. Однако при слишком большом количестве цемента закладочная смесь может потерять пластические свойства и стать более подверженной застыванию и образованию трещин. Кроме того, свойства твердого компонента закладочной смеси также зависят от геологических условий месторождения и характеристик выработки. Например, для выработок с высокой степенью осыпи потребуются закладочные смеси с улучшенными свойствами саморазрушения и более высокой пластичностью.

Плотность твердого компонента закладочной смеси оказывает влияние на объемный расход смеси, то есть на количество требуемой закладочной смеси для закладки определенного объема выработки. При использовании закладочной смеси с низкой плотностью может потребоваться больше смеси для закладки того же объема выработки, что приводит к дополнительным затратам на закладку. Плотность гидравлической закладочной смеси изменяется от 1400 до 2500 кг/м³ в зависимости от различных факторов. Оптимальное соотношение дисперсной фазы к жидкой при сгущении составляет 1:6. Размер дисперсной фазы зависит от состава смеси и технологических процессов на месторождении, влияя на ее пластичность и прочность на сжатие. Чем мельче дисперсные частицы, тем медленнее происходит сгущение, и при размере менее 0,1 мкм осаждение практически прекращается, такие частицы становятся коллоидными. Для коллоидных частиц влияние молекулярных сил, броуновского движения и электрического отталкивания компенсирует скорость осаждения, что помещает их в равновесное взвешенное состояние. Крупность дисперсной фазы влияет на пластичность и прочность закладочной смеси на месторождении, что влияет на процесс закладки. Если материал мельче, то процесс сгущения идет медленнее. Частицы размером менее 0,1 мкм становятся коллоидными, и осаждение прекращается из-за баланса молекулярных сил, броуновского движения и электрического отталкивания. В результате они остаются во взвешенном состоянии.

Закладочная смесь с тонкой дисперсной фазой может потерять свою пластичность, из-за чего затруднительно будет ее применение для закладки выработки. С другой стороны, закладочная смесь с слишком крупными частицами будет менее плотной, поэтому требуется большее количество закладочной смеси для закладки одной и той же выработки.

В зависимости от крупности частиц и их формы изменяется характер обтекания частиц жидкостью при их осаждении. Для очень мелких частиц сопротивление осаждению со стороны жидкости имеет линейный характер и пропорционально скорости. С увеличением крупности частиц дисперсной фазы сопротивление пропорционально квадрату скорости.

Для мелких частиц, осаждающихся с постоянной скоростью, определение зависимости гидравлической крупности твердых частиц от их геометрических размеров и плотности осуществляется на основе закона Стокса [10, 25, 99, 122].

Форма зерен закладочной смеси является важным фактором, который необходимо учитывать при проведении работ по закладке горных выработок на месторождениях за счет влияния на такие важные параметры, как уплотнение закладочного массива и распределение твердой фазы в массиве. В зависимости от конкретных условий, может потребоваться использование определенной формы зерен, чтобы обеспечить оптимальное уплотнение и распределение закладочной смеси.

Химический состав может сильно влиять на гидродинамические свойства закладочной смеси, включая длительность сохранения своих свойств, текучесть и вязкость. Текучесть структурных гидросмесей оценивается структурной вязкостью и предельными напряжениями сдвига. Их динамическая вязкость зависит от скорости деформации и при турбулентном режиме постоянна, определяясь концентрацией дисперсной фазы. Высококонцентрированные гидросмеси способны формировать устойчивые пространственные структуры, благодаря чему существуют без образования осадка, удерживая во взвешенном состоянии крупные частицы. Структурные гидросмеси, в отличие от ньютоновских жидкостей, находятся в покое до достижения максимального значения динамических напряжений сдвига, вызывая упругую деформацию и придавая гидросмеси свойства твердого тела. Вязкопластичные свойства особенно выражены при концентрации 0,25-0,3 и содержании твердой фазы минимальной крупности свыше 35%.

1.3.2 Применение пластификаторов и дополнительных реагентов

В закладочной смеси для повышения текучести смеси, снижения содержания вяжущего материала и уплотнения закладочного массива применяют пластификаторы. Примерами пластификаторов являются: лигносульфонат, ССБ (сульфитно-спиртовая барда), ГКЖ (гидрофобизирующая кремнийорганическая жидкость на основе силиконатов щелочных металлов), тонкодисперсный известняк в смеси с мылонафтом (является пластифицирующе-воздухововлекающей добавкой), глины и суглинки. Глина – является одним из доступных и эффективных пластификаторов природного происхождения, который образует скользящий гидрофобный слой на стенках трубопровода. Синтетические пластификаторы, например, СДБ (сульфатно-дрожжевая бражка), адипиновый пластификатор и водорастворимый пластификатор, используются для улучшения текучести гидросмесей, снижения расхода вяжущего и повышения прочности закладочного массива [34].

Пластифицирующе-воздухововлекающие добавки применяются при отрицательных температурах для повышения морозостойкости и водонепроницаемости смеси. Чтобы повысить

эффективность закладочных работ, необходимо использовать более густую закладочную смесь для снижения растекания и расслоения смеси и увеличения заполнения выработанного пространства [34, 70].

Помимо вяжущего материала, наполнителей и пластификаторов применяют активаторы. Активаторы – вещества, которые усиливают гидравлическую активность вяжущего, содействуя разрыву гидратных оболочек вокруг частиц активной фазы. Они интенсифицируют связывание воды и гидратов извести, ускоряя процесс отверждения. Основными применяемыми активаторами являются гипс, цемент, вода и различные химические соединения, такие как ускорители затвердевания, ретардеры, антифризы, стабилизаторы, микрофибры и другие [34].

1.4 Закладочные комплексы как взаимосвязанная система горного оборудования

На качество закладочного массива, помимо компонентов, влияет технология подготовки закладочной смеси, а также используемое оборудование.

Первым этапом закладки выработанного пространства является подготовка компонентов закладочной смеси на закладочных комплексах. Закладочный комплекс – совокупность объектов и оборудования для хранения, приготовления и транспортировки закладочных материалов [8]. В основном, закладочные комплексы располагаются на поверхности в пределах промплощадки или на специально оборудованных площадках. Комплекс на поверхности включает сооружения, подъездные пути и коммуникации для приёма, складирования, их приготовления, смешивания и перепуска в подземные горные выработки. Эксплуатируемые в настоящее время комплексы имеют горизонтальную схему компоновки, предполагающую перемещение всех материалов закладки в пределах промплощадки комплекса в основном конвейерами.

Большинство применяемых компонентов закладочных смесей необходимо подвергать предварительной подготовке на закладочном комплексе: дроблению, грохочению, измельчению, классификации, магнитной сепарации, промывке, дешламации и др (рисунок 1.12-1.13) [8-10, 69, 72].

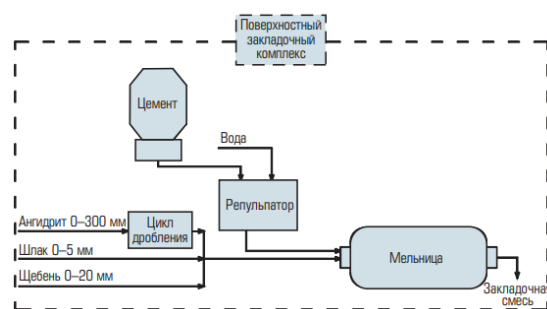


Рисунок 1.12 – Схема действующей на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» технологии изготовления твердеющей закладочной смеси [51]

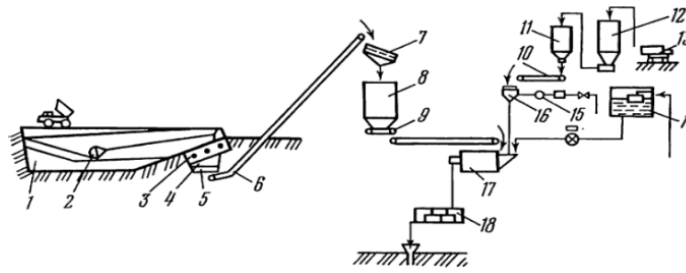


Рисунок 1.13 – Общая технологическая схема приготовления твердеющей закладочной смеси:

- 1 – склад заполнителя; 2 – скрепер; 3 – колосниковый грохот; 4 – бункер; 5 – питатель;
 6 – ленточный конвейер; 7 – виброгрохот; 8 – расходный бункер заполнителя; 9 – питатель;
 10 – питатель цемента; 11 – расходный силос цемента; 12 – приемная силоса цемента;
 13 – цементовоз; 14 – бак с постоянным уровнем воды; 15 – расходомер воды; 16 – затворитель цемента; 17 – барабанный смеситель; 18 – уравнильный смеситель

Существует два основных способа подготовки гидравлической закладочной смеси перед ее поступлением в трубопровод на этапе смешивания компонентов: твердый компонент смешивается с несущей средой в смесителе-активаторе или дисперсная фаза поступает в трубопровод к несущей жидкости в установленных соотношениях, отмеренных дозаторами [95].

1.4.1 Мельницы, измельчители, дробилки

Существует несколько типов мельниц, которые могут использоваться для подготовки закладочного материала на рудных месторождениях.

Шаровые мельницы работают смесью из воды и окалины, которая помогает разрушить материал на более мелкие частицы. Технология работы проста – материал загружается в мельницу, затем мельница начинает вращаться, что приводит к измельчению материала. Шаровые мельницы могут обрабатывать материалы различной целевой кривизны. Преимуществами этого типа мельницы являются высокая производительность, простота управления, возможность работы с различными типами материалов. Однако недостатком шаровых мельниц является высокая стоимость обслуживания и ремонта (рисунок 1.14).

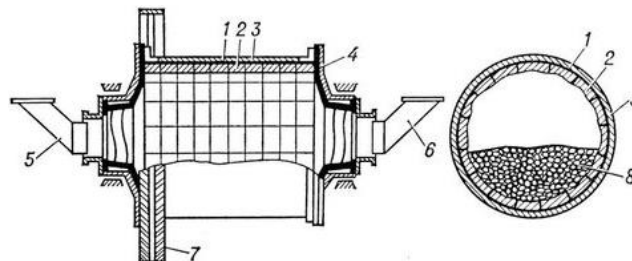


Рисунок 1.14 – Схема шаровой мельницы: 1 – барабан; 2 – броневые плиты; 3 – изоляция (от шума и тепловая); 4 – торцовый фланец мельницы; 5 – входной патрубок; 6 – выпускной патрубок; 7 – ведомая шестерня; 8 – шары

Импульсная мельница считается одним из наиболее эффективных оборудований для измельчения материалов. Она применяется для измельчения материалов различной твердости, включая кварцит, гранит, базальт. Импульсные мельницы работают на основе сильных ударов, которые применяются к материалу внутри мельницы. Это позволяет быстро разрушить материал на более мелкие частицы. Технология работы этого типа мельницы включает загрузку материала в мельницу и далее его разрушение с помощью камней. Преимуществами импульсных мельниц являются высокая производительность, возможность работы с различными типами материалов. Однако недостатком является высокая стоимость обслуживания и ремонта.

Роторная дробилка используется для измельчения материалов различной твердости, включая камень, бетон, гравий (рисунок 1.15). Роторные дробилки работают на основе сильных ударов, которые применяются к материалу внутри мельницы. Этот тип оборудования обычно работает с сухими материалами, но также может использоваться и для работы с водой. Технология работы включает загрузку материала в мельницу, где он разрушается на более мелкие частицы. Преимуществами роторных дробилок являются высокая производительность, возможность работы с различными типами материалов. Однако недостатком является высокая стоимость обслуживания и ремонта.

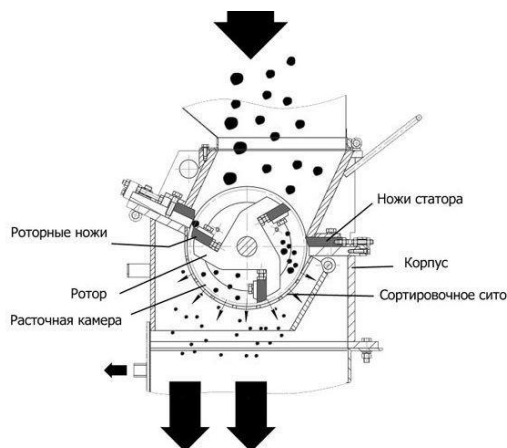


Рисунок 1.15 – Схема роторной дробилки

Измельчители на рудниках используются для измельчения горных пород и других материалов до нужной крупности, чтобы использовать их в качестве дисперсной фазы для закладки выработок на месторождении. Существуют два основных типа измельчителей – щековые и конусные. Щековые дробильные станки наиболее распространены и просты в управлении, позволяют измельчать крупные куски материала, но ограничены в размере и форме измельчаемых кусков и требуют высоких затрат на обслуживание и ремонт. Конусные дробильные станки используются для измельчения материалов средней твердости, имеют высокую производительность и устойчивы к изнашиванию, но также ограничены в размере и форме измельчаемых кусков и требуют высоких затрат на обслуживание и ремонт.

На выбор конкретного типа измельчителя влияют многие факторы, в том числе крупность и твердость измельчаемого материала, производительность и цена оборудования. Важно выбрать оптимальный тип измельчителя, чтобы обеспечить эффективность и высокую производительность технологической линии.

1.4.2 Дозаторы и смесители

Смесители служат для равномерного распределения различных компонентов, отмеренных и подаваемых дозаторами порционно, с целью получения однородной смеси.

Для дозирования компонентов в закладочной смеси используют различные устройства, включая весовые дозаторы. Они определяют точное количество каждого компонента при помощи встроенных весовых преобразователей. Управление дозатором осуществляется при помощи контроллера, который связан с весовыми датчиками. Весовые дозаторы точно дозируют компоненты. Их преимущества – точность, скорость работы, гибкость настройки. Недостатки – высокая стоимость, потребность в регулярной очистке и чувствительность к внешним факторам.

Весовые дозаторы используют различные типы весовых преобразователей, такие как консольно-ленточные весы, напольные весы, ударно-загружаемые весы, компактные весы и расходомеры, которые определяют точное количество жидкого компонента, измеряя его расход (рисунок 1.16).

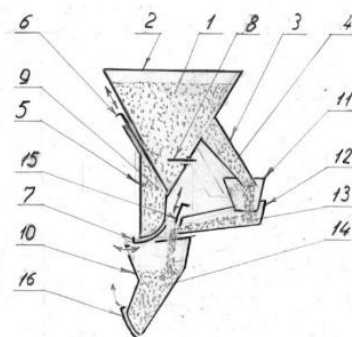


Рисунок 1.16 – Схема весового дозатора: 1 – продукт; 2 – приемная камера; 3 – патрубок отвода; 4 – поток тонкого дозирования; 5 – камера грубого дозирования; 6 – верхняя заслонка камеры грубого дозирования; 7 – нижняя заслонка камеры грубого дозирования; 8 – задвижка; 9 – грубая доза продукта; 10 – весоизмерительная емкость; 11 – воронка; 12 – поток тонкого дозирования; 13 – поток досыпки; 14 – точный объем продукта; 15 – заслонка лотка тонкого дозирования; 16 – заслонка весоизмерительной емкости

Расходомеры используются для измерения скорости потока жидкости или газа и объема, который протекает через систему. Они основаны на различных принципах измерения и имеют множество преимуществ, включая высокую точность, низкую чувствительность к изменению

условий эксплуатации, легкость в установке и возможность работы с различными жидкостями и газами.

Расходомеры имеют несколько недостатков, таких как высокая стоимость, требование специальной калибровки, чувствительность к изменениям состава жидкости или газа и потребность в регулярном обслуживании. Однако расходомеры, использующие эффект Кориолиса, позволяют эффективно измерять расход жидкости. Дозирующие фидеры широко используются в промышленности для дозирования и подачи веществ регулируемой массы и концентрации. Они могут работать по различным принципам, таким как микродозирование и гравитационная подача, и обладают высокой точностью, отсутствием пульсаций и возможностью регулировки скорости подачи.

Дозирующие фидеры имеют высокую точность дозирования, возможность регулировать подачу веществ, работать в автоматическом режиме, передавать широкий диапазон типов материалов, но требуют затрат на обслуживание и высокой стоимости.

Воздушные транспортировщики используют сжатый воздух для транспортировки сыпучих и гранулированных материалов по горизонтали или вертикали с высокой производительностью, низким уровнем шума, отсутствием вибраций и возможностью работы на длинных расстояниях. Воздушные транспортировщики обладают рядом преимуществ: безопасность, сохранность материала, низкий уровень шума, малая площадь занимаемой поверхности, возможность перемещать большие объемы материала и обеспечивать высокую скорость перемещения и перемещение крупногабаритного материала. Однако существуют и недостатки: ограниченный диапазон материалов, высокая стоимость.

После того, как отмерена нужная масса компонента для подготовки закладочной смеси, он поступает в смеситель. Смеситель-активатор поверхностного комплекса представляет собой емкость с заслонками, имеющие разное положение и конструкцию в зависимости от типа, часто используются пневматические или гидравлические заслонки [106, 116, 118]. При смешивании путем поступления твердого компонента в трубопровод с водой, рассматриваются два принципа действия, а именно:

1. загрузка материала с удалением объема жидкости, соответствующего объему поступающего материала. При данном способе поступления материала происходит сильное засорение несущей среды, что приводит к необходимости дополнительных этапов очистки для повторного ее использования. Способ не применим для высококонцентрированных смесей за счет обеспечения низкого КПД;

2. загрузка материала под высоким давлением. К таким способам можно отнести принцип действия шнековых, камерных, камерно-шлюзовых, трубчатых и барабанных питателей.

Качество смеси преимущественно оценивается ее однородностью, которая подразумевает неизменное содержание компонентов во всех точках объема смеси, соответствующее заданной рецептуре. На качество смешивания влияют различные факторы, в том числе: плотность и влажность компонентов, крупность, форма и адгезионные свойства частиц, влажность смешиваемых материалов, содержание компонентов и коэффициент внутреннего трения между частицами.

Мобильные смесители, с другой стороны, могут быть перенесены на различные участки рудника, чтобы обрабатывать сырье на месте. Они обычно более компактны, чем стационарные и могут обрабатывать менее объемные порции сырья за более короткий промежуток времени. Некоторые из наиболее распространенных типов мобильных смесителей включают:

- пневматический смеситель: используется для перемешивания крупных порций сырья на месте;
- стационарный смеситель: обычно используется, когда нужно быстро перемешать сырье на месте, например, перед закладкой выработок на руднике;
- поперечный смеситель: используется для перемешивания мелкой руды и ее смешивания с другими компонентами на месте.

Технологические процессы и оборудование для смешивания сыпучих материалов подлежат классификации по нескольким признакам: стационарность, непрерывность, способ воздействия на продукт, конструктивные особенности, характер движения компонентов в смесителе.

Стационарные смесители, как правило, устанавливаются на постоянной основе в центральном пункте подготовки смеси на руднике. Такие смесители спроектированы для обработки большого объема сырья и имеют высокий производительный показатель. Некоторые из наиболее распространенных типов стационарных смесителей включают в себя:

- ручной смеситель: используется в случаях, когда важно сохранить качество исходной руды путем смешивания дополнительных компонентов;
- шаровой мельничный смеситель: используется для измельчения руды и смешения ее с другими компонентами;
- барабанный смеситель: имеет форму барабана, в котором происходит смешивание руды.

Основной парк аппаратов, используемых сегодня, представлен радиальными смесителями различных типоразмеров, с центральным, либо периферийным приводом (рисунок 1.17.).

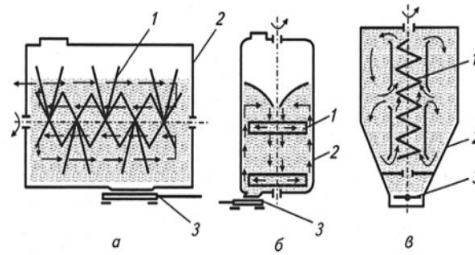


Рисунок 1.17 – Способы воздействия и схемы перемешивания продукта при смешивании:
 а – горизонтальный спирально-ленточный смеситель; б – вертикальный лопастной смеситель;
 в – вертикальный шнековый смеситель; 1 – рабочий орган; 2 – корпус; 3 – задвижка

Типы смесителей по способу перемешивания подразделяют на: гравитационные, с принудительным перемешиванием лопастями, вибрационные, комбинированного перемешивания. На закладочных комплексах чаще всего применяют смесители с принудительным перемешиванием. Продолжительность перемешивания закладочной смеси в смесителях такого типа зависит от степени его заполнения и консистенции смеси. С увеличением времени перемешивания прочность получаемого состава растет, а производительность смесителя снижается.

Оптимальное время перемешивания для смесей с крупным наполнителем составляет 25-30 с, без крупного наполнителя – 20-25 с. Смешивание исходных компонентов позволяет повысить прочность закладки на 15-20%.

С учетом требований к приготовлению закладочных смесей в настоящее время рекомендован ряд конструкций виброактиваторов непрерывного действия, способных работать при максимальной производительности закладочных комплексов (рисунок 1.18).

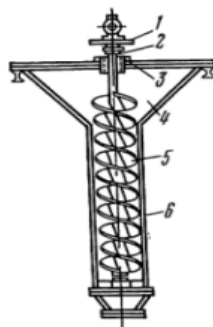


Рисунок 1.18 – Вертикальный вибросмеситель: 1 – вибропривод; 2 – пружина; 3 – втулка;
 4 – воронка; 5 – рабочий орган; 6 – корпус

Подготовленная в стандартном лопастном смесителе гидросмесь, поступает в загрузочную воронку вертикального вибрационного смесителя. Проходя через грузонесущий элемент, смесь подвергается воздействию вибрационных сил. Усиление смеси в вибросмесителе приводит к повышению прочности образцов на 33%, снижению расхода цемента при сохранении прочности на 20% и водоцементного отношения на 20% [26].

Смеситель-активатор роторного типа работают следующим образом (рисунок 1.19).

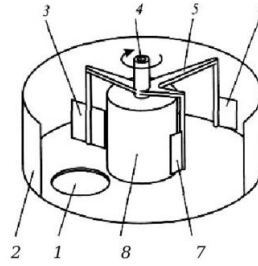


Рисунок 1.19 – Схема смесителя-активатора роторного типа: 1 – разгрузочный люк; 2 – чаша смесителя; 3 – перемешивающая лопасть; 4 – вал привода кронштейнов лопастей; 5 – кронштейн лопастей; 6 – лопасть, зачищающая стенки чаши; 7 – лопасть, зачищающая стенки стакана; 8 – внутренний стакан

Отмеренные компоненты закладочной смеси через загрузочный патрубок попадают на вращающиеся стержни ротора [34]. В процессе взаимодействия с ними частицы дисперсной фазы гидросмеси приобретают различные скорости и направления движения. Возникающие при соударении со стержнями силы сцепления между частицами значительно уменьшаются, что приводит к переходу частиц в коллоидное состояние. Одновременно разрушаются зерна вяжущего, что способствует интенсификации процессов гидратации и, как следствие, более полному использованию его активности. Гомогенизация и повышение текучести смеси, увеличение активности вяжущего в конечном счете позволяет улучшать качественные характеристики искусственного массива [34].

После того, как закладочная смесь подготовлена в смесителе через питатель она поступает в трубопроводную систему.

Питатель – это цилиндрическая емкость, используемая для перемешивания гидравлической смеси и/или разбавления перед подачей в трубопровод. Загрузочные аппараты используются для транспортировки абразивных гидросмесей и исключения попадания абразивов в насосы, позволяя использовать водяные высоконапорные насосы для подъема гидросмеси с большой глубины.

Существуют два типа питателей: одни удаляют жидкость, другие загружают материал в высоконапорный трубопровод за счет создаваемого давления. Шнековый питатель обеспечивает высокое давление и герметичность, но требует большую длину шнеков и не всегда стабилен при переменном гранулометрическом составе материала. Камерные питатели имеют большую вместительность и используют высоту столба материала для создания необходимого давления. Они прошли испытания на шахтах Донбасса для транспортировки дробленой породы на глубину 350 метров.

Камерно-шлюзовые питатели являются наиболее распространенными и экономичными (рисунок 1.20) [95].

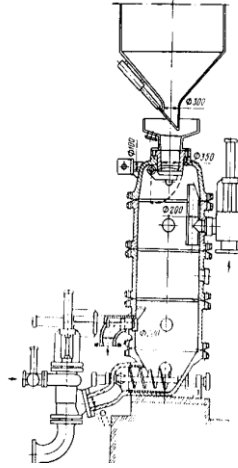


Рисунок 1.20 – Камерно-шлюзовый питатель со шнековой подачей материала в трубопровод

Питатели камерно-шлюзового типа шлюзуют камеры для загрузки и разгрузки материала в вертикальной плоскости. Давление создается при помощи тонкоструйных насадок, а разгрузка происходит через шнек. Комплекс – породопогрузочный, разработанный Сибгипрогормашем, имеет две камеры, вместимость каждой – 0,6 м³.

1.4.3 Трубопроводные системы закладочных комплексов

После подготовительного этапа компоненты закладочной смеси дозаторами равномерно подаются по системе конвейеров на смесительный желоб, где соединяются с несущей средой и направляются через питатели в трубопровод для самотечного транспортирования к выработкам. Транспортирование на горизонтальных участках производится самотеком за счет естественного напора столба закладочной смеси, образованного разницей отметок начала и конца трубопровода. Однако гидравлические системы подразделяются на напорные и системы с естественным напором [11]. Напорная система, представлена применением специального оборудования, а именно насосов для создания искусственного напора, в дополнение к напору, создаваемому перепадом геодезических высот, характерному для безнапорной системы.

При механизированной гидрозакладке горизонтальное расстояние транспортирования превосходит высоту вертикального участка трубопровода в 3-5 раз. При этом скорость потока смеси варьируется от 0,3 м/с до 2,4 м/с в зависимости от параметров дисперсной фазы, а диаметр трубопровода – от 76 до 220 мм [98].

Транспорт закладочной смеси представляет собой отдельный технологический процесс и ещё одно звено в большой цепи, связанной с добычей полезного ископаемого. Для перемещения гидросмеси на все большие расстояния необходимым является использование вспомогательного оборудования (насосы, пневмоэжекторы, виброактиваторы и т.д.), поскольку одной кинетической энергии может быть недостаточно для перемещения смеси [114].

Процесс закладки включает использование трубопроводной системы для транспортирования закладочной смеси к выработке.

Трубы широко используются в качестве средства доставки закладочной смеси к выработкам благодаря простоте монтажа и возможности транспортировать закладочную смесь на большие расстояния. Для транспортирования закладочной смеси, в основном, используют трубы с пропускной способностью 500-700 тыс.м³ в год. Данные трубы применимы для всех типов дисперсной фазы без значительных затрат на их производство и дальнейшее использование. Разновидностями труб для транспортировки закладочной смеси могут являться: биметаллические или двухслойные и синтетические.

Для транспортирования высокоабразивных или коррозионно-активных материалов используются биметаллические трубы (рисунок 1.21). Внутренняя поверхность таких труб облицована сплавом на основе стали, легированной вспомогательными сплавами на основе Mo, V, Ti и Cr. Это обеспечивает высокую износостойкость, однако влечет за собой значительные капитальные затраты [95].



Рисунок 1.21 – Биметаллическая труба

Стальные трубы широко применяются для закладки выработанного пространства благодаря их прочностным характеристикам и долговечности (рисунок 1.22). Однако данный вид труб подвержены коррозионным процессам, что обуславливает необходимость регулярных мероприятий по техническому обслуживанию во избежание разрушения.



Рисунок 1.22 – Стальная труба

Основными представителями класса синтетических труб являются: полиэтиленовые трубы из сшитого полиэтилена и пропиленовые трубы (рисунок 1.23), максимальным диаметром до 650 мм устойчивы к абразивному износу, но имеют высокие капитальные затраты, низкую жесткость и высокую хрупкость [107].



Рисунок 1.23 – Полиэтиленовая труба

Пластиковые трубы легкие и простые в установке, что делает их популярным выбором для закладки выработок. Они также устойчивы к коррозии и требуют меньше обслуживания, чем стальные трубы. Однако пластиковые трубы не такие прочные, как стальные, и могут не подходить для транспортировки высококонцентрированной закладочной смеси.

Трубы из стекловолокна легкие и прочные, что делает их хорошей альтернативой стальным трубам. Они также устойчивы к коррозии и требуют минимального обслуживания. Однако трубы из стекловолокна могут быть дороже, чем другие типы труб.

В большинстве случаев закладочная смесь подается по самотечным трубопроводам. Однако кинетической энергии часто бывает недостаточно, поэтому необходимо применение насосного оборудования и разработка с использованием различных конструкции, обеспечивающих транспортировку закладочной смеси по горизонтальным участкам трубопроводов на большие расстояния.

В случаях уменьшения кинетической энергии транспортируемой закладочной смеси либо при низкой скорости ее движения целесообразно использовать сжатый воздух. В точках врезки трубопроводов монтируются пневматические эжекторы, обеспечивающие подачу сжатого воздуха.

При снижении кинетической энергии движущейся закладочной смеси или низкой скорости движения гидравлической смеси, может использоваться сжатый воздух. В местах врезки трубопроводов, по ходу движения гидравлической смеси, трубопровод оборудуется пневматическими эжекторами для подачи сжатого воздуха (рисунок 1.24).

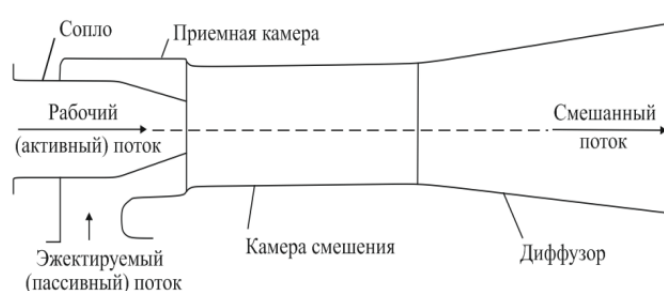


Рисунок 1.24 – Схема устройства эжектора

Для устранения аварийных ситуаций и перерывов в подаче смеси устанавливаются вспомогательные (аварийные) эжекторы по всей длине трубопровода. Они автоматически

включаются, когда скорость движения в трубопроводе снижается и приближается к критической.

Избыточное давление, возникающее при вертикальной гравитационной подаче гидросмеси на значительную глубину, может спровоцировать воздушные прорывы и повреждение трубопровода. Для своевременного предотвращения и устранения таких ситуаций могут быть использованы следующие механизмы:

- устройство для сброса смеси или воздуха;
- механизм сброса жидкости на колене трубы;
- манометры для контроля давления в закладочном трубопроводе;
- химические добавки – пластификаторы и катализаторы.

Для перекачивания закладочной смеси при закладке выработок на рудных месторождениях применяются различные насосы, которые могут работать с разными типами смесей. В зависимости от условий работы на месторождении можно выбрать насос с определенными техническими характеристиками. Все насосное оборудование подразделяется на два типа: динамические и объемные насосы со своими преимуществами и недостатками [18, 24, 78, 84, 95, 109].

Классификация насосов может быть проведена по различным критериям (таблица 1.1).

Центробежные насосы являются наиболее распространенными видами насосов, работы которых основаны на использовании вращающегося рабочего колеса. Они могут быть радиальными, полуосевыми и осевыми, что связано со способом расположения рабочих колес и направлением потока. Центробежные насосы хорошо подходят для перекачивания низкоконцентрированных гидросмесей.

Винтовые насосы работают на основе перекачивания гидросмеси внутри специального винта. Они хорошо подходят для перекачивания гидросмеси с высоким содержанием дисперсной фазы. Винтовые насосы имеют высокую эффективность и хорошую надежность.

Поршневые насосы работают на основе движения поршня внутри цилиндра. Они могут быть одноступенчатыми или многоступенчатыми и имеют разные типы уплотнений. Поршневые насосы используются для перекачивания чистых, агрессивных и вязких гидросмесей.

Диафрагменные насосы работают по принципу движения диафрагмы внутри корпуса насоса, сжимая и растягивая гидросмесь. Они хорошо подходят для перекачивания абразивных, вязких и слабоагрессивных гидросмесей. Диафрагменные насосы часто используются в фармацевтической, пищевой и химической промышленности.

Таблица 1.1 – Характеристики насосов

Тип насоса	Примеры смесей	Условия работы	Ограничения	Принцип работы	Преимущества	Недостатки
Центробежные насосы	Применяются для перекачивания чистых жидкостей или жидкостей с низкой концентрацией твердых частиц	Могут работать при различных температурах и давлениях	Не подходят для перекачивания жидкостей с высокой концентрацией твердых частиц или высокой вязкости	Жидкость втекает в центр насоса, где создается радиальная сила, которая перекачивает жидкость в систему	Высокий КПД, мало шума и вибрации, большой диапазон применения	Не подходят для перекачки жидкостей со слабоустановленной вязкостью
Винтовые насосы	Подходят для перекачки жидкостей с высокой концентрацией твердых частиц и суспензий, таких как гравий или шлам	Могут работать при высокой вязкости жидкости	Могут иметь проблемы с аварийной остановкой, требуют частых проверок и обслуживания	Жидкость перекачивается путем движения жидкости внутри цилиндров, разделенных винтом	Мало деталей, что приводит к низким эксплуатационным расходам, способность работать с высокой концентрацией твердых частиц	Высокая нагрузка на вал насоса, подверженность включению воздуха в насос, требуют обслуживание после длительной эксплуатации
Поршневые насосы	Подходят для чистых жидкостей, а также для агрессивных и вязких жидкостей	Высокое давление, могут работать при высокой вязкости жидкости	Чувствительны к задирам, особенно на поверхности поршня, что может привести к коррозии.	Жидкость перекачивается за счет движения поршня внутри цилиндра, который сжимает и разжимает жидкость	Высокое давление и КПД, высокая герметичность	Высокие затраты на замену поршневых колец и ограниченный ресурс из-за значительного изнашивания поршневых камер

Продолжение таблицы 1.1

Тип насоса	Примеры смесей	Условия работы	Ограничения	Принцип работы	Преимущества	Недостатки
Диафрагменные насосы	Подходят для абразивных, вязких и слабоагрессивных жидкостей	Могут работать при высокой вязкости жидкости	Требуют частой замены диафрагмы, склонность к образованию отложений на входе в насос	Жидкость перекачивается путем движения диафрагмы внутри корпуса насоса, сжимая и растягивая жидкость	Бесперебойная работа в режиме самовсасывания, высокая герметичность	Могут засоряться, высокий уровень вибрации
Перистальтические насосы	Подходят для химических жидкостей, агрессивных жидкостей и жидкостей с высокой вязкостью	Могут работать при высокой вязкости жидкости	Требуют замены роликов и шлангов по мере их износа	Жидкость перекачивается через гибкий шланг, который сжимается и разжимается между роликами	Высокая герметичность, низкий уровень износа	Малый объем перекачиваемой жидкости, склонность к засорению
Лопастные насосы	Подходят для перекачки сыпучих, насыпных и порошкообразных материалов	Могут работать при высокой вязкости жидкости	Низкий уровень производительности и при малых объемах перекачиваемой жидкости и низкая герметичность	Жидкость втекает через всасывающее отверстие и перемещается вдоль лопастей, создавая давление и перекачивая жидкость	Могут обрабатывать сыпучие, насыпные и порошкообразные материалы, низкие издержки на техническое обслуживание	Не очень эффективны в работе с жидкостями, малый объем перекачиваемой жидкости

Перистальтические насосы перекачивают гидросмесь через гибкий шланг, который сжимается и разжимается между роликами. Они хорошо подходят для перекачивания кислот, щелочей и других агрессивных жидкостей, так как гидросмесь не контактирует с насосом.

Лопастные насосы применяются для перемещения порошков и сыпучих материалов, таких как зерно, цемент и многие другие. Лопастные насосы могут иметь разные типы лопастей и являются хорошей альтернативой винтовым насосам.

Основные преимущества насосов включают простоту конструкции, высокую эффективность и относительно низкую стоимость. Недостатки могут включать значительные эксплуатационные затраты и необходимость постоянного обслуживания.

Для перекачивания гидросмесей могут применяться центробежные или перистальтические насосы. Оба типа насосов имеют ограничения по давлению и температуре и требуют постоянного обслуживания, но имеют широкий диапазон применения и высокую эффективность. Недостатки - высокая стоимость доставки и установки оборудования.

1.4.4 Сгустители

Транспортирование закладочного материала заканчивается поступлением смеси напрямую в выработку или с предварительным обезвоживанием до требуемой концентрации по дисперсной фазе в сгустителе. Сгустители используются также на подготовительном этапе для обезвоживания компонентов закладочной смеси [60, 61, 88, 97].

Сгущение – процесс осаждения дисперсной фазы и выделения несущей среды из гидросмеси под действием силы тяжести, центробежных и/или инерционных сил. При этом получается сгущенный конечный продукт. Сгущение сопровождается процессом осветления, т.е. получением свободной от дисперсной фазы несущей среды.

Все существующие сгустители можно подразделить на три большие группы:

- гравитационные;
- инерционные;
- комбинированные.

Гидротранспортные установки, являющиеся элементом технологического комплекса, способствуют поступлению в транспортную линию гидросмеси с низкой степенью насыщения, поэтому возникает необходимость сгущения гидросмеси в начале транспортной линии. Основным параметром, характеризующим процесс сгущения гидросмеси, является средняя скорость движения гидросмеси в разделительном и осадительном желобах.

Гравитационный сгуститель состоит из цилиндрического резервуара, выполненного из железа или стали (рисунок 1.25). Смесь подается в центр резервуара через загрузочный колодец, расположенный на глубине до 1 м ниже поверхности жидкости. Несущая среда в данном типе сгустителя движется и стекает к периферии, далее поступая в обратную систему

водоснабжения. По мере оттока воды от центра находящаяся во взвешенном состоянии дисперсная фаза опускается к основанию резервуара, где взаимодействуют со скребками или лопастями и удаляется в виде сгущенной гидросмеси через выходной патрубок в центре. Внутри резервуара находятся лопасти, имеющие такую форму, чтобы сгребать твердую фазу на дне резервуара к центральному патрубку [81].



Рисунок 1.25 – Гравитационный сгуститель

Основными конструктивными элементами сгустителя гравитационного типа являются разделительный и осадительный желоба, отсекаТЕЛЬ и регулятор. Разделительный желоб имеет прямоугольное сечение. Ему придается наклон, зависящий от условий разделения потока. При движении по нему гидросмеси происходит разделение по крупности фракций, выделение в нижний слой дисперсной фазы и осветленного потока несущей среды. Часть осветленного потока в конце желоба сливается через специальный отвод в верхней части желоба. Осадительный желоб в точке контакта с разделительным желобом имеет прямоугольную форму, которая переходит к концу желоба в параболическую. Угол наклона желоба определяет процесс сгущения. Отсекатель представляет собой прямоугольную емкость, в которой установлены лопасти для отделения выходящей струи. Регулятор имеет приводную подвижную пружину и действует автоматически. В разделительном желобе происходит процесс разделения на сгущенную и осветленную части потока. В процессе сгущения форма сечения желоба играет основную роль. Переменное по величине и форме сечение способствует изменению содержания частиц дисперсной фазы по всей длине и предельному их осаждению. Отсекатель устанавливается на различной высоте в соответствии с толщиной слоя осветленной части потока. Положение отсекаателя можно регулировать. Вместе с отсекателем монтируется сливной рукав. По мере изменения исходной концентрации потока мощность сливного потока может изменяться. Соответственно можно регулировать и сгущенную часть потока. Такие сгустители гравитационного типа получили применение при ведении закладочных и намывных работ.

Гравитационные сгустители обычно задерживают более 70-80% частиц из потока гидравлической смеси, в зависимости от характеристик твердого компонента и конструктивных особенностей оборудования, представленных в виде дополнительных элементов для ускорения осаждения твердых частиц - пластин, перегородок.

Гравитационные сгустители применимы для всех концентраций смесей и абразивности дисперсной фазы, но обладают рядом недостатков, влияющих на целесообразность применения в технологических цепочках, а именно:

- длительный срок сгущения;
- большие габариты оборудования;
- необходимость использования в конструкции оборудования специализированных рабочих элементов для ускорения процесса осаждения (пластин, перегородок, лопастей);
- изнашивание рабочих элементов.

Инерционные сгустители, в свою очередь, создают циркуляционное движение гидросмеси, поступающей в коническую емкость. Внутри емкости дисперсная фаза разделяется по плотности и тяжести, а сгущенная смесь поступает в выработку. Инерционные сгустители могут быть эффективными для обработки гидросмесей с различными плотностями и скоростями осаждения дисперсной фазы. Их преимуществом является относительно быстрое образование сгущенного потока, по отношению к гравитационным сгустителям, а недостатком – достаточно сложная конструкция, необходимость в постоянной подпитке несущей средой для обеспечения движения гидросмеси, создание постоянного напора гидросмеси, подвода большого количества энергии и значительный гидроабразивный износ. При изменении направления движения гидросмеси дисперсная фаза прижимается к ограничивающей поток стенке и опускается по ней к месту разгрузки. При этом отделяется несущая среда. Наиболее распространенными инерционными сгустителями являются гидроциклоны и дуговые решета. В горной промышленности они широко применяются на обогатительных фабриках.

Инерционные сгустители применяются при невозможности полного осаждения твердой фазы смеси под действием сил тяжести (рисунок 1.26).

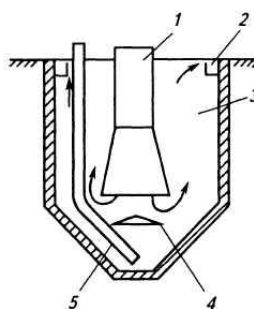


Рисунок 1.26 – Инерционный сгуститель: 1 – центральная труба; 2 – водослив; 3 – отстойная часть; 4 – отражательный щит; 5 – трубопровод для отвода осадка

Для формирования инерционных сил внутри аппарата, вносят конструктивные изменения в элементы сгустителя при необходимости интенсификации процесса сгущения: включение профилей осаждения, пластин, перегородок. После взаимодействия с данными

элементами конструкции, дисперсная фаза резко меняет свое направление движения и начинает осаждение.

Третьей разновидностью сгустителей – являются комбинированные сгустители, где действующими силами являются гравитационно-инерционные или центробежно-инерционные. Комбинированные сгустители сочетают в себе преимущества гравитационных и инерционных сгустителей и используются для обработки сложных гидросмесей. Они состоят из конусообразной емкости с осевым конусом в центре, который создает циркуляционное движение гидросмеси и позволяет разделить твердую фазу по плотности и тяжести. Основное преимущество комбинированных сгустителей заключается в том, что они универсальны и могут обрабатывать различные гидросмеси, и имеют более высокую эффективность по сравнению с гравитационными и инерционными сгустителями, но обладают значительными затратами на производство и обслуживание таких сгустителей (рисунок 1.27).

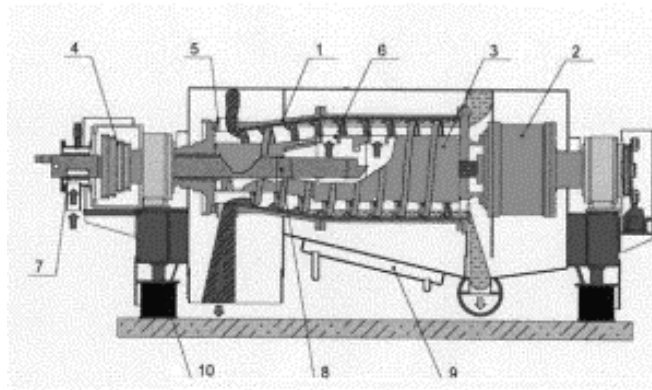


Рисунок 1.27 – Сгуститель комбинированного типа: 1 – ротор; 2 – редуктор; 3 – шнек; 4 – шкив ротора; 5 – окно выгрузки осадка; 6 – загрузочное окно; 7 – фильтр; 8 – труба питания; 9 – двойное днище; 10 – опора с амортизатором

Данные аппараты приступают к разделению смеси уже на начальном этапе, при поступлении смеси в резервуар. Инерционно - гравитационный сгуститель конструкции ЛГИ им. Г.В. Плеханова состоит из наклонной суживающейся малогабаритной камеры прямоугольного сечения, по которой движется гидросмесь, и примыкающего к камере наклонного (или вертикального) патрубка по которому поступает осветленная вода. На их границе находится жалюзийная решетка с наклоненными под определенным углом пластинками. Через эту решетку осветленная вода попадает в слив. В щели между пластинами жалюзийной решетки происходит изменение скорости движения гидросмеси (рисунок 1.28).

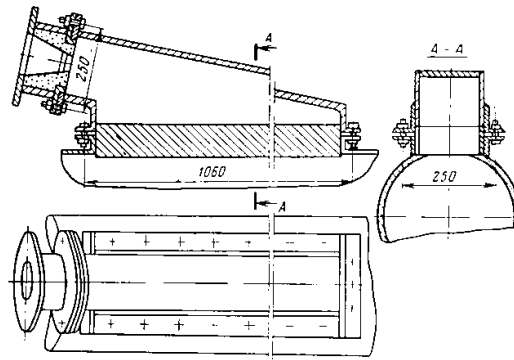


Рисунок 1.28 – Схема инерционно-гравитационного сгустителя

К инерционно-гравитационным сгустителям относится трубчатый сгуститель конструкции ИГД им. А.А. Скочинского, предназначенный для первой стадии сгущения щебеночно-гравийных гидросмесей. Основным конструктивным элементом сгустителя – перфорированная труба, установленная в цилиндрическом кожухе. Отвод воды осуществляется через трубопровод, на котором вмонтированы задвижки. Выводное отверстие расположено в верхней части трубы. Отделение воды из потока гидросмеси осуществляется за счет разности давления в трубе, кожухе и отводе.

Сгустители могут быть классифицированы по форме, размеру и расположению цилиндрического блока. В зависимости от этих факторов, инерционные сгустители могут быть классифицированы следующим образом (рисунок 1.29):

- Цилиндрического типа. Гидравлическая смесь под углом с начальной скоростью попадает в цилиндрическую камеру, где под действием центробежных сил более крупные частицы дисперсной фазы выпадают на дно камеры и отводятся для дальнейшего аккумулирования либо перемещаются при помощи шнека.
- Плоского типа. Поток гидравлической смеси разделяется неподвижными элементами, которые при взаимодействии с дисперсной фазой изменяют ее траекторию движения в сторону дна резервуара.

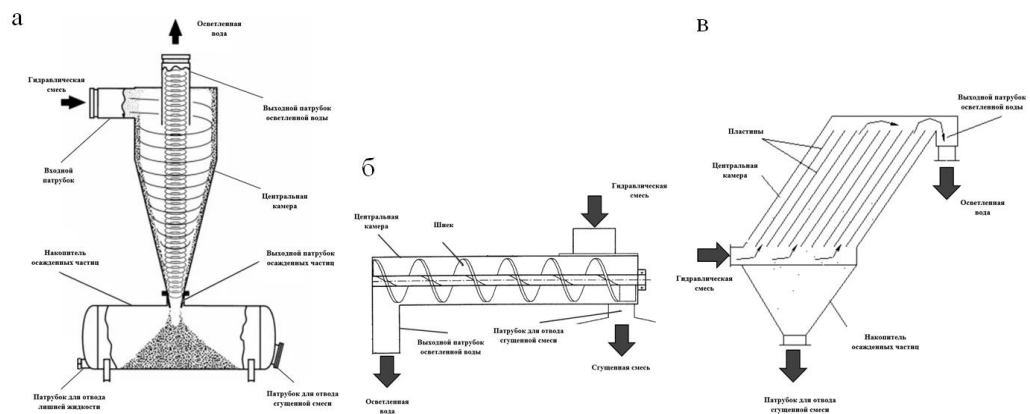


Рисунок 1.29 – Схема сгустителя цилиндрического типа (а, б) и плоского типа (в)

Основным параметром, характеризующим процесс сгущения и гранулометрический состав смеси, является скорость движения гидросмеси вдоль камеры сгустителя, обеспечивающая за счет вертикальной составляющей подъем в потоке гидросмеси. Необходимое сгущение гидросмеси достигается при соответствующей скорости истечения через жалюзийную решетку и сливной рукав. Для промышленных условий время наполнения сгустителя (с учетом времени остановки перед началом разгрузки) составляет 20-30 мин.

Каждый из данных сгустителей, работая с гидравлической смесью, способен получить массовую долю дисперсной фазы в сгущенной смеси 85-97%. Гравитационное и комбинированное оборудование обладает дополнительными рабочими элементами, внутри рабочей камеры, что обеспечивает повышенный износ рабочих элементов, обладают низкой скоростью сгущения смеси т.к. частицы находятся во взвешенном состоянии и пикируют только под действие силы тяжести.

При изучении конструкции сгустителей было выявлено четыре существенных недостатка:

1. значительные габариты сгустителей характеризуются низкой скоростью и большой длиной осаждения, что способствует большим затратам на время осаждения;
2. наличие высокоизнашиваемых конструктивных элементов сгустителей (лопасти, перегородки, направляющие и тд);
3. значительные энергозатраты при эксплуатации;
4. необходимость в очистном оборудовании для несущей среды после сгущения перед поступлением в водооборотную систему.

Большинство существующих предприятий используют гравитационный способ сгущения и прямоточную систему водоотведения с дополнительной очисткой. Следовательно, процессы сгущения на месторождениях ведутся с большими затратами времени на сгущение исходного потока и затратами времени на дополнительную очистку сточных вод.

1.5 Способы увеличения дальности подачи закладочных смесей.

Применение гидравлических закладочных комплексов в совокупности с применением гидросмесей сопровождается возникновением сложностей, а именно: невысокая дальность транспортирования материала и расслоение гидравлических смесей, что приводит к большим потерям по материалу, а также набору массивом недостаточной прочности. В конечном итоге страдает качество закладки, что приводит к значительному водоотделению от закладочного массива, образованию пустот – неполному заполнению выработок, низким прочностным и компрессионным характеристикам закладочного массива, приводящим к опусканию и обрушению вышележащих пород. Увеличение дальности транспортирования закладочной смеси является актуальной задачей на горном предприятии вследствие развития горного производства,

увеличения глубины разработки и усложнения конфигурации горных выработок, за счет отработки наиболее удаленных участков месторождения. В этом направлении проведены исследования зарубежными и отечественными учеными [1, 3, 8-10, 25, 62, 131, 143].

В настоящее время на различных рудниках, одним из которых является Риддер-Сокольный, добыча запасов руды ведется на флангах месторождения, недоступных для безнапорного транспортирования закладочной смеси. Следовательно, увеличение объемов добычи руды с использованием литых твердеющих смесей сдерживается отсутствием решений по транспортировке закладочных смесей на фланговые участки рудного поля и существенным удорожанием процесса закладки [9].

Увеличение дальности подачи закладочной смеси на руднике обеспечивается за счет гравитационно-пневматического способа транспортирования. Он предусматривает установку в конце самотечного участка транспортирования эжектора с подачей сжатого воздуха. Такая схема позволяет транспортировать закладочную смесь на расстояние до 1,5 км. Необходимо учитывать, что на транспортировку 1 м³ смеси на расстояние 1 км требуется в среднем 100-130 м³ сжатого воздуха [70].

Рассматриваемая технология была успешно применена на Орловском руднике Жезкентского горно-обогатительного комбината ТОО «Корпорация «Казахмыс». После подготовительного этапа твердеющая закладочная смесь подается на вертикальный участок трубопровода для самотечного транспортирования под действием давления смеси в вертикальном стволе. Выработки заполняются смесями различной концентрации с целью формирования закладочного массива с дифференцированной прочностью [70].

Однако применение нагнетательных установок приводит к расслоению потока гидросмеси, частым забутовкам трубопровода, повышенному износу труб, значительным объемам воды и обводнению гидросмеси (при применении нагнетания водно-воздушной смесью), что приводит к снижению прочностных характеристик массива и скорости его возведения.

Наравне с пневмоэжекторами рассматривается способ увеличения дальности транспортирования механическим способом, а именно: доставка сыпучих компонентов и несущей среды отдельно при смешивании у выработанного пространства. Однако при рассмотрении выработок, расположенных по флангам месторождения, необходимо обеспечить транспортирование компонентов смеси на протяженное расстояние, что повлечет за собой увеличение конвейерных линий, что значительно увеличит стоимость и время проведения закладки.

Третьим применяемым способом увеличения дальности транспортирования гидравлических смесей на месторождениях является применения виброактиваторов.

Применение виброактиваторов представляет собой воздействие на трубопровод знакопеременных колебаний для перемещения и последующего поступления материала в выработку в комплексе с самотечной или пневматической при [43, 55, 79].

Вибрационное перемещение материала обеспечивается за счет разделения горизонтального участка трубопровода на секции, соединенные упругими соединителями и оборудованные двумя вибровозбудителями на упругих опорах. Упругие опоры устанавливаются для компенсации поперечных колебаний и обеспечения устойчивости трубы на амортизаторах. Вибровозбудители приводятся в движение для совершения изгибающих колебаний требуемой амплитуды в горизонтальной и вертикальной плоскостях (рисунок 1.30) [43, 55, 79].

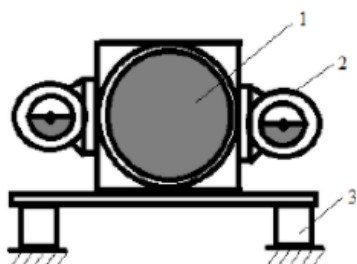


Рисунок 1.30 – Схема секции трубопровода при вибрационной закладке [79]:

1 – трубопровод; 2 – вибровозбудители; 3 – амортизационные опоры

Вибросамотечное или вибропневматическое транспортирование закладочной смеси обеспечивает снижение сопротивления перемещению потока гидросмеси по трубопроводу к выработке, сохраняет характеристики закладочной смеси вследствие уменьшения слоя осажденной дисперсной фазы по контуру трубопровода. Сохранение характеристик смеси и снижение осаждения дисперсной фазы осуществляется из-за тиксотропного разжижения. Тиксотропное разжижение приводит к снижению расслоения гидросмеси, образуя вязкопластичное ядро потока и пристенного потока пониженной вязкости, что ведет к сохранению характеристик закладочного материала, обеспечивающих требуемую прочность закладочного массива [43, 55, 79]. Для исключения расслоения гидросмеси рациональная скорость движения потока зависит от крупности дисперсной фазы, а именно:

- при крупности дисперсной фазы до 5 мм – рациональная скорость движения потока составляет 0,5-0,7 м/с;
- при крупности дисперсной фазы 5-40 мм – рациональная скорость движения потока составляет 0,7-1,0 м/с;
- при крупности дисперсной фазы более 40 мм – рациональная скорость движения потока составляет 1,0-1,5 м/с.

Увеличение дальности транспортирования за счет вибрационного транспортирования ведет за собой исключение необходимости строительства дополнительного закладочного комплекса и прокладки дополнительных линий трубопроводной системы для закладки удаленных участков, уменьшение сопротивления движению и увеличивает прочность закладочного массива. Однако применение виброактиваторов для увеличения дальности транспортирования оказывают негативное влияние на гидравлические системы. Появление вибрации в гидротранспортной системе приводит к увеличению вибрационной скорости и ускорению движения дисперсной фазы, влекущие за собой уменьшение расхода смеси и увеличения живого сечения потока [75]. Существующие недостатки также включают вероятность повышенного изнашивания поверхности труб, снижение скорости перемещения гидросмеси и ограничения в использовании с крупной дисперсной фазой. Вибрация, распространяющаяся по поверхности трубы, с потоком смеси, через упругие элементы и фундаменты, приводит к разрушению соединительных элементов трубопроводной системы, нарушая ее герметичность. Нарушение технико-эксплуатационных характеристик приводит к необходимости установки компенсаторов для ликвидации вибрации. Применение вибровозбудителей, упругих опор и компенсаторов на трубопроводе усложняет конструкцию гидротранспортной системы, что ведет к значительному увеличению стоимости оборудования для проведения и так дорогостоящей закладки выработанного пространства.

Заключительным способом увеличения дальности транспортирования является перемещение низкоконцентрированной закладочной смеси, которая увеличивает дальность перемещения за счет постоянного статического напора при снижении удельных потерь напора. Однако применение низкоконцентрированных гидравлических смесей сопровождается отделением значительных объемов воды от массива, приводит к обводнению выработок, трудностям при достижении необходимых прочностных и компрессионных свойств искусственным массивом и значительной величине усадки. При применении низкоконцентрированной смеси возникает проблема организации дренажа и отвода большого количества несущей среды. Массив, сформированной низкоконцентрированной смесью, может обладать несдренированными зонами, опасными по прорыву, образованными за счет наличия пылевидных и глинистых частиц.

Подача гидросмеси с высоким содержанием наполнителя сопровождается значительным гидроабразивным износом трубопроводной системы и снижению кинетической энергии потока. Это способствует расслоению потока, закупориванию трубопроводной системы, а также возрастанию потерь напора, осложняющих реализацию увеличения горизонтального участка транспортирования гидросмеси. Однако наиболее подходящим способом формирования закладочного массива является применение высококонцентрированных закладочных смесей т.к.

с применением данного материала формируется массив с требуемыми прочностными характеристиками. Высокая плотность смеси снижает показатель водоотделения, что ведет за собой уменьшение образующихся недозаложенных пустот, сопровождающееся снижением количества зон повышенного горного давления и возможности управления горным давлением после набора прочности массивом [114].

1.6 Выводы по главе 1

Анализ опыта разработки месторождений полезных ископаемых позволил сделать вывод, что около трети рудников применяют системы разработки с закладкой выработанного пространства.

Установлено, что преимущественно на данных рудниках закладка выработок осуществляется твердеющими смесями, состоящими из вяжущего материала, твердого наполнителя и несущей среды. Закладочная смесь поступает самотеком с закладочного комплекса в выработанное пространство, заполняет его под кровлю, часть материала отделяется от массива через фильтрующую перемычку и поступает в дренажную канавку, а закладочный массив набирает прочность в выработанном пространстве для достижения требуемых прочностных и компрессионных характеристик.

С течением времени происходит разрастание рудного поля и глубины отработки, что ведет за собой увеличение расстояния до выработок, требующих закладки. На основе анализа литературных источников установлено, что увеличение дальности транспортирования высококонцентрированной гидросмеси ведет за собой необходимость применения вспомогательного оборудования, например, виброактиваторов, насосов, пневмоэжекторов. Данное оборудование обладает ограничениями по концентрации гидросмеси и абразивности дисперсной фазы, приводит к забиткам трубопровода, повышению показателя износа труб, нарушению эксплуатационных характеристик гидротранспортной системы, необходимости подвода значительного количества энергии, значительному увеличению времени и затрат на проведение закладки выработанного пространства.

На основе анализа литературных источников, направленных на изучение увеличения дальности транспортирования и сгущения гидросмесей при закладке удаленных выработок, установлено, что применение существующего оборудования для увеличения дальности транспортирования высококонцентрированных смесей невозможно за счет ряда ограничений. Для решения задачи увеличения дальности транспортирования необходимо рассмотреть применение сгустительного оборудования на финальном участке транспортирования с использованием существующей низкоконцентрированной гидросмеси, обеспечивающей увеличение горизонтального участка транспортирования. Для установки возможности использования сгустительного оборудования, а также обоснованного выбора значений рабочих

параметров оборудования необходимо провести дополнительные теоретические и экспериментальные исследования.

На основании сформулированных выводов, ставится цель и задачи исследования.

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

Идея исследования заключается в применении для сгущения закладочной смеси на финальном этапе транспортирования оборудования, обеспечивающего седиментацию дисперсной фазы и формирование потока гидросмеси повышенной концентрации за счет реализации механизма инерционного взаимодействия первичного потока с отклоняющим гидродинамическим профилем.

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.

ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГУЩЕНИЯ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ

Процесс сгущения является основным методом получения высококонцентрированной гидросмеси. Сгустители позволяют использовать в производстве гидросмеси различной концентрации. Процесс сгущения, несмотря на успешную эксплуатацию сгустителей на многих объектах по всему миру, плохо изучен, а воспроизведение процесса сгущения все еще носит эмпирический характер [130].

Инерционные сгустители работают путем изменения траектории движения частиц в потоке путем создания центробежной силы. В зависимости от конструкции сгустителя и условий его работы, могут возникать различные процессы и силы, что определяет эффективность его работы. Процессы, законы и силы, которые возникают в инерционных сгустителях, можно описать следующим образом:

- Перенос массы, закон сохранения импульса и энергии. Частица с меньшей массой движется по направлению к наиболее крупной частице по массе в системе, что приводит к аккумулярованию частиц, снижению скорости движения до значений ниже критической скорости, с дальнейшим осаждением под действием силы тяжести, а как следствие, разделением дисперсной и жидкой фаз.
- Центробежная сила. Частицы в потоке движутся с различной скоростью после столкновения с препятствием инерционного сгустителя в зависимости от их массы. Тяжелые частицы сильнее отклоняются от траектории движения после взаимодействия с элементом конструкции.
- Молекулярные взаимодействия. Взаимодействие частиц гидросмеси с поверхностью сгустителя вызывает трение, что приводит к уменьшению их скорости и осаждению на стенках сгустителя.

2.1 Влияние свойств гидросмеси на процесс сгущения

Состав закладочной смеси играет ключевую роль в процессе сгущения. Различные компоненты дисперсной фазы и несущей среды, определяют вязкость, плотность и теплопроводность смеси. Изменение пропорций компонентов может привести к изменению тепловых и механических свойств закладочной смеси, что в свою очередь повлияет на процесс сгущения. Реологические характеристики твердеющих смесей должны обеспечивать стабильную транспортировку по трубопроводной системе, однородное растекание в выработанном пространстве без расслоения и необходимую проникающую способность для заполнения незначительных по объему остаточных пустот. Качественные характеристики возведенного искусственного массива должны соответствовать установленным нормативным требованиям, гарантируя его устойчивость и целостность.

Формирование сгущенного потока гидросмеси происходит за счет действия сил, включая гравитационную и инерционную. Как правило, смесь подается в сгуститель через входное устройство, где происходит ее равномерное распределение по сечению. Движение смеси происходит за счет создания давления в верхней части сгустителя, которое заставляет гидросмесь двигаться вниз, тем самым сообщая траекторию движения дисперсной фазе. Плотность большинства частиц дисперсной фазы больше плотности несущей среды, что приводит к их осаждению под действием силы тяжести на дно камеры сгустителя, при этом, частицы с меньшей плотностью всплывают к поверхности или находятся во взвешенном состоянии в потоке гидросмеси. В процессе движения смесь взаимодействует со стенками сгустителя и с другими частицами смеси. Тонкие частицы оседают медленно вследствие малой скорости витания и одноименного электрического заряда, вызывающего отталкивание частиц.

Смеси с повышенным содержанием дисперсной фазы позволяют значительно снизить водоотделение, уменьшая обводнение выработок и риск ее последующего нарушения. При этом для уменьшения напряжения сдвига при движении закладочной смеси, содержание дисперсной фазы размером около 45 мкм должно быть не более 15%. Однако, гидросмеси с высоким содержанием дисперсной фазы представляют собой дилатантные вещества. Благодаря своей внутренней структуре и межмолекулярному взаимодействию, при котором происходит структуризация в объеме дисперсной фазы, наблюдается степенная зависимость изменения напряжения сдвига от градиента скорости. Уравнение течения неньютоновской жидкости описывает наиболее распространенное явление – сдвиговое разжижение или вязкопластичное течение, при котором с увеличением скорости сдвига уменьшается вязкость, но увеличивается напряжение сдвига [63]. Движение гидравлической смеси в инерционных системах можно представить, как движение неньютоновской жидкости, поведение которой описывается степенным законом (2.1), предложенным Оствальдом де-Ваалем [87]:

$$\tau = K \left(\frac{dv}{dy} \right)^n, \quad (2.1)$$

где K – коэффициент, характеризующий вязкость гидросмеси; n – коэффициент течения, показывающий отклонение поведения течения от ньютоновского.

Как известно, изменение показателя степенной зависимости, сказывается на виде реологической кривой. При n меньше единицы, степенной закон определяет, что эффективная вязкость будет уменьшаться с увеличением скорости сдвига до бесконечности, что соответствует Бингамовским телам и вязкопластическим гидросмесям (телам Шведова). В свою очередь при n больше единицы наоборот наблюдается загустевание вещества при сдвиге (дилатантная гидросмесь) [80]. Данное утверждение согласуется с наблюдаемым при повышении содержания дисперсной фазы увеличением линейных потерь напора потока. Это

является следствием того факта, что в структурированных веществах повышение концентрации и уменьшение крупности приводит к появлению дополнительного контактного трения между частицами потока. Таким образом, степенной закон является лишь описанием поведения гидросмеси в диапазоне скоростей сдвига, для которых подобраны коэффициенты.

Однако модель движения частиц дисперсной фазы в гидросмеси предполагает, что эти смеси образуют седиментационно-устойчивые гидросмеси, которые равномерно распределяются по камере сгустителя при условии диффузионно-седиментационного равновесия (2.2) [111]:

$$I_{сед} = I_{диф}, \quad (2.2)$$

Удельный поток седиментации определяется уравнением (2.3):

$$I_{сед} = u_{сед} \cdot \nu, \quad (2.3)$$

где ν – число частиц в единице объема; $u_{сед}$ – линейная скорость седиментации, м/с (2.4):

$$u_{сед} = \frac{h}{\tau} = \frac{mg}{6\pi\eta r} \cdot \frac{\rho_k - \rho}{\rho_k} = \frac{2r^2 g (\rho_k - \rho)}{9\eta}, \quad (2.4)$$

где h – высота осаждения, м; τ – время осаждения, с; m – масса частицы, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ_k и ρ – плотность дисперсной фазы и несущей среды, кг/м³.

В процессе движения потока гидросмеси в сгустителе выделяются параметры, влияющие на процесс сгущения такие, как: скорость, концентрация, вязкость и плотность потока гидросмеси, крупность и форма частиц дисперсной фазы.

Уравнение диффузионно-седиментационного равновесия распределения частиц Лапласа-Перрена (2.5) позволяет определить основные параметры, влияющие на процесс сгущения [111]:

$$\ln \frac{\nu_0}{\nu} = \frac{mgh}{kT} \cdot \frac{\rho_k - \rho}{\rho_k} = \frac{Vgh \cdot (\rho_k - \rho)}{kT} = \frac{4\pi r^3 gh (\rho_k - \rho)}{3kT}, \quad (2.5)$$

где ν и ν_0 – число частиц на высоте h и на исходном уровне соответственно.

Следовательно, изменение параметров диффузионно-седиментационного равновесия приводит к началу процесса осаждения дисперсной фазы.

2.1.1 Влияние крупности дисперсной фазы гидросмеси

Закладочный материал представляет собой смесь, состоящую из дисперсной фазы (наполнителя и вяжущего материала), а также несущей среды. Движение потока способствует нахождению дисперсной фазы во взвешенном состоянии, но как только скорость потока снижается до нуля, на частицы оказывает влияние только сила тяжести, приводя к их осаждению за счет разности плотностей несущей среды и дисперсной фазы [38]. Таким образом, осаждение частиц при движении в сгустителе зависит от свойств несущей среды и дисперсной фазы т.к. наличие частиц в потоке несущей среды изменяет структуру потока и

определяет режим его движения. Взаимодействие твердых частиц дисперсной фазы в потоке гидросмеси детерминируется их крупностью, морфологией и концентрацией в дисперсионной среде. При этом процесс сгущения применяется к гидросмесям с различным гранулометрическим составом дисперсной фазы. Крупность частиц дисперсной фазы оказывает значительное влияние на скорость формирования сгущенной смеси и степень сгущения в гидросмесах. В чёрной и цветной металлургии крупность дисперсной фазы составляет от 0,05 до 5 мм, в угольной промышленности от 0,045 до 5 мм [38].

Мелкодисперсные частицы формируют плотные суспензии, и их влияние на несущую среду обусловлено концентрацией в потоке. Крупные частицы образуют смеси с повышенным содержанием частиц дисперсной фазы в центральной части потока [108]. С уменьшением крупности процесс сгущения идет медленнее, а осаждение частиц дисперсной фазы крупностью менее 0,1 мкм практически прекращается. Микрочастицы размером 10^{-7} - 10^{-9} м обладают способностью удерживаться во взвешенном состоянии в потоке гидросмеси, препятствуя осаждению более крупных частиц. Их распределение по объему гидросмеси остается практически однородным, что обуславливает ее седиментационную устойчивость. Данная крупность частиц приводит к необходимости установки дополнительных элементов конструкции в сгустителе для добавления действия инерционных сил и ускорения процесса сгущения.

В формируемых реальных гидросмесах присутствуют асимметричные по форме частицы дисперсной фазы, существенно отличающиеся от сферических. При проведении седиментационного анализа подобных смесей радиус частицы интерпретируется как радиус гипотетической сферической частицы (2.6), изготовленной из аналогичного материала и погружающейся с эквивалентной скоростью относительно частиц исследуемой дисперсии [111]:

$$r = \sqrt{\frac{9\eta h}{2g(\rho_k - \rho)\tau'}} \quad (2.6)$$

Так как процесс сгущения зависит от крупности дисперсной фазы, то, основываясь на формуле 2.6, процесс сгущения также зависит и от плотности компонентов гидросмеси, от которых зависит равновесное состояние смеси и турбулентность потока. Мелкие частицы, попадая в турбулентный поток полностью повторяют движение несущей среды. Более плотные гидросмеси увеличивают производительность сгустителя, но уменьшают скорость витания и увеличивают вынос дисперсной фазы. С увеличением крупности частиц возникает явление скольжения. Дисперсная фаза начинает отставать от несущей среды, что способствует росту сопротивления движению.

Проскальзывание частиц относительно несущей среды в двухфазном потоке влияет на характеристики турбулентности. Оно приводит к увеличению волнового числа турбулентности, что приводит к образованию более мелких вихревых структур. Кроме того, проскальзывание частиц и их выпадение из потока способствуют усилению турбулентности. Когда частицы отстают от потока или оседают, они создают локальные возмущения, которые взаимодействуют с турбулентными вихрями. Эти взаимодействия усиливают диссипацию энергии и приводят к увеличению турбулентной интенсивности [99].

Вследствие разделения дисперсной фазы и несущей среды гидросмеси возникает градиент концентраций по высоте сгустителя, приводящий к диффузии с осветленным потоком несущей среды и изменению его реологических характеристик [111]. Для обеспечения стабильности гранулометрического состава применяются мельницы тонкого измельчения, а также дезинтеграторы [59]. Это позволяет обеспечить более однородную форму фракции, а также минимизировать ее вторичную деструкцию в процессе транспортирования.

2.1.2 Влияние критической скорости потока гидросмеси

При изменении скорости гидросмеси, изменяется толщина придонного подвижного слоя с высокой концентрацией дисперсной фазы. Подвижный слой оказывает воздействие на поток гидросмеси аналогично стенкам трубы с высокой шероховатостью рабочей поверхности. При перемещении гидросмесей с полифракционным составом дисперсной фазы скорость скольжения несущей среды и частиц различна. Поэтому движение гидросмеси характеризуется различной скоростью скольжения фаз в разных точках поперечного сечения потока. Толщина, плотность и скорость движения подвижного слоя зависят от средней скорости потока гидросмеси и крупности твердой фазы. По мере снижения скорости потока концентрация частиц дисперсной фазы, находящихся во взвешенном состоянии, уменьшается, в то время как толщина формируемого ими слоя возрастает, переходя в осадок. Уменьшение критической скорости находится в прямой зависимости от разрушения крупных частиц и от степени насыщения несущего потока тонкодисперсными частицами.

С увеличением скорости движения гидросмеси и степени насыщения ее твердыми частицами проявляется винтообразный характер движения. Чем выше насыщение потока, тем ярче винтообразный характер движения. Различия в скоростях между частицами дисперсной фазы и несущей средой являются одним из факторов, способствующих возникновению дополнительной турбулентности и вихреобразования в двухфазном потоке. Неравномерное воздействие на частицы вертикальных и горизонтальных сил приводит к вариациям в их скоростях и траекториях. Эти различия в скоростях вызывают взаимодействие и коллизии между частицами, что приводит к образованию локальных вихрей. Увеличение относительных скоростей усиливает турбулентность потока и способствует генерации большего количества

вихревых структур. С увеличением скорости движения и концентрации гидросмеси в центре сечения потока образуется ядро с максимальной концентрацией. При уменьшении скорости движения и концентрации гидросмеси ядро опускается в придонную часть потока.

2.1.3 Влияния концентрации гидросмеси

Процесс сгущения в сгустителе происходит под действием силы тяжести из-за разницы в плотности дисперсной фазы и несущей среды, что приводит к осаждению частиц.

Распределение концентрации по сечению резервуара определяется крупностью дисперсной фазы в потоке. Для тонкодисперсных гидросмесей распределение концентрации параболическое, а для грубодисперсных гидросмесей – экспоненциальное. Мелкие частицы имеют скорость практически равную скорости несущей среды и траектории их движения совпадают с линиями тока несущей среды. Влияние взвешенных частиц дисперсной фазы на реологические свойства потока связано с их взаимодействием и коллизиями. Движение частиц разной крупности и по разным траекториям приводит к внутреннему трению и диссипации энергии. В результате гидродинамического взаимодействия дисперсной фазы и несущей среды в потоке происходят перераспределение скоростей движения частиц дисперсной фазы и концентрации гидросмеси, вызывающее изменение движения взвесенесущего потока и придающее ему винтовой характер.

Повышение концентрации дисперсной фазы усиливает взаимодействие частиц, что отражается на структуре потока. Это взаимодействие может привести к нарушению устойчивости и однородности потока и началу процесса седиментации частиц. Увеличение содержания дисперсной фазы в потоке гидросмеси приводит к увеличению вязкости гидросмеси и гидравлических сопротивлений. Однако слишком высокая концентрация может также затруднить перемещение частиц и привести к снижению эффективности процесса сгущения. При концентрации гидросмеси выше критической ее течение соответствует вязкопластичным (неньютоновским) жидкостям. По мере увеличения концентрации дисперсной фазы в гидросмеси скорость осаждения постепенно уменьшается, и на дне резервуара образуется слой ила.

Концентрационную классификацию закладочных смесей можно провести на основе отношения массы дисперсной фазы и массы несущей среды в смеси. Обычно выделяют следующие категории: смеси низкой концентрации, средней концентрации и высококонцентрированные смеси.

2.2 Разработка конструкции инерционного сгустителя

Применение дополнительного оборудования для увеличения дальности транспортирования ограничено концентрацией гидросмеси, невозможностью увеличения дальности транспортирования за счет линейных потерь напора, значительных затрат при

использовании на протяженных участках, а также необходимости подвода дополнительной энергии.

Таким образом, перспективным решением проблемы повышения дальности транспортирования закладочных смесей является применением поэтапной технологии: транспортирование смеси с низким содержанием наполнителя до участка закладки с последующим сгущением и транспортированием сгущенной смеси к месту закладки.

Проанализировав принципы работы существующего сгустительного оборудования, сделан вывод о возможности использования инерционного сгустителя из-за наличия ряда ограничений у оставшихся, исключающих возможность использования одного из существующих на данный момент сгустителей. В свою очередь, инерционный сгуститель позволит достичь формирования гидравлической смеси нужной концентрации [91, 89, 93]. Использование инерционного принципа сгущения обусловлено необходимостью реализации непрерывной технологии подачи закладочного материала, а также компактностью размеров оборудования.

2.2.1 Инерционный сгуститель: основные узлы, функции, принцип работы

Инерционный принцип сгущения подобран на основании теоретического исследования формирования сгущенного слоя, необходимости высокой производительности сгустителя, а также компактных размеров, требуемых для возможности размещения в выработке. Оборудование не требует подключения к системе электроснабжения, использует в технологическом процесс исходную гидравлическую смесь и позволяет получить гидросмесь с повышенной концентрацией на финальном участке транспортирования (рисунок 2.1).

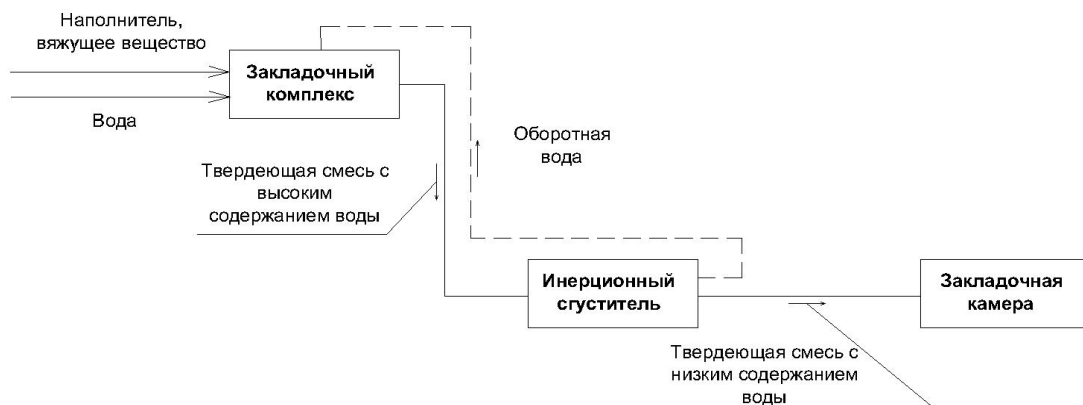


Рисунок 2.1 – Технологическая схема гидротранспорта закладочных смесей со сгущением на финальном этапе работ

При разработке конструкции сгустителя учитывалась необходимость получения высококонцентрированной смеси на основе первичной гидросмеси и обеспечение постоянной производительности по сгущенной смеси на выпускном патрубке инерционного сгустителя.

Разработанная конструкция инерционного сгустителя, способна осуществлять закладку выработанного пространства и подготовку твердеющей смеси у выработки (рисунок 2.2). Используемая на месторождении первичная гидросмесь с поверхности по трубопроводу поступает самотеком в рабочую камеру инерционного сгустителя, где дисперсная фаза осаждается при помощи гидродинамических профилей под действием сил тяжести и инерции [31, 38].

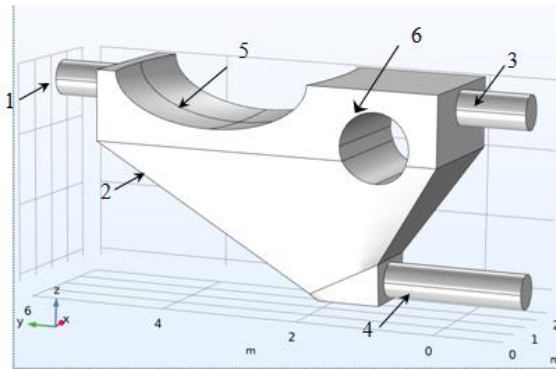


Рисунок 2.2 – Модель инерционного сгустителя: 1 – впускной патрубок; 2 – рабочая камера; 3, 4 – выпускной патрубок осветленной воды и сгущенной смеси; 5 – главный отклоняющий гидродинамический профиль; 6 – цилиндрический гидродинамический профиль

Инерционный сгуститель состоит из рабочей камеры – 2 трапецеидальной формы в которую по впускному патрубку – 1 поступает гидравлическая смесь с поверхности, где происходит ее аккумуляция и процесс сгущения. В ходе разработки конструкции рассматривались 3 формы рабочей камеры: квадрат, трапеция, полукруг. Форма рабочей камеры подобрана исходя из необходимости самотечного движения осевшей твердой фазы по наклонным стенкам рабочей камеры сгустителя, технической возможности создания конструкции, а также отсутствие зон заиливания, приводящих к потере материала. Таким образом, форма рабочей камеры выбрана трапецеидальная со скошенным дном, обеспечивающая при осаждении материала на стенки рабочей камеры равномерное его движение к выпускному патрубку сгущенной смеси без образования застойных зон.

Конструкция инерционного сгустителя оборудована двумя гидродинамическими профилями, обеспечивающими инерционный принцип сгущения в данном сгустителе. Двигаясь вперед по рабочей камере, гидросмесь вступает во взаимодействие с поверхностью главного отклоняющего гидродинамического профиля – 5. Главный отклоняющий гидродинамический профиль имеет эллиптическую форму и расположен в первичной зоне – зоне поступления и аккумуляции гидросмеси в рабочей камере. Основной поток дисперсной фазы гидросмеси взаимодействует с профилем 5, часть частиц смеси теряют скорость и изменяют траекторию своего движения. Конструкция данного профиля обоснована необходимостью изменения траектории движения дисперсной фазы в сторону дна рабочей камеры, способствуя увеличению

скорости сгущения гидросмеси. Форма отклоняющего гидродинамического профиля обеспечивает изменение траектории движения основного потока дисперсной фазы по касательной, что уменьшает зону образования вихревого следа и повторного взмучивания смеси с выносом дисперсной фазы с осветленным потоком несущей среды. Таким образом, частицы под действие гравитационных и инерционных сил движутся ко дну и стенкам рабочей камеры сгустителя для формирования сгущенного потока.

Поток гидросмеси с небольшим количеством частиц дисперсной фазы продолжает движение в рабочей камере по касательной отклоняющего гидродинамического профиля, двигаясь в сторону цилиндрического гидродинамического профиля – 6. Цилиндрический гидродинамический профиль размещен в зоне повторного сгущения перед выпускным патрубком осветленного потока несущей среды и отвечает за выделение из потока и осаждение оставшейся, после взаимодействия с отклоняющим гидродинамическим профилем, дисперсной фазы из потока гидросмеси. Дополнительно, повторный вынос дисперсной фазы урегулирован при подборе режимных параметров работы инерционного сгустителя.

Разделенные потоки направляются непосредственно к выпускным патрубкам сгущенного потока и осветленного потока несущей среды. В придонной области рабочей камеры образуется зона сгущенного потока, постепенно уплотняющегося под действием сил тяжести. Выпускной патрубок сгущенной смеси – 4 располагается в нижней части рабочей камеры для самотечного поступления сгущенного потока к данному патрубку для дальнейшего поступления в выработанное пространство.

Выпускной патрубок осветленного потока несущей среды – 3 располагается в верхней части рабочей камеры после зоны повторного сгущения для сокращения выноса дисперсной фазы с осветленным потоком. Конструкция сгустителя предусматривает отведение осветленного потока несущей среды по отдельному каналу для последующего использования ее в нуждах производства. При отсутствии возможности реализовать систему оборотного водоснабжения, отводимая осветленная вода может поступать в водоотливные канавки.

2.3 Разработка цифровой модели работы инерционного сгустителя

Для численного моделирования и проведения предварительной подготовки по определению начальных параметров гидравлической смеси, обеспечивающих эффективное осаждения дисперсной фазы при минимальном выносе с осветленным потоком несущей среды, задавалась поверхностная сетка для расчета с помощью вычислительной гидродинамики (CFD), задаваемая на базе трехмерной численной имитационной модели (рисунок 2.3). Трехмерная модель разработана в программном пакете Comsol Multiphysics 6.0 и учитывает работу инерционного сгустителя, движение потока смеси, стесненное осаждение и эффективное сжатие твердого компонента.

Для построения геометрии использовался стандартный модуль построения 3D объекта – Geometry. Модель построена из четырех основных частей – центральной камеры и впускных и выпускных патрубков.

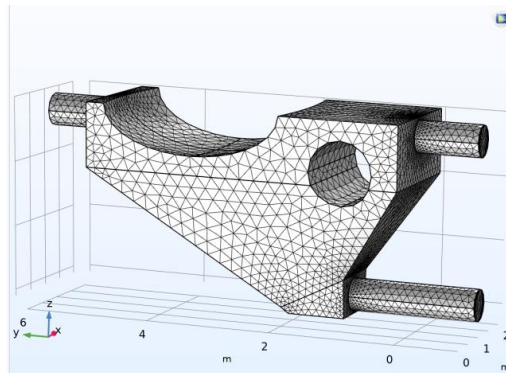


Рисунок 2.3 – Схема пространственной сетки модели инерционного сгустителя

Построение сетки на поверхности производилось при использовании модуля Mesh. Сетка поверхности инерционного сгустителя строилась как неструктурированная тетраэдрическая, включающая призмы, квадраты и угловые точки с крупным распределением узлов сетки при детальной прорисовке элементов выпускных патрубков и гидродинамических профилей. Размерность сетки составила 115,5 тыс. элементов. Области перехода плоскостей и пересечений выполнены с меньшим шагом сетки.

Дисперсная фаза описывается траекториями движения заданного количества частиц через расчетные поля течения [121, 129, 137]. Движение гидравлической смеси задано модулями: Turbulent flow для общего движения гидросмеси и Particle Tracing for Fluid Flow для моделирования движения дисперсной фазы в потоке. Моделирование потока течения гидросмеси в рабочей камере сгустителя позволяет визуализировать распределение дисперсной фазы в рабочей камере, определить траектории движения частиц и оценить эффективность работы инерционного сгустителя. Эффективность инерционного осаждения определяется долей частиц, извлеченных из потока.

2.3.1 Механизм формирования сгущенного потока и отделения осветленного потока несущей среды в рабочей камере

При рассмотрении сгущения гидравлической смеси, смесь представляется многофазным потоком жидкости. Математическое описание и численное моделирование фазовых переходов и двухфазных течений, а также предсказание упомянутых выше явлений являются сложными задачами. На настоящий момент существуют два основных метода конечных элементов для моделирования многофазных течений жидкости: метод Эйлера-Эйлера и метод Эйлера-Лагранжа.

Метод Эйлера-Эйлера представляет многофазный поток как смесь взаимопроникающих и несжимаемых флюидов. Законы сохранения массы, импульса и энергии решаются для каждой

фазы независимо. Взаимодействия между фазами учитываются путем обмена массой и импульсом между фазами, а также межфазными силами. Эта модель позволяет фазам иметь разные скорости и учитывать эффекты межфазного массо- и теплопереноса. Модель Эйлера-Эйлера особенно хорошо подходит для моделирования потоков с относительно низкой объемной долей дисперсной фазы, таких как пузырьковые и капельные потоки.

Метод Эйлера-Лагранжа – это модель, в которой каждая фаза описывается с помощью специальных уравнений, включающих дополнительные переменные – частицы. Каждая частица представляет собой небольшой объем жидкости, перемещающейся со скоростью фазы. Эта модель позволяет рассматривать многофазный поток частиц, движущихся внутри жидкости. В методе Эйлера-Лагранжа каждая частица описывается своими координатами, скоростью и массой, а также переменными, характеризующими ее состояние и взаимодействие с другими частицами. Метод Эйлера-Лагранжа используется для расчета сложных гидродинамических явлений, таких как турбулентность, перенос массы и нагрузка на поверхности, обусловленная частицами.

Модель дискретной фазы, основанная на методе Эйлера-Лагранжа, строится путем решения осредненных по времени уравнений Навье-Стокса для непрерывной жидкой фазы, которая аппроксимируется как постоянная среда. Движение частиц дисперсной фазы отслеживается путем расчета их траекторий в заданном поле течения [132, 140]. Применение метода Эйлера-Лагранжа для моделирования движения твердых частиц в потоке ограничено условием низкой объемной доли дисперсной фазы, обычно не превышающей 10%, для обеспечения корректности расчетов.

Уравнения, описывающие турбулентное течение гидросмеси в сгустителе, имеют следующий вид [128]:

Уравнение изменения массы смеси (2.7):

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla(\rho_m V_m) = 0, \quad (2.7)$$

где ρ_m – плотность гидросмеси, кг/м³; t – время, с; ∇ – дифференциальный оператор набла; V_m – усредненная по массе скорость потока гидросмеси, м/с.

Уравнение изменения объемной доли частиц (2.8):

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \nabla(\alpha_k V_k) = 0, \quad (2.8)$$

где α_k – объемная доля дисперсной фазы в потоке гидросмеси в диапазоне от 0 до 1;

V_k – усредненная в объеме скорость потока гидросмеси, м/с.

Скорость движения частиц определяется на основании усредненной скорости гидросмеси и скорости скольжения частицы относительно смеси (2.9):

$$V_k = V_m + V_{k,1} - \sum_{j=2}^3 \frac{\alpha_1 \rho}{\rho_m} V_1, \quad (2.9)$$

Скорость движения частицы относительно жидкости с учетом влияния турбулентной диффузии на процесс движения определяется по формуле (2.10):

$$V_{k,1} = \frac{(\rho_k - \rho)d_k^2}{18\mu f_d} a - D_{t,k} \left(\frac{\nabla \alpha_k}{\alpha_k} - \frac{\nabla \alpha_1}{\alpha_1} \right), \quad (2.10)$$

где ρ_k, ρ – плотность частиц дисперсной фазы и несущей среды, кг/м³; μ – динамический коэффициент вязкости гидросмеси, Па·с; f_d – расстояние, пройденное частицей, м; α_1 – объемная доля несущей среды в потоке гидросмеси соответственно в диапазоне от 0 до 1; $D_{t,k}$ – коэффициент турбулентной диффузии частиц дисперсной фазы гидравлической смеси.

При этом коэффициент турбулентной диффузии частиц дисперсной фазы гидравлической смеси определяется согласно формуле 2.11 [128]:

$$D_{t,k} = K^* C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \left(\frac{\gamma_k}{1 + \gamma_k} \right) \frac{1}{\sqrt{1 + C_{\beta,k} \varepsilon_k^2}}, \quad (2.11)$$

где K^* – множитель Лагранжа; $C_\mu, C_{\beta,k}$ – константа модели турбулентности k - ε ; k – кинетическая энергия турбулентности, м²/с²; ε – скорость турбулентного рассеяния, м²/с³; γ_k – скорость сдвига, Па. При этом основные коэффициенты для формулы 2.11 определяются согласно формулам 2.12-2.16 [128]:

$$\varepsilon_k = \frac{|V_{k,1}|}{\sqrt{2/3k}}, \quad (2.12)$$

$$C_{\beta,k} = 1,8 - 1,35 \cos^2(\theta_k), \quad (2.13)$$

$$\cos(\theta_k) = \frac{V_{k,1}}{|V_{k,1}|} \cdot \frac{V_1}{|V_1|}, \quad (2.14)$$

$$f_d = 1 + 0,15 Re^{0.687}, \quad (2.15)$$

$$a = g - (V_m \nabla) V_m - \frac{\partial V_m}{\partial t}, \quad (2.16)$$

Траектория движения дисперсной фазы гидравлической смеси основывается на силах, действующих на частицу, и определяется формулой 2.17 [128]:

$$f = \frac{d(m_v v)}{dt} Ft, \quad (2.17)$$

где m_v – масса частиц дисперсной фазы при заданной скорости, кг; v – средняя скорость движения частиц дисперсной фазы, м/с; Ft – результирующая внешних сил, Н.

Количество частиц дисперсной фазы за расчетный период в определяемой точке расчетной области или рассматриваемом сечении можно найти по формулам 2.18-2.19 [128]:

$$N = \int_{t_0}^t \frac{1}{\tau_i} dt, \quad (2.18)$$

$$\tau_i = \min \left(2\tau_L, -\tau_L \log \left(1 - \frac{I_e}{\tau_L |u - v|} \right) \right), \quad (2.19)$$

где τ_i – тензор вязких напряжений; τ_L – время отклика по Лагранжу, с; u – средняя скорость несущей среды, м/с; I_e – единичный тензор.

На частицы дисперсной фазы могут воздействовать силы, обусловленные вращением системы отсчета. Эти силы возникают при моделировании потоков в неинерциальных вращающихся системах координат, где градиент давления и броуновское движение модифицируются эффектом вращения. При этом основными силами, действующими при расчете гидродинамических систем, остаются: сила тяжести, сила сопротивления и подъемная сила.

Сила тяжести определяется согласно формуле 2.20 [128]:

$$F_g = m_p g \frac{\rho_k - \rho}{\rho_k}, \quad (2.20)$$

Подсчет силы сопротивления на единицу массы частицы осуществляется согласно формуле 2.21 [128]:

$$F_D = \frac{1}{\tau_p} m_p (u - v), \quad (2.21)$$

где τ_p – время осаждения частицы, с; m_p – масса частицы дисперсной фазы, кг.

Время осаждения частицы рассчитывается по формуле 2.22 [128]:

$$\tau_p = \frac{\rho_k d_k^2}{18\mu}, \quad (2.22)$$

Расчет подъемной силы производится согласно формуле 2.23 [128]:

$$F_L = 6,46pL_v \sqrt{\mu\rho_m \frac{|u - v|}{|L_v|}}, \quad (2.23)$$

где r_p – радиус частицы дисперсной фазы, м.

Откуда коэффициент подъемной силы равен (2.24) [128]:

$$L_v = (u - v)(\nabla(u - v)), \quad (2.24)$$

Для преодоления ограничения на приемлемую объемную долю твердых частиц в традиционных моделях дисперсной фазы была разработана модель уплотненной дисперсной фазы. Эта модель расширяет уравнения сохранения Лагранжа, позволяя частицам достигать плотной упаковки. Модель уплотненной дисперсной фазы учитывает взаимодействия между

частицами, которые приводят к их уплотнению при достижении определенной концентрации. Уплотнение частиц влияет на их поведение в потоке, включая скорость седиментации и коагуляцию. Определяющие уравнения были преобразованы в алгебраические. Все рабочие поверхности инерционного сгустителя подчиняются граничным условиям «нескользких стен». При расчете турбулентного потока учитывалась сила гравитации, при расчете траектории движения частиц учитывались сила сопротивления и сила гравитации [141]. Проверка рекомендуемой скорости основана на оценке количества частиц дисперсной фазы в выпускном патрубке осветленной воды и сгущенной смеси методом картирования сечений.

2.4 Обоснование рациональных режимов работы инерционного сгустителя

Для исследования работы инерционного сгустителя был выполнен численный эксперимент, позволивший построить карты распределения скоростей твердых частиц в расчетной области инерционного сгустителя.

Исходные параметры, принятые в исследовании для формирования модели мультифизического анализа приведены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Начальные параметры компонентов и свойства рабочей зоны инерционного сгустителя

Доля твердых частиц в потоке	0,1
Модуль упругости	1,96 ГПа
Плотность стали	7850 кг/м ³
Плотность частиц дисперсной фазы	2850 кг/м ³
Плотность гидравлической смеси	1400 кг/м ³
Крупность частиц дисперсной фазы	0,003 м*
Количество поступающих частиц дисперсной фазы	1000

*Для задания крупности фракции было использовано среднее значение фракционного состава тонкодисперсных гидросмесей: песчаная составляющая – 4-6 мм, хвосты обогащения – 0,2 мм [95].

Оценка содержания частиц в разделяемых потоках выполнялась согласно принципу картирования Пуанкаре [33]. Решение задачи трассировки позволяет определить траектории движения конечного числа частиц дисперсной фазы, исключая возможность их вторичной эмиссии в расчетную область после взаимодействия с рабочей поверхностью отклоняющего гидродинамического профиля. Работа инерционного сгустителя рассматривалась при различных входных скоростях первичной гидросмеси.

Поскольку при моделировании каждая частица потока обладает массой, то не все достигают выпускного патрубка, некоторые частицы остаются в пристенном слое рабочей камеры инерционного сгустителя. На основании полученных данных (Приложение А) построены графики распределения дисперсной фазы в потоке гидросмеси при различных входных скоростях первичной гидросмеси (рисунок 2.4).

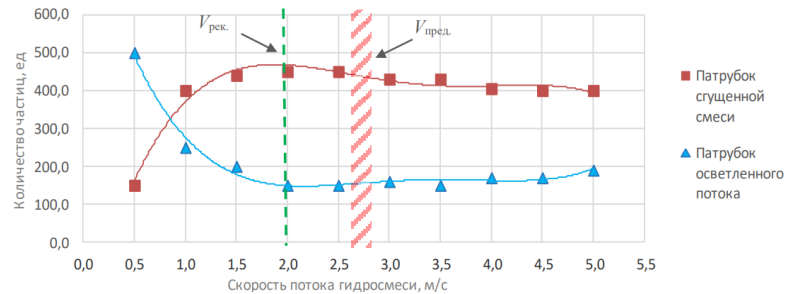


Рисунок 2.4 – Содержание дисперсной фазы в патрубках сгущенной смеси и осветленного потока несущей среды для входных скоростей движения гидросмеси

Анализ результатов выполненного исследования по оценке распределения количества частиц в сечениях выпускных патрубков при разных входных скоростях первичной гидросмеси выявил, что при скорости 2,0 м/с сечения выпускного патрубка сгущенной смеси в единицу времени достигают 45% дисперсной фазы потока. В сечении выпускного патрубка для осветленного потока, количество частиц регистрировалось на уровне 15% от первоначального количества. Дальнейшие исследования показали, что увеличение входной скорости первичной гидросмеси, поступающей в рабочую зону, способствует снижению числа частиц дисперсной фазы в патрубке сгущенной смеси и незначительный рост их содержания на патрубке осветленной смеси.

Выявленная рекомендуемая входная скорость подачи первичной гидросмеси в рабочую камеру сгустителя в пределах 2,0 м/с, ниже максимально допустимой усредненной скорости движения гидравлической смеси, принятой на производственных объектах – 2,65-2,76 м/с (в зависимости от производительности поверхностного закладочного комплекса). Стоит отдельно отметить, что увеличение входной скорости поступления первичной гидросмеси незначительно снижает содержание дисперсной фазы в сгущенном потоке – не более 8 %, содержание же частиц дисперсной фазы в осветленном потоке несущей среды практически не изменяется. Граничным значением входной скорости подачи первичной гидросмеси в инерционный сгуститель, по достижению которого его применение не является эффективным – 0,7 м/с, так как наблюдается высокий вынос дисперсной фазы восходящим потоком осветленной жидкости и высок риск формирования придонного осадка. Данные значения входной скорости первичной гидросмеси обеспечивают высокую эффективность работы инерционного сгустителя с минимальным выносом частиц дисперсной фазы с потоком осветленной воды [30].

Для подтверждения полученных результатов были проведены исследования распределения плотности потока и формируемых полей скорости потока в рабочей камере инерционного сгустителя. Ниже представлено распределение скоростей потока при взаимодействии с гидродинамическими профилями при входной скорости поступления гидравлической смеси (рисунок 2.5а), а также распределение векторов полей скорости потока гидросмеси (рисунок 2.5б).

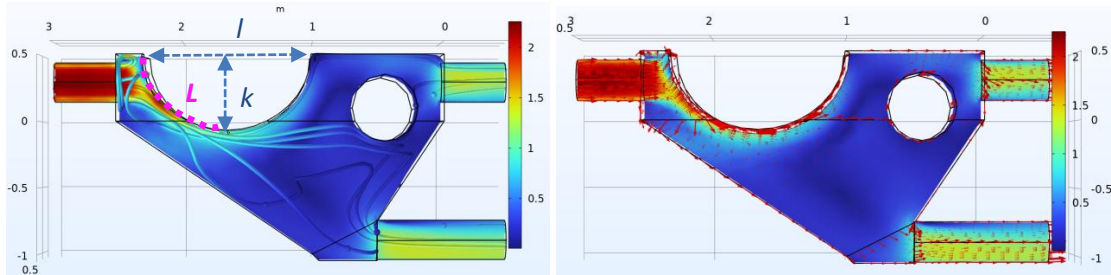


Рисунок 2.5 – Распределение полей параметров динамического процесса сгущения в рабочей зоне сгустителя: а – распределение скорости твердых частиц; б – распределение векторов скорости потока; L – длина участка взаимодействия; l – продольный размер профиля; k – поперечный размер профиля

Картины распределения скоростей потока и распределение частиц дисперсной фазы в расчетной области дополняет представление о принципе функционирования сгустителя. Анализ результатов выполненного исследования по оценке распределения полей скорости и плотности потока гидравлической смеси в рабочей камере инерционного сгустителя позволил выявить, что в рабочей камере сгустителя присутствуют несколько зон, в которых происходят процессы, определяющие эффективность осаждения (рисунок 2.6).

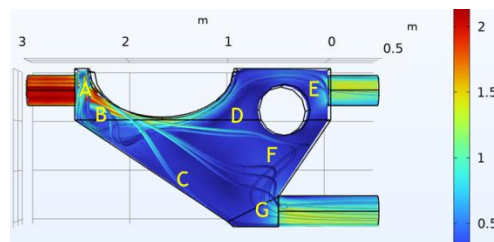


Рисунок 2.6 – Расположение зон рабочей камеры инерционного сгустителя

Зона A – участок первичного взаимодействия смеси с поверхностью главного отклоняющего гидродинамического профиля. На этом участке смесь значительно отклоняется от первоначальной траектории и существенно теряет скорость – более чем в 2 раза. При этом формируется обширная зона B с минимальными скоростями частиц, где и происходит основное осаждение частиц дисперсной фазы за счет действия сил инерции и сил тяжести. Зона B демонстрирует зону осаждения частиц дисперсной фазы без взаимодействия друг с другом, описываемую законом Стокса. С увеличением скорости, увеличивается сила сопротивления, стремящаяся к своему предельному состоянию, равному силе тяжести среды. Как только

предельное значение силы сопротивления будет достигнуто, частица дисперсной фазы приобретет постоянную скорость осаждения – скорость свободного падения. Также на рисунке 2.5б представлены направления движения частиц дисперсной фазы и разделение потока на формирующий осадок – зона *C* и восходящий поток – зона *D*, в котором скорость снижается до 0,25 от первоначальной. С увеличением концентрации частиц дисперсной фазы в придонном слое, скорость осаждения снижается и пропорциональна коэффициенту снижения скорости свободного осаждения частиц в стесненных условиях. Дисперсная фаза, увлекаемая восходящим потоком, сталкивается с цилиндрическим гидродинамическим профилем, который, рассекая ее, запускает процесс вторичного осаждения. Огибающие его поверхность частицы, опускаясь вдоль наклонной стенки рабочей камеры – зона *F*, формируют итоговый объем сгущенного потока – зона *G*, направляемый в патрубок для сгущенной смеси для проведения работ по закладке выработанного пространства. Зона *G* характеризуется наличие процессов сжатия под действием веса вышележащих слоев частиц, уплотнения, вытеснения межпространственной и поровой жидкости. С увеличением времени нахождения гидравлической смеси в сгустителе плотность сгущенного потока увеличивается с постепенным изменением соотношения Ж:Т. Для данной зоны характерна максимальная концентрация дисперсной фазы в придонном слое с минимальной скоростью движения потока. В свою очередь осветленный поток несущей среды – зона *E* направляется в выпускной патрубок для поступления в обратную систему.

Таким образом, определенная рекомендуемая входная скорость первичной гидросмеси, а также диаметр подводящего трубопровода и характеристики гидросмеси позволили сформулировать уравнение материального баланса и определить скорости на выпускных патрубках на основании расхода гидросмеси в патрубке сгущенной смеси (2.25-2.26) [95, 111]:

$$\sum Q_{\text{вх}} = \sum Q_{\text{вых}}, \quad (2.25)$$

$$Q_1 = Q_2 + Q_3, \quad (2.26)$$

где Q_1 – расход первичной гидросмеси на впусном патрубке, м³/ч; Q_2 – расход гидросмеси на выпускном патрубке сгущенной смеси, м³/ч (47 м³/ч согласно расчету на базе имитационного моделирования процесса сгущения); Q_3 – расход гидросмеси на выпускном патрубке осветленного потока несущей среды, м³/ч.

На основании того, что расход гидросмеси зависит от диаметра трубопровода и скорости движения потока в сечении, уравнение материального баланса преобразуется (2.27) [95]:

$$\frac{\pi D_{\text{тр}}^2}{4} v_1 = \frac{\pi D_{\text{тр}}^2}{4} v_2 + \frac{\pi D_{\text{тр}}^2}{4} v_3, \quad (2.27)$$

где $D_{\text{тр}}$ – диаметр трубопровода, м (одинаковый на всех патрубках и равен 0,25 м);

v_1 – входная скорость первичной гидросмеси, м/с ($v_1 = 2$ м/с); v_2 – скорость гидросмеси на выпускном патрубке сгущенной смеси, м/с; v_3 – расход гидросмеси на выпускном патрубке осветленного потока несущей среды, м/с.

Исходные данные позволили определить расход первичной гидросмеси на впусном патрубке и патрубке осветленного потока несущей среды:

$$Q_1 = \frac{\pi D_{\text{тр}}^2}{4} v_1 = \frac{3,14 \cdot 0,25^2}{4} 2 \cdot 3600 = 353 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$353 = 47 + Q_3 \rightarrow Q_3 = 306 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Условие равенства диаметров трубопровод позволило определить соотношение скоростей на патрубках инерционного сгустителя, а также значения скоростей на основании определенных значений расхода:

$$Q_2 = \frac{\pi D_{\text{тр}}^2}{4} v_2 = 47 \text{ м}^3/\text{ч} \rightarrow v_2 = 0,27 \text{ м/с}$$

$$\frac{\pi D_{\text{тр}}^2}{4} v_1 = \frac{\pi D_{\text{тр}}^2}{4} v_2 + \frac{\pi D_{\text{тр}}^2}{4} v_3 \rightarrow v_1 = v_2 + v_3$$

$$2 = 0,27 + v_3 \rightarrow v_3 = 1,73 \text{ м/с}$$

Таким образом, уравнение материального баланса движения гидросмеси в инерционном сгустителе сводится к уравнению:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \rightarrow 353 = 47 + 306$$

Следовательно, варьирование диаметра подводящего трубопровода приводит к изменению расхода поступающей первичной гидросмеси и возможности изменения скорости выходящих потоков.

Сгущенный поток со скоростью $v_2 = 0,27$ м/с поступает на выпускной патрубков сгущенной смеси, откуда при помощи магнитного перистальтического насоса закладочная смесь поступает в выработанное пространство для закладки [90].

2.4.1 Исследование влияния крупности частиц дисперсной фазы на процесс сгущения гидросмеси

При осаждении дисперсной фазы гидросмеси происходит изменение гидродинамических условий, которые приводят к увеличению коэффициента сопротивления осаждению. Скорость движения частиц в несущей среде оказывает прямое влияние на коэффициент сопротивления осаждению дисперсной фазы от времени. Скорость осаждения зависит от крупности частиц, их формы, разности плотностей дисперсной фазы и несущей среды, вязкости жидкости и содержания дисперсной фазы в гидросмеси. Два основных параметра, оказывающих влияние на процесс сгущения, входят в выражение для определения скорости осаждения – крупность частицы и доля содержания дисперсной фазы в смеси. Следовательно, незначительное

увеличение крупности частиц дисперсной фазы и соотношения содержания несущей среды и дисперсной фазы будут вызывать заметное изменение скорости осаждения.

Моделирование проведено для изучения поведения потока и седиментации частиц в смеси. Рассмотрение влияния крупности частиц на сгущение гидросмеси производилось на основании полученных данных имитационного моделирования (Приложение А) при входной скорости 2 м/с с крупностью дисперсной фазы 0,2-5 мм (рисунок 2.7).

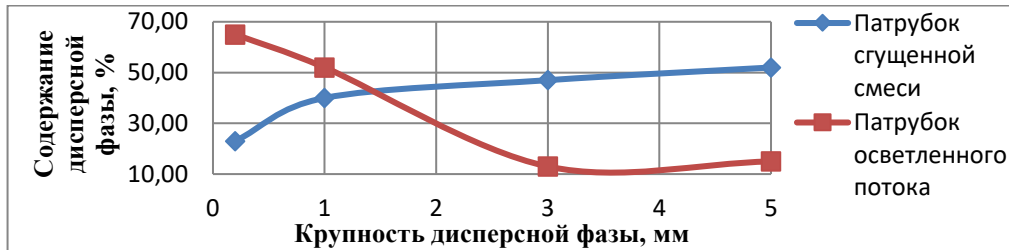


Рисунок 2.7 – Содержание дисперсной фазы на выпускных патрубках инерционного сгустителя

Таким образом, можно сделать вывод, что тонкие частицы гидросмеси обладают низкой гидравлической крупностью и наименее подвержены инерционному осаждению за счет невозможности преодоления сопротивления движению в гидросмеси. Данные частицы остаются во взвешенном состоянии т.к. сила сопротивления осаждению превышает силу тяжести частицы, что ведет к увеличению содержания твердых частиц в патрубке осветленного потока несущей среды. При постепенном увеличении крупности дисперсной фазы сила тяжести частицы становится больше по отношению к силе сопротивления. Это ведет к осаждению все большего числа частиц дисперсной фазы, а как следствие преобладанию содержания дисперсной фазы в сгущенном потоке при минимальном выносе частиц с осветленным потоком несущей среды. Таким образом, при крупности частиц более 1,4 мм содержание дисперсной фазы в сгущенном потоке будет превышать содержание в осветленном потоке несущей среды. Однако, на основании данных, представленных на рисунке 2.7, можно сделать вывод, что рекомендуемой средней крупностью частиц дисперсной фазы является 3 мм. При данной крупности наблюдается наименьший вынос дисперсной фазы с потоком несущей среды при получении сгущенного потока закладочной смеси с содержанием дисперсной фазы около 50%. Дальнейшее увеличение крупности частиц приводит к повторному выносу частиц дисперсной фазы в рабочей камере инерционного сгустителя, а как следствие, увеличению содержания частиц дисперсной фазы в осветленном потоке несущей среды.

2.4.2 Исследование влияния размеров рабочей камеры на концентрацию потока в сечениях выпускных патрубков

Инерционное осаждение реализуется в случае, когда кинетическая энергия частицы велика настолько, что частица не может следовать прямолинейной траектории движения и, сталкиваясь с препятствием, осаждается в выделенном объеме [136, 144, 147]. Инерционный

принцип сгущения в рассмотренной конструкции реализуется благодаря силовому взаимодействию дисперсной фазы с отклоняющим гидродинамическим профилем. Соответственно, целесообразным является определение соотношений его основных габаритных размеров, что позволит при последующем параметрическом синтезе оборудования, обеспечить достижение заданного уровня концентрации дисперсной фазы в выпускном патрубке сгущенной смеси.

Для обоснования геометрических размеров отклоняющего гидродинамического профиля на основании потребной концентрации сгущенного потока исследованы образцы рабочих камеры инерционного сгустителя с различным соотношением его продольного и поперечного размера. Размеры инерционного сгустителя в зависимости от потребной концентрации потока могут меняться. Для оценки влияния этого на эффективность функционирования было выполнено исследование распределения дисперсной фазы в рабочей камере и в сечениях выпускных патрубков. Совокупности рациональных сочетаний параметров, обеспечивающих формирование сгущенного потока с максимально возможным содержанием дисперсной фазы, представлены в Приложении А.

Полученные результаты позволили сформировать серию номограмм распределения дисперсной фазы в потоке, позволяющие определить рациональное соотношение соответствующих параметров (рисунок 2.8).

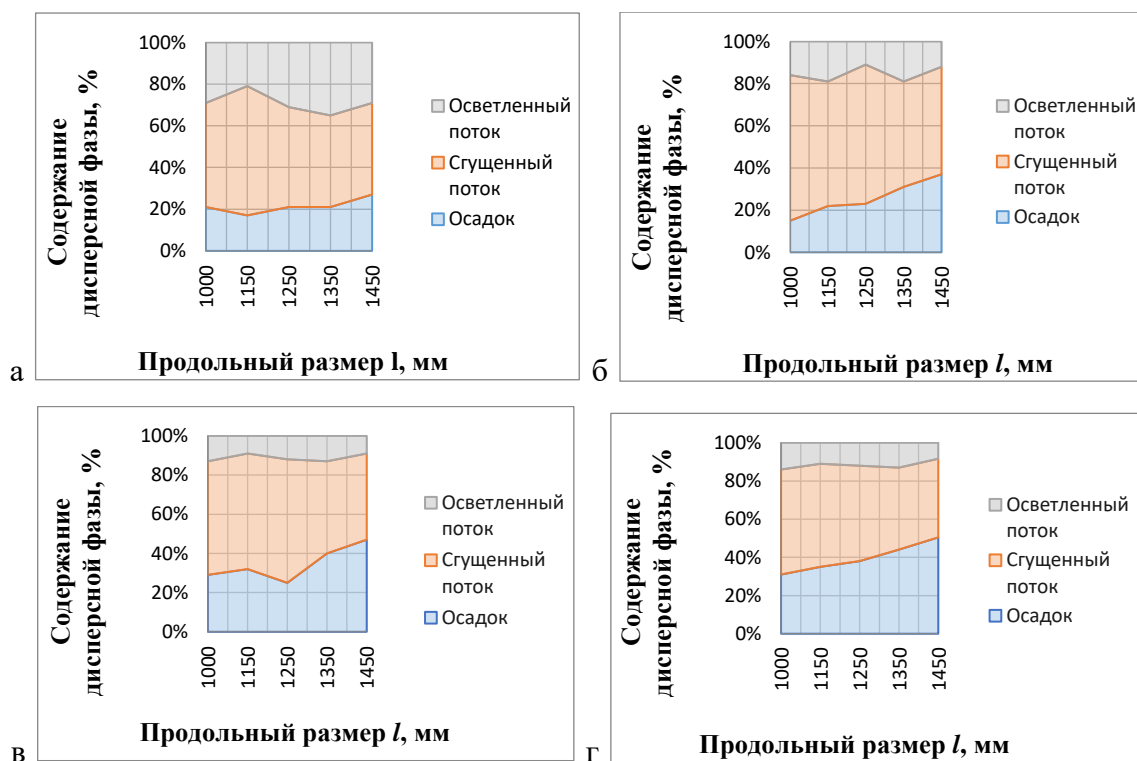


Рисунок 2.8 – Номограммы распределения дисперсной фазы в инерционном сгустителе при различных значениях величины поперечного размера k отклоняющего гидродинамического профиля: а – 400 мм; б – 500 мм; в – 600 мм; г – 700 мм

Соотношение поперечного и продольного габаритных размеров отклоняющего гидродинамического профиля – $N = k/l$, представляет собой инварианту геометрического подобия. Эта величина, не завися от размеров натурального и модельного объекта, может однозначно соответствовать изменению концентрации формируемого потока в широком диапазоне значений. Соотношение характерных размеров отклоняющего гидродинамического профиля задает форму профиля и, в свою очередь, определяет участок взаимодействия профиля с поступающим в рабочую камеру потоком. В зависимости от угла атаки потока, инерционное отражение частиц будет происходить также с разными углами, определяя изменение направления потока и сопровождаясь изменением скорости дисперсной фазы.

Расчет линейного размера участка взаимодействия обтекаемого тела и потока выполнен согласно второй формуле Рамануджана (2.28) для определения длины периметра эллипса [146]:

$$L \approx \pi(l/2 + k) \left[1 + \frac{3(Z)^2}{10 + \sqrt{4 - 3(Z)^2}} \right] \frac{\varphi}{360'} \quad (2.28)$$

где $Z = \left(\frac{l/2 - k}{l/2 + k} \right)$ – соотношение большой и малой полуосей.

В результате исследования распределения контактной плотности потока были получены картины распределения соответствующих участков взаимодействия, формирующие зоны обтекания взвесенесущим потоком поверхности отклоняющего гидродинамического профиля (рисунок 2.9). Формирование траектории движения потока определяется углом атаки потока – α и углом обтекания профиля – φ , величина которых зависит от соотношения поперечного и продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля.

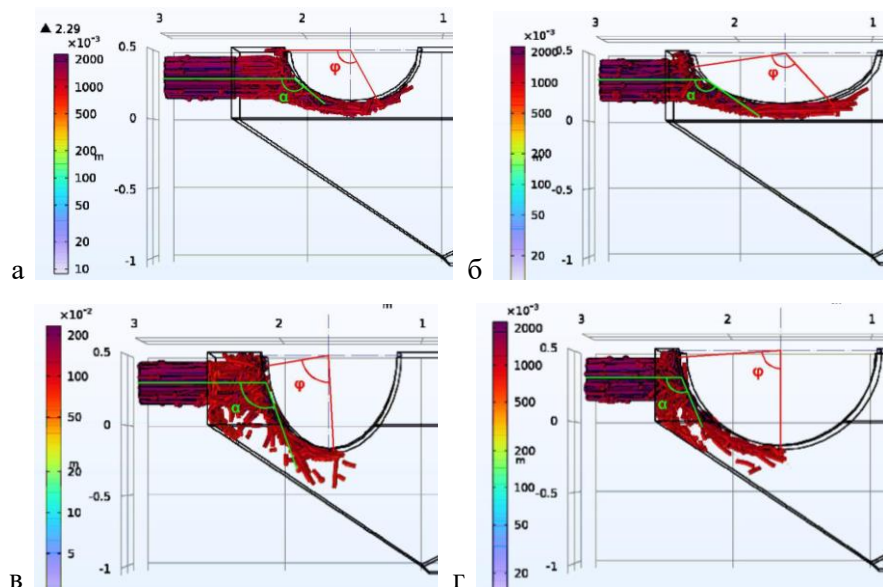


Рисунок 2.9 – Формирование участков взаимодействия с потоком при различных соотношениях поперечного и продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля k/l : а – 400/1000 мм; б – 400/1450 мм; в – 700/1000 мм; г – 400/1450 мм

Содержание дисперсной фазы на выпускных патрубках сгустителя определяется не только входной скоростью первичной гидросмеси и крупностью дисперсной фазы, но и углом обтекания профиля, изменяющимся при варьировании размеров отклоняющего гидродинамического профиля. Влияние размеров 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 размеров профиля, на основании полученных результатов при имитационном моделировании, представлены на рисунке 2.10.

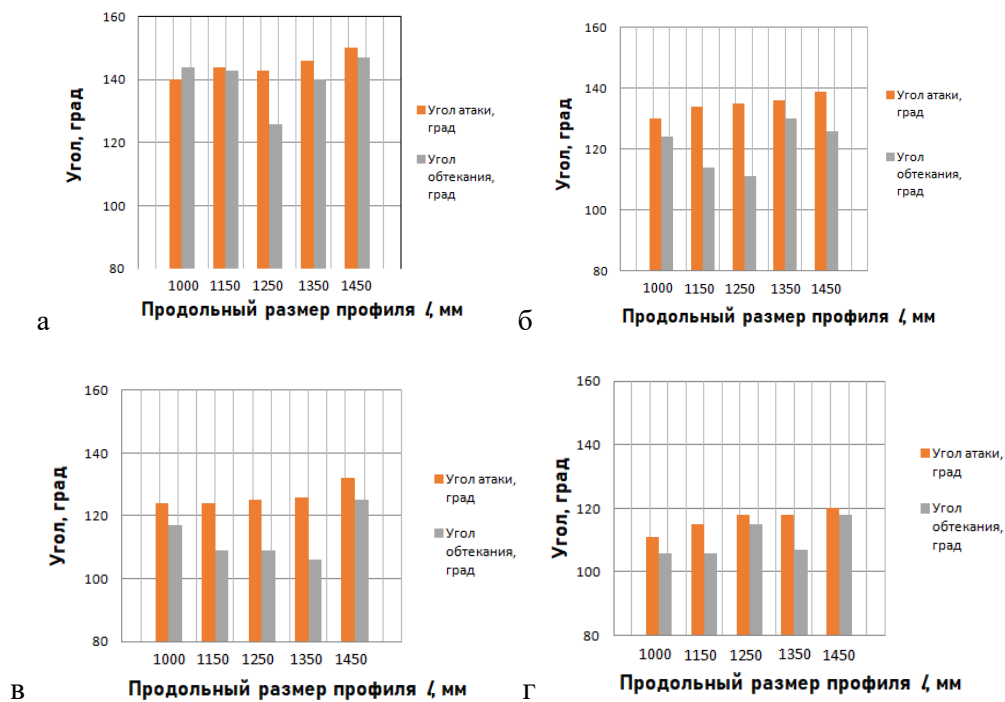


Рисунок 2.10 – Изменение характерных углов взаимодействия с отклоняющим гидродинамическим профилем при различных значениях величины поперечного размера k отклоняющего гидродинамического профиля: а – 400 мм; б – 500 мм; в – 600 мм; г – 700 мм

В результате анализа параметров распределения взвесенесущих потоков и образуемых траекторий движения частиц выявлено, что увеличение соотношения поперечного и продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля сопровождается увеличением длины участка взаимодействия с потоком L (рисунок 2.11).

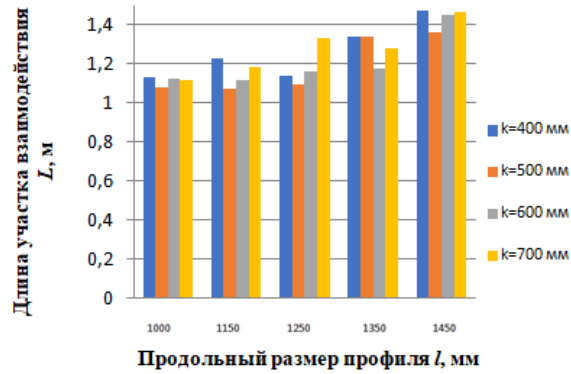


Рисунок 2.11 – Динамика изменения длины участка взаимодействия

Длина участка взаимодействия потока с профилем характеризуется углом обтекания φ в пределах 105° - 150° и оказывает непосредственное влияние на параметры потока и последующее инерционное осаждение. Анализ картин движения потока выявил, что динамика увеличения характерной длины участка взаимодействия L прямо пропорционально зависит от величины угла обтекания φ и подчиняется закону 2.29:

$$L = 6,48\varphi + 342,95, \quad (2.29)$$

$$R^2 = 0,9,$$

Увеличение продольного размера профиля, незначительно сказываясь на изменении угла φ , сопровождается ростом L за счет увеличения общей протяженности отклоняющего гидродинамического профиля. Рост поперечного размера отклоняющего гидродинамического профиля приводит к относительному снижению углом обтекания φ , за счет изменения общей формы. При этом тенденция к увеличению длины участка взаимодействия L сохраняется. Углы атаки, лежащие в диапазоне 110° - 150° согласно рисунку 2.10, и обтекания потока с увеличением поперечного габаритного размера отклоняющего гидродинамического профиля значительно снижаются.

Результаты комплексного анализа, включающего оценку влияния независимого изменения характерных размеров отклоняющего гидродинамического профиля на концентрацию формируемого сгущенного потока на выходе из рабочей камеры инерционного сгустителя, также включали определение соответствия длин формируемых участков взаимодействия. Номограмма, приведенная на рисунке 2.12, отражает формирование областей изменения концентрации потока и позволяет обоснованно выбрать размеры отклоняющего гидродинамического профиля для достижения соответствующей концентрации. Пунктирными линиями отмечены соответствующие протекающему процессу формирования участков взаимодействия потока с профилем, характеризующих зоны обтекания, в рамках выбранной геометрии профиля.

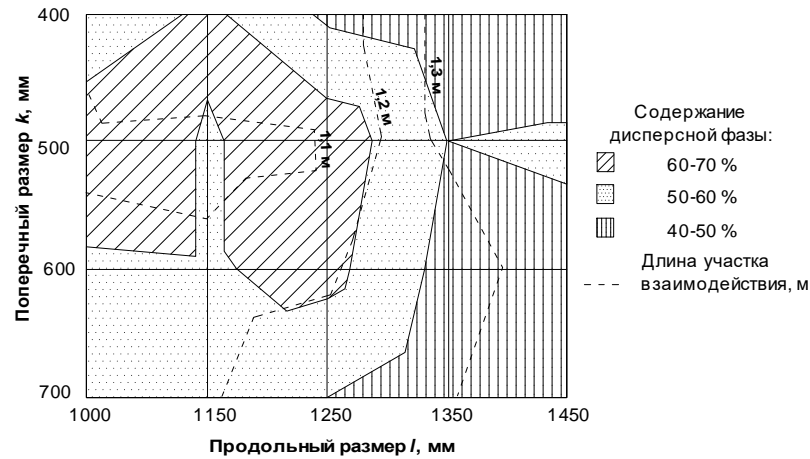


Рисунок 2.12 – Номограмма изменения концентрации сгущенного потока

Однако в зависимости от крупности частиц дисперсной фазы потока гидросмеси и входной скорости первичной гидросмеси номограмма меняется.

Согласно полученной номограмме, увеличение продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля на 50% приводит к росту 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 согласно рисункам 2.10-2.12. Таким образом, увеличение соотношения размеров отклоняющего гидродинамического профиля N на 14% сопровождается увеличением концентрации гидросмеси на 30%.

2.5 Исследование интенсивности гидроабразивного изнашивания оборудования

В процессе столкновения дисперсной фазы с отклоняющим гидродинамическим профилем, возникает сила трения, которая препятствует движению частицы. На некоторых участках распределения полей скорости, частица дисперсной фазы взаимодействует с отклоняющим гидродинамическим профилем под углом атаки близким к 90° . Распределение скоростей совпадает с принципом работы инерционного сгустителя. После взаимодействия, на данном участке скорость частицы значительно снижается по отношению к начальному значению. Соответственно отклоняющий гидродинамический профиль наиболее подвержен гидроабразивному изнашиванию при перемещении гидравлической смеси.

Рассматриваемые смеси представляют собой жидкости с большим количеством частиц, ком случае, эрозия поверхности может наблюдаться даже при низких скоростях движения потока, поскольку частицы движутся вдоль контактируемой поверхности и воздействуют на нее.

Процесс гидроабразивного изнашивания может быть оценен по общему уравнению, при условии, что скорость и угол атаки известны для частиц дисперсной фазы, взаимодействующих с рассматриваемой поверхностью (2.30) [128]:

$$E = G_p K U_p^n F(\alpha), \quad (2.30)$$

При наличии следующих параметров: скорость движения частиц в потоке, угол атаки частиц и масса частиц дисперсной фазы, воздействующих на поверхность, скорость процесса изнашивания может быть рассчитана исходя из формулы 2.31 [128]:

$$E_L = \frac{G_p K U_p^n F(\alpha)}{\rho_t A_t} C_{unit} = \frac{E_m}{\rho_t A_t} \cdot 10^3, \quad (2.31)$$

где G_p – массовый расход частиц дисперсной фазы в смеси, кг/с; K и n – константы материала, которые определяются экспериментальными исследованиями; U_p^n – скорость удара частицы, м/с; A_t – площадь, подверженная изнашиванию, м²; ρ_t – плотность материала поверхности, кг/м³; C_{unit} – коэффициент пересчета из м/с в мм/год ($C_{unit} = 3,15E^{10}$).

Функция $F(\alpha)$ характеризует пластичность материала поверхности, которая, в зависимости от материала, может определяться по формулам 2.32-2.33 или по графику (рисунок 2.13) [128]:

$$F(\alpha) = \sum (-1)^{(i+1)} A_t \left(\frac{\alpha\pi}{180} \right)^i, \quad (2.32)$$

$$A_t = \frac{\pi D^2}{4 \sin \alpha}, \quad (2.33)$$

где α – это угол атаки, который определяется как угол между частицей и стенкой.

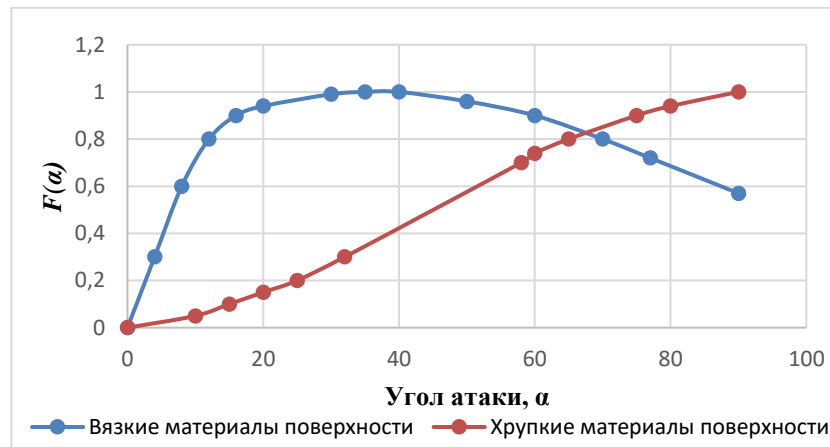


Рисунок 2.13 – Значения $F(\alpha)$ в зависимости от угла атаки и типа материала поверхности

Функция $F(\alpha)$ характеризует вязкость материала стенки. Вязкие материалы получают максимальное разрушение при углах атаки в диапазоне 15°-30°. Хрупкие материалы достигают максимального разрушения при угле атаки в диапазоне 80°-90°.

Вследствие недостаточной изученности воздействия ряда факторов на интенсивность изнашивания поверхности камеры инерционного сгустителя возникает необходимость проведения экспериментального исследования. Для исследования износа рабочих поверхностей

инерционного сгустителя замоделированы две конструкции инерционного сгустителя со стальными стенками: с полиуретановым покрытием и без него.

Помимо того, что модель $k-\varepsilon$ сама по себе является очень распространенной моделью турбулентности, то ее относительно легко комбинировать с лагранжевыми методами отслеживания частиц дисперсной фазы, поскольку переменные турбулентности сразу дают оценки амплитуды скорости возмущения из-за турбулентных вихрей и среднее время жизни вихря (пропорционально $k-\varepsilon$).

При поступлении смеси в рабочую камеру инерционного сгустителя, она сталкивается с гидродинамическим профилем, обеспечивая резкое изменение движения частиц гидросмеси, образуя вихревые токи, вызывающие турбулизацию потока, которые оказывают многократное воздействие на поверхность контакт, что приводит к увеличению показателя интенсивности гидроабразивного изнашивания внутренней поверхности инерционного сгустителя. При постоянных параметрах гидросмеси, а именно исходных концентрации и крупности частиц дисперсной фазы, турбулизация обеспечивается за счет увеличения скорости транспортирования, появления перегородок на пути переноса частиц потоком, а также при изменении направления движения, все это обеспечивается при взаимодействии с отклоняющим гидродинамическим профилем инерционного сгустителя.

Места с гидродинамическими профилями в инерционном сгустителе на пути прямолинейно движущегося потока подвергается интенсивному изнашиванию за счет воздействия сил инерции, способствующих возрастанию сил ударного воздействия частиц на изнашиваемую поверхность. Износ на данных участках увеличивается за счет возрастания энергии ударного воздействия потока гидросмеси.

Зона, подверженная наиболее интенсивному гидроабразивному изнашиванию, определена исходя из принципа действия установки, а также распределения скоростей частиц дисперсной фазы и их траекторий при движении в камере. В зоне взаимодействия потока с отклоняющим гидродинамическим профилем образуется зона с максимальным показателем интенсивности изнашивания отклоняющего гидродинамического профиля – участок взаимодействия частиц дисперсной фазы с поверхностью профиля под углом атаки, стремящимся к 90° .

Выполнено исследование интенсивности гидроабразивного изнашивания поверхности отклоняющего гидродинамического профиля при взаимодействии частиц сгущаемой гидравлической смеси. Получены графики зависимости интенсивности гидроабразивного изнашивания поверхностей инерционного сгустителя с течением времени при постоянной концентрации гидросмеси и приведены на рисунках 2.14-2.15.

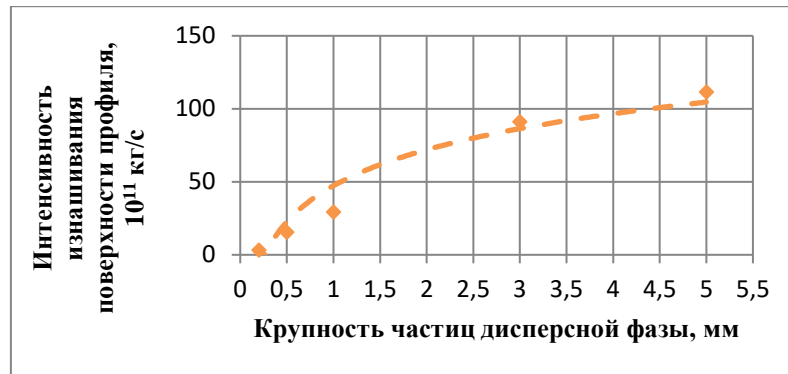


Рисунок 2.14 – Изменение интенсивности гидроабразивного изнашивания поверхности отклоняющего гидродинамического профиля в зависимости от крупности дисперсной фазы

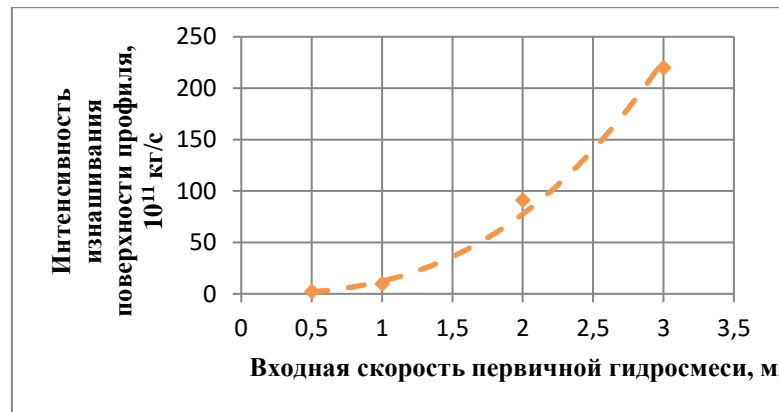


Рисунок 2.15 – Изменение интенсивности гидроабразивного изнашивания поверхности отклоняющего гидродинамического профиля в зависимости от входной скорости первичной гидросмеси

При гидроабразивном воздействии потока с отклоняющим гидродинамическим профилем интенсивность гидроабразивного изнашивания, на основании рисунков 2.14 и 2.15, имеет логарифмическую зависимость по отношению к крупности дисперсной фазы (2.34) и степенную по отношению к входной скорости первичной гидросмеси (2.35):

$$I = 35,613 \ln(d) + 47,291, \quad (2.34)$$

$$R^2 = 0,93,$$

$$I = 12,356 v^{2,6512}, \quad (2.35)$$

$$R^2 = 0,99,$$

Следовательно, чем выше скорость движения частиц дисперсной фазы и их крупность, тем больше их кинетическая энергия и тем сильнее они воздействуют на рабочую поверхность инерционного сгустителя.

Одним из методов снижения интенсивности гидроабразивного изнашивания поверхности отклоняющего гидродинамического профиля является снижение угла атаки профиля, достигаемое при изменении габаритных размеров профиля (рисунок 2.16).

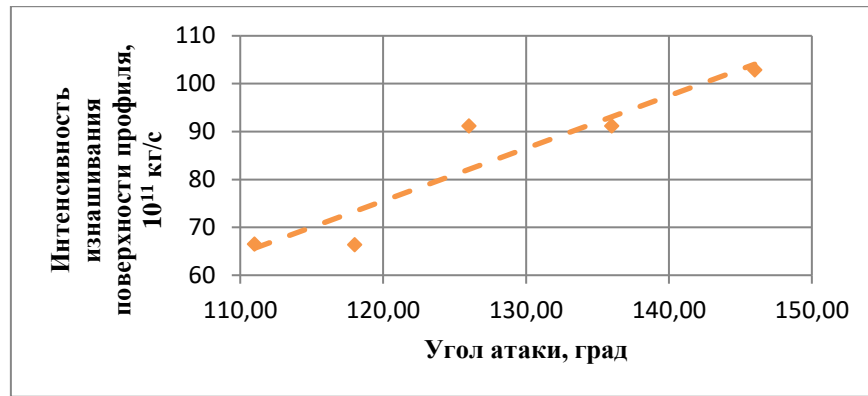


Рисунок 2.16 – Изменение интенсивности гидроабразивного изнашивания отклоняющего гидродинамического профиля в зависимости от угла атаки профиля

Исследование изменения угла атаки, приводящее к изменению интенсивности гидроабразивного изнашивания приведено на рисунке 2.16 и описывается линейной зависимостью 2.36:

$$I = 1,0983\alpha - 56,287, \quad (2.36)$$

$$R^2 = 0,87,$$

Изменение продольного и поперечного размера отклоняющего гидродинамического профиля может изменить направление движения гидросмеси и, следовательно, скорость движения абразивных частиц. Важно учитывать, что изменение размеров может привести к изменению траектории потока гидросмеси, что также может повлиять на интенсивность изнашивания (рисунок 2.17).

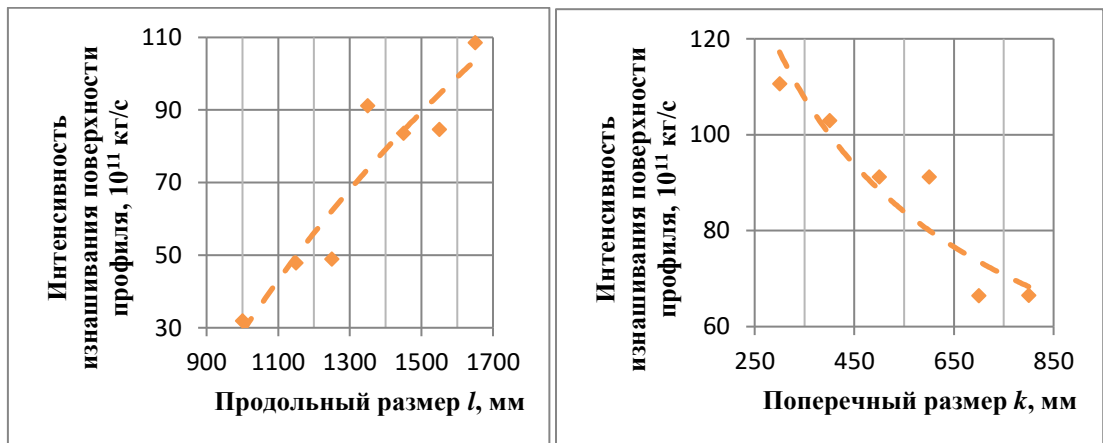


Рисунок 2.17 – Изменение интенсивности гидроабразивного изнашивания поверхности отклоняющего гидродинамического профиля в зависимости от его размеров

Полученные данные по функциям зависимости интенсивности гидроабразивного изнашивания от размеров отклоняющего гидродинамического профиля позволили сформулировать некоторые зависимости (2.37-2.38):

$$I = 149,44 \ln(l) - 1003,4, \quad (2.37)$$

$$R^2 = 0,87,$$

$$I = 2703,3k^{-0,55},$$

$$R^2 = 0,86_m \quad (2.38)$$

Таким образом, увеличение продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля на 50% приводит к возрастанию интенсивности гидроабразивного изнашивания в 2,8 раза при устойчивом значении угла атаки потока профилем, изменение которого составило 3% (Рисунок 2.18).

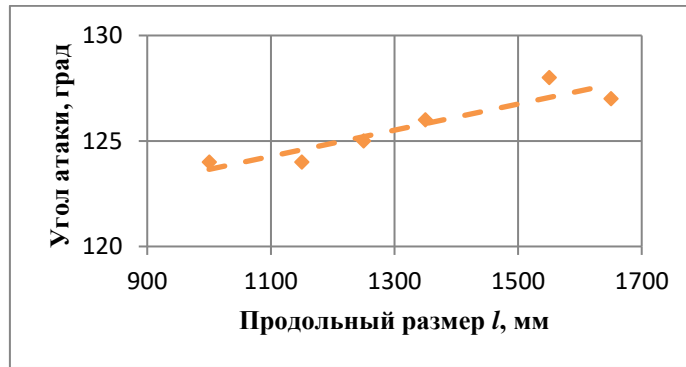


Рисунок 2.18 – Изменение угла атаки профиля при изменении продольного размера

Увеличение поперечного размера отклоняющего гидродинамического профиля на 50% приводит к снижению угла атаки профиля α в среднем на 13%, а как следствие уменьшение интенсивности гидроабразивного изнашивания на 12%. Таким образом, увеличение соотношения габаритных размеров отклоняющего гидродинамического профиля N на 14% сопровождается увеличением концентрации гидросмеси на 30% и увеличением интенсивности гидроабразивного изнашивания на 23% (Рисунок 2.19).

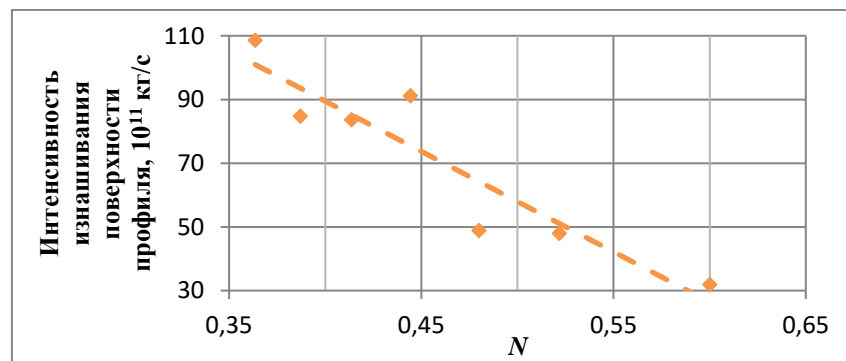


Рисунок 2.19 – Изменение интенсивности гидроабразивного изнашивания поверхности отклоняющего гидродинамического профиля в зависимости от соотношения его размеров N

2.6 Выводы по главе 2

Во второй главе проанализирован процесс формирования сгущенной смеси и движения гидравлической смеси внутри сгустителя, исследованы свойства гидросмеси, влияющие на процесс сгущения. Рассмотрен механизм сгущения в рабочей камере инерционного сгустителя и интенсивность гидроабразивного изнашивания поверхности отклоняющего гидродинамического профиля.

Исследование поведения гидросмеси внутри сгустителя позволило выявить зависимости влияния крупности дисперсной фазы, входной скорости первичной гидросмеси и размеров отклоняющего гидродинамического профиля на содержание дисперсной фазы на выпускных патрубках сгущенной смеси и осветленного потока несущей среды. Для рассмотрения процесса седиментации частиц дисперсной фазы и формирования сгущенного потока разработана математическая модель, основанная на методе Эйлера-Лагранжа. Модель решает усредненные по времени уравнения Навье-Стокса для несущей среды, рассматриваемой как постоянная. Модель позволяет оценить влияние ряда параметров первичной гидравлической смеси на процесс седиментации: вязкости и плотности, гранулометрического состава и концентрации частиц. Результаты моделирования позволяют определить рекомендуемые параметры гидравлической смеси для повышения эффективности процесса седиментации и формирования сгущенного потока.

Траектории ограниченного количества частиц через расчетные поля течения рассмотрены как дискретная динамическая система и для их анализа применены сечения Пуанкаре. Механизм работы инерционного сгустителя рассматривался на основе имитационного моделирования, позволившего определить рекомендуемую входную скорость первичной гидросмеси, составившую 2 м/с и крупность частиц дисперсной фазы, равной 3 мм. При данной скорости содержание дисперсной фазы в сгущенном потоке преобладает над содержанием в осветленном потоке несущей среды, что также наблюдается при крупности дисперсной фазы от 1,4 мм.

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

В ходе имитационного моделирования процесса сгущения определен участок, наиболее подверженный гидроабразивному изнашиванию. Данным участком является поверхность отклоняющего гидродинамического профиля с которым под углом атаки взаимодействует поток первичной гидросмеси.

Согласно полученным данным, увеличение соотношения габаритных размеров отклоняющего гидродинамического профиля N на 14% способствует увеличению концентрации гидросмеси на 30% и интенсивности гидроабразивного изнашивания на 23%. При этом увеличение продольного размера на 50% способствует увеличению длины участка взаимодействия L на 25%, приводя к возрастанию интенсивности гидроабразивного изнашивания в 2,8 раз при устойчивом значении угла атаки потока профилем, изменяющегося в пределах 3%. Увеличение поперечного размера на 50% способствует снижению угла обтекания

потока на 26% и угла атаки на 13%, а как следствие уменьшение интенсивности гидроабразивного изнашивания на 12%.

Так как инерционный сгуститель позволяет сформировать закладочную смесь с концентрацией 50% при первичной гидросмеси в 10%, то следующим этапом работы является экспериментальное исследование для изучения качественных характеристик закладочного массива при изменении содержания наполнителя в закладочных смесях от 10 до 50%.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАКЛАДОЧНОГО МАССИВА ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАКЛАДОЧНОЙ ГИДРОСМЕСИ

Транспортировка закладочных смесей в выработанное пространство осуществляется следующими способами: самотеком под действием силы тяжести или при низком давлении с использованием сжатого воздуха или вибрации для перемещения смеси по горизонтальным участкам трубопровода. На эффективность перемещения закладочной смеси по системе трубопроводов оказывают влияние: характеристики закладочной смеси, а именно – вязкость, плотность, гранулометрический состав, и начальная скорость движения гидросмеси, задаваемая высотой вертикального става и определяющая кинетическую энергию, необходимую для преодоления сопротивления трубопровода.

Для систем разработки с закладкой выработанного пространства одним из направлений совершенствования технологии закладки становится изменение физико-химических свойств закладочной смеси, а именно, использование компонентов, улучшающих пластичность, увеличивая дальность перемещения, и прочностные характеристики закладочного массива.

Повышение концентрации закладочной смеси за счет изменения содержания частиц дисперсной фазы позволяет осуществлять закладку под кровлю и улучшить прочностные характеристики формируемого массива. Это особенно важно в условиях высоких скоростей разработки или при необходимости обеспечить более плотный и прочный закладочный массив, сократив время на закладку и снизив затраты на транспортировку и хранение гидросмеси. Высокосконцентрированные гидросмеси не содержат излишнего количества несущей среды, которое приводит к расслоению смеси, образованию неоднородного массива и существенному ухудшению прочности формируемого закладочного массива. При работе в условиях повышенного газовыделения или разрушения породы, увеличение концентрации закладочной смеси способствует более быстрому набору прочности массивом и укреплению выработанного пространства для предотвращения обрушения или газовых выбросов.

Несущая среда и дисперсная фаза являются основными компонентами закладочной смеси. Дисперсная фаза представлена вяжущими веществами и наполнителем, влияющими на пластичность смеси и твердость, прочность и гигроскопичность закладочного массива [26]. Весомость этих свойств заключается в обеспечении формирования закладочного массива, способного выдержать давление вышележащих горных пород.

Повышение содержания вяжущего увеличивает значение разрушающей силы при проведении испытаний образцов на одноосное или объемное сжатие и скорость затвердевания. Однако при слишком большом количестве цемента закладочная смесь может потерять пластические свойства, что приведет к усыханию и трещиноватости формируемого

закладочного массива. Поскольку на месторождении для проведения закладки выработанного пространства чаще всего используются отходы производства, то в зависимости от используемых компонентов, свойства смеси могут меняться.

Качество смеси для закладки и формируемого из нее массива определяется рядом параметров, таких как:

- прочность;
- компрессионные характеристики;
- реологические характеристики.

Закладочные массивы, в зависимости от горно-геологических условий и глубины горных работ, обладают разными прочностными характеристиками. Закладочный массив характеризуется устойчивостью в обнажении и деформацией, связанной с временем набора прочности. Набор прочности должен обеспечивать достижение 85-95% нормативной прочности к моменту обнажения. При камерной системе разработки для проведения закладки отводится от 3 до 12 месяцев до полного набора прочности сформированным массивом, а при слоевой – от нескольких дней до 2-3 недель [26]. В комбинированном закладочном массиве, состоящем из чередования закладочной смеси разной концентрации, определяется только устойчивость в обнажении. Формируемый закладочный массив должен обладать:

- необходимыми прочностными показателями: для обеспечения устойчивости горного массива;
- способностью к плавной деформации: для предотвращения резких смещений и нарушений целостности вышележащих пород.

Глубина горных работ является одним из основных критериев, воздействующих на прочность закладочного массива [8].

При разработке месторождений различной глубины прочностные характеристики формируемого массива меняются в 2,5-3 раза и представлены прочностным диапазоном 2,7-10 МПа [101, 114]. При добыче железной руды Южно-Белозерского месторождения состав закладочной смеси представлен молотым доменным гранулированным шлаком, известняком, отходами производства и водой, формируя при этом закладочный массив прочностью около 6-7 МПа. Закладочные смеси на месторождении представляют собой грубодисперсные системы с крупностью дисперсной фазы свыше 1000 нм. Глубина разработки на месторождении составляет 740 м. Увеличение производственной мощности комбината приводит к значительному увеличению объемов закладываемых выработок. Крупность дисперсной фазы закладочной смеси оказывает влияние на транспортабельность смеси, возможность расслоения при перемещении и прочностные характеристики закладочного массива. В основном в качестве наполнителя закладочных смесей используют пустую породу или отходы обогащения с

преобладающей крупностью до 1 мм. Таким образом, для проведения экспериментального исследования в качестве дисперсной фазы использованы отходы обогащения железной руды, позволяющие подготовить полидисперсную гидросмесь.

3.1 Описание методики проведения эксперимента

Целью экспериментального исследования является установка взаимосвязи величины вертикальной усадки и водоотделения, а также прочностных характеристик закладочных массивов от содержания наполнителя в закладочных смесях.

Основные задачи проведения экспериментального исследования:

- определение влияния концентрации закладочной смеси на физико-механические свойства возводимого искусственного массива;
- оценка показателя водоотделения от формируемого закладочного массива в зависимости от концентрации первичной гидросмеси;
- оценка прочностных характеристик формируемого закладочного массива в зависимости от массовой концентрации первичной гидросмеси.

На основании того, что инерционный сгуститель позволяет увеличить концентрацию закладочной смеси с 10 до 50%, необходимо рассмотреть, как изменятся качественные характеристики формируемых закладочных массивов при изменении концентрации на 40%. Методика исследования представлена воспроизведением процесса закладки выработанного пространства в лабораторных условиях закладочными смесями на основе отходов обогащения железной руды с варьированием содержания наполнителя закладочной смеси при постоянном содержании вяжущего вещества. Таким образом, для проведения эксперимента подготовлено 15 экспериментальных образцов закладочных смесей. Подготовка образцов и проведение эксперимента выполнено согласно ГОСТ 21153.2-84 и ГОСТ 10180-90 на кафедре транспортно-технологических процессов и машин Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II. 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» (далее экспериментальные образцы закладочных массивов) выполнялось посредством заливки закладочных смесей в подготовленные фильтрующие формы. Экспериментальные образцы взвешивались и замерялись по высоте и массе ежедневно на протяжении 28 дней. Во время каждого замера отделившаяся от экспериментального образца смесь фильтровалась и фиксировалась масса компонентов, позволяющая оценить величину потери материала при формировании закладочного массива.

3.2 Подготовка форм и экспериментальных образцов

Фильтрующие формы объемом – $269,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ с размерами: 70 мм – диаметр, 70 мм – высота цилиндра, подобраны согласно ГОСТу 21153.2-84 и ГОСТ 10180-90 для проведения прочностного анализа [82]. В лабораторных условиях определен гранулометрический состав наполнителя, представленный в таблице 3.1 [57].

Таблица 3.1 – Гранулометрический состав отходов обогащения железной руды

Крупность фракции, мм:	Содержание, %
0,106	9
0,159	21
0,256	16
0,3625	18
0,5125	12
0,725	11
1,015	6
1,180	8

На начальном этапе подготовка образцов закладочных смесей осуществлялась дозированием компонентов смеси посредством замера массы на весах AND DL-5000 (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Контрольно-измерительный прибор – весы AND DL-5000

Компоненты закладочной смеси соединялись в емкости с несущей средой для дальнейшей механической активации до однородной смеси в течение 1 мин [48-50]. Закладочные смеси сформированы из наполнителя – отходов обогащения железной руды с массовой концентрацией от 10 до 50%, вяжущего вещества – цемента марки М500 при постоянной массе в 55 г и воды в качестве несущей среды. Для проведения эксперимента подготовлены образцов закладочных смесей, представленные пятью массовыми концентрациями. Начальная масса полученных образцов закладочных смесей приведена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Исходные параметры образцов закладочных смесей

№	Масса наполнителя, г	Масса цемента, г	Масса несущей среды, г	Суммарная расчетная масса закладываемой смеси, г	Массовое содержание наполнителя	Массовое содержание цемента	Массовое содержание несущей среды
Ж-10-1	56,03	55,6	441,16	552,79	10,14	10,06	79,81
Ж-10-2	55,83	55,09	441,29	552,21	10,11	9,98	79,91
Ж-10-3	55,51	55,18	445,31	556	9,98	9,92	80,09
Ж-20-1	110,09	55,26	387,49	552,84	19,91	10,00	70,09
Ж-20-2	109,98	55,56	387,07	552,61	19,90	10,05	70,04
Ж-20-3	110,84	55,24	386,43	552,51	20,06	10,00	69,94
Ж-30-1	166,12	55,75	331,73	553,6	30,01	10,07	59,92
Ж-30-2	165,09	55,67	335,21	555,97	29,69	10,01	60,29
Ж-30-3	165,56	55,13	331,53	552,22	29,98	9,98	60,04
Ж-40-1	220,92	55,64	277,85	554,41	39,85	10,04	50,12
Ж-40-2	220,43	55,74	275,46	551,63	39,96	10,10	49,94
Ж-40-3	220,33	55,19	278,1	553,62	39,80	9,97	50,23
Ж-50-1	275,06	55,18	202,22	532,46	51,66	10,36	37,98
Ж-50-2	275,97	55,23	220,01	551,21	50,07	10,02	39,91
Ж-50-3	275,64	55,43	220,01	551,08	50,02	10,06	39,92

Номенклатура обозначения экспериментального образца на всем протяжении эксперимента состоит из трех элементов (3.1):

$$\text{Ж-}X_1\text{-}X_2, \quad (3.1)$$

где Ж – обозначение экспериментального образца, X_1 – концентрация образца закладочной смеси, X_2 – порядковый номер образца.

Оценка качественных характеристик закладочных смесей производится при формировании экспериментальных образцов закладочных массивов заливкой в сплошные формы [82]. При этом для исследования показателя водоотделения от закладочного массива и дальнейшего определения прочностных характеристик создается фильтрующая оболочка, покрытая мешковиной для снижения потери компонентов смеси при наборе прочности экспериментальным образцом закладочного массива. Формирование экспериментальных образцов закладочного массивов производилось заливкой образцов закладочных смесей в подготовленные фильтрующие формы, изготавливаемые из двух слоев: мешковина для предохранения от утечек несущей среды, и перфорированного материала с размером ячейки 3-4 мм для улавливания дисперсной фазы (рисунок 3.2).

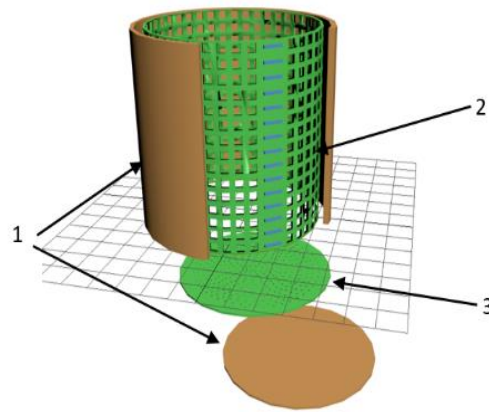


Рисунок 3.2 – Конструкция форм для заливки образцов: 1 – мешковина; 2 – перфорированный материал с габаритами ячейки 3x3 мм; 3 – перфорированный материал с габаритами ячейки 1x1 мм

Заливка форм осуществлялась в лаборатории Гидромеханики (на кафедре транспортно-технологических процессов и машин Санкт-Петербургского горного университета) при нормальных условиях. Перед заливкой внутренние поверхности формы смазывались тонким слоем минерального масла, препятствующего налипанию материала к обмотке для последующего проведения исследования прочностных характеристик экспериментальных образцов закладочных массивов после набора прочности.

3.3 Оценка показателя водоотделения и величины вертикальной усадки экспериментальных образцов закладочных массивов

Через промежутки времени 5 и 15 минут от начала эксперимента, после заливки образцов закладочной смеси в формы, производилось взвешивание формы с экспериментальными образцами закладочных массивов, а также фиксирование высота образца в форме [48-50]. Определение массы и высоты экспериментальных образцов закладочных массивов в начальный момент необходимо из-за интенсивной потери несущей среды с дисперсной фазой через фильтрующую форму. Отделившаяся смесь во время каждого взвешивания фильтровалась при помощи воронки и лабораторных обеззоленных фильтров Filtrak. Отфильтрованную несущую среду и дисперсную фазу, оставшуюся на фильтре, взвешивали для исследования потери материала экспериментальными образцами закладочных массивов (рисунок 3.3).

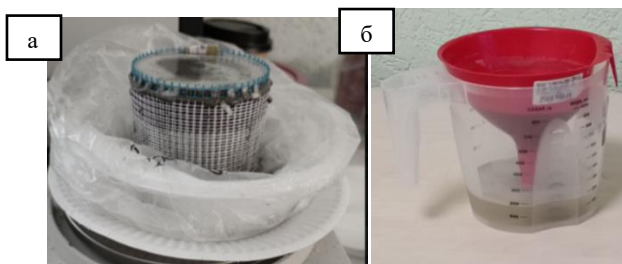


Рисунок 3.3 – Подготовка экспериментальных образцов закладочных массивов:
а – залитый образец закладочной смеси в подготовленной форме, б – фильтрация отделившейся смеси через фильтрующую форму

После проведения двух замеров массы экспериментальных образцов закладочных массивов в формах через 5 и 15 минут от начала эксперимента, формы с залитыми закладочными массивами были установлены в герметичную емкость для поддержания постоянной влажности с возможностью наблюдения за показателем водоотделения (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Набор прочности образцами закладочных смесей в герметичных условиях
Через 7 дней от начала эксперимента с каждой формы была снята мешковина – покрывающий слой, но формы оставлены в герметичной емкости. Спустя 10 дней от начала эксперимента убран перфорированный материал с поверхности экспериментальных образцов и далее формы хранились в открытой емкости для дальнейшего набора прочности (рисунок 3.5) [48-50].

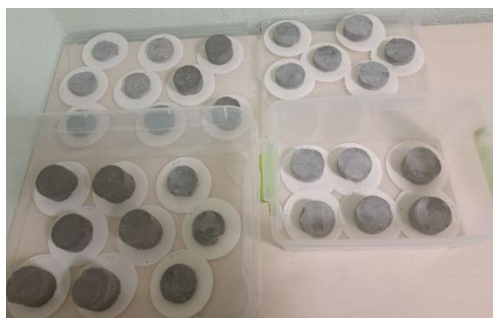


Рисунок 3.5 – Набор прочности экспериментальными образцами в нормальных условиях после удаления фильтрующих элементов

На протяжении 28 дней ежедневно у экспериментальных образцов закладочных смесей контролировалось изменение массы и высоты (Приложение Б). Это позволило оценить показатель водоотделения и сопутствующие потери дисперсной фазы образцами [48-50, 82]. Полученные результаты сведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Изменение массы и высоты экспериментальных образцов закладочных смесей при наборе прочности для концентрации гидросмеси 10-50% по массе

№	Концентрация гидросмеси, %	Исходная масса закладочной смеси, г	Исходная масса несущей среды в подготовленной закладочной смеси, г	Инфильтрация несущей среды, г	Масса массива, г	Высота массива, мм
Ж-10-1	10,14	552,79	441,16	370,4	71,06	10
Ж-10-2	10,11	552,21	441,29	372,71	63,29	11
Ж-10-3	9,98	556	445,31	350,53	73,26	10
Ж-20-1	19,91	552,84	387,49	327,5	128,92	17,5
Ж-20-2	19,90	552,61	387,07	320,06	119,62	14,5
Ж-20-3	20,06	552,51	386,43	319,04	117,03	14,5
Ж-30-1	30,01	553,6	331,73	275,19	181,82	24
Ж-30-2	29,69	555,97	335,21	273,84	164,91	24
Ж-30-3	29,98	552,22	331,53	275,44	167,94	21
Ж-40-1	39,85	554,41	277,85	211,29	225	30
Ж-40-2	39,96	551,63	275,46	232,86	212,14	26
Ж-40-3	39,80	553,62	278,1	232,44	216,89	26
Ж-50-1	51,66	532,46	202,22	151,26	261,88	32
Ж-50-2	50,07	551,21	220,01	172,35	275,49	36,5
Ж-50-3	50,02	551,08	220,01	164,82	269,14	36

Наблюдение за усадкой экспериментальных образцов закладочных смесей прекращено, когда высота образцов перестала изменяться, а масса изменялась незначительно. Зависимость высоты образцов от продолжительности эксперимента представляет собой так называемую «кривую скорости усадки» (рисунок 3.6-3.7).

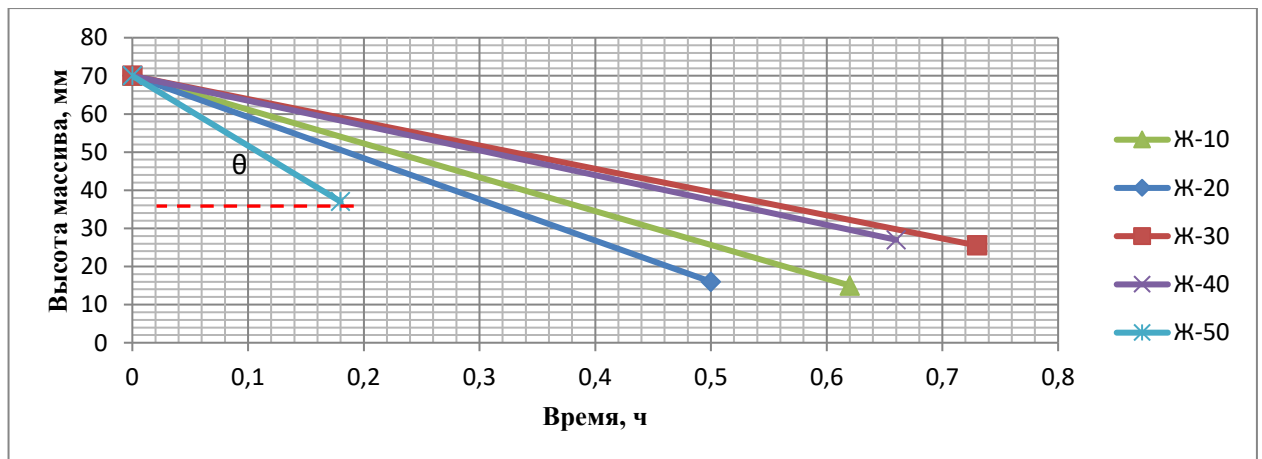


Рисунок 3.6 – Кривая скорости усадки экспериментальных образцов в начальный момент времени

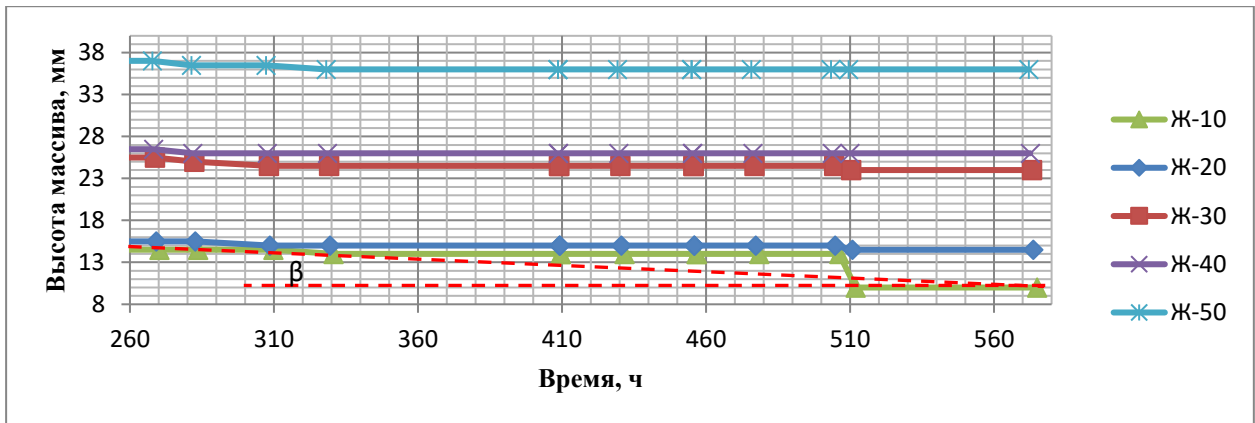


Рисунок 3.7 – Кривая скорости усадки экспериментальных по прошествии 10 дней от начала эксперимента

Тангенсы углов наклона левых частей ветвей кривых (θ) характеризуют скорость первичного водоотделения от образцов, которая и определяет скорость усадки экспериментальных образцов закладочных смесей. Тангенсы углов наклона правых частей ветвей кривых (β) характеризуют скорость уплотнения дисперсной фазы в форме, определяет необходимый объем смеси для закладки и время выдержки массива до набора нормативной прочности.

Кривые скорости усадки, представленные на рисунках 3.6-3.7 для пяти экспериментальных образцов закладочных смесей, отражают изменение величины усадки образцов при постепенном наборе прочности. По прошествии 10 дней набора прочности экспериментальными образцами уплотнение дисперсной фазы в формах происходит равномерно для четырех образцов, согласно кривой скорости усадки на рисунке 3.7. Изменение высоты на финальном этапе набора прочности для образца с концентрацией около 10% по массе характеризует частичное разрушение образца на этапе удаления формы из-за недостаточной прочности сформированных образцов. Увеличение угла наклона кривой скорости усадки на рисунке 3.6 указывает на увеличение скорости водоотделения от экспериментальных образцов при увеличении концентрации образцов закладочной смеси от 10 до 50%, сопровождаясь более интенсивным переходом к этапу набора прочности образцом при меньшем изменении высоты образца в форме.

Усадка массива и водоотделение от массива рассчитывается по формулам 3.2-3.3 [82]:

$$\Delta H = \frac{h}{H}, \quad (3.2)$$

$$\Delta M = \frac{m}{M}, \quad (3.3)$$

где H – высота формы, мм; h – высота сформированного экспериментального образца закладочного массива, мм, m – масса отделившейся несущей среды через фильтрующую перемычку, г; M – исходная масса несущей среды в подготовленной закладочной смеси, г.

На рисунках 3.8-3.9 приведены графики изменения величины вертикальной усадки и показателя водоотделения относительно содержания дисперсной фазы в экспериментальных образцах закладочной смеси, на основании которых сформированы лабораторные экспериментальные образцы закладочных массивов.

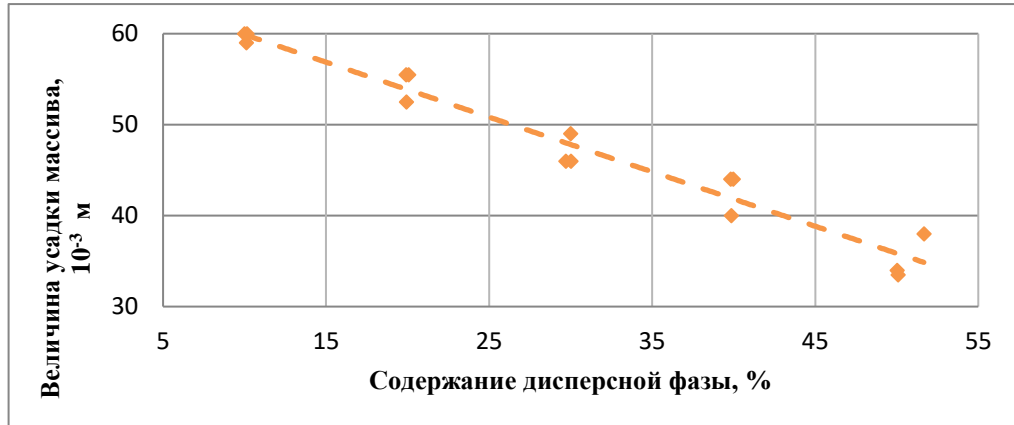


Рисунок 3.8 – Изменение показателя усадки экспериментальных образцов закладочных массивов

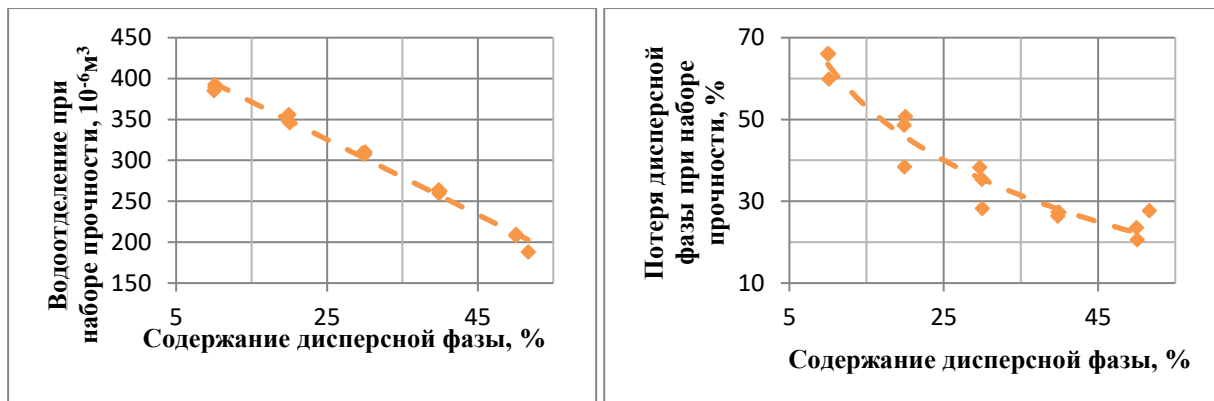


Рисунок 3.9 – Изменение показателя водоотделения от экспериментальных образцов закладочных массивов

Изменение показателя водоотделения от экспериментальных образцов закладочных массивов и величины вертикальной усадки массива от содержания дисперсной фазы подчиняются линейным зависимостям (рисунок 3.8-3.9). Это связано с тем, что при низкой концентрации наблюдается водоотделение значительной массы несущей среды, сопровождающееся дополнительным выносом дисперсной фазы за пределы формы. Водоотделение от массива и потеря дисперсной фазы в период набора прочности приводит к формированию остаточной влажности формируемых экспериментальных образцов закладочной смеси (рисунок 3.10).

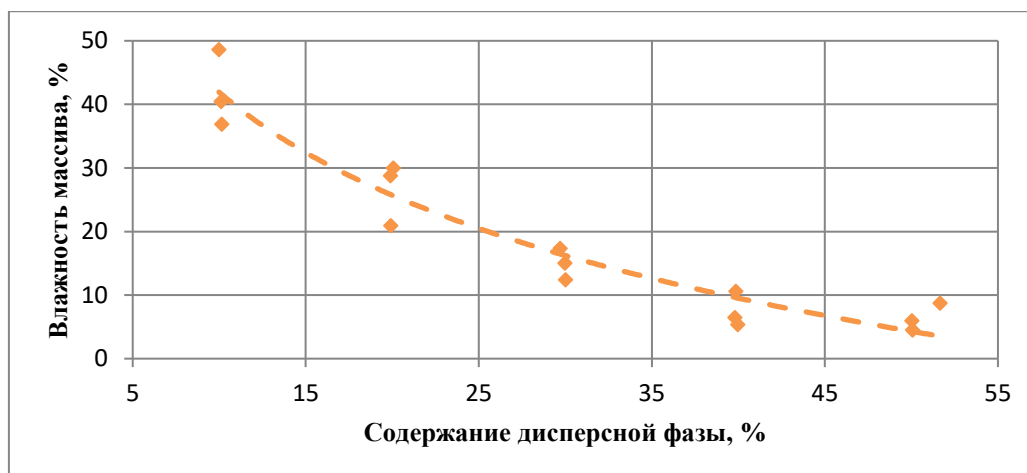


Рисунок 3.10 – Изменение влажности экспериментальных образцов закладочных массивов

На рисунке 3.10 приведены значения влажности экспериментальных образцов закладочных массивов. Образцы закладочных смесей с содержанием дисперсной фазы в 50% обладают наименьшим содержанием несущей среды. При этом при водоотделении, в период набора прочности образцами, происходит отделение свободной жидкости и вытеснение части поровой за счет давления вышележащих слоев. Следовательно, влажность, представленная на рисунке 3.10 для закладочной смеси с содержанием дисперсной фазы в 50% характеризует объем оставшейся поровой и связанной жидкости.

Таким образом при увеличении концентрации образцов закладочной смеси с 10 до 50% по массе величина показателя усадки уменьшилась на 37%. Сформированные экспериментальные образцы закладочных массивов требуют исследования прочностных характеристик, вследствие присутствия водоотделения и выноса дисперсной фазы от экспериментальных образцов закладочных массивов.

3.4 Прочностной анализ экспериментальных образцов закладочных массивов

Прочностной анализ экспериментальных образцов закладочных массивов проведен на базе Научного центра «Геомеханики и проблем горного производства» Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II [48-50]. Перед проведением прочностного анализа торцы и боковые поверхности образцов дополнительно выравнивались при помощи шлифовального диска. Определение максимальной разрушающей силы, приложенной к торцам образцов, проводилось на испытательной машине ДРМБ-300 (рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 – Испытательная машина ДРМБ-300 с установленным экспериментальным образцом

Подготовленные экспериментальные образцы закладочных массивов с различным содержанием дисперсной фазы в образцах закладочной смеси поочередно подвергались одноосному сжатию между стальными плитами на гидравлическом прессе для определения разрушающей силы.

На основании полученных результатов, были определены прочностные характеристики образцов [48-50]. Значение предела прочности при одноосном сжатии для каждого i -го образца выборки вычисляют по формуле 3.4-3.5 [48]:

$$\sigma_{сж.i} = K_B \frac{P}{S}, \quad (3.4)$$

где P – разрушающая образец сила, Н; S – площадь поперечного сечения образца, м²; K_B – безразмерный коэффициент высоты образца (рисунок 3.12) [48]:

$$K_B = \frac{h}{D}, \quad (3.5)$$

где h – высота образца, м, D – диаметр образца, м.

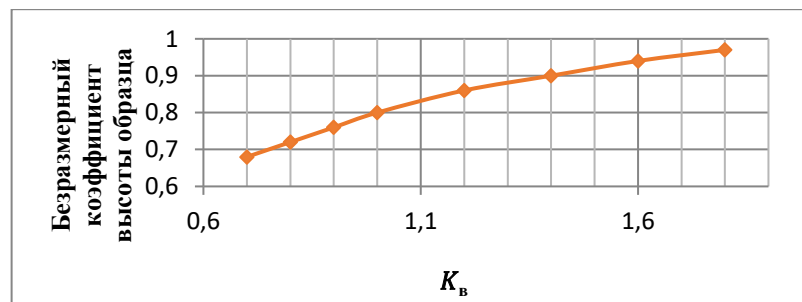


Рисунок 3.12 – Зависимость коэффициента высоты образца от геометрических параметров образцов закладочных массивов

Таблица 3.4 – Предел прочности при одноосном сжатии образцов закладочных массивов

№	Диаметр образца, мм	Высота образца, мм	Разрушающая сила, кН	Отношение высоты к диаметру	Безразмерный коэффициент высоты образца (п.1.5. ГОСТ21153. 2-84)	Площадь поперечного сечения образца, см ²	Предел прочности при одноосном сжатии, МПа	Среднее арифметическое значение предела прочности при одноосном сжатии, МПа	Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации
Ж-10-1	68	10	2,696	0,15	0,15	36,30	0,1114	0,0816	0,0211	0,26
Ж-10-2	70	11	0,614	0,16	0,16	38,47	0,0255		0,0396	0,49
Ж-10-3	70	10	2,962	0,14	0,14	38,47	0,1078		0,0185	0,23
Ж-20-1	70	17,5	3,835	0,25	0,23	38,47	0,2293	0,2024	0,0191	0,09
Ж-20-2	70	14,5	3,036	0,21	0,21	38,47	0,1658		0,0259	0,13
Ж-20-3	71	14,5	4,195	0,20	0,20	39,57	0,2120		0,0068	0,03
Ж-30-1	72	24	5,93	0,33	0,32	40,69	0,4663	0,4377	0,0202	0,05
Ж-30-2	70	24	4,702	0,34	0,33	38,47	0,4034		0,0243	0,06
Ж-30-3	69	21	5,714	0,30	0,29	37,37	0,4434		0,0040	0,01
Ж-40-1	71	30	8,552	0,42	0,40	39,57	0,8645	0,6532	0,1494	0,23
Ж-40-2	72	26	6,313	0,36	0,34	40,69	0,5274		0,0889	0,14
Ж-40-3	72	26	6,793	0,36	0,34	40,69	0,5676		0,0605	0,09
Ж-50-1	71	32	13,167	0,45	0,43	39,57	1,4308	1,5022	0,0505	0,03
Ж-50-2	70	36,5	10,21	0,52	0,50	38,47	1,3272		0,1237	0,08
Ж-50-3	69,5	36	13,26	0,52	0,50	37,92	1,7485		0,1742	0,12

Для статистической обработки результатов испытаний 15 экспериментальных образцов закладочных массивов вычислено среднее арифметическое значение предела прочности при одноосном сжатии ($\overline{\sigma_{сж}}$) (3.6), среднее квадратическое отклонение Δ (3.7) и коэффициент вариации (3.8) [48]:

$$\overline{\sigma_{сж}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{сжi}, \quad (3.6)$$

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_{сжi} - \overline{\sigma_{сж}})^2}, \quad (3.7)$$

$$V = \frac{\Delta}{\overline{\sigma_{сж}}} \cdot 100, \quad (3.8)$$

Полученные прочностные характеристики образцов закладочного массива сведены в таблицу 3.4 и построен график изменения прочности массива от содержания дисперсной фазы в образцах закладочной смеси (рисунок 3.13).

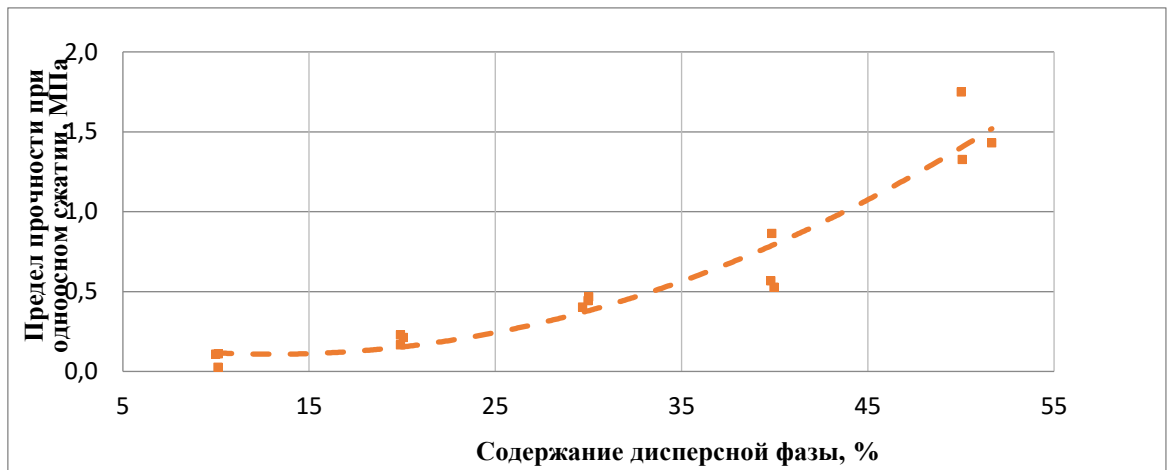


Рисунок 3.13 – Зависимость прочности экспериментальных образцов (возрастом 28 дней) от концентрации гидросмеси

Исследование показало, что изменение прочности экспериментальных образцов закладочных массивов при увеличении концентрации от 10% до 50% увеличивается на 1,5 МПа и аппроксимируется экспоненциальной функцией (3.9):

$$\sigma = 0,039 \cdot e^{0,0727C_H}, \quad (3.9)$$

где σ – предел прочности при одноосном сжатии, МПа; C_H – концентрация образца закладочной смеси, % по массе. Достоверность аппроксимации составила $R^2 = 0,89$.

Полученные результаты прочностных характеристик экспериментальных образцов разной концентрации согласуются с работами ряда ученых, а в частности с работами Институт горного дела им. Н.А. Чинакала. Прочностные характеристики массивов, полученные в ходе

эксперимента, для концентрации в 50% лежат в нормативных пределах, а именно от 1,37 МПа в зависимости от расхода вяжущего на 30 суток [20, 117].

Таким образом, на основании расчетного коэффициента потери дисперсной фазы и водоотделения (Приложение Б) и того, что при гидратации цемента в несущей среде происходит растворение 75-80 мг/л цемента. Определены массовые показатели потери вяжущего закладочной смеси в зависимости от содержания дисперсной фазы в образцах закладочных смесей на основании соотношений и введенных коэффициентов 3.10 и 3.11:

$$K_{\text{отд.н.с.}(i)} = \frac{V_{\text{отд.н.с.}(i)}}{V_{\text{н.с.}(i)}}, \quad (3.10)$$

$$K_{\text{отд.н.с.}(10)} = 0,92; K_{\text{отд.н.с.}(50)} = 0,97$$

$$K_{\text{пот.д.ф.}(i)} = \frac{m_{\text{пот.д.ф.}(i)}}{m_{\text{д.ф.}(i)}}, \quad (3.11)$$

$$K_{\text{пот.д.ф.}(10)} = 0,6; K_{\text{пот.д.ф.}(50)} = 0,24$$

где $V_{\text{отд.н.с.}(i)}$ – объем отделившейся несущей среды от экспериментального образца закладочного массива за период набора прочности, м³; $V_{\text{н.с.}(i)}$ – исходный объем несущей среды в образце закладочной смеси, м³; $m_{\text{пот.д.ф.}(i)}$ – масса дисперсной фазы, отделившейся от экспериментального образца закладочного массива за период набора прочности, кг;

$m_{\text{д.ф.}(i)}$ – исходная масса дисперсной фазы в образце закладочной смеси, кг.

Масса растворенного цемента отделившегося вместе с несущей средой (3.12-3.14):

$$m_{\text{пот.р.ц.}(i)} = 0,08V_{\text{н.с.}(i)}K_{\text{отд.н.с.}(i)}, \quad (3.12)$$

$$m_{\text{пот.р.ц.}(10)} = 31,5 \cdot 10^{-3} \text{ г}; m_{\text{пот.р.ц.}(50)} = 16,6 \cdot 10^{-3} \text{ г}$$

Масса потери цемента при выносе дисперсной фазы:

$$m_{\text{пот.тв.ц.}(i)} = K_{\text{пот.д.ф.}(i)}(m_{\text{ц}} - m_{\text{пот.р.ц.}(i)}), \quad (3.13)$$

$$m_{\text{пот.тв.ц.}(10)} = 33 \text{ г}; m_{\text{пот.тв.ц.}(50)} = 13,2 \text{ г}$$

где $m_{\text{ц}}$ – исходная масса вяжущего в образце закладочной смеси, г.

Масса цемента в форме, участвующего в наборе прочности экспериментальным образцом закладочного массива:

$$m_{\text{ост.ц.}(i)} = m_{\text{ц}} - m_{\text{пот.р.ц.}(i)} - m_{\text{пот.тв.ц.}(i)}, \quad (3.14)$$

$$m_{\text{ост.ц.}(10)} = 22 \text{ г}; m_{\text{ост.ц.}(50)} = 42 \text{ г}$$

Увеличение прочности экспериментальных образцов при увеличении содержания дисперсной фазы обеспечивается за счет увеличения содержания дисперсной фазы в образце закладочной смеси, уменьшении влажности образца и большей массы цемента, участвующей в наборе прочности, рассчитанной по формулам 3.10-3.14. Меньший объем несущей среды в смеси способствует меньшему водоотделению от сформированного массива и меньшему

сопутствующему выносу дисперсной фазы. Увеличение содержание дисперсной фазы в закладочной смеси ведет за собой увеличение удельной поверхности, вокруг которой, в период гидратации цемента, происходит связывание частиц цемента и образование цементного клея вокруг каждой частицы дисперсной фазы.

На основании сформированных экспериментальных образцов закладочных массивов рассмотрен коэффициент остаточного заполнения выработки при изменении концентрации экспериментальных образцов закладочных смесей. Данная величина позволила оценить заполняемость экспериментальной формы гидросмесью (рисунок 3.14).

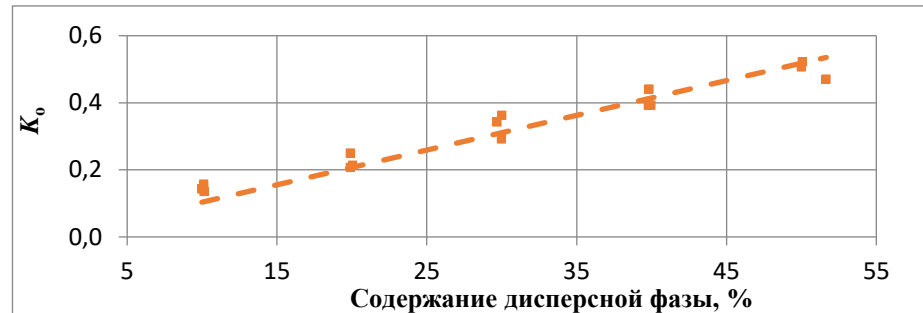


Рисунок 3.14 – Коэффициент остаточного заполнения

Коэффициент остаточного заполнения рассчитан для каждого экспериментального образца закладочного массива по формуле 3.15:

$$K_0 = \frac{V_{M(i)}}{V_0}, \quad (3.15)$$

где $V_{M(i)}$ - объем экспериментального образца закладочной смеси, m^3 (Приложение Б); V_0 - объем формы, m^3 .

Исследование показало, что изменение коэффициента остаточного заполнения экспериментальных образцов закладочных массивов от концентрации (рисунок 3.14) аппроксимируется линейной функцией (3.16):

$$K_0 = 0,0104C_H, \quad (3.16)$$

Данное соотношение позволило сделать вывод, что увеличение концентрации закладочной смеси сопровождается увеличением коэффициента остаточного заполнения, а как следствие, увеличением высоты формируемого массива и уменьшением объема выработанного пространства, требующего дополнительной закладки для заполнения выработки под кровлю.

На заключительном этапе исследована потребная масса закладочной смеси при разной концентрации, требуемая для закладки определенного объема при учете водоотделения от массива и его вертикальной усадке. Потребная масса (3.17) рассчитывалась исходя из усредненной плотности экспериментальных образцов закладочной смеси (ρ_{CM}), объема формы (V_0) и коэффициента остаточного заполнения (K_0):

$$M_0 = V_0 \rho_{\text{см}} \frac{1}{K_0} = \frac{V_0^2 \rho_{\text{см}}}{V_{\text{M}(i)}}, \quad (3.17)$$

$$M_{0(10)} = 3,66 \text{ кг}; M_{0(50)} = 1,06 \text{ кг}$$

Расчетные значения потребной массы закладочной смеси для полного заполнения отведенного объема представлены на рисунке 3.15.

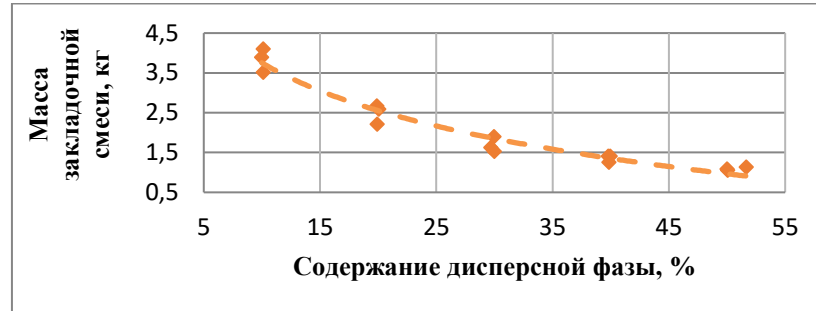


Рисунок 3.15 – Потребная масса закладочной смеси для полного заполнения отведенного объема

Изменение концентрации образцов закладочных смесей от 10% до 50% по массе сопровождается изменением массы закладочной смеси, необходимой для полного заполнения формы (рисунок 3.15) и аппроксимируется логарифмической функцией (3.18):

$$M_0 = -1,732 \ln(C_H) + 7,7402, \quad (3.18)$$

где M_0 – масса подготовленного образца закладочной смеси, кг; C_H – концентрация образца закладочной смеси, % по массе. Достоверность аппроксимации составила $R^2 = 0,96$. Преобразовав уравнение коэффициента остаточного заполнения, скорректировано уравнение массы закладочной смеси, необходимой для полного заполнения формы (3.19):

$$M_0 = 17585,98 \cdot K_0^2 - 1670673,08 \cdot K_0 - 5417,6, \quad (3.19)$$

Анализ зависимости 3.18 позволил сделать вывод, что с увеличением концентрации смеси, повышается коэффициент остаточного заполнения, что сопровождается снижением потребной массы закладочной смеси необходимой для заполнения отведенного объема для закладки. Достоверность аппроксимации составила $R^2 = 0,97$.

Динамика формирования экспериментальных образцов закладочных массивов закладочных массивов позволила проанализировать полноту заполнения формы установленного объема, скорость заполнения, а также массу закладочной смеси, необходимой для полного заполнения отведенного объема. Таким образом, увеличение концентрации образцов закладочной смеси с 10% до 50% сопровождается снижением потребной массы смеси для полного заполнения формы на 72%.

Прочность закладочного массива увеличивается на 1,5 МПа с увеличением концентрации до 50% по массе и уменьшением содержания несущей среды в закладочной смеси, что в свою очередь характеризует увеличение скорости усадки массива и сниженному

показателю водоотделения от массива. Таким образом, увеличение содержания дисперсной фазы закладочной смеси приведет к уменьшению массы отделяемой несущей среды на 54% и изменению вертикальной усадки массива на 37%, сформировав более прочный массив с меньшими потерями по массе и высоте.

3.5 Выводы по главе 3

Проведенные экспериментальные исследования по формированию экспериментальных образцов закладочных массивов с варьированием концентрации дисперсной фазы и несущей среды в образцах закладочной смеси позволили установить зависимость изменения параметра водоотделения, величины вертикальной усадки и прочности экспериментальных образцов закладочных массивов в зависимости от содержания дисперсной фазы. В ходе проведения эксперимента использован цемент марки М500 в качестве вяжущего вещества, наполнителя в виде отходов обогащения железной руды и воды в качестве несущей среды.

Проанализировав полученные экспериментальные данные можно сделать вывод, что увеличение концентрации ведет к увеличению прочности экспериментальных образцов закладочной смеси при одноосном сжатии. Снижение прочности в 2,3 раза наблюдается при уменьшении концентрации смеси с 50% до 40% по массе, в то время как при 10% концентрации уменьшение показателя прочности составляет 1,5 МПа спустя 28 суток от начала эксперимента. Уменьшение прочности на одноосное сжатие при снижении содержания дисперсной фазы с 50% до 10% объясняется менее эффективным сцеплением частиц наполнителя с цементной матрицей из-за высокой влажности экспериментальных образцов и значительного выноса цемента при наборе прочности, что привело к малой массе цемента, участвующего в наборе прочности. Исследование различных составов образцов закладочных смесей показало, что усадка смеси с использованием 10% концентрации больше чем у смеси с массовой концентрацией 50% на 37%. Однако при этом для полного заполнения выработки закладочной смесью с концентрацией в 50% при учете наблюдаемого водоотделения от экспериментальных образцов закладочных массивов потребуется на 72% удельного объема закладочной смеси меньше чем, если бы мы использовали гидравлическую смесь низкой концентрации.

Выполненные исследования доказывают, что отходы обогащения железной руды могут быть эффективно использованы при управлении горным массивом в процессе закладки выработанного пространства твердеющими смесями. Применение закладочной смеси 50% массовой концентрации позволит сохранить необходимую несущую способность массива, предотвратить опасные динамические явления и деформации в горных выработках и подработанных зонах.

ГЛАВА 4 ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ ИНЕРЦИОННОГО СГУСТИТЕЛЯ

4.1 Обоснование размеров рабочей камеры инерционного сгустителя

Моделирование конструкции инерционного сгустителя позволило оценить распределение содержания дисперсной фазы на выпускных патрубках сгущенной смеси и осветленного потока несущей среды в зависимости от крупности дисперсной фазы, входной скорости первичной гидросмеси и размеров отклоняющего профиля. Для исследования траектории движения дисперсной фазы и ее содержания на выпускных патрубках создано 988 вариантов конструкций (Приложение А), среди которых:

- 840 ед. при высоте рабочей камеры 1500 мм;
- 64 ед. при высоте рабочей камеры 750 мм;
- 84 ед. при высоте рабочей камеры 3000 мм.

Высоты рабочей камеры для моделей инерционного сгустителя приняты равными половине высоты от подошвы до кровли выработанного пространства, взятые на основе теоретического исследования высот выработанного пространства на месторождениях. Данные высоты образцов инерционных сгустителей позволяют оценить изменение поведения сгущенного потока в рабочей камере и содержания дисперсной фазы на выпускном патрубке.

Все исследуемые образцы инерционных сгустителей подразделены по входной скорости первичной гидросмеси, поступающей в рабочую камеру от 0,5 м/с до 3 м/с с целью определения рациональной-рекомендуемой скорости, позволяющей обеспечить формирование закладочной смеси требуемой концентрации. Таким образом, для исследования движения гидросмеси в рабочей камере инерционного сгустителя создано моделей конструкции инерционного сгустителя:

- 352 ед. при 0,5 м/с;
- 241 ед. при 1 м/с;
- 184 ед. при 2 м/с;
- 211 ед. при 3 м/с.

Изменение концентрации гидросмеси на выпускных патрубках изучалось не только при разной входной скорости первичной гидросмеси, но и при варьировании крупности дисперсной фазы. Так как закладочные смеси содержат в большем процентном соотношении тонкие и мелкие частицы дисперсной фазы, то крупность частиц дисперсной фазы рассмотрена диапазоном 0,2-5 мм [95]. Преобладающее большинство образцов рассмотрено при равномерном разделении рассматриваемого диапазона крупности:

- 154 ед. при крупности дисперсной фазы 0,2 мм;
- 208 ед. при крупности дисперсной фазы 1 мм;

- 214 ед. при крупности дисперсной фазы 3 мм;
- 202 ед. при крупности дисперсной фазы 5 мм.

Помимо входной скорости гидросмеси и крупности дисперсной фазы на концентрацию сгущенной смеси оказывает влияние и длина продольного и поперечного размера отклоняющего гидродинамического профиля. Таким образом, исследуемые объекты инерционного сгустителя с высотой рабочей камеры 1500 мм рассмотрены при продольном размере отклоняющего профиля 1000-1650 мм:

- 120 ед. при длине продольного габарита 1000 мм;
- 120 ед. при длине продольного габарита 1150 мм;
- 120 ед. при длине продольного габарита 1250 мм;
- 120 ед. при длине продольного габарита 1350 мм;
- 120 ед. при длине продольного габарита 1450 мм;
- 120 ед. при длине продольного габарита 1550 мм;
- 120 ед. при длине продольного габарита 1650 мм.

При каждом продольном размере рассмотрено варьирование длины поперечного размера 300-800 мм:

- 140 ед. при поперечном размере 300 мм;
- 140 ед. при поперечном размере 400 мм;
- 140 ед. при поперечном размере 500 мм;
- 140 ед. при поперечном размере 600 мм;
- 140 ед. при поперечном размере 700 мм;
- 140 ед. при поперечном размере 800 мм.

Данные длины габаритов отклоняющего профиля позволили определить их соотношение, сохраняющееся при увеличении и уменьшении высоты рабочей камеры инерционного сгустителя. Таким образом, при высоте рабочей камеры 750 мм рассмотрены длины продольного габарита отклоняющего профиля 600 мм и 800 мм:

- 32 ед. при длине продольного габарита 600 мм;
- 32 ед. при длине продольного габарита 800 мм.

При каждой длине продольного габарита рассмотрено варьирование длины поперечного габарита от 300 мм до 400 мм:

- 32 ед. при длине поперечного габарита 300 мм;
- 32 ед. при длине поперечного габарита 400 мм.

При высоте рабочей камеры 3000 мм рассмотрены длины продольного габарита отклоняющего профиля 1150 мм и 3000 мм с изменением поперечного габарита от 300 мм до 1500 мм:

- 28 ед. при длине продольного габарита 1150 мм;
- 28 ед. при длине продольного габарита 1550 мм;
- 28 ед. при длине продольного габарита 3000 мм;
- 12 ед. при длине поперечного габарита 300 мм;
- 30 ед. при длине поперечного габарита 500 мм;
- 21 ед. при длине поперечного габарита 700 мм;
- 21 ед. при длине поперечного габарита 1500 мм.

Полученные данные предоставили возможность выполнить параметрический анализ и параметрический синтез параметров рабочей камеры инерционного сгустителя для получения требуемой концентрации сгущенной смеси.

При проектировании и эксплуатации сложного технического объекта, необходимо обладать знаниями о количественных и качественных свойствах, характерных для изучаемых систем. Они могут быть получены с помощью методов математического моделирования. Среди основных задач моделирования выделяются структурный анализ и синтез, параметрический анализ и синтез, а также комбинированные задачи, объединяющие различные аспекты указанных методов. Параметрический синтез – это процесс задания параметров и характеристик элементов модели с учетом дополнительных факторов, определяемых соответствующими свойствами [85, 86, 96]. Дополнительные факторы учитываются путем задания соответствующих значений параметров. Параметрический анализ включает одноэтапный или многоэтапный анализ параметров.

Главным параметром, определяющим эффективность применения инерционного сгустителя в системе гидротранспорта, является его производительность, которая находится в прямой зависимости от скорости потока гидросмеси и содержания дисперсной фазы [28]. Производительность инерционного сгустителя выбирается согласно объему заполняемого выработанного пространства и требуемой скорости его закладки. В свою очередь влияющими факторами на производительность остаются скорость потока в подводящем трубопроводе и его диаметр. Согласно результатам исследования динамики осаждения (глава 2, п.2.4) интервал рациональной скорости первичной гидросмеси варьируется в зависимости от крупности частиц дисперсной фазы. Сортамент труб, применяемых на месторождении для закладки, ограничен по диаметру и представлен рядом: 125 мм, 150 мм, 179 мм, 200 мм и 220 мм. Это обуславливает

ограничение по производительности инерционного сгустителя и определяют его допустимые объемы рабочей камеры.

Высота инерционного сгустителя определяется на основе требуемой концентрации сгущенной смеси и длины отклоняющего гидродинамического профиля. При этом работа инерционного сгустителя основана на том, что поток поступает в рабочую камеру и взаимодействует с отклоняющим профилем. При этом концентрация сгущенной гидросмеси является функцией от угла обтекания, входной скорости первичной гидросмеси, крупности дисперсной фазы и длины участка взаимодействия, но данная длина также является функцией от угла обтекания. Высоту сгустителя нельзя масштабировать пропорционально расходу гидросмеси, однако ширина инерционного сгустителя напрямую зависит от расхода, заданного на впускном патрубке инерционного сгустителя. Таким образом, в зависимости от диаметра подводящего трубопровода будет варьироваться ширина рабочей камеры инерционного сгустителя т.к. поток выходит из трубы и попадает на поверхность отклоняющего гидродинамического профиля, который инициирует инерционное осаждение.

Подбор параметров инерционного сгустителя следует осуществлять, соблюдая два равнозначных условия: достижение необходимой концентрации на выпускном патрубке сгущенной смеси инерционного сгустителя и обеспечение компактности оборудования. Это возможно благодаря использованию оборудования ограниченной высоты, достаточной для обеспечения требуемой производительности при закладке выработанного пространства. Производительность инерционного сгустителя напрямую зависит от объема рабочей камеры и скорости движения гидросмеси.

Обоснование типоразмерного и параметрического ряда учитывает, что для достижения концентрации закладочной смеси около 50%, соотношение продольного l и поперечного k размеров отклоняющего гидродинамического профиля должно составлять 2,3.

На основе теоремы подобия Бэкингема, результаты экспериментальных исследований преобразованы в критериальные уравнения 4.1 [5, 52]:

$$\left\{ \begin{array}{l} H = f(Q, L) \\ B = f(S_{\text{рк}}, D_{\text{тр}}) \\ Q = f(D_{\text{тр}}, v) \\ C_{\text{вых}} = f(v, C_{\text{вх}}) = f(\varphi, L) \\ L = f(\varphi, N^*) \end{array} \right. , \quad (4.1)$$

где H – предельная высота инерционного сгустителя, м; Q – производительность инерционного сгустителя, м³/ч; $S_{\text{рк}}$ – площадь сечения рабочей камеры инерционного сгустителя, м²;

$D_{\text{тр}}$ – диаметр подводящего трубопровода, м; v – входная скорость первичной гидросмеси, м/с;

$C_{\text{вых}}$ – концентрация сгущенной гидросмеси, %; $C_{\text{вх}}$ – концентрация первичной гидросмеси, %;

N^* – коэффициент соотношения продольного и поперечного размера отклоняющего гидродинамического профиля; L – длина участка взаимодействия, м; φ – угол обтекания потока, град.

Решение полученной системы уравнений позволяет определить размеры рабочей камеры инерционного сгустителя. Для переменных значений расхода гидросмеси и диаметра подводящего трубопровода, были определены рациональные значения высоты рабочей камеры инерционного сгустителя для формирования сгущенного потока с различным расходом.

Определяющий параметр $C_{\text{вых}}$ зафиксирован на уровне 50%.

Определение ширины инерционного сгустителя B произведено при следующих параметрах:

- диаметр трубопровода $D_{\text{тр}}$: 125 мм, 150 мм, 179 мм, 200 мм и 220 мм;
- средневзвешенная крупность дисперсной фазы – 3 мм;
- входная скорость первичной гидросмеси v : 0,7 м/с, 1,0 м/с, 1,3 м/с, 1,6 м/с и 2,0 м/с (согласно п.4 главы 2 диапазон скоростей 0,7 – 3,65 м/с является рациональным для частиц крупностью 3 мм для получения требуемой концентрации).

На первом этапе вычислений величина скорости транспортирования принят постоянным и равен 0,7 м/с. Учитывая, что производительность инерционного сгустителя определяется согласно выражению 4.2 [95]:

$$Q = \frac{\pi D_{\text{тр}}^2}{4} v, \quad (4.2)$$

был определен ряд значений Q при скоростях 0,7 м/с, 1,0 м/с, 1,3 м/с, 1,6 м/с и 2,0 м/с. Диаметры подводящего трубопровода и выпускных патрубков являются равными.

Анализ характера движения гидросмеси при взаимодействии с отклоняющим профилем позволяет выявить, что площадь контакта потока зависит от $D_{\text{тр}}$ (рисунок 4.1).

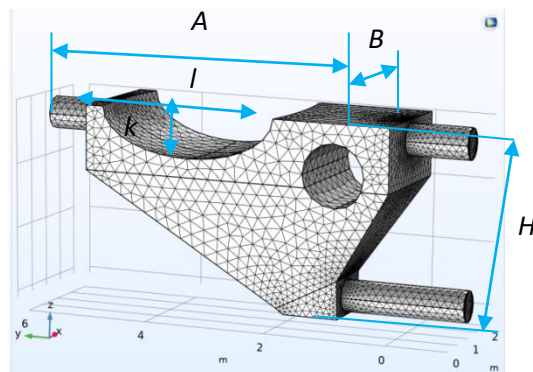


Рисунок 4.1 – Конструктивная схема инерционного сгустителя

При движении гидросмеси в рабочей камере инерционного сгустителя, входная скорость первичной гидросмеси резко снижается при взаимодействии с отклоняющими профилями. Изменение скорости на выпускном патрубке инерционного сгустителя, согласно параметрическому анализу полученных результатов мультифизического моделирования, имеет линейный характер и по величине является равной половине входной скорости первичной гидросмеси. Учитывая потерю скорости потока при расширении в рабочей камере, ширина B рабочей камеры принята равной (4.3):

$$B = 2D_{\text{тр}}, \quad (4.3)$$

Падение скорости потока при движении гидросмеси определяет время, требуемое для осаждения частиц дисперсной фазы на дно рабочей камеры. Разница входной скорости первичной гидросмеси и скорости сгущенного потока на выпускном патрубке определяет процесс накопления смеси в рабочей камере инерционного сгустителя до предельного объема.

Учитывая рациональное соотношение размеров отклоняющего гидродинамического профиля, равное 2,3, упрощаем конструкцию рабочей камеры инерционного сгустителя до треугольника с равными сторонами, при этом его основание относится к высоте, как 1,67 (рисунок 4.2).

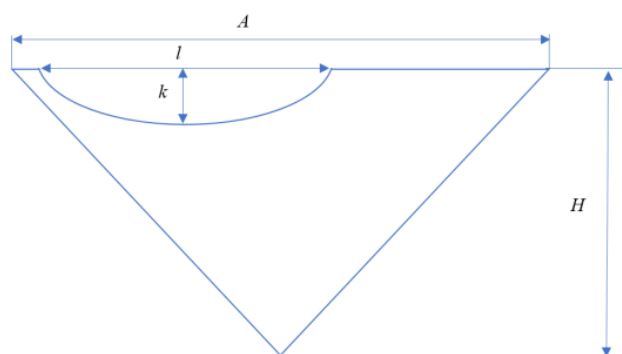


Рисунок 4.2 – Упрощенная конструктивная схема инерционного сгустителя

Длина рабочей камеры инерционного сгустителя согласно моделированию, принята равной (4.4):

$$A = 2,5l, \quad (4.4)$$

Для определения характерных размеров конструкции необходимо знать объем рабочей камеры и время его полного заполнения (4.5):

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{\text{рк}} = 0,5AHB \\ A = 1,67H \\ A = 2,5l \\ t = \frac{Q}{V_{\text{рк}}} \end{array} \right. , \quad (4.5)$$

Время накопления смеси в рабочей камере инерционного сгустителя определялось исходя из потери скорости потоком (4.6):

$$t = \frac{t_{\text{ВХ}} + t_{\text{ВЫХ}}}{2}, \quad (4.6)$$

где $t_{\text{ВХ}}$ – время накопления смеси при входной скорости, с; $t_{\text{ВЫХ}}$ – время накопления смеси при выходной скорости, с. Расчет длины рабочей камеры инерционного сгустителя производился на основании продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля: 1000 мм, 1150 мм и 1250 мм. Полученные в ходе расчетов результаты сведены в Приложение В.

Полученные высота, ширина и длина рабочей камеры инерционного сгустителя и время накопления в ней позволили определить рациональные значения габаритных размеров отклоняющего гидродинамического профиля.

Объем рабочей камеры инерционного сгустителя имеет линейную зависимость от времени нахождения потока в рабочей камере при установленном расходе гидросмеси. Определение продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля основывается на времени накопления смеси в рабочей камере на основании моделирования (4.7):

$$t = \frac{V_{\text{рк}} - V_{\text{пр}}}{Q} = \frac{0,5AHB - 0,25\pi lkB}{\frac{\pi D_{\text{тр}}^2}{4} v_{\text{ср}}}, \quad (4.7)$$

где $V_{\text{рк}}$ – объем рабочей камеры, м³; $V_{\text{пр}}$ – объем отклоняющего гидродинамического профиля, м³; $v_{\text{ср}}$ – средняя скорость потока гидросмеси в рабочей камере, м; A – длина рабочей камеры ($A = 2,5l$), м; H – высота рабочей камеры ($H = \frac{A}{1,67}$), м; B – ширина рабочей камеры, м; l – продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля, м; k – поперечный размер отклоняющего гидродинамического профиля ($k = \frac{l}{2,3}$), м; v – входная скорость первичной гидросмеси (4.8), м/с.

$$v_{\text{ср}} = \frac{v + v_{\text{ВЫХ}}}{2}, \quad (4.8)$$

где v – входная скорость первичной гидросмеси, м/с; $v_{\text{ВЫХ}}$ – скорость на выпускном патрубке сгущенной смеси, м/с.

Упростив уравнение 4.7 и подставив соотношение для длины, высоты и ширины рабочей камеры, продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля определяется согласно формуле 4.9:

$$l = \sqrt{\frac{\pi D_{\text{тр}} v_{\text{ср}} t}{14,97 - \frac{\pi}{2,3}}}, \quad (4.9)$$

Согласно формуле 4.9 и коэффициенту соотношения продольного и поперечного размера отклоняющего гидродинамического профиля определены размеры отклоняющего гидродинамического профиля (Приложение В).

На основании полученных значений объема рабочей камеры (Приложение В) при условии постоянства величины коэффициента соотношения габаритов N^* , сформирован ряд значений, определяющих продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля l . Изменение продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля находится в линейной зависимости от высоты рабочей камеры.

Результаты вычислений, представленные в Приложении В, позволили построить графики, отражающие зависимость продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля от высоты рабочей камеры инерционного сгустителя $l = f(H)$ (рисунок 4.3).

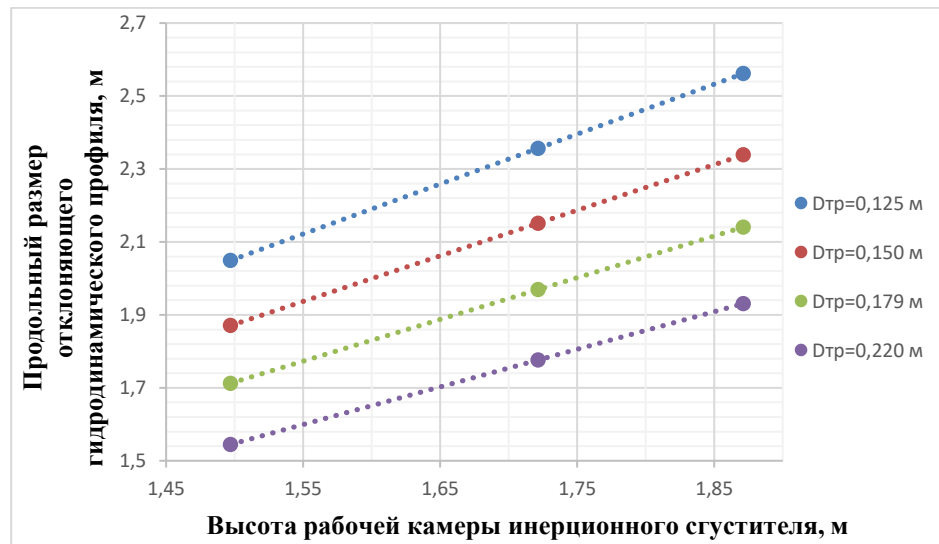


Рисунок 4.3 – Распределение значений продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля в зависимости от высоты рабочей камеры

Анализ результатов вычислений при заданных начальных условиях, позволил сформулировать закон роста длины продольного габарита отклоняющего профиля в корреляции с увеличением высоты рабочей камеры инерционного сгустителя (рисунок 4.3).

Исследование полученных результатов позволило определить классы (4.10), формирующие типоразмерный ряд. Распределение по классам выполнено основываясь на правиле Штюргеса [138]:

$$m = 1 + 3,324 \log(n), \quad (4.10)$$

где m – количество классов, n – количество итераций.

При $n = 12$:

$$m = 1 + 3,324 \log(12) \approx 5$$

В качестве интервала варьирования продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля принят диапазон значений 1,5-2,6 м, при котором шаг варьирования рассчитывается по формуле 4.11:

$$t = \frac{B_{max} - B_{min}}{k}, \quad (4.11)$$

$$t = \frac{2,6 - 1,5}{4} = 0,22$$

В результате выполнения исследований, полученные значения продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля распределены по классам, в каждом из которых рассчитано количество попадающих в данный интервал значений (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Распределение значений продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля в заданном интервале

$l, \text{ м}$	1,5-1,72	1,72-1,94	1,94-2,16	2,16-2,38	2,38-2,6
n	2	3	4	2	1

По данным, представленным в таблице 4.1, построена гистограмма распределения значений ширины рабочей камеры инерционного сгустителя (рисунок 4.4).

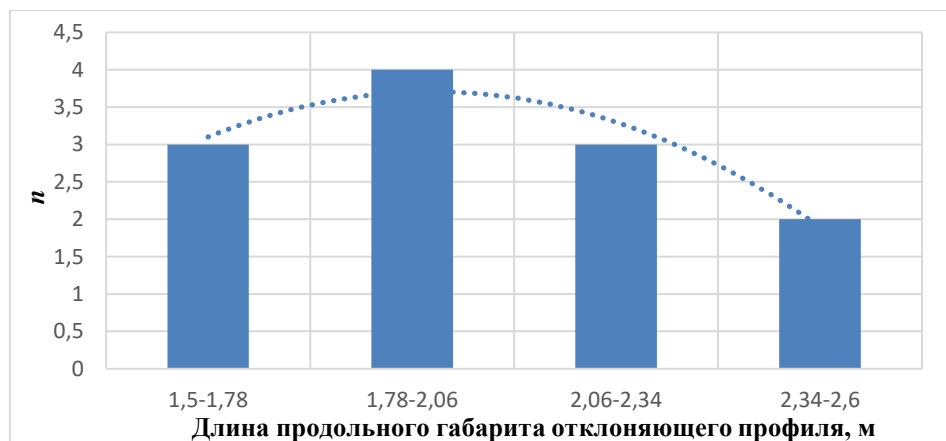


Рисунок 4.4 – Распределение значений продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля в зависимости от класса варьирования

При аппроксимации распределения значений продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля получено уравнение кривой 4.12:

$$n = -0,5l^2 + 2,1l + 1,5, \quad (4.12)$$

$$R^2 = 0,9,$$

Исследовав распределение полученных значений, можно сделать вывод, что связь между всеми возможными значениями продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля и n носит полиномиальную зависимость второй степени [133-134].

Линейное уравнение регрессии 4.12 принимает вид 4.13 при введении параметров:

$$n = al^2 + bl + c, \quad (4.13)$$

где a , b и c – оценки параметров регрессионной модели.

Оценка параметров регрессионной модели выполнена с применением метода наименьших квадратов (4.14) [76]:

$$\begin{cases} a \sum l_i^4 + b \sum l_i^3 + c \sum l_i^2 = \sum l_i^2 n_i \\ a \sum l_i^3 + b \sum l_i^2 + c \sum l_i = \sum l_i n_i, \\ a \sum l_i^2 + b \sum l_i + cm = \sum n_i \end{cases} \quad (4.14)$$

Коэффициенты системы (4.13):

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 l_i &= 8,23, \quad \sum_{i=1}^4 l_i^2 = 17,32, \quad \sum_{i=1}^4 l_i^3 = 37,21, \quad \sum_{i=1}^4 l_i^4 = 81,47, \\ \sum_{i=1}^4 n_i &= 12, \quad \sum_{i=1}^4 l_i \cdot n_i = 24,14, \quad \sum_{i=1}^4 l_i^2 \cdot n_i = 49,54 \end{aligned}$$

Интеграция известных коэффициентов системы в систему уравнений 4.14 принимает следующий вид (4.15):

$$\begin{cases} 81,47a + 37,21b + 17,31c = 49,54 \\ 37,21a + 17,32b + 8,23c = 24,14, \\ 17,32a + 8,23b + 4c = 12 \end{cases} \quad (4.15)$$

При помощи метода Крамера определены коэффициенты регрессии:

$$\begin{cases} a = 0,33 \\ b = -2,86 \\ c = 7,45 \end{cases}$$

На основании полученных коэффициентов уравнение регрессии принимает вид (4.16):

$$n = 0,33l^2 - 2,86l + 7,45, \quad (4.16)$$

Величина линейного индекса корреляции (4.17) определялась согласно выражению [76]:

$$R = \sqrt{\frac{\sum \bar{n} \bar{l} - \sum \bar{n} \cdot \sum \bar{l}}{\sigma_B \cdot \sigma_n}}, \quad (4.17)$$

Анализ итоговых значений позволил определить линейный коэффициент корреляции и индекс детерминации, которые равны $|R| = 0,99$ и $R^2 = 0,99$ соответственно. Это подтверждает адекватность выполнения аппроксимации данных согласно предложенной зависимости. Полученная величина указывает на значительное влияние фактора продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля инерционного сгустителя на n .

Ключевым статистическим показателем динамики ряда является абсолютный прирост, который рассчитывается сравнением двух уровней ряда динамики в исходных единицах

измерения. Темп прироста выступает важным показателем, так как он характеризует соотношение двух уровней ряда.

Результаты оценки цепных показателей ряда динамики представлены в таблице. Для этого каждый последующий уровень ряда сравнивался с предыдущим, что и позволило определить показатели динамики, сведенные в таблицу 4.2 [142].

Таблица 4.2 – Цепные показатели ряда динамики

Номер класса	Выборка значений	Предельное значение продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля, м	Абсолютный прирост	Темп прироста, %	Темп роста, %
1	3	1,78	-	-	100
2	4	2,06	2,06	15,73	15,73
3	3	2,34	2,34	13,59	13,59
4	2	2,6	2,6	11,11	11,11

Исследование темпа прироста демонстрирует убывающий тренд, что указывает на замедление увеличения продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля. В классе 4 по сравнению с классом 1 ширина рабочей камеры увеличилась на 0,82 м, что эквивалентно 46%.

В ходе параметрического синтеза обозначены основные параметры, оказывающие влияние на работу инерционного сгустителя: производительность инерционного сгустителя по сгущенной смеси, входной скорости первичной гидросмеси, а также высота и ширина рабочей камеры инерционного сгустителя. Ширина рабочей камеры инерционного сгустителя напрямую зависит от диаметра подводящего трубопровода. В свою очередь высота рабочей камеры инерционного сгустителя зависит от длины рабочей камеры инерционного сгустителя и размеров отклоняющего гидродинамического профиля.

Размер отклоняющего гидродинамического профиля напрямую зависит от диаметра подводящего трубопровода, в котором формируется смесь с расходом, относительно которого необходимо корректировать размеры отклоняющего гидродинамического профиля. Помимо диаметра подводящего трубопровода размеры отклоняющего гидродинамического профиля зависят от высоты рабочей камеры инерционного сгустителя, обеспечивающей осаждение дисперсной фазы на дно рабочей камеры. Продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля в первую очередь оказывает влияние на содержание дисперсной фазы в сгущенном потоке, а концентрация формируемой сгущенной смеси обосновывает эффективность работы инерционного сгустителя. Таким образом, основываясь на полученных результатах (Приложение В) построена номограмма определения размера отклоняющего гидродинамического профиля (рисунок 4.5).

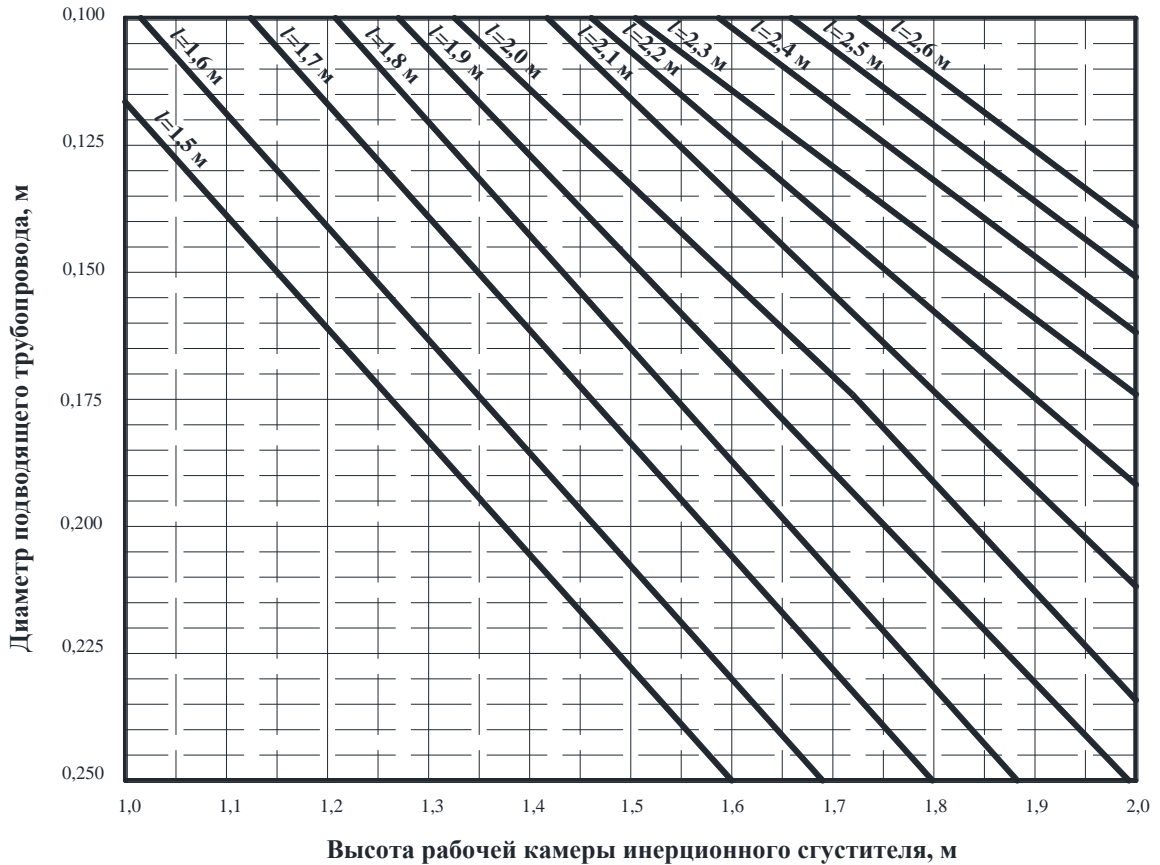


Рисунок 4.5 – Номограмма для определения продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля

На основании известного диаметра подводящего трубопровода $D_{\text{тр}}$ и высоты рабочей камеры инерционного сгустителя H , допустимой для размещения в выработанном пространстве, определяется значение продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля l по номограмме (рисунок 4.5). Продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля по номограмме и высота рабочей камеры инерционного сгустителя позволят определить оставшиеся размеры инерционного сгустителя по известным соотношениям (4.18):

$$\begin{cases} l = 2,3 \cdot k \\ A = 1,67 \cdot H, \\ B = 2 \cdot D_{\text{тр}} \end{cases} \quad (4.18)$$

4.2 Рекомендации по интеграции инерционного сгустителя

Соотношение вертикальной и горизонтальной составляющих участков закладочных трубопроводов определяет величину геодезического напора потока закладочной смеси, обуславливая предельную дальность транспортирования. При перемещении на горизонтальном участке трубопровода наблюдается падение напора, и смесь имеет тенденцию к расслоению за счет снижения скорости потока ниже критических значений, приводя к неизбежному

изменению реологических характеристик [125, 139]. При подготовке закладочной смеси, содержание дисперсной фазы определяется дальностью расположения закладываемого участка на этапе смешивания компонентов. Обеспечиваемая уменьшением содержания дисперсной фазы подвижность гидросмеси становится причиной увеличения времени достижения нормативной прочности формируемым закладочным массивом. Дополнительно это приводит к необходимости выполнения работ по отводу избыточной жидкости и ее дальнейшей утилизации. Модернизация технологической цепочки оборудования закладочного комплекса осуществляется за счет интегрирования разработанного инерционного сгустителя в трубопроводную систему (рисунок 4.6) [30, 31, 32]. Сгущение гидросмеси на финальных этапах транспортирования позволит увеличить дальность подачи закладочных смесей низкой концентрации и снизить обводненность выработок за счет реализации системы оборотного водоснабжения [30]. Применение же традиционных сгустителей ограничивается их громоздкостью и невысокой скоростью работы, что потребует внесения существенных изменений в процесс ведения работ по закладке [38, 40, 41].

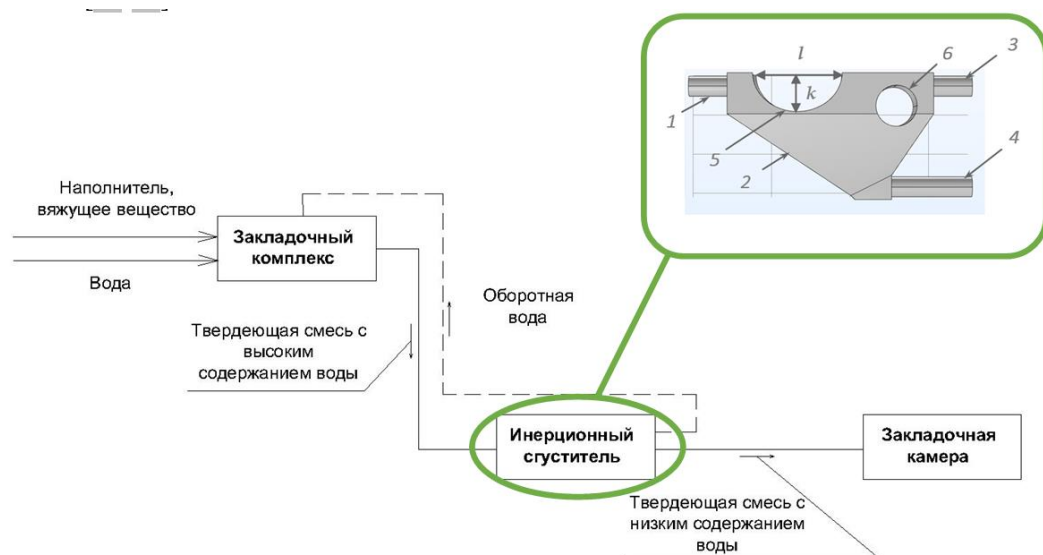


Рисунок 4.6 – Технологическая схема гидротранспорта закладочных смесей со сгущением на финальном участке транспортирования: 1 – впускной патрубок; 2 – рабочая камера; 3 – выпускной патрубок осветленного потока несущей среды; 4 – выпускной патрубок сгущенной смеси; 5 – главный отклоняющий гидродинамический профиль; 6 – цилиндрический гидродинамический профиль; l – продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля; k – поперечный размер отклоняющего гидродинамического профиля

На финальном участке транспортирования, непосредственно перед поступлением в выработанное пространство, гидравлическая смесь с высоким содержанием несущей фазы поступает в инерционный сгуститель. Его конструкция представляет собой рабочую камеру – 2,

в которой установлены два гидродинамических профиля. Гидравлическая смесь через впускной патрубок – 1 поступает в рабочую камеру, где происходит ее аккумуляция и осаждение. При поступлении в рабочую камеру частицы дисперсной фазы гидравлической смеси сталкиваются с отклоняющим гидродинамическим профилем – 5 и осаждаются на дно под действием инерционных и гравитационных сил. Оставшиеся во взвешенном состоянии частицы осаждаются после взаимодействия с цилиндрическим гидродинамическим профилем – 6. В нижней части камеры образуется слой сгущенной смеси, который движется в сливной патрубок, откуда поступает при помощи магнитного перистальтического насоса в выработанное пространство [29, 90]. Осветленный поток несущей среды направляется на слив или в оборотную систему водоснабжения горного предприятия [38, 39].

Использование инерционного принципа сгущения обусловлено необходимостью реализации непрерывной технологии подачи закладочного материала, а также компактностью размеров оборудования. Оборудование не требует подключения к системе электроснабжения и, используя исходную гидравлическую смесь, позволяет сгустить ее до концентрации около 50% [12]. Конструкция сгустителя предусматривает отведение осветленной воды по отдельному каналу для последующего использования ее в нуждах производства. При отсутствии возможности реализовать систему оборотного водоснабжения, отводимая осветленная вода может поступать в водоотливные канавки.

4.3 Оценка капитальных и эксплуатационных затрат при внедрении инерционного сгустителя в трубопроводную систему закладочного комплекса.

Технико-экономические мероприятия представлены двумя составляющими: капитальными и эксплуатационными затратами. В случае капитальных затрат они представлены: стоимостью оборудования и его транспорта до предприятия, стоимостью монтажных работ для оборудования, а также прочие затраты, составляющие 2%-4% от суммы стоимости оборудования и монтажных работ.

- Капитальные затраты

Капитальные затраты рассчитываются по формуле 4.19:

$$CI = C_{ba} + C_{tr} + C_{as} + C_{ex}, \quad (4.19)$$

где C_{ba} – стоимость инерционного сгустителя, руб; $C_{tr}=60\,000$ – затраты на транспортировку оборудования, руб (данные затраты входят в стоимость оборудования); $C_{as}=100\,000$ – затраты на монтаж и пусконаладочные работы, руб; C_{ex} – прочие затраты, руб.

$$CI(ст) = 152\,604 + 60\,000 + 100\,000 + 0,03 \cdot (152\,604 + 60\,000 + 100\,000) = 321\,982,12 \text{ руб}$$

$$CI(пол) = 225\,504 + 60\,000 + 100\,000 + 0,03 \cdot (225\,504 + 60\,000 + 100\,000) = 397\,069 \text{ руб}$$

- Эксплуатационные затраты

Эксплуатационные затраты – затраты на эксплуатацию и обслуживание оборудования на протяжении его рабочего периода, после сдачи в эксплуатацию, определяются по формуле:

$$TC_t = C_{ep} + C_s + C_{ic} + C_d + C_0, \quad (4.20)$$

где C_{ep} – затраты на электроэнергию, руб; C_s – заработная плата, руб; C_{ic} – страховые взносы, руб; C_d – амортизационные отчисления, руб; C_0 – прочие расходы, руб.

Затраты на электроэнергию определяются по формуле:

$$C_{ep} = R_{ep} t P N, \quad (4.21)$$

где R_{ep} – тариф на электроэнергию, руб/кВт час; $t = 24 \cdot 365 = 8760$ – эффективный фонд времени работы оборудования, час; P – мощность оборудования, кВт·час; N – количество единиц оборудования, шт.

$$C_{ep} = 0 \text{ руб}$$

Расчет расхода потребляемой электроэнергии для инерционного сгустителя не требуется на основании движения гидросмеси под действием собственного веса самотеком.

Заработная плата определяется по формуле:

$$C_s = SP T N, \quad (4.22)$$

где SP – оклад, руб; T – период работы, мес; N – численность персонала, чел.

$$C_s = 0 \text{ руб}$$

(т. к. дополнительные рабочие на месторождение наниматься не будут)

Страховые взносы – неналоговый сбор, который обязаны уплачивать все организации, а также ИП в РФ, определяется по формуле:

$$C_{ic} = C_s R_{ic}, \quad (4.23)$$

где $R_{ic} = 0,312$ – ставка на страховые взносы, доли.

$$C_{ic} = 0 \text{ руб}$$

Амортизационные отчисления – отчисления части стоимости основных фондов для возмещения их износа, определяется по формуле.

$$C_d = C_{ba} R_d, \quad (4.24)$$

где $R_d = 0,2$ – норма амортизации.

$$C_{d.ст} = 152\,604 \cdot 0,2 = 30\,520,8 \text{ руб}$$

$$C_{d.пол} = 225\,504 \cdot 0,2 = 45\,100,8 \text{ руб}$$

Прочие расходы определяются по формуле:

$$C_0 = (C_{ep} + C_s + C_{ic}) \cdot R_0, \quad (4.25)$$

где $R_0 = 0,03$ – ставка на прочие расходы (составляет 3% от суммы эксплуатационных затрат).

$$C_0 = 0 \text{ руб}$$

$$TC_{\text{тст}} = 30\,520,8 \text{ руб}$$

$$TC_{\text{пол}} = 45\,100,8 \text{ руб}$$

В прочие расходы необходимо включить затраты на ремонт оборудования, представленное собой заменой элементов рабочих поверхностей.

Для определения периодичности ремонта, необходимо определить время, через которое материал изнашивается до половины толщины исходной детали [13, 73, 92].

Для определения времени изнашивания, взяты наиболее подверженные изнашиванию поверхности:

- 1 – поверхность отклоняющего гидродинамического профиля;
- 2 – боковая поверхность рабочей камеры инерционного сгустителя;
- 3 – дно рабочей камеры инерционного сгустителя.

На каждой поверхности выделена квадратная площадка 0,05x0,05м под каждой расчетной точкой с толщиной материала 10 мм для исследования процесса гидроабразивного изнашивания материала (таблица 4.3). Для каждой поверхности определен объем рассматриваемой площадки и масса формирующего площадку материала.

Таблица.4.3 – Характеристики расчетных площадок

Поверхность	Изнашиваемый материал площадки	Объем материала на исследуемой площадке, м ³	Плотность материала, кг/м ³	Масса материала площадки, кг	Допустимая масса изношенного материала, кг	Интенсивность изнашивания поверхности под РТ, кг/с*10 ⁻⁹
1	сталь	0,000025	7850	0,2	0,1	154
2	сталь		7850	0,2	0,1	35
3	сталь		7850	0,2	0,1	30
1*	сталь+полиуретан	0,000125+0,000025	1200/7850	0,015/0,2	0,015/0,1	92/154
2*	сталь+полиуретан		1200/7850	0,015/0,2	0,015/0,1	16/35
3*	сталь+полиуретан		1200/7850	0,015/0,2	0,015/0,1	5/30

Расчетные значения времени изнашивания материалов, приводящего к ремонтным работам:

$$T_i = \frac{M_{\text{изн}}}{I_{\text{изн}}}, \quad (4.26)$$

$$T_1 = \frac{0,1}{154 \cdot 10^{-9}} = 180 \text{ ч}$$

$$T_2 = \frac{0,1}{35 \cdot 10^{-9}} = 794 \text{ ч}$$

$$T_3 = \frac{0,1}{30 \cdot 10^{-9}} = 926 \text{ ч}$$

$$T_{1*} = \frac{0,015}{92 \cdot 10^{-9}} + \frac{0,1}{154 \cdot 10^{-9}} = 226 \text{ ч}$$

$$T_{2*} = \frac{0,015}{16 \cdot 10^{-9}} + \frac{0,1}{35 \cdot 10^{-9}} = 1054 \text{ ч}$$

$$T_{3*} = \frac{0,015}{5 \cdot 10^{-9}} + \frac{0,1}{30 \cdot 10^{-9}} = 1759 \text{ ч}$$

На основании полученных данных в Таблицу 4.4 внесено количество ремонтных работ, необходимых для восстановления поверхностей рабочей камеры инерционного сгустителя.

Таблица 4.4 – Таблица ремонтных работ

Поверхность	Периодичность ремонта, ч	Количество ремонтных работ за 1 год	Площадь заменяемого материала, м ²	Количество листов по 9м ² для ремонта
1	180	49	109,3	13
2	794	11	17,5	2
3	926	10	35,4	4
Итого:		70	162,2	19
1*	226	39	87	10
2*	1054	9	14,3	2
3*	1759	5	17,7	2
Итого:		53	119	14

Для обеспечения эффективного функционирования инерционного сгустителя ежегодно необходимо осуществлять закупку a количества стальных/полиуретановых листов.

Затраты на закупку материала для ремонтных работ определяется из выражения:

$$P_{\text{н.ст.л}} = P_{\text{ст}} S_{\text{листа}} a, \quad (4.27)$$

$$P_{\text{н.ст}} = 5652 \cdot 9 \cdot 19 = 966\,492 \text{ руб}$$

$$P_{\text{н.пол}} = 8352 \cdot 9 \cdot 14 = 756\,000 \text{ руб}$$

Основываясь на полученных результатах применение инерционного сгустителя на производстве сопровождается капитальными затратами в 322 тыс.руб, представленными стоимостью оборудования, его транспортировкой до предприятия и монтаж в существующую гидротранспортную систему, а также дополнительными расходами. Помимо капитальных затрат, использование инерционного сгустителя сопровождается эксплуатационными затратами составляющими 30,5 тыс. руб. Однако при постоянном применении инерционного сгустителя на месторождении, основные расходы представлены ремонтными работами, а именно закупкой материала для замены изношенных рабочих поверхностей. Для оценки затрат на ремонтные работы рассматривались две конструкции: стальная и стальная с полиуретановым покрытием. Расчет затрат показал, что капитальные и эксплуатационные затраты на инерционный сгуститель с полиуретанов покрытием на 23% и 50% соответственно выше по отношению к стальной конструкции. Однако затраты на ремонтные работы при сокращении площадей, требующих замены, сократились на 22% ежегодно, что составляет 210 тыс.руб/год.

4.4 Выводы по главе 4

В данной главе проведен параметрический синтез параметров, влияющих на концентрацию получаемой закладочной смеси на выпускном патрубке рабочей камеры инерционного сгустителя. Разработаны рекомендации, позволяющие определить значения основных конструктивных параметров инерционного сгустителя отклоняющего гидродинамического профиля рабочей камеры инерционного сгустителя, обеспечивающих формирование потока сгущенной закладочной смеси с концентрацией 50% при изменении диаметра подводящего трубопровода и высоты рабочей камеры инерционного сгустителя.

В ходе параметрического синтеза осуществлялось варьирование подводящего трубопровода от 125 мм до 220 мм для определения расхода гидросмеси в трубопроводе, высоты, ширины и длина рабочей камеры инерционного сгустителя, а также времени накопления смеси в ней, позволяющие в дальнейшем определить продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля. Анализ результатов вычислений, позволил сформулировать закон роста продольный размера отклоняющего гидродинамического профиля в корреляции с увеличением высоты рабочей камеры инерционного сгустителя. Продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля напрямую зависит от диаметра подводящего трубопровода, в котором формируется смесь с расходом, относительно которого необходимо корректировать габариты отклоняющего профиля. Таким образом, основываясь на полученных результатах параметрического синтеза и анализа, построена номограмма определения значения продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля. На

основании известного диаметра подводящего трубопровода и высоты рабочей камеры инерционного сгустителя, допустимой для размещения в выработанном пространстве, номограмма позволяет определить продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля, для дальнейшего определения оставшихся размеров инерционного сгустителя по установленным соотношениям.

Произведено технико-экономическое обоснование внедрения инерционного сгустителя в технологическую цепочку закладочных работ. Основной целью данного расчета было определить экономические затраты на изготовление и использование инерционного сгустителя. Для этого были просчитаны такие параметры, как капитальные затраты, годовые эксплуатационные затраты, экономия средств за счет уменьшения количества ремонтных работ в год с уменьшением объемов требуемого материала для ремонтных работ.

Технико-экономическое обоснование применения инерционного сгустителя производилось для стальной конструкции и конструкции с полиуретановым покрытием. Стоимость оборудования из стали, за счет меньшей стоимости материала рабочих поверхностей по отношению к полиуретановому покрытию, ниже, чем при использовании футеровочных материалов, что имеет противоположную зависимость по отношению к эксплуатационным затратам. Снижение годовых эксплуатационных расходов наблюдается при уменьшении количества ремонтных работ за счет снижения интенсивности гидроабразивного изнашивания при применении футеровки поверхности полиуретановым покрытием. Количество ремонтных работ определялось исходя из интенсивности изнашивания рабочих поверхностей и материала поверхности. Таким образом, применение инерционного сгустителя с полиуретановым покрытием является экономически более выгодным для предприятия и его внедрение может повлиять на оптимизацию затрат и повышение эффективности производственного процесса.

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 содержанием 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов, О.В. Методы и алгоритмы параметрического синтеза стохастических систем / О.В. Абрамов // Проблемы управления. – 2006. – №4. С.3-8.
2. Авксентьев, С.Ю. Определение параметров гидротранспорта хвостов обогащения железной руды Качканарского ГОКа / С.Ю. Авксентьев, С.Л. Сержан, И.С. Труфанова. – М.: Издательство «Горная книга», 2018. – 16 с.
3. Аглюков, Х.И. Совершенствование технологии закладочных работ / Х.И. Аглюков // Горный журнал. – 2003. – №1. – С. 35-39.
4. Айнбиндер, И.И. К вопросу классификации технологий и составов закладки / И.И. Айнбиндер, И.Н. Савич, О.И. Савич // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – №1. – С.186-195.
5. Александров, В.И. Гидротранспорт сгущенных хвостов обогащения железной руды на Качканарском ГОКе по результатам опытно-промышленных испытаний системы гидротранспорта / В.И. Александров, М.А. Васильева // Записки Горного института. – 2018. – № 233. – С. 471. DOI: 10.31897/pm.2018.5.471.
6. Александров, В.И. Удельная энергоемкость гидравлического транспортирования продуктов переработки минерального сырья / В.И. Александров, И. Собица // Записки Горного института. – 2015. – № 213. – С. 9-16.
7. Аллабердин, А.Б. Способ закладки выработанного пространства при восходящем порядке отработки рудных залежей / А.Б. Аллабердин // Успехи современного естествознания. – 2021. – №2. – С. 64-69. DOI: 10.17513/use.37575.
8. Анушенков, А.Н. Производство закладочных работ на примере Таштагольского подземного рудника / А.Н. Анушенков – Красноярск: СФУ, 2016. – 137с.
9. Анушенков, А.Н. Подземная геотехнология. / А.Н. Анушенков, Б.А. Ахпашев, Е.П. Волков, – Красноярск: СФУ, 2017. – 304 с.
10. Анушенков, А.Н. Основы процессов производства и транспортирования закладочных смесей при подземной разработке месторождений полезных ископаемых / А.Н. Анушенков, А.Ю. Стовманенко, Е.П. Волков – Красноярск:СФУ, 2015. – 208с.
11. Ариоглу, Э. Разработка месторождений с закладкой / Э. Ариоглу, Лю Кэчжень, Сунь Кайнянь и др. – М.: Мир, 1987. – 519 с.
12. Атрощенко, В.А. Влияние модернизации линейного участка гидротранспортной системы горного предприятия на энергоемкость 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.

13. 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.
14. Байконуров, О.А. Подземная разработка месторождений с закладкой / О.А. Байконуров, Л.А. Крупник, В.А. Мельников. – Акад. наук Казах.ССР, Казах. политехн. ин-т им. В. И. Ленина. – Алма-Ата: Наука, 1972. – 384 с.
15. Балах, Р.В. Разработка месторождений с закладкой хвостами обогащения / Р.В. Балах. – Акад. наук Казах.ССР, Ин-т горного дела. – Алма-Ата: Наука, 1977. – 231 с.
16. Бейсебаев, А.М. Горно – геологический справочник по разработке рудных месторождений / А.М. Бейсебаев, М.Ж. Битимбаев, Д.Г. Букейханов и др. – Том I, Алматы, 1997. – 581 с.
17. Белоусов, А.С. Оптимизация закладочных работ на урановых рудниках ПАО "ППГХО" / А.С. Белоусов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 8. – С. 17-20.
18. Бендерович, В.А. Ламинарные насосы и новые технологические возможности / В.А. Бендерович, Э.Д. Лунаци, А.В. Ноздрин, А.Е. Шеина // Экспозиция Нефть Газ. – 2016. – № 3(49). – С. 44-47.
19. Бердиева, Д.Х. К вопросу снижения себестоимости закладочных работ при системе разработки горизонтальными слоями с закладкой / Д.Х. Бердиева // Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences. – 2021. –Т. 1, № 4. – С. 674-679.
20. Битимбаев, М.Ж. Теория и практика закладочных работ при разработке месторождений полезных ископаемых/ М.Ж. Битимбаев, Л.А. Крупник, Ю.Н. Шапошник – Алматы, 2012. – 624 с.
21. Богданов, М.Н. Техническое перевооружение и модернизация горного производства ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель» / М.Н. Богданов / Записки Горного института. – 2005. – Т. 164. – С.92-94.
22. Боголюбов, А.А. Опыт применения комбинированной системы разработки и показатели работы крупнейших рудников за рубежом / А.А. Боголюбов, Л.А. Ермолаева. – М.: ЦНИИ ЭИИ, 1991. – 53 с.
23. Братченко, Б.Ф. Машины и оборудование для проведения горизонтальных и наклонных горных выработок / Б.Ф. Братченко, Н.К. Гринько, Д.И. Малиованов и др. – М.: Недра, 1975. – 415 с.

24. Бреннан, Дж.Р. Высокоэффективные винтовые насосы Colfax corporation: allweiler, houttuin, imo, warren, zenith / Дж.Р. Бреннан // Экспозиция нефть газ. – 2009. – Т 3. – С. 38-40.
25. Бронников, Д.М. Основы технологии подземной разработки рудных месторождений с закладкой / Д.М. Бронников, Н.Ф. Замесов, Г.С. Кириченко, Г.И. Богданов. – М.: Недра, 1973. – 200 с.
26. Бронников, Д.М. Закладочные работы в шахтах / Д.М. Бронников, М.Н. Цыгалов. – М.: Недра, 1989. – 401 с.
27. Васильев, А.Л. Применение гидравлической закладки на основе твердеющих смесей из отходов калийного производства / А.Л. Васильев, М.А. Васильева // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2015. – № 1. – С. 224-227.
28. Васильева, М.А. Обоснование параметрического и типоразмерного рядов магнитных перистальтических насосных агрегатов / М.А. Васильева // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 12-2. – С. 70-86. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_70.
29. 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. – СПб. Изд. ИП Жукова Е.В. – 2022. – № 15. – С. 93-98. DOI: 10.26160/2658-3305-2022-15-93-98.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. Васильева, М.А. Мультифизическая модель течения гетерогенного потока при движении по каналу переменного сечения / М.А. Васильева, С. Фёйт // Записки Горного института. – 2017. – Т. 227. – С. 558-562. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.558.

34. Волков, Е.П. Разработка технологии закладки горных выработок литыми твердеющими смесями на основе хвостов обогащения: монография / Е.П. Волков, А.Н. Анушенков, 2020. – 172 с.
35. Волков, Е.П. Разработка рецептур и механизма активации закладочных смесей для подземной разработки полезных ископаемых с использованием хвостов обогащения / Е.П. Волков, С.А. Вохмин, А.Н. Анушенков, А.И. Голованов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и Технологии. – 2014. – Т.7, №3. – С. 295-303.
36. Волощенко, В.П. Передовой опыт применения твердеющей закладки при добыче железных руд. По материалам межруднич. школы / В.П. Волощенко, В.М. Горюнов, В.П. Драгунов и др. – М.: Ин-т "Черметинформация", 1979. – 53 с.
37. **Волчихина, А.А.** Оборудование и технологии для проведения работ по дозакладке выработанного пространства // В сборнике: VIII Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021». Секция «Круглый стол молодых ученых», Санкт-Петербург. – 2021. – С. 33-36.
38. **Волчихина, А.А.** Комплексный подход увеличения длины транспортирования твердеющей закладочной смеси / А.А. Волчихина, М.А. Васильева // В сборнике: 19-я Международная конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики, Тула. – 2023. – С. 104-110.
39. **Волчихина, А.А.** Моделирование функционирования инерционного сгустителя / А.А. Волчихина, М.А. Васильева // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк. – №3 – 2022. – С. 9 – 14.
40. **Волчихина, А.А.** Оборудование для дозакладочных работ / А.А. Волчихина, М.А. Васильева // В сборнике: XVI Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные вопросы недропользования», Санкт-Петербург. – 2022. – С. 14-17.
41. **Волчихина, А.А.** Обоснование повышения концентрации отходов обогащения и применения эффективного насосного оборудования для работы закладочного комплекса / А.А. Волчихина, М.А. Васильева // В сборнике: 10-я Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Опыт прошлого – взгляд в будущее», – Тула. – 2020. – С. 85-89.
42. Вяткин, А.П. Твердеющая закладка на рудниках / А.П. Вяткин, В.Г. Горбачев, В.А. Рубцов. – М.: Недра, 1983. – 168 с.
43. Голик, В.И. Инновационная технология приготовления твердеющих смесей / В.И. Голик, В.И. Комащенко // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2008. – С.92-97.

44. Голик, В.И. Использование вяжущих на основе металлургических шлаков в составе закладочных смесей / В.И. Голик, Ч.Б. Конгар-Сюрюн, Ю.С. Тюляева, А.М. Хайрутдинов // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2020. – № 4. – С. 389-400.
45. Голик, В.И. Обоснование возможности и целесообразности использования хвостов обогащения руд для изготовления твердеющих смесей / В.И. Голик, В.Г. Лукьянов, З.М. Хашева // Известия ТПУ. – 2015. – № 5. – С. 6-14.
46. Голик, В.И. Комбинированная доставка твердеющих смесей на удаленные участки месторождений / В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, Б.В. Дзеранов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – Т.122, №4. – С. 14-19. DOI: 10.26730/1999-4125-2017-4-14-19.
47. Голик, В.И. Повышение эффективности добычи руд на основе комбинирования традиционных и инновационных технологий / В.И. Голик, Т.С. Цидаев, Б.С. Цидаев // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – №4. – С. 11-18.
48. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 10 с.
49. ГОСТ Р 58766-2019. Растворы строительные. Общие технические условия – М.: Изд-во стандартов, 2022. – 15 с.
50. ГОСТ Р 58767-2019. Растворы строительные. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 2022. – 19 с.
51. Гузанов, П.С. Закладочные смеси на основе отходов обогащения руд в системах подземной разработки месторождений Норильского промышленного района / П.С. Гузанов, А.Э. Лытнева, А.Н. Анушенков, Е.П. Волков// Горный журнал. – 2015. – №6. – С.89-95. DOI: 10.17580/gzh.2015.06.17.
52. Гухман, А.А. Введение в теорию подобия / А.А. Гухман. – М.: Машиностроение, 1973. – 296 с.
53. Давыдов, Ю.Н. Технология подземных горных работ / Ю.Н.Давыдов. – Караганда, 2008. – 116 с.
54. Демидов, Ю.В. Подземная разработка мощных рудных залежей / Ю.В. Демидов, В. Н. Аминов. – М.: Недра, 1991. – 204 с.
55. Дмитрак, Ю.В. Эффективность вибротранспортирования материалов / Ю.В. Дмитрак // Научный вестник ЮИМ. – 2017. – № 4. – С. 24-29.
56. Еременко, А.А. Особенности освоения железорудных месторождений Горной Шории / А.А. Еременко, В.Н. Филиппов, С.М. Никитенко, Е.А. Христолюбов // ФТПРПИ. – 2017. – № 5. – С. 79-95.

57. Ермолин, Д.С. Гидродинамические характеристики пульп хвостов обогащения железных руд АО «ЕВРАЗ КГОК» / Д.С. Ермолин, М.А. Васильева // В сборнике: Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы 17-й Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики, Тула. – 2021. – С. 553-557.
58. Зубов, В.П. Повышение полноты закладки выработанных пространств при слоевых системах разработки Яковлевской залежи / В.П. Зубов, А.А. Антонов, Ю.Н. Луговский и др. // Записки Горного института. – 2010. – Т.185. – С. 25-30.
59. Ильинов, М.Д. Исследование возможности применения акрилатов в качестве заполнителя кейлькранца при разработке соляных толщ на больших глубинах / М.Д. Ильинов, Д.Н. Петров, Е.В. Колонтаевский и др. // Горный журнал. – 2023. – №.8. – С. 77-87. DOI: 10.17580/gzh.2023.08.10.
60. Информационно-аналитический обзор технико-экономических показателей горнорудных предприятий. Часть 1. Производство, поставки, запасы. – М.: ОАО «РУДПРОМ», 2016.
61. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 25-2021 «Добыча и обогащение железных руд». – М.: ОАО «РУДПРОМ», 2021.
62. Каплунов, Д. Р. Перспективы развития технологии закладки выработанного пространства при подземной разработке рудных месторождений / Д.Р. Каплунов, М.В. Рыльникова, Д.Н. Радченко // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 12. – С. 5–10.
63. Кирсанов, Е.А. Неньютоновское течение дисперсных, полимерных и жидкокристаллических систем. Структурный подход / Е.А. Кирсанов, В.Н. Матвеев. – М.: Техно-сфера, 2016. – 384 с.
64. Ковальский, Е.Р. Разработка технологии закладки выработанного пространства при выемке / Е.Р. Ковальский, К.В. Громцев // Записки Горного института. – 2022. – Т.254. – С. 202-209. DOI: 10.31897/PMI.2022.36.
65. Коликов, К. С. Закладка выработанного пространства как способ снижения негативного экологического воздействия при подземной угледобыче / К.С. Коликов, И.Э. Мазина, А.Г. Урузбиева // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 5. – С. 252-259.
66. Кравченко, В.П. Применение твердеющей закладки при разработке рудных месторождений / В.П. Кравченко, В.В. Куликов. – М.: Недра, 1974. – 200 с.
67. Кремер, Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика / Н.Ш. Кремер. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 573 с.

68. Кротков, В.В. Особенности процесса гидрозакладки выработанного пространства алмазосодержащих трубок камерными питателями / В.В. Кротков // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2000. – № 5. – С. 92-94.
69. Крупник, Л.А. Закладочные смеси высокой плотности, их свойства и перспективы применения / Л.А. Крупник, Г.В. Соколов // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2005. – №13. – С. 237-240.
70. Крупник, Л. А. Технология закладочных работ на горнодобывающих предприятиях Республики Казахстан / Л.А. Крупник, Ю.Н. Шапошник, С. Н. Шапошник и др. // ФТПРПИ. – 2013. – № 1. – С. 95-105.
71. Кузьмин, Е.В. Варианты систем подземной разработки с закладкой для Малеевского месторождения / Е.В. Кузьмин, Н.Н. Григорьева // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2000. – №8. – С. 173-174.
72. Кузьмин, Е.В. Сгущение отходов переработки урановых руд с получением пасты для подземного размещения / Е.В. Кузьмин, В.С. Святецкий, В.В. Марковец // Горный журнал. – 2018. – № 7. – С. 73-77. DOI: 10.17580/gzh.2018.07.14.
73. 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.
74. Лаутербах, Т. Закладка подземных пустот с помощью поршневых насосов / Т. Лаутербах // Глюкауф. – 2006. – Т.3, № 2. – С. 40-44.
75. Левкин, Ю.С. Влияние вибрационных ускорений 3g и 4g на дисперсную структуру низко и среднечастотных колебаний / Ю.С. Левкин, И.А. Лушкин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2015. – Т. 14, №4.– С. 135-142. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-135-142.
76. Линник, Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений / Ю.В. Линник. – М.: Физматгиз, 1958. –336 с.
77. Ломоносов, Г.Г. Производственные процессы подземной разработки рудных месторождений / Г.Г. Ломоносов. – М.: Изд-во «Горная книга», 2013. – 517 с.
78. Луговая, И.С. Классификация гидравлических систем для перекачивания высоковязких жидкостей / И.С. Луговая // Наука и техника. – 2019. – Т.18, №5. – С. 422-426. DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-5-422-426.

79. Ляшенко, В.И. Обоснование параметров вибросамотечного транспорта твердеющих закладочных смесей в шахты / В.И. Ляшенко, В.И. Голик, Ю.В. Дмитрак и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2021. – Т.19, №1. – С. 4-16. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-1-4-16.
80. Матвиенко, О.В. Исследование гидравлических характеристик потока водно-песчаной суспензии в трубе / О.В. Матвиенко, В.П. Базуев, И.С. Черкасов и др. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2020. – Т.22, №2. – С.129-144. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-129-144.
81. Мельников, В.В. Исследование основ гидродинамики гравитационного обогащения полезных ископаемых / В.В. Мельников // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2008. – № 3.
82. Методическим рекомендациям по контролю качества закладочных смесей. – Апатиты: Кольский научный центр АН СССР, 1990.
83. Монтянова, А.Н. Специфические особенности закладочных работ на руднике «Мир» алмазодобывающей АК «Алроса» / А.Н. Монтянова, Д.С. Кириллов, И.В. Штауб и др. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2012. – № 4. – С. 10-14.
84. Незаметдинов, А.Б. Вопросы совершенствования конструкций и эксплуатации регулируемых насосов / А.Б. Незаметдинов, А.Н. Фракман // Записки Горного института. – 1991. – Т.126. – С.67-71.
85. Никитин, А.В. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: Монография / Под ред. В.Ф. Шишлакова / СПбГУАП. СПб., 2003. – 358с.
86. Норенков, И.П. Автоматизированное проектирование / И.П. Норенков. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000 – 188 с.
87. Рейнер, М. Деформация и течение / М. Рейнер. – М.: Гостоптехиздат, 1965. – 381 с.
88. ОЭСВ проекта Кызыл, АО «Полиметалл». № ММ1021, 2015. – 1124 с.
89. Патента № 2042387 Российская Федерация, МПК В04С 9/00. Инерционный сгуститель. Заявка № 5049135/26. Дата приоритета: 22.06.1992. Дата регистрации: 27.02.1995. Авторы: В.Е. Тройнин, В.А. Гребцов. Заявитель: АО «Новатор». – 5 с.
90. Патент № 214518 Российская Федерация, МПК F04В43/12 (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.

91. Патента № 2383743 Российская Федерация, МПК E21F15/00 (2006.01). Способ приготовления закладочной смеси. Заявка № 2008130567/03. Дата приоритета: 23.07.2008. Дата регистрации: 27.01.2010. Авторы: В.В. Аршавский, В.И. Хуцишвили, Б.П. Бадтиев, П.М. Баскаев, М.Н. Нафталь, А.М. Малинин, О.Ю. Хубулов. Заявитель: М.Н. Нафталь. – 7 с.
92. 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.
93. Патент № 2181435 Российская Федерация, МПК E21F15/00 (2006.01). Способ приготовления закладочной смеси. Заявка № 2001113931/03. Дата приоритета: 20.04.2002. Дата регистрации: 25.05.2001. Авторы: Р.Б. Юн, Е.И. Николаев. Заявитель: Р.Б. Юн, Е.И. Николаев. – 6 с.
94. Покровская, В.Н. Пути повышения эффективности гидротранспорта / В.Н. Покровская. – М.: Недра, 1972. – 161 с.
95. Покровская, В.Н. Трубопроводный транспорт в горной промышленности / В.Н. Покровская. – М.: Недра, 1985. – 192 с.
96. Почтман, Ю.М. Модели и методы многокритериальной оптимизации конструкций. – Днепропетровск: Днепропетровский университет, 1984 – 132 с.
97. Программа производственного экологического контроля горно-обогатительного комплекса «Алтай» ТОО «Казцинк» на 2023 – 2026 годы. – Алтай, 2022. – 86 с.
98. Пухов, Ю.С. Рудничный транспорт / Ю.С. Пухов. – М.: Недра, 1991. – 255 с.
99. Рубашкина, Т.И. Оптимизация гранулометрического состава закладочных песков с использованием отходов металлургического производства / Т.И. Рубашкина, М.А. Корнейчук // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 5. – С. 1-10. DOI: 10.15372/FTPPI20200515.
100. Савич, И.Н. Технология очистной выемки при разработке Верхнекамского калийного месторождения / И.Н. Савич, М.В. Вотяков // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2006. – №9. – С. 268-271.
101. Смирнов, С.М. Выбор и обоснование состава закладочной смеси из местных материалов при слоевой системе разработки Рубцовского полиметаллического месторождения ОАО «Сибирь-Полиметаллы» Уральской горно-металлургической компании / С.М.Смирнов, А.А. Еременко // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – С. 28-32.

102. Смолдырев, А.Е. Гидро-пневмотранспорт / А.Е. Смолдырев. – М.: Metallurgy, 1967. – 367 с.
103. Соколов, И.В. Разработка и оценка вариантов стратегии освоения железорудных месторождений экологически сбалансированными подземными геотехнологиями / И.В. Соколов, Ю.Г. Антипин, А.А. Смирнов // Проблемы недропользования. – 2015. – №4. – С. 59-67.
104. Соколов, И.В. Технология восходящей выемки золоторудного месторождения с применением сухой закладки / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Ю.Г. Антипин и др. // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – С. 14-18.
105. Соколов, И.В. Анализ формирования геотехнологической стратегии разработки Естюнинского месторождения / И.В. Соколов, А.А. Смирнов, Н.В. Гобов и др. // Сборник докладов III Международной научно-технической конференции «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений». – 2014. – С. 40-44.
106. Солонщиков, П.Н. Эффективность работы установки для приготовления смесей как лопастного насоса / П.Н. Солонщиков // Вестник НГИЭИ. – 2016. – № 12. – С. 77-85.
107. Стовманенко, А.Ю. Перспективы применения трубопроводов из полимерных материалов при транспортировании литых закладочных смесей / А.Ю. Стовманенко, А.Н. Анушенков // Известия УГГУ. – 2016. – №4. – С. 68-71. DOI: 10.21440/2307-2091-2016-4-68-71.
108. Стовманенко, А.Ю. Повышение эффективности системы трубопроводного транспорта литых закладочных смесей при их механической активации в условиях подземной разработки месторождений полезных ископаемых / А.Ю. Стовманенко, А.Н. Анушенков // Известия УГГУ. – 2016. – №1. – С. 94-102.
109. Уразаков, К.Р. Метод расчета динамических нагрузок и энергопотребления штанговой установки с системой автоматического уравнивания / К.Р. Уразаков, В.А. Молчанова, П.М. Тугунов // Записки Горного института. – 2020. – Т.246. – С.640-649. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.6.
110. Фрейдин, А.М. Подземная разработка рудных месторождений: учеб. пособие / А.М. Фрейдин, А.А. Неверов, С.А. Неверов. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010. – 372 с.
111. Фролов, Ю. Г. Курс коллоидной химии / Ю.Г. Фролов. – М.: Химия, 1982. – 463 с.
112. Хайрутдинов, М.М. Гидравлическая закладка на калийных рудниках / Хайрутдинов М.М., Вотяков М.В. // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – №17. – С. 214-218.
113. Хайрутдинов, М.М. Формирование разнопрочных массивов при разработке месторождений полезных ископаемых / М.М. Хайрутдинов, Г.А. Карасев // ГИАБ. Горный

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – №3. – С. 276-283.

114. Хайрутдинов, М.М. Подземная геотехнология с закладкой выработанного пространства: недостатки, возможности совершенствования / М.М. Хайрутдинов, И.К. Шаймярдянов // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – №15. – С. 240-250.

115. Цирель, С.В. Оценка влияния гранулометрического состава на сжимаемость и пустотность закладочного материала / С.В. Цирель, Ю.С. Гапонов, А.Н. Шоков // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – №12. – С. 80-83.

116. Чиликин, И.А. Моделирование системы вертикального гидротранспорта с погружной капсулой / И.А. Чиликин // Записки Горного института. – 2002. – Т.150. – С. 106-108.

117. Шапошник, Ю.Н. Бутобетонная закладка на подземных рудниках крайнего севера / Ю.Н. Шапошник, С.А. Неверов, А.А. Неверов // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – №1. – С. 282-290. DOI: 10.15372/FPVGN2021080143.

118. Шубин, А.А. К вопросу о закладке крупных подземных пустот // ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2005. – № 8. – С. 145-148.

119. Шубин, Г.В. Технологические свойства руд и вмещающих пород Удачинского месторождения / Г.В. Шубин, Б.Н. Заровняев, А.С. Курилко и др. – Новосибирск: «Наука», 2017. – 161 с.

120. Юркевич, Г.Ф. Исследование свойств комбинированного закладочного материала с использованием пород от проходки выработок / Г.Ф. Юркевич, В.П. Конохов, А.А. Леонтьев // Горный журнал. – 1986. – №9. – С. 29-31.

121. Adamczyk, W.P. Comparison of the standard Euler-Euler and hybrid Euler-Lagrange approaches for modeling particle transport in a pilot-scale circulating fluidized bed / W.P. Adamczyk, A. Klimanek, R. Bialecki et al. // Particuology. – 2014. – Vol.15. – PP.129-137. DOI: 10.1016/J.PARTIC.2013.06.008.

122. Adiansyah, J.S. A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies / J.S. Adiansyah, M. Rosano, S. Vink et al. // Journal of Cleaner Production. – 2015. – № 108. – PP. 1050-1062. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.07.139.

123. Adiguzel, D. The investigation of effect of particle size distribution on flow behavior of paste tailings / D. Adiguzela, A. Bascetin // Journal of Environmental Management. – 2019. – № 243. – PP.393-401. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.05.039.

124. Alexandrov, V.I. Efficiency of using polyurethane-lined pipes in hydrotransport systems of slurry tailings / V.I. Alexandrov, M.A. Vasilyeva, P.A. Vasilyeva // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. International Conference "Complex equipment of quality control laboratories". – 2018. – № 1118. – PP. 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012002.
125. Aleksandrova, T. Justification for Criteria for Evaluating Activation and Destruction Processes of Complex Ores / T. Aleksandrova, N. Nikolaeva, A. Afanasova et al. // Minerals. – 2023. – Vol.13. – PP.684-704. DOI: 10.3390/min13050684.
126. Bise, Ch.J. Mining Engineering Analysis. Second Edition / Ch.J. Bise. SME, 2003. – 313 p.
127. Calvo, M. Minerales y Minas de España. Sulfuros y sulfosales / M. Calvo // Vitoria, Spain: Museo de Ciencias Naturales de Alava. – 2003. – Vol.II. – PP. 205– 335.
128. CFD Module. Chapter 5: Multiphase flow interfaces // Comsol. – 2017. – PP. 236– 341.
129. Esgandari, B. A comprehensive comparison of Two Fluid Model, Discrete Element Method and experiments for the simulation of single- and multiple spout fluidized beds / B. Esgandari, S. Rauchenzauner, C. Goniva et al. // Chemical Engineering Science. – 2023. – Vol.267. – PP.1-23. DOI: 578 10.1016/j.ces.2022.118357.
130. Gladman, B.J. Understanding the thickening process / B.J. Gladman, S.P. Usher, P.J. Scales // Proceedings of the Ninth International Seminar on Paste and Thickened Tailings. – 2006. – PP.5-12.
131. Huang, Z. Study on the Mechanical Relationship among the Backfilling Mining Support, Roof Rock Beam, and Gangue Filling Body in Comprehensive Mechanized Filling Mining Process / Z. Huang, L. Zhang, Z. Ma // Advances in Civil Engineering. – 2020. – Vol. 4. – PP.1-15. DOI: 10.1155/2020/8824735.
132. Fedyushkin, A. Symmetrisation of laminar flow of viscous fluid in a flat diffuser by periodic influence on the inlet flow velocity / A. Fedyushkin, A. Puntus // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol.446. – PP.1-9. DOI: 10.1051/e3sconf/202344601001.
133. Keay, M.J. An exponential endogenous switching regression with correlated random coefficients / M.J. Keay // Econometrics. – 2022. – Vol. 10. – P.1. DOI: 10.3390/econometrics10010001.
134. Kevei, P. Limit laws for the norms of extremal samples / P. Kevei, L. Oluoch, L. Viharos // Journal of Statistical Planning and Inference. – 2022. – Vol.216. – PP. 151-173. DOI: 10.1016/j.jspi.2021.06.001.
135. Li, S. The recent progress China has made in the backfill mining method, Part II: The composition and typical examples of backfill systems / S. Li, Z. Zhao, H. Yu et al. // Minerals. – 2021. – Vol.11, № 12. – PP.1362-1375. DOI: 10.3390/min11121362.

136. Liu, W. Analysis of inertial migration of neutrally buoyant particle suspensions in a planar Poiseuille flow with a coupled lattice Boltzmann method-discrete element method / W. Liu, C. Wu // *Physics of Fluids*. – 2019. – Vol.31, №6. – PP.1-49. DOI: 10.1063/1.5095758.
137. Li, Y. CFD simulation of hydrodynamic characteristics in a multiple-spouted bed / Y. Li, D. Che, Y. Liu // *Chemical Engineering Science*. – 2012. – Vol.80. – PP.365-379. DOI: 10.1016/J.CES.2012.06.003.
138. Matuła, P. Note on exact laws of large numbers for the range of a sample from Pareto-type distributions / P. Matuła, A.A. Adler // *Statistics and Probability Letters*. – 2022. – Vol.182, № 109297. DOI: 10.1016/j.spl.2021.109297.
139. Nattaj Jelodar, H. Effective Suspended Particles and Sediment on Water Flow Velocity / H. Nattaj Jelodar, B. Navayi Neya // *World Applied Sciences Journal*. – 2008. – Vol.4, №2. – PP. 295-299.
140. Saidi, F. Non-Newtonian stokes flow with frictional boundary conditions / F. Saidi // *Mathematical Modelling and Analysis*. – 2007. – Vol.12. – PP.483-495. DOI: 10.3846/1392-6292.2007.12.483-495.
141. Seiphoori, A. Tuning sedimentation through surface charge and particle shape / A. Seiphoori, A. Gunn, A. Kosgodagan et al. // *Geophysical Research Letters*. – 2021. – Vol.48. – PP.1-11. DOI: 10.1029/2020GL091251.
142. Sogueru-Ruiz, C. Statistical nonlinear analysis for reliable promotion decision-making / C. Sogueru-Ruiz, I. Mora-Jiménez, M. D.P. Martínez-Ruiz et al. // *Digital Signal Processing: A Review Journal*. – 2014. – Vol. 33. – PP.156-168. DOI: 10.1016/j.dsp.2014.06.014.
143. Qin, J. An analytical solution to estimate the settlement of tailings or backfill slurry by considering the sedimentation and consolidation / J. Qin, J. Zheng, L. Li // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2021. – Vol. 31, № 3. – PP.463–471. DOI: 10.1016/j.ijmst.2021.02.004.
144. Voulgaropoulos, V. Experimental and numerical studies on the flow characteristics and separation properties of dispersed liquid-liquid flows / V. Voulgaropoulos, R. Jamshidi, L. Mazzei et al. // *Physics of Fluids*. – 2019. – Vol.31. – PP.073304-073304-16. DOI: 10.1063/1.5092720.
145. Wu, A.X. Paste backfill system design and commissioning at Chambishi Copper Mine / A.X. Wu, X.X. Miao, X.H. Liu et al. // *Paste 2015: Proceedings of the 18th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. Australian Centre for Geomechanics. – 2015. – PP. 301-308. DOI: 10.36487/ACG_rep/1504_22_Xiuxiu.
146. Xu, Ce. Some Evaluation of Infinite Series Involving Trigonometric and Hyperbolic Function / Ce. Xu. // *Results in Mathematics*. – 2018. – Vol. 73, № 128. – PP.1-18. DOI: 10.1007/s00025-018-0891-9.

147. Yan, Y. Channeling and stress during fluid and suspension flow in self-affine fractures / Y. Yan, J. Koplik // *Phys. Rev.* – 2014 – Vol.89. – P.023010. DOI: 10.1103/PhysRevE.89.023010.
148. Yi, Z. Study on the relation between tailing particle size and tailing slurry underflow concentration / Z. Yi, Q. Liu, W. Liu // *Advances in Civil Engineering.* – 2022. – Vol.2022. – PP. 1-10. DOI: 10.1155/2022/5449032.
149. Yin, S. A systematic review of paste technology in metal mines for cleaner production in China / S. Yin, Y. Shao, A. Wu et al. // *Journal of Cleaner Production.* – 2019. – №247. – P.119590. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119590.

СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА***РИСУНКИ:***

Рисунок 1.1 – Блок-схема процессов очистных работ;

Рисунок 1.2 – Схема отработки Естюнинского месторождения НПРО «Урал»;

Рисунок 1.3 – Технологическая схема подготовки закладочного материала для гидравлической закладки;

Рисунок 1.4 – Схемы возведения закладочного массива при гидравлической закладке;

Рисунок 1.5 – Технологическая схема с гидравлической закладкой твердеющими смесями на Тасеевском руднике;

Рисунок 1.6 – Технологическая схема закладочного комплекса по подготовке смеси для возведения закладочного массива литым способом;

Рисунок 1.7 – Технологическая схема инъекционного способа возведения массива;

Рисунок 1.8 – Схема установки для приготовления цементно-глинистых инъекционных растворов;

Рисунок 1.9 – Технологическая схема подготовки закладочной смеси на Малеевском руднике;

Рисунок 1.10 – Система этажного принудительного обрушения;

Рисунок 1.11 – Этажно-камерная система разработки с закладкой выработанного пространства на Северо-Западном участке Таштагольского месторождения;

Рисунок 1.12 – Схема действующей на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» технологии изготовления твердеющей закладочной смеси;

Рисунок 1.13 – Общая технологическая схема приготовления твердеющей закладочной смеси;

Рисунок 1.14 – Схема шаровой мельницы;

Рисунок 1.15 – Схема роторной дробилки;

Рисунок 1.16 – Схема весового дозатора;

Рисунок 1.17 – Способы воздействия и схемы перемешивания продукта при смешивании;

Рисунок 1.18 – Вертикальный вибросмеситель;

Рисунок 1.19 – Схема смесителя-активатора роторного типа;

Рисунок 1.20 – Камерно-шлюзовый питатель со шнековой подачей материала в трубопровод;

Рисунок 1.21 – Биметаллическая труба;

Рисунок 1.22 – Стальная труба;

Рисунок 1.23 – Полиэтиленовая труба;

Рисунок 1.24 – Схема устройства эжектора;

Рисунок 1.25 – Гравитационный сгуститель;

Рисунок 1.26 – Инерционный сгуститель;

Рисунок 1.27 – Сгуститель комбинированного типа;

Рисунок 1.28 – Схема инерционно-гравитационного сгустителя;

Рисунок 1.29 – Схема сгустителя цилиндрического типа (а, б) и плоского типа (в);

Рисунок 1.30. – Схема секции трубопровода при вибрационной закладке;

Рисунок 2.1 – Технологическая схема гидротранспорта закладочных смесей со сгущением на финальном этапе работ;

Рисунок 2.2 – Модель инерционного сгустителя;

Рисунок 2.3 – Схема пространственной сетки модели инерционного сгустителя;

Рисунок 2.4 – Содержание дисперсной фазы в патрубках сгущенной смеси и осветленного потока несущей среды для входных скоростей движения гидросмеси;

Рисунок 2.5 – Распределение полей параметров динамического процесса сгущения в рабочей зоне сгустителя;

Рисунок 2.6 – Расположение зон рабочей камеры инерционного сгустителя;

Рисунок 2.7 – Содержание дисперсной фазы на выпускных патрубках инерционного сгустителя;

Рисунок 2.8 – Номограммы распределения дисперсной фазы в инерционном сгустителе при различных значениях величины поперечного размера k отклоняющего гидродинамического профиля;

Рисунок 2.9 – Формирование участков взаимодействия с потоком при различных соотношениях поперечного и продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля k/l ;

Рисунок 2.10 – Изменение характерных углов взаимодействия с отклоняющим гидродинамическим профилем при различных значениях величины поперечного размера k отклоняющего гидродинамического профиля;

Рисунок 2.11 – Динамика изменения длины участка взаимодействия;

Рисунок 2.12 – Номограмма изменения концентрации сгущенного потока;

Рисунок 2.13 – Значения $F(\alpha)$ в зависимости от угла атаки и типа материала поверхности;

Рисунок 2.14 – Изменение интенсивности гидроабразивного изнашивания поверхности отклоняющего гидродинамического профиля в зависимости от крупности дисперсной фазы;

Рисунок 2.15 – Изменение интенсивности гидроабразивного изнашивания поверхности отклоняющего гидродинамического профиля в зависимости от входной скорости первичной гидросмеси;

Рисунок 2.16 – Изменение интенсивности гидроабразивного изнашивания отклоняющего гидродинамического профиля в зависимости от угла атаки профиля;

Рисунок 2.17 – Изменение интенсивности гидроабразивного изнашивания поверхности отклоняющего гидродинамического профиля в зависимости от его размеров;

Рисунок 2.18 – Изменение угла атаки профиля при изменении продольного размера;

- Рисунок 2.19 – Изменение интенсивности гидроабразивного изнашивания поверхности отклоняющего гидродинамического профиля в зависимости от соотношения его размеров N ;
- Рисунок 3.1 – Контрольно-измерительный прибор - весы AND DL-5000;
- Рисунок 3.2 – Конструкция форм для заливки;
- Рисунок 3.3 – Подготовка экспериментальных образцов закладочных массивов;
- Рисунок 3.4 – Набор прочности образцами закладочных смесей в герметичных условиях;
- Рисунок 3.5 – Набор прочности экспериментальными образцами в нормальных условиях после удаления фильтрующих элементов;
- Рисунок 3.6 – Кривая скорости усадки экспериментальных образцов в начальный момент времени;
- Рисунок 3.7 – Кривая скорости усадки экспериментальных по прошествии 10 дней от начала эксперимента;
- Рисунок 3.8 – Изменение показателя усадки экспериментальных образцов закладочных массивов;
- Рисунок 3.9 – Изменение показателя водоотделения от экспериментальных образцов закладочных массивов;
- Рисунок 3.10 – Изменение влажности экспериментальных образцов закладочных массивов;
- Рисунок 3.11 – Испытательная машина ДРМБ-300 с установленным экспериментальным образцом
- Рисунок 3.12 – Зависимость коэффициента высоты образца от геометрических параметров образцов закладочных массивов;
- Рисунок 3.13 – Зависимость прочности экспериментальных образцов (возрастом 28 дней) от концентрации гидросмеси;
- Рисунок 3.14 – Коэффициент остаточного заполнения;
- Рисунок 3.15 – Потребная масса закладочной смеси для полного заполнения отведенного объема;
- Рисунок 4.1 – Конструктивная схема инерционного сгустителя;
- Рисунок 4.2 – Упрощенная конструктивная схема инерционного сгустителя;
- Рисунок 4.3 – Распределение значений продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля в зависимости от высоты рабочей камеры;
- Рисунок 4.4 – Распределение значений продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля в зависимости от класса варьирования;
- Рисунок 4.5 – Номограмма для определения продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля;

Рисунок 4.6 – Технологическая схема гидротранспорта закладочных смесей со сгущением на финальном участке транспортирования.

ТАБЛИЦЫ:

Таблица 1.1 – Характеристики насосов;

Таблица 2.1 – Начальные параметры компонентов и свойства рабочей зоны инерционного сгустителя;

Таблица 3.1 – Гранулометрический состав отходов обогащения железной руды;

Таблица 3.2 – Исходные параметры образцов закладочных смесей;

Таблица 3.3 – Изменение массы и высоты экспериментальных образцов закладочных смесей при наборе прочности для концентрации гидросмеси 10-50% по массе;

Таблица 3.4 – Предел прочности при одноосном сжатии образцов закладочных массивов;

Таблица 4.1 – Распределение значений продольного размера отклоняющего гидродинамического профиля в заданном интервале;

Таблица 4.2 – Цепные показатели ряда динамики;

Таблица 4.3 – Характеристики расчетных площадок;

Таблица 4.4 – Таблица ремонтных работ;

Таблица А.1 – Содержание дисперсной фазы в сгущенном потоке и осветленном потоке несущей среды для исследуемых образцов инерционного сгустителя высотой 1500 мм;

Таблица А.2 – Содержание дисперсной фазы в сгущенном потоке и осветленном потоке несущей среды для исследуемых образцов инерционного сгустителя высотой 750 мм;

Таблица А.3 – Содержание дисперсной фазы в сгущенном потоке и осветленном потоке несущей среды для исследуемых образцов инерционного сгустителя высотой 3000 мм;

Таблица Б.1 – Результаты замеров массы и высоты экспериментальных образцов в зависимости от времени набора прочности;

Таблица В.1 – Сводная таблица технических характеристик инерционного сгустителя;

Таблица В.2 – Сводная таблица размеров отклоняющего гидродинамического профиля инерционного сгустителя.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Характеристики гидросмеси на выпускных патрубках инерционного сгустителя

Таблица А.1 – Содержание дисперсной фазы в сгущенном потоке и осветленном потоке несущей среды для исследуемых образцов инерционного сгустителя высотой 1500 мм

Входная скорость первичной гидросмеси, м/с	Крупность дисперсной фазы, мм	Поперечный размер отклоняющего гидродинамического профиля (k), мм	Продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля (l), мм							
			Исследуемый поток: СП - сгущенный поток, ОП - осветленный поток несущей среды.	1000	1150	1250	1350	1450	1550	1650
0,5	0,2	300	СП	42	42	46	38	40	40	38
			ОП	37	34	40	44	42	40	38
		400	СП	34	34	32	34	39	38	37
			ОП	48	47	43	41	46	43	43
		500	СП	24	29	29	25	25	32	34
			ОП	56	53	48	60	54	52	54
		600	СП	21	34	27	20	29	28	26
			ОП	57	48	59	57	50	52	53
		700	СП	20	20	18	23	25	38	36
	ОП		54	62	54	59	50	35	36	
	800	СП	33	36	30	36	32	41	27	
		ОП	42	47	56	46	48	43	46	
	0,5	300	СП	39	43	46	35	40	40	39
			ОП	38	34	38	46	41	42	38
		400	СП	29	36	35	33	36	43	36
			ОП	54	49	48	43	46	43	41
		500	СП	27	26	33	29	28	30	36
			ОП	60	61	55	55	52	52	53
600	СП	26	25	23	21	26	31	27		

Продолжение таблицы А.1

Входная скорость первичной гидросмеси, м/с	Крупность дисперсной фазы, мм	Поперечный размер отклоняющего гидродинамического профиля (k), мм	Продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля (l), мм							
			Исследуемый поток: СП - сгущенный поток, ОП - осветленный поток несущей среды.	1000	1150	1250	1350	1450	1550	1650
	0,5	600	ОП	38	54	58	64	59	50	62
		700	СП	17	19	23	21	25	40	38
			ОП	48	65	50	60	41	35	34
		800	СП	36	26	25	37	30	45	31
	ОП		38	59	57	44	54	39	40	
	1	300	СП	41	32	38	36	35	31	42
			ОП	43	43	40	46	43	49	39
		400	СП	33	38	39	38	36	38	42
			ОП	54	44	41	39	35	43	36
		500	СП	31	37	35	36	29	34	36
			ОП	55	48	51	50	51	51	50
		600	СП	29	30	29	31	29	32	39
			ОП	21	43	43	57	51	54	44
		700	СП	20	20	27	26	34	53	41
			ОП	26	65	35	42	44	17	23
		800	СП	39	32	27	35	39	47	28
			ОП	47	57	65	40	41	35	34
	2	300	СП	35	33	34	34	36	34	39
			ОП	48	45	44	37	40	45	36
		400	СП	43	38	31	35	41	36	29
			ОП	36	44	45	41	29	37	26
		500	СП	44	37	33	39	40	37	27
			ОП	38	48	46	45	36	47	42
		600	СП	40	38	35	28	27	28	18
			ОП	15	31	44	50	59	39	31
		700	СП	35	33	25	32	38	35	22
			ОП	25	43	46	32	37	26	11
		800	СП	38	35	33	35	30	28	11

Продолжение таблицы А.1

Входная скорость первичной гидросмеси, м/с	Крупность дисперсной фазы, мм	Поперечный размер отклоняющего гидродинамического профиля (k), мм	Продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля (l), мм								
			Исследуемый поток: СП - сгущенный поток, ОП - осветленный поток несущей среды.	1000	1150	1250	1350	1450	1550	1650	
	3	300	ОП	57	53	59	42	51	30	11	
			СП	12	11	14	17	18	15	18	
		400	ОП	33	24	27	10	19	21	17	
			СП	26	25	25	20	24	12	22	
		500	ОП	45	45	42	40	32	19	8	
			СП	37	32	31	20	25	28	30	
		600	ОП	35	52	48	65	60	40	26	
			СП	31	19	15	16	22	17	31	
		700	ОП	30	31	41	37	30	31	10	
			СП	23	21	27	22	24	27	18	
		800	ОП	42	27	16	30	18	12	12	
			СП	56	29	42	45	48	21	18	
		4	300	ОП	38	49	42	24	12	11	2
				СП	8	13	11	10	6	6	7
			400	ОП	22	17	22	11	18	20	18
				СП	9	16	13	13	14	19	18
			500	ОП	24	25	26	23	22	16	10
				СП	18	23	30	29	15	25	19
	600		ОП	24	23	17	27	23	21	10	
			СП	32	32	32	26	28	23	29	
	700		ОП	20	17	17	12	10	14	14	
			СП	28	26	31	17	26	27	21	
	800		ОП	21	7	8	15	11	13	3	
			СП	47	48	50	47	33	31	13	
	5		300	ОП	29	7	8	2	10	9	5
				СП	14	13	11	11	14	14	10
			400	ОП	17	11	14	9	11	7	8
СП				10	7	11	15	22	20	13	

Продолжение таблицы А.1

Входная скорость первичной гидросмеси, м/с	Крупность дисперсной фазы, мм	Поперечный размер отклоняющего гидродинамического профиля (k), мм	Продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля (l), мм									
			Исследуемый поток: СП - сгущенный поток, ОП - осветленный поток несущей среды.	1000	1150	1250	1350	1450	1550	1650		
		500	ОП	10	11	19	12	12	11	18		
			СП	17	18	20	27	15	14	11		
		600	ОП	7	14	11	8	9	8	10		
			СП	19	21	29	22	16	23	22		
		700	ОП	8	5	1	4	4	8	2		
			СП	29	31	31	26	28	24	11		
		800	ОП	4	2	6	2	6	3	6		
			СП	39	52	46	52	35	28	15		
		1	0,2	300	СП	38	41	46	35	37	36	39
					ОП	39	38	38	48	43	41	39
				400	СП	35	39	37	37	36	39	39
					ОП	49	50	46	48	47	42	43
500	СП			29	32	29	32	29	33	40		
	ОП			56	52	53	56	54	54	50		
600	СП			28	35	28	29	34	35	26		
	ОП			53	48	60	54	54	52	64		
700	СП			27	29	26	31	29	37	38		
	ОП			57	57	58	54	59	51	53		
800	СП			38	34	31	36	39	44	39		
	ОП			53	52	55	54	50	44	56		
0,5	300	СП	44	43	39	33	38	39	39			
		ОП	38	38	45	49	44	44	41			
	400	СП	37	43	40	40	40	40	42			
		ОП	53	48	48	45	45	45	43			
	500	СП	31	39	33	36	32	37	46			
		ОП	58	53	58	58	58	52	43			
600	СП	23	33	27	26	31	38	27				

Продолжение таблицы А.1

Входная скорость первичной гидросмеси, м/с	Крупность дисперсной фазы, мм	Поперечный размер отклоняющего гидродинамического профиля (k), мм	Продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля (l), мм								
			Исследуемый поток: СП - сгущенный поток, ОП - осветленный поток несущей среды.	1000	1150	1250	1350	1450	1550	1650	
		700	ОП	41	46	56	57	62	51	57	
			СП	22	21	25	31	39	38	40	
		800	ОП	42	66	38	50	38	46	34	
			СП	34	30	26	35	42	51	38	
		1	300	ОП	58	61	64	53	46	31	46
				СП	38	44	39	36	35	42	42
	400		ОП	45	45	42	46	48	42	41	
			СП	35	40	40	42	38	35	41	
	500		ОП	50	50	47	44	41	48	41	
			СП	36	42	44	42	46	41	49	
	600		ОП	56	47	46	49	41	48	42	
			СП	35	37	31	36	41	49	27	
	700		ОП	34	47	56	49	51	39	37	
			СП	40	35	28	34	42	50	29	
	800		ОП	16	44	40	42	34	36	27	
			СП	41	33	34	36	40	29	27	
	3	300	ОП	51	58	57	55	49	40	25	
			СП	12	17	17	20	21	18	18	
		400	ОП	41	30	34	10	23	21	15	
			СП	36	41	36	36	35	33	24	
		500	ОП	42	41	41	33	35	27	21	
			СП	64	53	55	49	43	33	39	
		600	ОП	21	35	27	24	21	25	24	
			СП	65	57	46	49	44	24	32	
		700	ОП	21	26	25	23	23	33	11	
			СП	45	46	41	42	29	21	19	
		800	ОП	44	24	22	13	20	16	12	
			СП	41	63	49	49	41	29	16	

Продолжение таблицы А.1

Входная скорость первичной гидросмеси, м/с	Крупность дисперсной фазы, мм	Поперечный размер отклоняющего гидродинамического профиля (k), мм	Продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля (l), мм									
			Исследуемый поток: СП - сгущенный поток, ОП - осветленный поток несущей среды.	1000	1150	1250	1350	1450	1550	1650		
5		300	ОП	34	10	20	14	7	6	6		
			СП	24	24	19	26	24	19	19		
		400	ОП	12	16	17	15	10	20	7		
			СП	16	48	37	40	38	29	27		
		500	ОП	15	17	19	24	21	20	15		
			СП	53	56	52	48	41	34	34		
		600	ОП	10	14	14	19	15	14	11		
			СП	52	57	47	48	46	25	28		
		700	ОП	12	3	10	9	10	21	9		
			СП	43	49	47	39	26	22	16		
		800	ОП	15	10	10	15	20	12	7		
			СП	38	37	44	28	27	17	8		
		2	0,2	300	СП	45	32	50	39	40	41	42
					ОП	43	37	41	49	43	43	42
				400	СП	40	36	42	41	42	37	37
					ОП	49	56	50	52	48	49	51
				500	СП	32	40	36	35	30	34	28
					ОП	59	53	55	55	59	53	68
600	СП			37	33	30	23	24	29	34		
	ОП			53	58	59	65	67	62	58		
700	СП			40	25	46	26	49	28	47		
	ОП			51	63	38	55	40	63	49		
800	СП			33	35	27	28	52	49	68		
	ОП			59	56	59	61	27	35	26		
1	300			СП	38	39	42	42	42	36	48	
				ОП	52	50	49	44	39	46	34	
				СП	50	49	52	50	53	50	54	

Продолжение таблицы А.1

Входная скорость первичной гидросмеси, м/с	Крупность дисперсной фазы, мм	Поперечный размер отклоняющего гидродинамического профиля (k), мм	Продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля (l), мм									
			Исследуемый поток: СП - сгущенный поток, ОП - осветленный поток несущей среды.	1000	1150	1250	1350	1450	1550	1650		
		500	ОП	42	42	41	42	33	28	30		
			СП	55	54	45	40	44	33	31		
		600	ОП	37	39	42	40	32	48	44		
			СП	32	34	41	40	44	26	14		
		700	ОП	59	44	40	52	29	54	55		
			СП	62	50	60	41	42	27	20		
		800	ОП	29	33	17	33	52	26	34		
			СП	36	35	40	43	37	25	25		
		3	300	ОП	56	58	52	49	55	20	20	
				СП	25	27	21	27	32	31	26	
				400	ОП	35	42	35	27	30	17	28
					СП	50	62	48	44	44	40	29
				500	ОП	29	21	31	35	29	22	24
					СП	69	59	66	50	51	43	41
600	ОП			16	19	11	19	12	15	17		
	СП			58	59	63	47	48	26	35		
700	ОП			13	9	12	13	12	17	20		
	СП			55	54	50	43	44	22	18		
800	ОП			14	11	12	13	9	13	8		
	СП			31	37	39	34	34	18	14		
5	300			ОП	32	21	16	14	12	12	3	
				СП	25	21	20	25	32	26	27	
	400			ОП	28	24	28	27	17	26	18	
				СП	44	52	43	43	37	40	36	
	500	ОП	27	19	23	26	24	18	19			
		СП	55	55	53	52	42	31	42			
	600	ОП	17	19	18	19	23	19	12			
		СП	49	42	49	52	48	37	30			

Продолжение таблицы А.1

Входная скорость первичной гидросмеси, м/с	Крупность дисперсной фазы, мм	Поперечный размер отклоняющего гидродинамического профиля (k), мм	Продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля (l), мм									
			Исследуемый поток: СП - сгущенный поток, ОП - осветленный поток несущей среды.	1000	1150	1250	1350	1450	1550	1650		
		700	ОП	16	18	19	15	14	19	8		
			СП	39	41	37	33	29	19	16		
		800	ОП	33	21	22	17	23	23	12		
			СП	15	34	24	19	12	12	12		
		3	0,5	300	СП	45	43	45	40	41	42	46
					ОП	43	47	47	50	47	46	43
				400	СП	38	46	40	43	46	43	47
					ОП	54	46	51	51	46	43	38
500	СП			51	47	35	25	44	35	38		
	ОП			42	45	51	56	37	54	46		
600	СП			49	39	34	27	33	28	31		
	ОП			40	49	49	54	54	63	32		
700	СП		57	33	45	35	22	34	28			
	ОП		34	54	39	47	67	50	20			
800	СП		34	23	28	21	38	38	43			
	ОП		56	61	57	64	49	44	40			
1	300		СП	26	28	34	64	59	44	57		
			ОП	62	62	58	24	24	40	21		
	400		СП	41	41	45	48	45	46	41		
			ОП	51	49	41	44	39	34	35		
	500	СП	46	49	35	31	40	32	23			
		ОП	47	40	50	49	29	38	39			
	600	СП	44	29	37	29	31	20	29			
		ОП	45	52	37	39	36	41	20			
700	СП	51	43	43	51	45	23	18				
		ОП	40	37	26	23	19	30	16			
		800	СП	56	40	32	34	35	35	20		

Продолжение таблицы А.1

Входная скорость первичной гидросмеси, м/с	Крупность дисперсной фазы, мм	Поперечный размер отклоняющего гидродинамического профиля (k), мм	Продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля (l), мм								
			Исследуемый поток: СП - сгущенный поток, ОП - осветленный поток несущей среды.	1000	1150	1250	1350	1450	1550	1650	
	3	300	ОП	31	43	33	34	23	14	8	
			СП	46	25	27	36	42	34	33	
		400	ОП	31	46	40	24	27	37	27	
			СП	63	57	51	44	49	44	32	
		500	ОП	19	21	30	29	23	23	29	
			СП	68	67	54	49	46	37	34	
		600	ОП	15	13	12	14	14	13	16	
			СП	55	49	49	42	42	26	36	
		700	ОП	14	13	18	13	17	19	8	
			СП	53	43	38	39	37	12	16	
		800	ОП	18	19	22	13	18	20	9	
			СП	32	26	26	42	20	21	14	
		5	300	ОП	34	19	25	16	16	13	9
				СП	26	28	20	31	21	33	23
			400	ОП	23	27	27	22	27	23	29
				СП	46	43	36	44	32	35	31
			500	ОП	20	20	30	28	24	16	19
				СП	67	52	46	42	40	37	31
	600		ОП	11	12	18	13	19	12	14	
			СП	45	49	44	45	28	24	34	
	700		ОП	19	20	13	11	17	19	8	
			СП	33	31	31	25	16	25	11	
	800	ОП	23	19	26	24	24	24	11		
		СП	13	19	21	18	18	15	8		
			ОП	44	24	20	22	20	13	4	

Таблица А.2 – Содержание дисперсной фазы в сгущенном потоке и осветленном потоке несущей среды для исследуемых образцов инерционного сгустителя высотой 750 мм

Входная скорость первичной гидросмеси, м/с	Крупность дисперсной фазы, мм	Поперечный размер отклоняющего гидродинамического профиля (<i>k</i>), мм	Продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля (<i>l</i>), мм		
			Исследуемый поток: СП - сгущенный поток, ОП - осветленный поток несущей среды.	600	800
0,5	0,2	300	СП	32	30
			ОП	54	59
		400	СП	35	43
			ОП	52	43
	1	300	СП	40	41
			ОП	44	39
		400	СП	35	32
			ОП	55	20
	3	300	СП	52	31
			ОП	20	20
		400	СП	58	19
			ОП	14	4
	5	300	СП	51	51
			ОП	11	11
400		СП	33	3	
		ОП	21	9	
1	0,2	300	СП	36	26
			ОП	46	66
		400	СП	39	33
			ОП	44	46
	1	300	СП	35	27
			ОП	52	41
		400	СП	42	30
			ОП	15	19

Продолжение таблицы А.2

Входная скорость первичной гидросмеси, м/с	Крупность дисперсной фазы, мм	Поперечный размер отклоняющего гидродинамического профиля (k), мм	Продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля (l), мм		
			Исследуемый поток: СП - сгущенный поток, ОП - осветленный поток несущей среды.	600	800
	3	300	СП	63	31
			ОП	6	21
		400	СП	44	52
			ОП	20	17
	5	300	СП	53	23
			ОП	15	12
		400	СП	26	3
			ОП	29	15
2	0,2	300	СП	34	26
			ОП	58	64
		400	СП	27	33
			ОП	64	52
	1	300	СП	33	21
			ОП	45	30
		400	СП	42	24
			ОП	42	8
	3	300	СП	53	53
			ОП	15	15
		400	СП	31	25
			ОП	19	15
	5	300	СП	45	24
			ОП	9	14
		400	СП	16	8
			ОП	20	9
3	0,2	300	СП	38	32
			ОП	54	60
		400	СП	33	53

Продолжение таблицы А.2

Входная скорость первичной гидросмеси, м/с	Крупность дисперсной фазы, мм	Поперечный размер отклоняющего гидродинамического профиля (k), мм	Продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля (l), мм			
			Исследуемый поток: СП - сгущенный поток, ОП - осветленный поток несущей среды.	600	800	
	1	300	ОП	59	35	
			СП	37	23	
		400	ОП	35	24	
			СП	44	20	
	3	300	ОП	17	8	
			СП	46	25	
		400	ОП	19	16	
			СП	32	8	
	5	300	ОП	24	13	
			СП	33	23	
		400	ОП	18	12	
			СП	26	6	
				ОП	14	11

Таблица А.3 – Содержание дисперсной фазы в сгущенном потоке и осветленном потоке несущей среды для исследуемых образцов инерционного сгустителя высотой 3000 мм

Входная скорость первичной гидросмеси, м/с	Крупность дисперсной фазы, мм	Поперечный размер отклоняющего гидродинамического профиля (<i>k</i>), мм	Продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля (<i>l</i>), мм			
			Исследуемый поток: СП - сгущенный поток, ОП - осветленный поток несущей среды.	1150	1550	3000
0,5	0,2	300	СП	22	21	27
			ОП	55	53	48
		500	СП	35	37	32
			ОП	35	35	41
		700	СП	17	26	25
			ОП	32	37	39
	1500	СП	42	44	30	
		ОП	1	1	1	
	1	300	СП	24	22	36
			ОП	54	54	49
		500	СП	37	41	35
			ОП	38	37	44
		700	СП	16	32	23
			ОП	34	30	41
	1500	СП	45	28	37	
		ОП	1	1	1	
	3	300	СП	20	20	32
			ОП	57	55	48
		500	СП	16	23	37
			ОП	41	49	42
		700	СП	7	3	7
			ОП	18	31	28
	1500	СП	50	45	22	
		ОП	1	1	1	

Продолжение таблицы А.3

Входная скорость первичной гидросмеси, м/с	Крупность дисперсной фазы, мм	Поперечный размер отклоняющего гидродинамического профиля (<i>k</i>), мм	Продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля (<i>l</i>), мм			
			Исследуемый поток: СП - сгущенный поток, ОП - осветленный поток несущей среды.	1150	1550	3000
0,5	5	300	СП	13	8	16
			ОП	38	37	30
		500	СП	2	6	5
			ОП	19	13	14
1	1	500	СП	42	42	40
			ОП	30	41	45
	3	500	СП	16	17	28
			ОП	49	44	15
		700	СП	26	30	22
			ОП	38	40	16
	1500	СП	61	57	25	
		ОП	26	16	9	
	5	500	СП	18	14	16
			ОП	22	16	8
3	1	500	СП	33	43	40
			ОП	55	47	49
		700	СП	22	33	41
			ОП	61	54	45
		1500	СП	56	41	56
			ОП	25	30	32
	3	500	СП	21	21	18
			ОП	39	36	25
		700	СП	48	49	45
			ОП	30	36	19
		1500	СП	30	29	33
			ОП	53	40	10
	5	500	СП	14	18	25

Продолжение таблицы А.3

Входная скорость первичной гидросмеси, м/с	Крупность дисперсной фазы, мм	Поперечный размер отклоняющего гидродинамического профиля (<i>k</i>), мм	Продольный размер отклоняющего гидродинамического профиля (<i>l</i>), мм			
			Исследуемый поток: СП - сгущенный поток, ОП - осветленный поток несущей среды.	1150	1550	3000
			ОП	28	20	18
		700	СП	27	32	30
			ОП	26	34	21
		1500	СП	23	18	22
			ОП	29	39	17

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты проведения экспериментального исследования

Таблица Б.1 – Результаты замеров массы и высоты экспериментальных образцов в зависимости от времени набора прочности

№ экс-та	Время снятия показаний	Время от начала экс-та, мин	Масса образца без учета формы, г	Масса отделившегося материала от сформированного образца массива, г			Суммарная масса отделившегося материала через фильтрующую форму, г			Высота образца в форме, мм	Потери закладочной материала образцом	Плотность образца, г/см ³	Отделившаяся смесь через фильтрующую форму, %	Величина усадки, %	Величина усадки относительно отстоявшегося материала (2 экс-та), %
				Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза	Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза						
Ж -10-1															
1	29.12 13:33	0,00	114,87	0,00	0,00	0,00	411,97	356,75	55,22	35,00	0,00	0,90	74,63	0,00	0,00
2	29.12 14:10	0,62	106,34	-	-	-	411,97	356,75	55,22	15,00	7,43	1,95	74,63	57,14	0,00
3	09.01.24 9:09	259,60	93,73	6,32	5,20	1,12	418,29	361,95	56,34	14,50	18,40	1,78	75,77	58,57	3,33
4	09.01.24 19:45	270,20	91,95	0,89	0,89	0,00	419,18	362,84	56,34	14,50	19,95	1,75	75,93	58,57	3,33
5	10.01.24 9:11	283,63	90,85	1,10	0,91	0,19	420,28	363,75	56,53	14,50	20,91	1,73	76,13	58,57	3,33
6	11.01.24 11:16	309,72	88,48	2,37	2,37	0,00	422,65	366,12	56,53	14,50	22,97	1,68	76,56	58,57	3,33
7	12.01.24 8:13	330,67	86,78	1,70	1,70	0,00	424,35	367,82	56,53	14,00	24,45	1,71	76,87	60,00	6,67
8	15.01.24 15:05	409,53	84,40	2,38	2,38	0,00	426,73	370,20	56,53	14,00	26,53	1,66	77,30	60,00	6,67
9	15.01.24 15:10	409,63	83,93	0,47	0,00	0,47	427,20	370,20	57,00	14,00	26,93	1,65	77,39	60,00	6,67
10	16.01.24 13:15	431,70	83,83	0,10	0,10	0,00	427,30	370,30	57,00	14,00	27,02	1,65	77,40	60,00	6,67
11	17.01.24 14:18	456,75	83,80	0,03	0,03	0,00	427,33	370,33	57,00	14,00	27,05	1,65	77,41	60,00	6,67
12	17.01.24 14:24	456,85	79,87	3,93	0,00	3,93	431,26	370,33	60,93	14,00	30,47	1,57	78,12	60,00	6,67
13	18.01.24 12:05	478,53	79,83	0,04	0,04	0,00	431,30	370,37	60,93	14,00	30,50	1,57	78,13	60,00	6,67

Продолжение таблицы Б.1

№ экс-та	Время снятия показаний	Время от начала экс-та, мин	Масса образца без учета формы, г	Масса отделившегося материала от сформированного образца массива, г			Суммарная масса отделившегося материала через фильтрующую форму, г			Высота образца в форме, мм	Потери закладочной материала образцом	Плотность образца, г/см ³	Отделившаяся смесь через фильтрующую форму, %	Величина усадки, %	Величина усадки относительно отстоявшегося материала (2 экс-та), %
				Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза	Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза						
14	19.01.24 15:42	506,25	79,83	0,00	0,00	0,00	431,30	370,37	60,93	14,00	30,50	1,57	78,13	60,00	6,67
15	19.01.24 21:30	511,95	71,09	5,85	0,00	5,85	437,15	370,37	66,78	10,00	38,11	1,96	79,19	71,43	33,33
16	22.01.24 12:28	574,92	71,06	0,03	0,03	0,00	437,18	370,40	66,78	10,00	38,14	1,96	79,19	71,43	33,33
Образец для определения прочности	Дата	24.01.24	Масса, г	71,06	Высота, мм	10,00	Диаметр, мм	68			Разрушающая образец сила, кН				
Ж -10-2															
1	29.12 13:44	0,00	97,06	0,00	0,00	0,00	427,45	363,17	64,28	34,00	0,00	0,74	77,76	0,00	0,00
2	29.12 14:11	0,45	95,19	-	-	-	427,45	363,17	64,28	13,00	1,93	1,90	77,76	61,76	0,00
3	09.01.24 9:11	259,45	83,29	1,61	1,24	0,37	429,06	364,41	64,65	12,00	14,19	1,80	78,06	64,71	7,69
4	09.01.24 19:47	269,95	81,53	0,88	0,88	0,00	429,94	365,29	64,65	11,50	16,00	1,84	78,22	66,18	11,54
5	10.01.24 9:13	283,48	79,86	1,67	1,59	0,08	431,61	366,88	64,73	11,50	17,72	1,81	78,52	66,18	11,54
6	11.01.24 11:18	309,57	77,44	2,42	2,42	0,00	434,03	369,30	64,73	11,50	20,21	1,75	78,96	66,18	11,54
7	12.01.24 8:16	330,53	75,96	1,48	1,48	0,00	435,51	370,78	64,73	11,00	21,74	1,80	79,23	67,65	15,38
8	15.01.24 15:12	409,47	74,15	1,81	1,81	0,00	437,32	372,59	64,73	11,00	23,60	1,75	79,56	67,65	15,38
9	15.01.24 15:20	409,60	71,46	2,69	0,00	2,69	440,01	372,59	67,42	11,00	26,38	1,69	80,05	67,65	15,38

Продолжение таблицы Б.1

№ экс-та	Время снятия показаний	Время от начала экс-та, мин	Масса образца без учета формы, г	Масса отделившегося материала от сформированного образца массива, г			Суммарная масса отделившегося материала через фильтрующую форму, г			Высота образца в форме, мм	Потери закладочной материала образцом	Плотность образца, г/см ³	Отделившаяся смесь через фильтрующую форму, %	Величина усадки, %	Величина усадки относительно отстоявшегося материала (2 экс-та), %
				Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза	Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза						
10	16.01.24 13:16	431,53	71,45	0,01	0,01	0,00	440,02	372,60	67,42	11,00	26,39	1,69	80,05	67,65	15,38
11	17.01.24 14:24	456,66	71,42	0,03	0,03	0,00	440,05	372,63	67,42	11,00	26,42	1,69	80,06	67,65	15,38
12	17.01.24 14:28	456,73	69,78	1,64	0,00	1,64	441,69	372,63	69,06	11,00	28,11	1,65	80,35	67,65	15,38
13	18.01.24 12:05	478,35	69,74	0,04	0,04	0,00	441,73	372,67	69,06	11,00	28,15	1,65	80,36	67,65	15,38
14	19.01.24 15:43	505,98	69,73	0,01	0,01	0,00	441,74	372,68	69,06	11,00	28,16	1,65	80,36	67,65	15,38
15	19.01.24 21:32	511,80	63,32	4,18	0,00	4,18	445,92	372,68	73,24	11,00	34,76	1,50	81,12	67,65	15,38
16	22.01.24 12:28	574,73	63,29	0,03	0,03	0,00	445,95	372,71	73,24	11,00	34,79	1,50	81,13	67,65	15,38
Образец для определения прочности	Дата	24.01.24	Масса, г	63,29	Высота, мм	11	Диаметр, мм	70	Разрушающая образец сила, кН	0,614					
Ж -10-3															
1	29.12 13:56	0,00	115,59	0,00	0,00	0,00	399,66	337,53	62,13	33,00	0,00	0,91	74,16	0,00	0,00
2	29.12 14:12	0,27	109,86	-	-	-	399,66	337,53	62,13	13,00	4,96	2,20	74,16	60,61	0,00
3	09.01.24 9:14	259,30	93,55	6,88	6,07	0,81	406,54	343,60	62,94	12,50	19,07	1,95	75,44	62,12	3,85
4	09.01.24 19:48	269,87	92,29	0,63	0,63	0,00	407,17	344,23	62,94	12,50	20,16	1,92	75,55	62,12	3,85
5	10.01.24 9:14	283,30	91,80	0,49	0,30	0,19	407,66	344,53	63,13	12,00	20,58	1,99	75,64	63,64	7,69

Продолжение таблицы Б.1

№ экс-та	Время снятия показаний	Время от начала экс-та, мин	Масса образца без учета формы, г	Масса отделившегося материала от сформированного образца массива, г			Суммарная масса отделившегося материала через фильтрующую форму, г			Высота образца в форме, мм	Потери закладочной материала образцом	Плотность образца, г/см ³	Отделившаяся смесь через фильтрующую форму, %	Величина усадки, %	Величина усадки относительно отстоявшегося материала (2 экс-та), %
				Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза	Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза						
6	11.01.24 11:19	309,38	90,03	1,77	1,77	0,00	409,43	346,30	63,13	11,50	22,11	2,04	75,97	65,15	11,54
7	12.01.24 8:16	330,33	88,74	1,29	1,29	0,00	410,72	347,59	63,13	11,00	23,23	2,10	76,21	66,67	15,38
8	15.01.24 15:36	409,66	86,24	2,50	2,50	0,00	413,22	350,09	63,13	11,00	25,39	2,04	76,68	66,67	15,38
9	15.01.24 15:41	409,75	84,30	1,94	0,00	1,94	415,16	350,09	65,07	11,00	27,07	1,99	77,04	66,67	15,38
10	16.01.24 13:18	431,37	84,05	0,25	0,25	0,00	415,41	350,34	65,07	11,00	27,29	1,99	77,08	66,67	15,38
11	17.01.24 14:30	456,57	83,93	0,12	0,12	0,00	415,53	350,46	65,07	11,00	27,39	1,98	77,10	66,67	15,38
12	17.01.24 14:34	456,63	79,15	4,78	0,00	4,78	420,31	350,46	69,85	11,00	31,53	1,87	77,99	66,67	15,38
13	18.01.24 12:06	478,17	79,14	0,01	0,01	0,00	420,32	350,47	69,85	11,00	31,53	1,87	77,99	66,67	15,38
14	19.01.24 15:43	505,78	79,14	0,00	0,00	0,00	420,32	350,47	69,85	11,00	31,53	1,87	77,99	66,67	15,38
15	19.01.24 21:33	511,62	73,32	3,21	0,00	3,21	423,53	350,47	73,06	10,00	36,57	1,91	78,59	69,70	23,08
16	22.01.24 12:29	574,55	73,26	0,06	0,06	0,00	423,59	350,53	73,06	10,00	36,62	1,90	78,60	69,70	23,08
Образец для определения прочности	Дата	24.01.24	Масса, г	73,26	Высота, мм	10,00	Диаметр, мм	70	Разрушающая образец сила, кН	2,962					
Ж -20-1															
1	29.12 14:21	0,00	168,13	0,00	0,00	0,00	360,31	304,21	56,10	35,00	0,00	1,25	65,58	0,00	0,00

Продолжение таблицы Б.1

№ экс-та	Время снятия показаний	Время от начала экс-та, мин	Масса образца без учета формы, г	Масса отделившегося материала от сформированного образца массива, г			Суммарная масса отделившегося материала через фильтрующую форму, г			Высота образца в форме, мм	Потери закладочной материала образцом	Плотность образца, г/см ³	Отделившаяся смесь через фильтрующую форму, %	Величина усадки, %	Величина усадки относительно отстоявшегося материала (2 экс-та), %
				Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза	Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза						
2	29.12 15:25	1,07	158,97	-	-	-	360,31	304,21	56,10	18,50	5,45	2,23	65,58	47,14	0,00
3	09.01.24 9:28	259,12	156,80	7,43	5,17	2,26	367,74	309,38	58,36	18,50	6,74	2,20	66,93	47,14	0,00
4	09.01.24 19:53	269,53	156,02	0,39	0,39	0,00	368,13	309,77	58,36	18,50	7,20	2,19	67,00	47,14	0,00
5	10.01.24 9:23	283,03	153,79	2,23	2,03	0,20	370,36	311,80	58,56	18,50	8,53	2,16	67,41	47,14	0,00
6	11.01.24 11:23	309,03	149,04	4,75	4,75	0,00	375,11	316,55	58,56	18,50	11,35	2,09	68,27	47,14	0,00
7	12.01.24 8:20	329,98	146,77	2,27	2,27	0,00	377,38	318,82	58,56	18,00	12,70	2,12	68,68	48,57	2,70
8	15.01.24 15:46	409,42	141,96	4,81	4,81	0,00	382,19	323,63	58,56	18,00	15,57	2,05	69,56	48,57	2,70
9	15.01.24 15:51	409,50	141,52	0,44	0,00	0,44	382,63	323,63	59,00	18,00	15,83	2,04	69,64	48,57	2,70
10	16.01.24 13:23	431,03	140,30	1,22	1,22	0,00	383,85	324,85	59,00	18,00	16,55	2,03	69,86	48,57	2,70
11	17.01.24 14:37	456,27	139,54	0,76	0,76	0,00	384,61	325,61	59,00	18,00	17,00	2,02	70,00	48,57	2,70
12	17.01.24 14:42	456,35	136,21	3,33	0,00	3,33	387,94	325,61	62,33	18,00	18,99	1,97	70,61	48,57	2,70
13	18.01.24 12:06	477,75	135,25	0,96	0,96	0,00	388,90	326,57	62,33	18,00	19,56	1,95	70,78	48,57	2,70
14	19.01.24 15:43	505,37	134,77	0,48	0,48	0,00	389,38	327,05	62,33	18,00	19,84	1,95	70,87	48,57	2,70
15	19.01.24 21:35	511,23	129,37	1,09	0,00	1,09	390,47	327,05	63,42	17,50	23,05	1,92	71,07	50,00	5,41
16	22.01.24 12:29	574,13	128,92	0,45	0,45	0,00	390,92	327,50	63,42	17,50	23,32	1,92	71,15	50,00	5,41
Образец для	Дата	24.01.24	Масса, г	128,92	Высота, мм	17,5	Диаметр, мм	70	Разрушающая образец сила, кН	3,835					

Продолжение таблицы Б.1

№ экс-та	Время снятия показаний	Время от начала экс-та, мин	Масса образца без учета формы, г	Масса отделившегося материала от сформированного образца массива, г			Суммарная масса отделившегося материала через фильтрующую форму, г			Высота образца в форме, мм	Потери закладочной материала образцом	Плотность образца, г/см ³	Отделившаяся смесь через фильтрующую форму, %	Величина усадки, %	Величина усадки относительно отстоявшегося материала (2 экс-та), %
				Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза	Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза						
определения прочности					мм										
Ж -20-2															
1	29.12 14:37	0,00	157,0 4	0,00	0,00	0,00	371,71	297,05	74,66	34,50	0,00	1,18	67,54	0,00	0,00
2	29.12 15:23	0,77	151,4 4	-	-	-	371,71	297,05	74,66	16,50	3,57	2,39	67,54	52,17	0,00
3	09.01.24 9:25	258,80	147,8 4	4,71	2,86	1,85	376,42	299,91	76,51	16,50	5,86	2,33	68,39	52,17	0,00
4	09.01.24 19:55	269,30	146,9 0	0,47	0,47	0,00	376,89	300,38	76,51	16,50	6,46	2,31	68,57	52,17	0,00
5	10.01.24 9:28	282,85	144,0 4	2,86	2,70	0,16	379,75	303,08	76,67	16,50	8,28	2,27	69,09	52,17	0,00
6	11.01.24 11:25	308,80	138,4 0	5,64	5,64	0,00	385,39	308,72	76,67	16,00	11,87	2,25	70,11	53,62	3,03
7	12.01.24 8:21	329,73	134,4 8	3,92	3,92	0,00	389,31	312,64	76,67	16,00	14,37	2,19	70,82	53,62	3,03
8	15.01.24 15:53	409,27	128,8 0	5,68	5,68	0,00	394,99	318,32	76,67	15,00	17,98	2,23	71,86	56,52	9,09
9	15.01.24 15:58	409,35	127,7 8	1,02	0,00	1,02	396,01	318,32	77,69	15,00	18,63	2,21	72,04	56,52	9,09
10	16.01.24 13:27	430,83	127,0 1	0,77	0,77	0,00	396,78	319,09	77,69	15,00	19,12	2,20	72,18	56,52	9,09
11	17.01.24 14:43	456,10	126,4 7	0,54	0,54	0,00	397,32	319,63	77,69	15,00	19,47	2,19	72,28	56,52	9,09
12	17.01.24 14:45	456,13	125,8 2	0,65	0,00	0,65	397,97	319,63	78,34	15,00	19,88	2,18	72,40	56,52	9,09
13	18.01.24 12:06	477,48	125,5 2	0,30	0,30	0,00	398,27	319,93	78,34	15,00	20,07	2,18	72,45	56,52	9,09

Продолжение таблицы Б.1

№ экс-та	Время снятия показаний	Время от начала экс-та, мин	Масса образца без учета формы, г	Масса отделившегося материала от сформированного образца массива, г			Суммарная масса отделившегося материала через фильтрующую форму, г			Высота образца в форме, мм	Потери закладочной материала образцом	Плотность образца, г/см ³	Отделившаяся смесь через фильтрующую форму, %	Величина усадки, %	Величина усадки относительно отстоявшегося материала (2 экс-та), %
				Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза	Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза						
14	19.01.24 15:44	505,12	125,49	0,03	0,03	0,00	398,30	319,96	78,34	15,00	20,09	2,17	72,46	56,52	9,09
15	19.01.24 21:37	511,00	119,72	2,04	0,00	2,04	400,34	319,96	80,38	14,50	23,76	2,15	72,83	57,97	12,12
16	22.01.24 12:29	573,87	119,62	0,10	0,10	0,00	400,44	320,06	80,38	14,50	23,83	2,14	72,85	57,97	12,12
Образец для определения прочности	Дата	24.01.24	Масса, г	119,62	Высота, мм	14,5	Диаметр, мм	70	Разрушающая образец сила, кН	3,036					
Ж -20-3															
1	29.12 14:52	0,00	155,76	0,00	0,00	0,00	373,67	296,04	77,63	34,50	0,00	1,14	67,81	0,00	0,00
2	29.12 15:22	0,50	150,08	-	-	-	373,67	296,04	77,63	16,00	3,65	2,37	67,81	53,62	0,00
3	09.01.24 9:22	258,50	143,96	7,22	4,97	2,25	380,89	301,01	79,88	15,50	7,58	2,35	69,12	55,07	3,13
4	09.01.24 19:57	269,08	142,80	0,58	0,58	0,00	381,47	301,59	79,88	15,50	8,32	2,33	69,23	55,07	3,13
5	10.01.24 9:29	282,62	140,15	2,65	2,49	0,16	384,12	304,08	80,04	15,50	10,02	2,28	69,71	55,07	3,13
6	11.01.24 11:26	308,57	134,10	6,05	6,05	0,00	390,17	310,13	80,04	15,00	13,91	2,26	70,81	56,52	6,25
7	12.01.24 8:22	329,50	130,74	3,36	3,34	0,02	393,53	313,47	80,06	15,00	16,06	2,20	71,42	56,52	6,25
8	15.01.24 16:03	409,18	126,30	4,44	4,44	0,00	397,97	317,91	80,06	15,00	18,91	2,13	72,22	56,52	6,25
9	15.01.24 16:08	409,27	125,72	0,58	0,00	0,58	398,55	317,91	80,64	15,00	19,29	2,12	72,33	56,52	6,25

Продолжение таблицы Б.1

№ экс-та	Время снятия показаний	Время от начала экс-та, мин	Масса образца без учета формы, г	Масса отделившегося материала от сформированного образца массива, г			Суммарная масса отделившегося материала через фильтрующую форму, г			Высота образца в форме, мм	Потери закладочной материала образцом	Плотность образца, г/см ³	Отделившаяся смесь через фильтрующую форму, %	Величина усадки, %	Величина усадки относительно отстоявшегося материала (2 экс-та), %
				Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза	Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза						
10	16.01.24 13:29	430,62	125,32	0,40	0,40	0,00	398,95	318,31	80,64	15,00	19,54	2,11	72,40	56,52	6,25
11	17.01.24 14:45	455,88	124,99	0,33	0,33	0,00	399,28	318,64	80,64	15,00	19,75	2,11	72,46	56,52	6,25
12	17.01.24 14:48	455,93	123,37	1,62	0,00	1,62	400,90	318,64	82,26	15,00	20,79	2,08	72,76	56,52	6,25
13	18.01.24 12:06	477,23	123,10	0,27	0,27	0,00	401,17	318,91	82,26	15,00	20,97	2,07	72,80	56,52	6,25
14	19.01.24 15:44	504,87	123,03	0,07	0,07	0,00	401,24	318,98	82,26	15,00	21,01	2,07	72,82	56,52	6,25
15	19.01.24 21:38	510,77	117,09	1,88	0,00	1,88	403,12	318,98	84,14	14,50	24,83	2,04	73,16	57,97	9,38
16	22.01.24 12:30	573,63	117,03	0,06	0,06	0,00	403,18	319,04	84,14	14,50	24,87	2,04	73,17	57,97	9,38
Образец для определения прочности	Дата	24.01.24	Масса, г	117,03	Высота, мм	14,50	Диаметр, мм	71	Разрушающая образец сила, кН	4,195					
Ж -30-1															
1	29.12 15:17	0,00	231,30	0,00	0,00	0,00	297,76	243,31	54,45	32,50	0,00	1,75	54,12	0,00	0,00
2	29.12 16:01	0,73	223,42	-	-	-	297,76	243,31	54,45	25,50	3,41	2,15	54,12	21,54	0,00
3	09.01.24 9:43	258,43	219,77	7,64	6,06	1,58	305,40	249,37	56,03	25,50	4,98	2,12	55,51	21,54	0,00
4	09.01.24 19:59	268,70	218,93	0,42	0,42	0,00	305,82	249,79	56,03	25,50	5,35	2,11	55,59	21,54	0,00
5	10.01.24 9:34	282,28	215,68	3,25	3,06	0,19	309,07	252,85	56,22	25,00	6,75	2,12	56,18	23,08	1,96

Продолжение таблицы Б.1

№ экс-та	Время снятия показаний	Время от начала экс-та, мин	Масса образца без учета формы, г	Масса отделившегося материала от сформированного образца массива, г			Суммарная масса отделившегося материала через фильтрующую форму, г			Высота образца в форме, мм	Потери закладочной материала образцом	Плотность образца, г/см ³	Отделившаяся смесь через фильтрующую форму, %	Величина усадки, %	Величина усадки относительно отстоявшегося материала (2 экс-та), %
				Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза	Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза						
6	11.01.24 11:28	308,18	208,97	6,71	6,71	0,00	315,78	259,56	56,22	24,50	9,65	2,10	57,40	24,62	3,92
7	12.01.24 8:24	329,12	204,37	4,60	4,60	0,00	320,38	264,16	56,22	24,50	11,64	2,05	58,24	24,62	3,92
8	15.01.24 16:10	408,88	197,76	6,61	6,61	0,00	326,99	270,77	56,22	24,50	14,50	1,98	59,44	24,62	3,92
9	15.01.24 16:15	408,97	196,83	0,93	0,00	0,93	327,92	270,77	57,15	24,50	14,90	1,97	59,61	24,62	3,92
10	16.01.24 13:31	430,23	195,77	1,06	1,06	0,00	328,98	271,83	57,15	24,50	15,36	1,96	59,80	24,62	3,92
11	17.01.24 14:50	455,55	194,92	0,85	0,85	0,00	329,83	272,68	57,15	24,50	15,73	1,96	59,95	24,62	3,92
12	17.01.24 14:57	455,67	193,13	1,79	0,00	1,79	331,62	272,68	58,94	24,50	16,50	1,94	60,28	24,62	3,92
13	18.01.24 12:07	476,83	191,80	1,33	1,33	0,00	332,95	274,01	58,94	24,50	17,08	1,92	60,52	24,62	3,92
14	19.01.24 15:45	504,47	191,21	0,59	0,59	0,00	333,54	274,60	58,94	24,50	17,33	1,92	60,63	24,62	3,92
15	19.01.24 21:40	510,38	182,41	3,67	0,00	3,67	337,21	274,60	62,61	24,00	21,14	1,87	61,29	26,15	5,88
16	22.01.24 12:30	573,22	181,82	0,59	0,59	0,00	337,80	275,19	62,61	24,00	21,39	1,86	61,40	26,15	5,88
Образец для определения прочности	Дата	24.01.24	Масса, г	181,82	Высота, мм	24	Диаметр, мм	72	Разрушающая образец сила, кН	5,93					
Ж -30-2															
1	29.12 15:30	0,00	227,49	0,00	0,00	0,00	305,35	238,40	66,95	33,00	0,00	1,79	55,15	0,00	0,00

Продолжение таблицы Б.1

№ экс-та	Время снятия показаний	Время от начала экс-та, мин	Масса образца без учета формы, г	Масса отделившегося материала от сформированного образца массива, г			Суммарная масса отделившегося материала через фильтрующую форму, г			Высота образца в форме, мм	Потери закладочной материала образцом	Плотность образца, г/см ³	Отделившаяся смесь через фильтрующую форму, %	Величина усадки, %	Величина усадки относительно отстоявшегося материала (2 экс-та), %
				Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза	Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза						
2	29.12 16:00	0,50	218,7 6	-	-	-	305,35	238,40	66,95	25,00	3,84	2,27	55,15	24,24	0,00
3	09.01.24 9:35	258,08	215,9 5	7,24	4,74	2,50	312,59	243,14	69,45	25,00	5,07	2,25	56,46	24,24	0,00
4	09.01.24 20:00	268,50	215,1 3	0,41	0,41	0,00	313,00	243,55	69,45	25,00	5,43	2,24	56,53	24,24	0,00
5	10.01.24 9:36	282,10	211,3 9	3,74	3,44	0,30	316,74	246,99	69,75	24,00	7,08	2,29	57,21	27,27	4,00
6	11.01.24 11:30	308,00	205,2 0	6,19	6,14	0,05	322,93	253,13	69,80	24,00	9,80	2,22	58,33	27,27	4,00
7	12.01.24 8:26	328,93	199,2 4	5,96	5,95	0,01	328,89	259,08	69,81	24,00	12,42	2,16	59,40	27,27	4,00
8	15.01.24 16:23	408,88	188,0 1	11,23	11,22	0,01	340,12	270,30	69,82	24,00	17,35	2,04	61,43	27,27	4,00
9	15.01.24 16:26	408,93	187,6 4	0,37	0,00	0,37	340,49	270,30	70,19	24,00	17,52	2,03	61,50	27,27	4,00
10	16.01.24 13:33	430,05	186,5 9	1,05	1,05	0,00	341,54	271,35	70,19	24,00	17,98	2,02	61,69	27,27	4,00
11	17.01.24 14:58	455,47	185,6 2	0,97	0,97	0,00	342,51	272,32	70,19	24,00	18,41	2,01	61,86	27,27	4,00
12	17.01.24 15:03	455,55	176,5 9	9,03	0,00	9,03	351,54	272,32	79,22	24,00	22,37	1,91	63,49	27,27	4,00
13	18.01.24 12:07	476,62	175,4 4	1,15	1,15	0,00	352,69	273,47	79,22	24,00	22,88	1,90	63,70	27,27	4,00
14	19.01.24 15:45	504,25	175,2 0	0,24	0,24	0,00	352,93	273,71	79,22	24,00	22,99	1,90	63,75	27,27	4,00
15	19.01.24 21:43	510,22	165,0 4	5,23	0,00	5,23	358,16	273,71	84,45	24,00	27,45	1,79	64,69	27,27	4,00
16	22.01.24 12:30	573,00	164,9 1	0,13	0,13	0,00	358,29	273,84	84,45	24,00	27,51	1,79	64,71	27,27	4,00
Образец для	Дата	24.01.24	Масса, г	164,91	Высота,	24	Диаметр, мм	70	Разрушающая образец сила, кН	4,702					

Продолжение таблицы Б.1

№ экс-та	Время снятия показаний	Время от начала экс-та, мин	Масса образца без учета формы, г	Масса отделившегося материала от сформированного образца массива, г			Суммарная масса отделившегося материала через фильтрующую форму, г			Высота образца в форме, мм	Потери закладочной материала образцом	Плотность образца, г/см ³	Отделившаяся смесь через фильтрующую форму, %	Величина усадки, %	Величина усадки относительно отстоявшегося материала (2 экс-та), %
				Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза	Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза						
определения прочности					мм										
Ж -30-3															
1	29.12 15:37	0,00	212,3 1	0,00	0,00	0,00	317,54	247,41	70,13	30,00	0,00	1,89	57,83	0,00	0,00
2	29.12 15:59	0,37	205,6 4	-	-	-	317,54	247,41	70,13	22,00	3,14	2,50	57,83	26,67	0,00
3	09.01.24 9:31	257,90	200,4 7	7,29	5,35	1,94	324,83	252,76	72,07	21,00	5,58	2,55	59,16	30,00	4,55
4	09.01.24 20:02	268,42	199,5 1	0,48	0,48	0,00	325,31	253,24	72,07	21,00	6,03	2,54	59,25	30,00	4,55
5	10.01.24 9:38	282,02	196,3 0	3,21	3,00	0,21	328,52	256,24	72,28	21,00	7,54	2,50	59,83	30,00	4,55
6	11.01.24 11:31	307,90	189,0 2	7,28	7,04	0,24	335,80	263,28	72,52	21,00	10,97	2,41	61,16	30,00	4,55
7	12.01.24 8:27	328,83	184,7 9	4,23	4,23	0,00	340,03	267,51	72,52	21,00	12,96	2,35	61,93	30,00	4,55
8	15.01.24 16:28	408,85	179,0 6	5,73	5,73	0,00	345,76	273,24	72,52	21,00	15,66	2,28	62,97	30,00	4,55
9	15.01.24 16:30	408,88	177,8 3	1,23	0,00	1,23	346,99	273,24	73,75	21,00	16,24	2,27	63,20	30,00	4,55
10	16.01.24 13:34	429,95	177,0 8	0,75	0,75	0,00	347,74	273,99	73,75	21,00	16,59	2,26	63,33	30,00	4,55
11	17.01.24 15:04	455,45	176,5 6	0,52	0,52	0,00	348,26	274,51	73,75	21,00	16,84	2,25	63,43	30,00	4,55
12	17.01.24 15:06	455,48	176,0 6	0,50	0,00	0,50	348,76	274,51	74,25	21,00	17,07	2,24	63,52	30,00	4,55
13	18.01.24 12:08	476,52	175,3 7	0,69	0,69	0,00	349,45	275,20	74,25	21,00	17,40	2,23	63,65	30,00	4,55

Продолжение таблицы Б.1

№ экс-та	Время снятия показаний	Время от начала экс-та, мин	Масса образца без учета формы, г	Масса отделившегося материала от сформированного образца массива, г			Суммарная масса отделившегося материала через фильтрующую форму, г			Высота образца в форме, мм	Потери закладочной материала образцом	Плотность образца, г/см ³	Отделившаяся смесь через фильтрующую форму, %	Величина усадки, %	Величина усадки относительно отстоявшегося материала (2 экс-та), %
				Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза	Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза						
14	19.01.24 15:46	504,15	175,21	0,16	0,16	0,00	349,61	275,36	74,25	21,00	17,47	2,23	63,68	30,00	4,55
15	19.01.24 21:45	510,13	168,02	3,78	0,00	3,78	353,39	275,36	78,03	21,00	20,86	2,14	64,36	30,00	4,55
16	22.01.24 12:31	572,90	167,94	0,08	0,08	0,00	353,47	275,44	78,03	21,00	20,90	2,14	64,38	30,00	4,55
Образец для определения прочности	Дата	24.01.24	Масса, г	167,94	Высота, мм	21	Диаметр, мм	69	Разрушающая образец сила, кН	5,714					
Ж -40-1															
1	29.12 15:47	0,00	284,77	0,00	0,00	0,00	237,08	171,24	65,84	33,00	0,00	2,18	43,74	0,00	0,00
2	29.12 16:37	0,83	272,77	-	-	-	237,08	171,24	65,84	32,00	4,21	2,15	43,74	3,03	0,00
3	09.01.24 9:46	257,98	268,67	11,15	9,07	2,08	248,23	180,31	67,92	31,50	5,65	2,16	45,80	4,55	1,56
4	09.01.24 20:09	268,37	267,85	0,41	0,41	0,00	248,64	180,72	67,92	31,50	5,94	2,15	45,87	4,55	1,56
5	10.01.24 9:40	281,88	264,36	3,49	3,29	0,20	252,13	184,01	68,12	31,50	7,17	2,12	46,52	4,55	1,56
6	11.01.24 11:33	307,77	256,40	7,96	7,96	0,00	260,09	191,97	68,12	31,50	9,96	2,06	47,98	4,55	1,56
7	12.01.24 8:28	328,68	249,79	6,61	6,61	0,00	266,70	198,58	68,12	30,00	12,28	2,10	49,20	9,09	6,25
8	15.01.24 16:33	408,77	241,30	8,49	8,49	0,00	275,19	207,07	68,12	30,00	15,26	2,03	50,77	9,09	6,25
9	15.01.24 16:35	408,79	239,86	1,44	0,00	1,44	276,63	207,07	69,56	30,00	15,77	2,02	51,04	9,09	6,25

Продолжение таблицы Б.1

№ экс-та	Время снятия показаний	Время от начала экс-та, мин	Масса образца без учета формы, г	Масса отделившегося материала от сформированного образца массива, г			Суммарная масса отделившегося материала через фильтрующую форму, г			Высота образца в форме, мм	Потери закладочной материала образцом	Плотность образца, г/см ³	Отделившаяся смесь через фильтрующую форму, %	Величина усадки, %	Величина усадки относительно отстоявшегося материала (2 экс-та), %
				Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза	Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза						
10	16.01.24 13:37	429,83	238,68	1,18	1,18	0,00	277,81	208,25	69,56	30,00	16,18	2,01	51,25	9,09	6,25
11	17.01.24 15:09	455,37	237,66	1,02	1,02	0,00	278,83	209,27	69,56	30,00	16,54	2,00	51,44	9,09	6,25
12	17.01.24 15:12	455,43	234,53	3,13	0,00	3,13	281,96	209,27	72,69	30,00	17,64	1,98	52,02	9,09	6,25
13	18.01.24 12:08	476,35	233,38	1,15	1,15	0,00	283,11	210,42	72,69	30,00	18,05	1,97	52,23	9,09	6,25
14	19.01.24 15:46	503,98	232,85	0,53	0,53	0,00	283,64	210,95	72,69	30,00	18,23	1,96	52,33	9,09	6,25
15	19.01.24 21:47	510,00	225,34	2,77	0,00	2,77	286,41	210,95	75,46	30,00	20,87	1,90	52,84	9,09	6,25
16	22.01.24 12:31	572,73	225,00	0,34	0,34	0,00	286,75	211,29	75,46	30,00	20,99	1,90	52,90	9,09	6,25
Образец для определения прочности	Дата	24.01.24	Масса, г	225	Высота, мм	30	Диаметр, мм	71	Разрушающая образец сила, кН	8,552					
Ж -40-2															
1	29.12 15:55	0,00	272,94	0,00	0,00	0,00	257,23	194,67	62,56	32,00	0,00	2,10	46,77	0,00	0,00
2	29.12 16:35	0,66	263,26	-	-	-	257,23	194,67	62,56	27,00	3,55	2,40	46,77	15,63	0,00
3	09.01.24 9:49	257,90	258,20	9,56	7,33	2,23	266,79	202,00	64,79	26,50	5,40	2,39	48,51	17,19	1,85
4	09.01.24 20:07	268,20	213,90	44,02	44,02	0,00	310,81	246,02	64,79	26,50	21,63	1,98	56,51	17,19	1,85
5	10.01.24 9:41	281,77	251,51	- 37,61	- 37,83	0,22	273,20	208,19	65,01	26,00	7,85	2,38	49,67	18,75	3,70

Продолжение таблицы Б.1

№ экс-та	Время снятия показаний	Время от начала экс-та, мин	Масса образца без учета формы, г	Масса отделившегося материала от сформированного образца массива, г			Суммарная масса отделившегося материала через фильтрующую форму, г			Высота образца в форме, мм	Потери закладочной материала образцом	Плотность образца, г/см ³	Отделившаяся смесь через фильтрующую форму, %	Величина усадки, %	Величина усадки относительно отстоявшегося материала (2 экс-та), %
				Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза	Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза						
6	11.01.24 11:35	307,66	242,53	8,98	8,98	0,00	282,18	217,17	65,01	26,00	11,14	2,29	51,30	18,75	3,70
7	12.01.24 8:30	328,58	237,55	4,98	4,97	0,01	287,16	222,14	65,02	26,00	12,97	2,25	52,21	18,75	3,70
8	15.01.24 16:37	408,70	230,62	6,93	6,93	0,00	294,09	229,07	65,02	26,00	15,51	2,18	53,47	18,75	3,70
9	15.01.24 16:40	408,75	228,06	2,56	0,00	2,56	296,65	229,07	67,58	26,00	16,44	2,16	53,93	18,75	3,70
10	16.01.24 13:38	429,72	227,11	0,95	0,95	0,00	297,60	230,02	67,58	26,00	16,79	2,15	54,11	18,75	3,70
11	17.01.24 15:12	455,28	226,21	0,90	0,90	0,00	298,50	230,92	67,58	26,00	17,12	2,14	54,27	18,75	3,70
12	17.01.24 15:14	455,32	225,58	0,63	0,00	0,63	299,13	230,92	68,21	26,00	17,35	2,13	54,39	18,75	3,70
13	18.01.24 12:08	476,22	224,46	1,12	1,12	0,00	300,25	232,04	68,21	26,00	17,76	2,12	54,59	18,75	3,70
14	19.01.24 15:46	503,85	223,98	0,48	0,48	0,00	300,73	232,52	68,21	26,00	17,94	2,12	54,68	18,75	3,70
15	19.01.24 21:48	509,88	212,48	7,17	0,00	7,17	307,90	232,52	75,38	26,00	22,15	2,01	55,98	18,75	3,70
16	22.01.24 12:31	572,60	212,14	0,34	0,34	0,00	308,24	232,86	75,38	26,00	22,28	2,01	56,04	18,75	3,70
Образец для определения прочности	Дата	24.01.24	Масса, г	212,14	Высота, мм	26	Диаметр, мм	72	Разрушающая образцовая сила, кН	6,313					
Ж -40-3															
1	29.12 16:05	0,00	272,80	0,00	0,00	0,00	257,36	195,00	62,36	29,00	0,00	2,31	46,81	0,00	0,00

Продолжение таблицы Б.1

№ экс-та	Время снятия показаний	Время от начала экс-та, мин	Масса образца без учета формы, г	Масса отделившегося материала от сформированного образца массива, г			Суммарная масса отделившегося материала через фильтрующую форму, г			Высота образца в форме, мм	Потери закладочной материала образцом	Плотность образца, г/см ³	Отделившаяся смесь через фильтрующую форму, %	Величина усадки, %	Величина усадки относительно отстоявшегося материала (2 экс-та), %
				Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза	Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза						
2	29.12 16:37	0,37	266,05	-	-	-	257,36	195,00	62,36	27,00	2,47	2,42	46,81	6,90	0,00
3	09.01.24 9:37	257,53	260,27	8,21	6,24	1,97	265,57	201,24	64,33	27,00	4,59	2,37	48,30	6,90	0,00
4	09.01.24 20:05	268,00	259,71	0,28	0,28	0,00	265,85	201,52	64,33	27,00	4,80	2,36	48,35	6,90	0,00
5	10.01.24 9:42	281,62	256,42	3,29	3,11	0,18	269,14	204,63	64,51	27,00	6,00	2,33	48,95	6,90	0,00
6	11.01.24 11:37	307,53	249,26	7,16	7,16	0,00	276,30	211,79	64,51	26,50	8,63	2,31	50,25	8,62	1,85
7	12.01.24 8:31	328,43	242,37	6,89	6,89	0,00	283,19	218,68	64,51	26,50	11,15	2,25	51,51	8,62	1,85
8	15.01.24 16:41	408,53	233,17	9,20	9,20	0,00	292,39	227,88	64,51	26,00	14,53	2,20	53,18	10,34	3,70
9	15.01.24 16:46	408,68	230,65	2,52	0,00	2,52	294,91	227,88	67,03	26,00	15,45	2,18	53,64	10,34	3,70
10	16.01.24 13:40	429,58	229,41	1,24	1,24	0,00	296,15	229,12	67,03	26,00	15,91	2,17	53,86	10,34	3,70
11	17.01.24 15:14	455,15	228,35	1,06	1,06	0,00	297,21	230,18	67,03	26,00	16,29	2,16	54,06	10,34	3,70
12	17.01.24 15:16	455,18	227,52	0,83	0,00	0,83	298,04	230,18	67,86	26,00	16,60	2,15	54,21	10,34	3,70
13	18.01.24 12:09	476,07	226,14	1,38	1,38	0,00	299,42	231,56	67,86	26,00	17,10	2,14	54,46	10,34	3,70
14	19.01.24 15:47	503,70	225,53	0,61	0,61	0,00	300,03	232,17	67,86	26,00	17,33	2,13	54,57	10,34	3,70
15	19.01.24 21:50	509,75	217,16	4,80	0,00	4,80	304,83	232,17	72,66	26,00	20,40	2,05	55,44	10,34	3,70
16	22.01.24 12:32	572,45	216,89	0,27	0,27	0,00	305,10	232,44	72,66	26,00	20,49	2,05	55,49	10,34	3,70
Образец для	Дата	24.01.24	Масса, г	216,89	Высота, мм	26	Диаметр, мм	72	Разрушающая образец сила, кН	6,793					

Продолжение таблицы Б.1

№ экс-та	Время снятия показаний	Время от начала экс-та, мин	Масса образца без учета формы, г	Масса отделившегося материала от сформированного образца массива, г			Суммарная масса отделившегося материала через фильтрующую форму, г			Высота образца в форме, мм	Потери закладочной материала образцом	Плотность образца, г/см ³	Отделившаяся смесь через фильтрующую форму, %	Величина усадки, %	Величина усадки относительно отстоявшегося материала (2 экс-та), %
				Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза	Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза						
определения прочности					мм										
Ж -50-1															
1	29.12 16:13	0,00	339,9 0	0,00	0,00	0,00	168,97	100,65	68,32	35,00	0,00	2,45	31,97	0,00	0,00
2	29.12 16:39	0,43	330,8 4	-	-	-	168,97	100,65	68,32	32,50	2,67	2,57	31,97	7,14	0,00
3	09.01.24 10:00	257,78	324,1 2	12,84	10,87	1,97	181,81	111,52	70,29	32,50	4,64	2,52	34,40	7,14	0,00
4	09.01.24 20:11	267,97	323,1 4	0,49	0,49	0,00	182,30	112,01	70,29	32,50	4,93	2,51	34,50	7,14	0,00
5	10.01.24 9:45	281,53	317,5 9	5,55	5,28	0,27	187,85	117,29	70,56	32,00	6,56	2,51	35,55	8,57	1,54
6	11.01.24 11:38	307,42	303,9 3	13,66	13,66	0,00	201,51	130,95	70,56	32,00	10,58	2,40	38,13	8,57	1,54
7	12.01.24 8:33	328,33	298,1 4	5,79	5,79	0,00	207,30	136,74	70,56	32,00	12,29	2,35	39,23	8,57	1,54
8	15.01.24 16:49	408,60	289,4 3	8,71	8,71	0,00	216,01	145,45	70,56	32,00	14,85	2,29	40,87	8,57	1,54
9	15.01.24 16:54	408,68	286,0 3	3,40	0,00	3,40	219,41	145,45	73,96	32,00	15,85	2,26	41,52	8,57	1,54
10	16.01.24 13:41	429,47	284,4 6	1,57	1,57	0,00	220,98	147,02	73,96	32,00	16,31	2,25	41,81	8,57	1,54
11	17.01.24 15:17	455,07	283,0 9	1,37	1,37	0,00	222,35	148,39	73,96	32,00	16,71	2,24	42,07	8,57	1,54
12	17.01.24 15:20	455,12	280,0 0	3,09	0,00	3,09	225,44	148,39	77,05	32,00	17,62	2,21	42,66	8,57	1,54
13	18.01.24 12:09	475,93	278,5 9	1,41	1,41	0,00	226,85	149,80	77,05	32,00	18,04	2,20	42,92	8,57	1,54

Продолжение таблицы Б.1

№ экс-та	Время снятия показаний	Время от начала экс-та, мин	Масса образца без учета формы, г	Масса отделившегося материала от сформированного образца массива, г			Суммарная масса отделившегося материала через фильтрующую форму, г			Высота образца в форме, мм	Потери закладочной материала образцом	Плотность образца, г/см ³	Отделившаяся смесь через фильтрующую форму, %	Величина усадки, %	Величина усадки относительно отстоявшегося материала (2 экс-та), %
				Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза	Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза						
14	19.01.24 15:47	503,57	277,83	0,76	0,76	0,00	227,61	150,56	77,05	32,00	18,26	2,19	43,07	8,57	1,54
15	19.01.24 21:52	509,65	262,58	14,28	0,00	14,28	241,89	150,56	91,33	32,00	22,75	2,07	45,77	8,57	1,54
16	22.01.24 12:33	572,33	261,88	0,70	0,70	0,00	242,59	151,26	91,33	32,00	22,95	2,07	45,90	8,57	1,54
Образец для определения прочности	Дата	24.01.24	Масса, г	261,88	Высота, мм	32,00	Диаметр, мм	71	Разрушающая образец сила, кН	13,167					
Ж -50-2															
1	29.12 16:21	0,00	352,90	0,00	0,00	0,00	168,82	119,57	49,25	43,00	0,00	2,13	31,17	0,00	0,00
2	29.12 16:38	0,28	342,31	-	-	-	168,82	119,57	49,25	38,00	3,00	2,34	31,17	11,63	0,00
3	09.01.24 9:57	257,60	336,93	14,07	12,12	1,95	182,89	131,69	51,20	37,00	4,53	2,37	33,77	13,95	2,63
4	09.01.24 20:12	267,85	336,55	0,19	0,19	0,00	183,08	131,88	51,20	37,00	4,63	2,36	33,80	13,95	2,63
5	10.01.24 9:46	281,42	330,76	5,79	5,50	0,29	188,87	137,38	51,49	37,00	6,27	2,32	34,87	13,95	2,63
6	11.01.24 11:40	307,32	319,53	11,23	11,23	0,00	200,10	148,61	51,49	37,00	9,46	2,25	36,95	13,95	2,63
7	12.01.24 8:34	328,22	312,73	6,80	6,80	0,00	206,90	155,41	51,49	37,00	11,38	2,20	38,20	13,95	2,63
8	15.01.24 16:55	408,57	302,50	10,23	10,23	0,00	217,13	165,64	51,49	36,50	14,28	2,15	40,09	15,12	3,95
9	15.01.24 16:58	408,62	300,64	1,86	0,00	1,86	218,99	165,64	53,35	36,50	14,81	2,14	40,43	15,12	3,95

Продолжение таблицы Б.1

№ экс-та	Время снятия показаний	Время от начала экс-та, мин	Масса образца без учета формы, г	Масса отделившегося материала от сформированного образца массива, г			Суммарная масса отделившегося материала через фильтрующую форму, г			Высота образца в форме, мм	Потери закладочной материала образцом	Плотность образца, г/см ³	Отделившаяся смесь через фильтрующую форму, %	Величина усадки, %	Величина усадки относительно отстоявшегося материала (2 экс-та), %
				Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза	Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза						
10	16.01.24 13:43	429,37	299,09	1,55	1,55	0,00	220,54	167,19	53,35	36,50	15,25	2,13	40,72	15,12	3,95
11	17.01.24 15:20	454,98	297,63	1,46	1,46	0,00	222,00	168,65	53,35	36,50	15,66	2,12	40,99	15,12	3,95
12	17.01.24 15:24	455,05	291,12	6,51	0,00	6,51	228,51	168,65	59,86	36,50	17,51	2,07	42,19	15,12	3,95
13	18.01.24 12:09	475,80	289,61	1,51	1,51	0,00	230,02	170,16	59,86	36,50	17,93	2,06	42,47	15,12	3,95
14	19.01.24 15:47	503,43	288,51	1,10	1,10	0,00	231,12	171,26	59,86	36,50	18,25	2,05	42,67	15,12	3,95
15	19.01.24 21:53	509,53	276,58	8,23	0,00	8,23	239,35	171,26	68,09	36,50	21,63	1,97	44,19	15,12	3,95
16	22.01.24 12:33	572,20	275,49	1,09	1,09	0,00	240,44	172,35	68,09	36,50	21,94	1,96	44,39	15,12	3,95
Образец для определения прочности	Дата	24.01.24	Масса, г	275,49	Высота, мм	36,5	Диаметр, мм	70	Разрушающая образец сила, кН	10,21					
Ж-50-3															
1	29.12 16:27	0,00	359,75	0,00	0,00	0,00	168,27	111,42	56,85	45,00	0,00	2,11	30,69	0,00	0,00
2	29.12 16:38	0,18	339,49	-	-	-	168,27	111,42	56,85	37,00	5,63	2,42	30,69	17,78	0,00
3	09.01.24 9:54	257,45	337,52	11,67	9,08	2,59	179,94	120,50	59,44	37,00	6,18	2,41	32,82	17,78	0,00
4	09.01.24 20:14	267,78	336,74	0,39	0,38	0,01	180,33	120,88	59,45	37,00	6,40	2,40	32,89	17,78	0,00
5	10.01.24 9:47	281,33	330,03	6,71	5,50	1,21	187,04	126,38	60,66	36,50	8,26	2,38	34,12	18,89	1,35

Продолжение таблицы Б.1

№ экс-та	Время снятия показаний	Время от начала экс-та, мин	Масса образца без учета формы, г	Масса отделившегося материала от сформированного образца массива, г			Суммарная масса отделившегося материала через фильтрующую форму, г			Высота образца в форме, мм	Потери закладочной материала образцом	Плотность образца, г/см ³	Отделившаяся смесь через фильтрующую форму, %	Величина усадки, %	Величина усадки относительно отстоявшегося материала (2 экс-та), %
				Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза	Общая масса смеси	Несущая среда	Дисперсная фаза						
6	11.01.24 11:41	307,23	319,13	10,90	10,90	0,00	197,94	137,28	60,66	36,50	11,29	2,31	36,11	18,89	1,35
7	12.01.24 8:36	328,15	311,26	7,87	7,87	0,00	205,81	145,15	60,66	36,00	13,48	2,28	37,54	20,00	2,70
8	15.01.24 16:59	408,53	298,83	12,43	12,43	0,00	218,24	157,58	60,66	36,00	16,93	2,19	39,81	20,00	2,70
9	15.01.24 17:05	408,63	295,81	3,02	0,00	3,02	221,26	157,58	63,68	36,00	17,77	2,17	40,36	20,00	2,70
10	16.01.24 13:45	429,30	293,80	2,01	1,91	0,10	223,27	159,49	63,78	36,00	18,33	2,15	40,73	20,00	2,70
11	17.01.24 15:24	454,95	292,78	1,02	1,02	0,00	224,29	160,51	63,78	36,00	18,62	2,14	40,91	20,00	2,70
12	17.01.24 15:26	454,98	291,95	0,83	0,00	0,83	225,12	160,51	64,61	36,00	18,85	2,14	41,06	20,00	2,70
13	18.01.24 12:10	475,72	289,91	2,04	2,04	0,00	227,16	162,55	64,61	36,00	19,41	2,12	41,44	20,00	2,70
14	19.01.24 15:48	503,35	288,73	1,18	1,18	0,00	228,34	163,73	64,61	36,00	19,74	2,12	41,65	20,00	2,70
15	19.01.24 21:56	509,48	270,23	13,39	0,00	13,39	241,73	163,73	78,00	36,00	24,88	1,98	44,09	20,00	2,70
16	22.01.24 12:33	572,10	269,14	1,09	1,09	0,00	242,82	164,82	78,00	36,00	25,19	1,97	44,29	20,00	2,70
Образец для определения прочности	Дата	24.01.24	Масса, г	269,14	Высота, мм	36	Диаметр, мм	69,5	Разрушающая образец сила, кН	13,26					

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Технические и геометрические характеристики инерционного сгустителя

Таблица В.1 – Сводная таблица технических характеристик инерционного сгустителя

$D_{тр}, м$	$v, м/с$	$v_{ср}, м/с$	$Q_{вх}, м^3/ч$	$Q_{вых}, м^3/ч$	$B, м$	$A, м$	$H, м$	$V_{рк}, м^3$	$t, с$
0,125	0,700	0,525	30,909	15,455	0,250	2,500	1,497	0,468	277,256
0,125	0,700	0,525	30,909	15,455	0,250	2,875	1,722	0,619	366,671
0,125	0,700	0,525	30,909	15,455	0,250	3,125	1,871	0,731	433,212
0,125	1,000	0,750	44,156	22,078	0,250	2,500	1,497	0,468	194,079
0,125	1,000	0,750	44,156	22,078	0,250	2,875	1,722	0,619	256,669
0,125	1,000	0,750	44,156	22,078	0,250	3,125	1,871	0,731	303,248
0,125	1,300	0,975	57,403	28,702	0,250	2,500	1,497	0,468	149,292
0,125	1,300	0,975	57,403	28,702	0,250	2,875	1,722	0,619	197,438
0,125	1,300	0,975	57,403	28,702	0,250	3,125	1,871	0,731	233,268
0,125	1,600	1,200	70,650	35,325	0,250	2,500	1,497	0,468	121,299
0,125	1,600	1,200	70,650	35,325	0,250	2,875	1,722	0,619	160,418
0,125	1,600	1,200	70,650	35,325	0,250	3,125	1,871	0,731	189,530
0,125	2,000	1,500	88,313	44,156	0,250	2,500	1,497	0,468	97,039
0,125	2,000	1,500	88,313	44,156	0,250	2,875	1,722	0,619	128,335
0,125	2,000	1,500	88,313	44,156	0,250	3,125	1,871	0,731	151,624
0,150	0,700	0,525	44,510	22,255	0,300	2,500	1,497	0,561	192,539
0,150	0,700	0,525	44,510	22,255	0,300	2,875	1,722	0,742	254,632
0,150	0,700	0,525	44,510	22,255	0,300	3,125	1,871	0,877	300,842
0,150	1,000	0,750	63,585	31,793	0,300	2,500	1,497	0,561	134,777
0,150	1,000	0,750	63,585	31,793	0,300	2,875	1,722	0,742	178,243
0,150	1,000	0,750	63,585	31,793	0,300	3,125	1,871	0,877	210,589
0,150	1,300	0,975	82,661	41,330	0,300	2,500	1,497	0,561	103,675
0,150	1,300	0,975	82,661	41,330	0,300	2,875	1,722	0,742	137,110
0,150	1,300	0,975	82,661	41,330	0,300	3,125	1,871	0,877	161,992
0,150	1,600	1,200	101,736	50,868	0,300	2,500	1,497	0,561	84,236
0,150	1,600	1,200	101,736	50,868	0,300	2,875	1,722	0,742	111,402
0,150	1,600	1,200	101,736	50,868	0,300	3,125	1,871	0,877	131,618
0,150	2,000	1,500	127,170	63,585	0,300	2,500	1,497	0,561	67,389
0,150	2,000	1,500	127,170	63,585	0,300	2,875	1,722	0,742	89,121

Продолжение таблицы В.1

$D_{тр}, м$	$v, м/с$	$v_{ср}, м/с$	$Q_{вх}, м^3/ч$	$Q_{вых}, м^3/ч$	$B, м$	$A, м$	$H, м$	$V_{рк}, м^3$	$t, с$
0,150	2,000	1,500	127,170	63,585	0,300	3,125	1,871	0,877	105,295
0,179	0,700	0,525	63,384	31,692	0,358	2,500	1,497	0,670	135,206
0,179	0,700	0,525	63,384	31,692	0,358	2,875	1,722	0,886	178,809
0,179	0,700	0,525	63,384	31,692	0,358	3,125	1,871	1,047	211,259
0,179	1,000	0,750	90,548	45,274	0,358	2,500	1,497	0,670	94,644
0,179	1,000	0,750	90,548	45,274	0,358	2,875	1,722	0,886	125,167
0,179	1,000	0,750	90,548	45,274	0,358	3,125	1,871	1,047	147,881
0,179	1,300	0,975	117,712	58,856	0,358	2,500	1,497	0,670	72,803
0,179	1,300	0,975	117,712	58,856	0,358	2,875	1,722	0,886	96,282
0,179	1,300	0,975	117,712	58,856	0,358	3,125	1,871	1,047	113,755
0,179	1,600	1,200	144,877	72,438	0,358	2,500	1,497	0,670	59,152
0,179	1,600	1,200	144,877	72,438	0,358	2,875	1,722	0,886	78,229
0,179	1,600	1,200	144,877	72,438	0,358	3,125	1,871	1,047	92,426
0,179	2,000	1,500	181,096	90,548	0,358	2,500	1,497	0,670	47,322
0,179	2,000	1,500	181,096	90,548	0,358	2,875	1,722	0,886	62,583
0,179	2,000	1,500	181,096	90,548	0,358	3,125	1,871	1,047	73,941
0,220	0,700	0,525	95,745	47,872	0,440	2,500	1,497	0,823	89,507
0,220	0,700	0,525	95,745	47,872	0,440	2,875	1,722	1,089	118,372
0,220	0,700	0,525	95,745	47,872	0,440	3,125	1,871	1,286	139,854
0,220	1,000	0,750	136,778	68,389	0,440	2,500	1,497	0,823	62,655
0,220	1,000	0,750	136,778	68,389	0,440	2,875	1,722	1,089	82,861
0,220	1,000	0,750	136,778	68,389	0,440	3,125	1,871	1,286	97,898
0,220	1,300	0,975	177,812	88,906	0,440	2,500	1,497	0,823	48,196
0,220	1,300	0,975	177,812	88,906	0,440	2,875	1,722	1,089	63,739
0,220	1,300	0,975	177,812	88,906	0,440	3,125	1,871	1,286	75,306
0,220	1,600	1,200	218,845	109,423	0,440	2,500	1,497	0,823	39,159
0,220	1,600	1,200	218,845	109,423	0,440	2,875	1,722	1,089	51,788
0,220	1,600	1,200	218,845	109,423	0,440	3,125	1,871	1,286	61,186
0,220	2,000	1,500	273,557	136,778	0,440	2,500	1,497	0,823	31,327

Продолжение таблицы В.1

$D_{тр}, м$	$v, м/с$	$v_{ср}, м/с$	$Q_{вх}, м^3/ч$	$Q_{вых}, м^3/ч$	$B, м$	$A, м$	$H, м$	$V_{рк}, м^3$	$t, с$
0,220	2,000	1,500	273,557	136,778	0,440	2,875	1,722	1,089	41,430
0,220	2,000	1,500	273,557	136,778	0,440	3,125	1,871	1,286	48,949

Таблица В.2 – Сводная таблица размеров отклоняющего гидродинамического профиля инерционного сгустителя

$D_{тр}, м$	$v_{ср}, м/с$	$H, м$	$l, м$	$t, с$	$k, м$
0,125	0,525	1,497	2,049	277,256	0,891
0,125	0,525	1,722	2,357	366,671	1,025
0,125	0,525	1,871	2,562	433,212	1,114
0,125	0,750	1,497	2,049	194,079	0,891
0,125	0,750	1,722	2,357	256,669	1,025
0,125	0,750	1,871	2,562	303,248	1,114
0,125	0,975	1,497	2,049	149,292	0,891
0,125	0,975	1,722	2,357	197,438	1,025
0,125	0,975	1,871	2,562	233,268	1,114
0,125	1,200	1,497	2,049	121,299	0,891
0,125	1,200	1,722	2,357	160,418	1,025
0,125	1,200	1,871	2,562	189,530	1,114
0,125	1,500	1,497	2,049	97,039	0,891
0,125	1,500	1,722	2,357	128,335	1,025
0,125	1,500	1,871	2,562	151,624	1,114
0,150	0,525	1,497	1,871	192,539	0,813
0,150	0,525	1,722	2,151	254,632	0,935
0,150	0,525	1,871	2,338	300,842	1,017
0,150	0,750	1,497	1,871	134,777	0,813
0,150	0,750	1,722	2,151	178,243	0,935
0,150	0,750	1,871	2,338	210,589	1,017
0,150	0,975	1,497	1,871	103,675	0,813
0,150	0,975	1,722	2,151	137,110	0,935

Продолжение таблицы В.2

$D_{тр}, м$	$v_{ср}, м/с$	$H, м$	$l, м$	$t, с$	$k, м$
0,150	0,975	1,871	2,338	161,992	1,017
0,150	1,200	1,497	1,871	84,236	0,813
0,150	1,200	1,722	2,151	111,402	0,935
0,150	1,200	1,871	2,338	131,618	1,017
0,150	1,500	1,497	1,871	67,389	0,813
0,150	1,500	1,722	2,151	89,121	0,935
0,150	1,500	1,871	2,338	105,295	1,017
0,179	0,525	1,497	1,712	135,206	0,745
0,179	0,525	1,722	1,969	178,809	0,856
0,179	0,525	1,871	2,141	211,259	0,931
0,179	0,750	1,497	1,712	94,644	0,745
0,179	0,750	1,722	1,969	125,167	0,856
0,179	0,750	1,871	2,141	147,881	0,931
0,179	0,975	1,497	1,712	72,803	0,745
0,179	0,975	1,722	1,969	96,282	0,856
0,179	0,975	1,871	2,141	113,755	0,931
0,179	1,200	1,497	1,712	59,152	0,745
0,179	1,200	1,722	1,969	78,229	0,856
0,179	1,200	1,871	2,141	92,426	0,931
0,179	1,500	1,497	1,712	47,322	0,745
0,179	1,500	1,722	1,969	62,583	0,856
0,179	1,500	1,871	2,141	73,941	0,931
0,220	0,525	1,497	1,545	89,507	0,672
0,220	0,525	1,722	1,776	118,372	0,772
0,220	0,525	1,871	1,931	139,854	0,839
0,220	0,750	1,497	1,545	62,655	0,672
0,220	0,750	1,722	1,776	82,861	0,772
0,220	0,750	1,871	1,931	97,898	0,839
0,220	0,975	1,497	1,545	48,196	0,672
0,220	0,975	1,722	1,776	63,739	0,772
0,220	0,975	1,871	1,931	75,306	0,839

Продолжение таблицы В.2

$D_{тр}, м$	$v_{ср}, м/с$	$H, м$	$l, м$	$t, с$	$k, м$
0,220	1,200	1,497	1,545	39,159	0,672
0,220	1,200	1,722	1,776	51,788	0,772
0,220	1,200	1,871	1,931	61,186	0,839
0,220	1,500	1,497	1,545	31,327	0,672
0,220	1,500	1,722	1,776	41,430	0,772
0,220	1,500	1,871	1,931	48,949	0,839

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертации



АО «Гипроцветмет»
 Звездный бульвар, д. 23, стр. 10, эт. 2, пом. 1
 Москва, а/я 25, 129075
 Тел.: +7 (495) 600-32-00, e-mail: office@giprocm.ru
 ОКПО 00198404, ОГРН 1137746314640
 ИНН/КПП 7717750345/771701001

Утверждаю
 Управляющий директор
 Н.А. Липинский
 М.П.
 Дата « 08. » мая 2024 г.

АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертации аспиранта Санкт-Петербургского горного университета, Волчихиной Александры Алексеевны, обучающейся по научной специальности «2.8.8. «Геотехнология, горные машины»

Рабочая комиссия в составе: председателя комиссии - директора по горному производству-технического директора, канд. техн. наук, Куранова Антона Дмитриевича, а также членов комиссии - директора по авторскому надзору, промышленной безопасности и охране труда Тимохина Вадима Анатольевича, главного инженера проектов Черепанова Андрея Владимировича - составила настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Оборудование для сгущения закладочных гидросмесей на финальном участке транспортирования», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы при ведении проектной и экспертной работы в деятельности АО «Гипроцветмет» при проработке технических решений при разработке технико-коммерческих предложений по проектированию технологических схем закладочных работ на горнодобывающих предприятиях, по объектам:

- «Рабочая документация «Строительство временного здания БРУ-30 на месторождении Кумроч в Усть-Камчатском муниципальном районе Камчатского края. I очередь. Золотоизвлекательная фабрика с объектами инфраструктуры»
- «Проведение научно-исследовательской работы с составлением рецептуры для изготовления мокрого торкретбетона, а также разработка технологической схемы, с технико-экономической оценкой и возможностью задействования закупленного оборудования на месторождении «Кумроч».

Результаты диссертационного исследования приняты к внедрению при проработке технических решений в части проектирования технологических схем и регламентации производства закладочных работ на горнодобывающих предприятиях.

По результатам совместных разработок получено 0 патентов.

Использование результатов, полученных Волчихиной А.А., позволяет повысить качество проектирования и эффективность применения систем разработки с закладкой выработанного пространства за счет возможности реализовать закладку гидросмесью с содержанием наполнителя до 50% по массе.

Председатель комиссии

Директор по горному производству-
технический директор, канд. техн. наук



Куранов А.Д.

Члены комиссии:

Директор по авторскому надзору,
промышленной безопасности и охране труда



Тимохин В.А.

Главный инженер проектов



Черепанов А.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
Патенты
Патент на полезную модель

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 214518

МАГНИТНЫЙ ПЕРИСТАЛЬТИЧЕСКИЙ НАСОС

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Васильева Мария Александровна (RU), Волчихина Александра Алексеевна (RU), Зеленцова Анна Александровна (RU)*

Заявка № 2022117026

Приоритет полезной модели 24 июня 2022 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 01 ноября 2022 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 24 июня 2032 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2773111

**СТЕНД ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ
ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА
ГИДРОАБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Васильева Мария Александровна (RU), Кускильдин Рафис Бурибаевич (RU), Волчихина Александра Алексеевна (RU), Серебров Максим Алексеевич (RU)*

Заявка № 2021127092

Приоритет изобретения 15 сентября 2021 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 30 мая 2022 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 15 сентября 2041 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов

