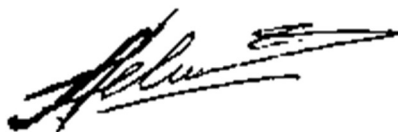


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет»

*На правах рукописи*

Атрощенко Виктор Александрович



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗАКЛАДОЧНОГО  
КОМПЛЕКСА ФУТЕРОВКОЙ ПОЛИУРЕТАНОМ ТРАНСПОРТНЫХ  
ТРУБОПРОВОДОВ

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 – 2023

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗАКЛАДКЕ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА .....</b>	<b>12</b>
1.1. Геотехнологии с закладкой выработанного пространства .....	13
1.1.1. Геотехнология с механической закладкой.....	14
1.1.2. Геотехнология с пневматической закладкой .....	16
1.1.3. Геотехнология с гидравлической закладкой.....	17
1.1.4. Геотехнология с твердеющей закладкой.....	19
1.1.5. Закладочные смеси, их характеристики и свойства.....	22
1.1.6. Типы закладочных массивов и характеристика способов их возведения .....	25
1.1.7. Анализ опыта проведения работ по закладке выработанного пространства.....	26
1.2. Закладочные комплексы как система, их состав и основные элементы ..	28
1.3. Транспортные трубопроводы.....	29
1.4. Обзор и анализ теоретических и экспериментальных исследований по улучшению эксплуатационных характеристик трубопроводов закладочных комплексов.....	35
1.5. Подготовка закладочных материалов .....	45
1.5.1. Смесительные устройства.....	47
1.5.2. Дозаторные устройства .....	50
1.5.3. Вспомогательное оборудование (насосы, вибраторы, пневмоактиваторы).....	51
1.6. Выводы по главе 1.....	54

<b>ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОТРАНСПОРТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ.....</b>	<b>56</b>
2.1. Влияние свойств гидросмеси на транспортабельность.....	57
2.1.1. Кинематические характеристики взвесенесущих потоков .....	59
2.1.2. Межфазовое динамическое равновесие потока гидросмеси.....	66
2.1.3. Критическая скорость потока гидросмеси.....	69
2.1.4. Вязкость гидросмесей .....	71
2.2. Потери напора при гидространспорте закладочной смеси.....	73
2.2.1. Оценка шероховатости внутренней поверхности трубопроводов .....	75
2.2.2. Определение коэффициентов шероховатости труб с покрытием .....	77
2.3. Местные сопротивления.....	80
2.4. Выводы по главе 2.....	80
<b>ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ИЗМЕНЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ .....</b>	<b>82</b>
3.1. Описание экспериментальной гидротранспортной установки .....	83
3.2. Подготовка экспериментальных образцов трубопроводов .....	87
3.3. Обоснование времени и рабочих интервалов проведения экспериментальных исследований .....	88
3.4. Определение величины наработанной шероховатости экспериментальных образцов труб.....	90
3.5. Оценка коэффициента гидравлических сопротивлений и потерь напора .....	102
3.6. Выводы по главе 3.....	107
<b>ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ТРУБОПРОВОДОВ С ПОЛИУРЕТАНОВОЙ ФУТЕРОВКОЙ В</b>	

<b>СИСТЕМАХ</b>	<b>ГИДРОТРАНСПОРТА</b>	<b>ЗАКЛАДОЧНЫХ</b>
<b>КОМПЛЕКСОВ.....</b>		<b>109</b>
4.1. Оценка потерь напора при транспортировании закладочных смесей....		109
4.2. Оценка капитальных затрат на закупку трубопроводов.....		111
4.3. Оценка эксплуатационных затрат на обслуживание трубопроводов.....		113
4.4. Общая эффективность применения полиуретановой футеровки стальных трубопроводов.....		115
4.5. Выводы по главе 4.....		116
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>		<b>118</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>		<b>121</b>
<b>СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА.....</b>		<b>141</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Показатели систем разработки с закладкой на рудниках.....</b>		<b>148</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Результаты замеров шероховатости и массы экспериментальных образцов труб.....</b>		<b>149</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В Зависимости изменения шероховатости <i>Ra</i> экспериментальных образцов труб от времени наработки.....</b>		<b>153</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт о внедрении результатов диссертации.....</b>		<b>157</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д Патент на изобретение.....</b>		<b>159</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** В настоящее время на горных предприятиях при проведении подземных работ для заполнения выработанного пространства применяются закладочные комплексы, реализующие, как правило, самотечное транспортирование гидросмеси по системе гидротранспортных трубопроводов к месту закладки. Гидравлическая закладка выработанного пространства позволяет обеспечить безопасность проведения работ по добыче полезных ископаемых, не допустить опасных деформаций подрабатываемого горного массива и снизить техногенные риски вследствие неконтролируемой миграции подземных вод. Закладочная смесь подаётся в подземные выработки по закладочной скважине с поверхностного закладочного комплекса в выработки приёма закладочной смеси, затем её транспортируют в выработанное пространство по закладочным трубопроводам. При самотёчном режиме закладочная смесь транспортируется под действием статического напора, создаваемого весом столба смеси в вертикальном ставе.

К числу существенных недостатков данной технологии закладки можно отнести тот факт, что традиционно применяемые в закладочных комплексах стальные трубопроводы обладают низкой устойчивостью к гидроабразивному изнашиванию. Интенсивность гидроабразивного изнашивания стенок стальных трубопроводов на Джекказганском ГМК при перекачивании закладочной смеси на основе хвостов обогащения 15-18 ч в сутки составляет 2,5-3,0 мм/год, а срок службы трубопровода не превышает 1,7-2,0 года. Интенсивное изнашивание закладочных трубопроводов приводит к необходимости их частой замены, что увеличивает стоимость проведения работ. Также интенсивное гидроабразивное изнашивание стенок трубопроводов закладочных комплексов приводит к повышению шероховатости поверхности и вызывает значительный рост удельных сопротивлений движению потока закладочной смеси. Это существенно

снижает эффективность проведения закладочных работ, так как снижение удельной кинетической энергии потока неизбежно приводит к расслоению закладочной смеси из-за перехода скорости потока гидросмеси к значениям ниже критической. Особенно важно исключить расслоение закладочной смеси при проведении горных работ с нисходящей выемкой. Из-за расслоения потока в выработанное пространство подается избыточное количество воды, что приводит к образованию неоднородного закладочного массива со сниженной прочностью, который не способен полноценно участвовать в управлении горным давлением. Это снижает безопасность ведения горных работ и увеличивает стоимость добычи полезных ископаемых из-за необходимости проведения дополнительных объемов работ по дозакладке образующихся пустот и замене изношенных трубопроводов.

Современное развитие горных технологий определяет потребность в увеличении концентрации закладочной гидросмеси, а также в увеличении расстояния ее транспортирования. Традиционные стальные трубопроводы, имеющие высокое сопротивление перемещению закладочных смесей, не в состоянии это обеспечить.

#### **Степень научной разработанности проблемы.**

Решению проблем переноса твердых частиц с потоком жидкости посвящены исследования, выполненные видными учеными Александровым В.И., Анушенковым А.Н., Вяткиным А.П., Дементьевым М.А., Джваршеишвили А.Г., Кравченко В.П., Леоновой Л.Б., Покровской В.Н., Силиным Н.А., Смолдыревым А.Е. и другими. Из зарубежных школ большой вклад в общую теорию и практику гидротранспорта внесли труды Дюрана Р., Ричардсона Д.Ф., Шука С.А., Пажонки В., Событы Е., Слаттера П., Трайниса В.В. и других.

Ими выполнены исследования по изучению влияния параметров гидросмеси на процесс гидротранспортирования в системе закладочных комплексов горных предприятий. Однако, недостаточно изучен вопрос

обоснованного выбора параметров и режимов эксплуатации систем гидротранспорта закладочных комплексов для обеспечения качества формируемого искусственного массива, что обуславливает необходимость в дополнительных теоретических и экспериментальных исследованиях.

**Объект исследования** – процесс взаимодействия твердых абразивных частиц закладочной смеси в потоке с рабочей поверхностью трубы.

**Предмет исследования** – изменение относительной шероховатости рабочей поверхности труб гидротранспортной системы закладочного комплекса вследствие гидроабразивного изнашивания в зависимости от времени взаимодействия и массового расхода гидросмеси, влекущие изменение удельного напора.

**Цель работы** – обоснование значений параметров трубопроводов в гидротранспортной системе закладочного комплекса, обеспечивающих снижение удельных сопротивлений потока при самотечном транспортировании закладочной смеси для предотвращения её расслоения и повышения качества возводимого искусственного массива.

**Идея работы:**

Снижение сопротивления перемещению закладочных смесей в системах гидротранспорта закладочных комплексов достигается применением труб с полиуретановой футеровкой рабочей поверхности, реализующей, из-за свойств материала, механизм упругого взаимодействия частиц твердой фракции закладочной смеси со стенкой трубы при движении потока.

**Основные задачи исследования:**

1. Провести анализ и обобщение теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертационной работы и определить приоритетные направления совершенствования подземных технологий добычи полезных ископаемых и способы повышения эксплуатационных характеристик закладочных комплексов.

2. Выполнить теоретические исследования изменения удельной кинетической энергии потока закладочной смеси при перемещении в

транспортных трубопроводах с различными характеристиками рабочей поверхности.

3. Провести экспериментальные исследования по оценке изменения шероховатости рабочей поверхности труб и сравнительный анализ ее влияния на коэффициент гидравлических сопротивлений и уменьшение напора при транспортировании закладочных смесей в стальных трубах и трубах с полиуретановой футеровкой.

4. Разработать практические рекомендации по выбору параметров трубопроводов с полиуретановой футеровкой в гидротранспортных системах закладочных комплексов.

5. Выполнить оценку экономической эффективности применения в гидротранспортных системах закладочного комплекса труб с полиуретановой футеровкой в сравнении с традиционными стальными.

#### **Научная новизна работы:**

1. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что реализация механизма упругого взаимодействия твердых частиц закладочной смеси с материалом стенки трубы уменьшает коэффициент гидравлического сопротивления движению потока благодаря снижению гидроабразивного изнашивания рабочей поверхности и, обуславливаемого им увеличения эквивалентной шероховатости поверхности трубы.

2. Экспериментально выявлена зависимость изменения энергетических характеристик транспортируемого потока закладочной смеси от времени эксплуатации трубопроводной системы закладочного комплекса при изменении массовой концентрации твердых частиц в потоке закладочной смеси для труб с различными физико-механическими свойствами рабочей поверхности.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Разработана методика оценки изменения шероховатости рабочей поверхности трубопроводов закладочных комплексов при перекачивании абразивной гидросмеси.



2. Выполнено обоснование технических решений по изменению свойств рабочей поверхности трубопроводов закладочных комплексов, обеспечивающих снижение удельных потерь напора и способствующих предотвращению расслоения гидросмеси.

3. Разработаны рекомендации по оценке удельных снижений напора при транспортировании гидросмесей различной концентрации в трубах со стальной поверхностью и футерованных полиуретаном.

4. Результаты исследований в виде полученной зависимости изменения шероховатости рабочих поверхностей трубопроводов с внутренней полиуретановой футеровкой при долговременной работе гидротранспорта применены в деятельности компании АО «Механобр инжиниринг» при разработке проектной документации по реконструкции системы гидротранспорта АО «ЕВРАЗ Качканарский ГОК», заключающейся в замене стальных магистральных трубопроводов на трубопроводы с полиуретановой футеровкой внутренней поверхности для снижения потерь напора по длине пульповода при гидротранспорте хвостов, что подтверждается актом об использовании результатов кандидатской диссертации от 26.04.2023 г. (приложение Г).

### **Методология и методы исследования**

В работе использован комплексный подход к исследованию, включающий: научный анализ и обобщение; математическое моделирование; инструментальную оценку износа образцов труб с применением оборудования Surfrest SJ-210; экспериментальные исследования процесса транспортирования гидросмеси на лабораторном стенде с применением специальных средств измерения; сопоставление расчетных и экспериментальных данных.

### **Основные защищаемые положения:**

1. Применение полиуретановой футеровки рабочей поверхности трубопровода позволяет снизить в среднем в 20 раз величину её эквивалентной шероховатости и в 2 раза уменьшить коэффициент

гидравлических сопротивлений за время приработки трубопровода в сравнении с традиционным стальным трубопроводом без футеровки.

2. Удельные потери напора в трубопроводах с полиуретановой футеровкой рабочей поверхности при перемещении абразивной гидросмеси, приготовленной с использованием хвостов обогащения, находятся в линейной зависимости от массовой концентрации гидросмеси.

**Степень достоверности и обоснованность научных положений и рекомендаций** подтверждается корректной постановкой цели и задач исследований, представительным объемом проанализированных теоретических и экспериментальных данных, применением современных численных методов исследований, удовлетворительной сходимостью результатов аналитических исследований с результатами экспериментов автора и других исследователей.

#### **Апробация результатов**

Основные идеи и научные результаты диссертационного исследования были представлены в качестве докладов на ряде научно-практических мероприятий: VII Международная научно-практическая конференция «IPDME-2020» (апрель 2020 года, г. Санкт-Петербург); VIII Международная научно-практическая конференция «IPDME-2021» (апрель 2021 года, г. Санкт-Петербург); XI Международный молодежный форум «Нефтегазовое и горное дело» (октябрь 2022 года, г. Пермь).

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач исследований, разработке программы и методики лабораторных исследований, разработке экспериментального гидротранспортного стенда, обработке и интерпретации экспериментальных данных, подготовке публикаций по выполненной работе и формировании практических рекомендаций по оценке удельных снижений напора при транспортировании в стальных трубах, футерованных полиуретаном, гидросмесей различной концентрации и в выполнении оценки экономической эффективности применения в закладочных комплексах трубопроводов с полиуретановой футеровкой.

**Публикации.** По теме исследования опубликовано 8 печатных работ (пункты списка литературы № 14, 15, 16, 17, 25, 101, 107, 108), в том числе 3 статьи - 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, 3 статьи - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен патент на изобретение (приложение Д).

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и 5 приложений. Материалы работы изложены на 159 страницах машинописного текста, включая 27 таблиц, 41 рисунок. Список цитируемой литературы включает 152 источника, из них 52 – на иностранных языках.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность первому научному руководителю профессору Александрову В.И., заместителю начальника гидротехнического отдела АО «Механобр инжиниринг» Кибиреву В.И., а также коллективу кафедры транспортно-технологических процессов и машин, где автор сформировался как специалист в области горного транспорта, и лично заведующему кафедрой Афанасьеву А.С.

## ГЛАВА 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЗАКЛАДКЕ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА

Закладка выработанного пространства – это совокупность процессов, включающих приготовление, доставку и укладку закладочного материала в выработанном пространстве. Среди основных назначений закладки выработанного пространства можно выделить: предотвращение обрушения вмещающих пород и оседания земной коры, управление горным давлением, поддержание выработанного пространства, уменьшение потерь полезных ископаемых в недрах, предотвращение подземных пожаров и внезапных выбросов угля и газа, повышение безопасности проведения горных работ, охрана окружающей среды [12, 23, 114].

При выемке рудных залежей с применением технологий закладки заполнение выработанного пространства осуществляется по мере прохождения очистных работ. Заполнение подземных пустот происходит последовательно после полной отработки камеры или вместе с очистной выемкой в зависимости от применяемой системы разработки [11, 22, 45].

Закладка выработанного пространства применяется при любой сложности геомеханических и горнотехнических условий. Область применения технологий добычи полезных ископаемых с закладкой постоянно расширяется в связи с повышением законодательных требований к охране окружающей среды [13, 23]. Известны 5 типов закладки выработанного пространства: сухая, гидравлическая, твердеющая, ледяная и блочная. Наибольшее распространение получили первые три, так как ледяная и блочная закладки используются при определенных условиях ведения горных работ (вечная мерзлота, возможность и целесообразность установки блоков в выработанном пространстве) [18, 23].

## **1.1. Геотехнологии с закладкой выработанного пространства**

Известные технологии закладки выработанного по взаимодействию компонентов закладочного материала можно разделить на 2 группы. К первой относятся технологии такие, как сухая закладка и гидравлическая закладка, при которых не происходит взаимодействие компонентов закладочного материала между собой. Ко второй группе относятся технологии твердеющей закладки, при которых составляющие закладочной смеси взаимодействуют между собой, в результате чего изменяется ее химическое или физическое состояние [12, 23, 115, 120].

Сухую закладку в зависимости от способа доставки закладочного материала можно разделить на механическую, пневматическую и самотечную. При сухой закладке возводимый массив получается не скрепленным податливым с неоднородной плотностью, не допускаются большие обнажения, а также характерна значительная усадка (15-30%), что является недостатками данной технологии [11].

Гидравлическая закладка дает возможность интенсифицировать процесс возведения и получить более плотный массив в сравнении с сухой, однако эта технология также не допускает значительных обнажений. Главным недостатком гидравлической закладки является необходимость в организации отвода большого количества воды [11, 22, 127].

Твердеющая закладка по способу возведения разделяется на: литую, инъекционную и гидрозакладку с вяжущей добавкой. Одним из компонентов закладочной смеси является вяжущий материал, связывающий в монолит остальные компоненты за счет гидратации с водой. В результате возведенный массив способен выдерживать динамические нагрузки при проведении взрывных работ и допускает значительные по площади обнажения [13, 23, 45, 49]. Среди основных преимуществ твердеющей закладки можно выделить: возможность обеспечения высокого уровня

безопасности для проведения горных работ, меньшая усадка массива, возможность отработки руды в различных охранных целиках [12, 23, 112]. Затраты на закупку вяжущего компонента и оборудования закладочных комплексов (ЗК) для приготовления твердеющей смеси увеличивают стоимость добычи руд, что является основным недостатком твердеющей закладки. [12, 23, 67].

Основными характеристиками закладочного массива являются: прочность (предел прочности при одноосном сжатии, предел прочности на растяжение и изгиб), плотность, однородность, пористость, а также компрессионные (усадка), упругие и деформационные свойства [11, 22]. К прочностным свойствам закладки относятся: пределы прочности на растяжение, сжатие и срез со сжатием. Прочностные свойства определяются экспериментально путем исследования образцов – кубов с размерами 10х10х10 см. Плотность твердеющей закладки определяется взвешиванием исследуемых образцов. Компрессионные свойства закладки характеризуются коэффициентом усадки, который определяется по данным измерения специального прибора – стабилметра. Коэффициент усадки зависит от: гранулометрического состава материала, горного давления, наличия пластифицирующих добавок и от способа возведения закладочного массива [11, 23, 129].

### **1.1.1. Геотехнология с механической закладкой**

Механическая закладка - это заполнение выработанного пространства закладочным массивом, доставка которого осуществляется скреперными установками, погрузочно-доставочными машинами (ПДМ), специальными установками метательного, трамбующего или прессующего действия и конвейерами. Материалом служат оставшиеся после проходческих работ породы, а также хвосты обогащения руд [11, 23, 44, 110, 134].

В условиях сплошной камерной выемки отдельных залежей небольшого объема возведение закладочного массива возможно с применением

погрузочно-доставочных машин (ПДМ) [11, 23]. Схема механической закладки с использованием ПДМ, применяемая на руднике «Локербай» в Канаде представлена на рисунке 1.1 [11].

Для подготовки рудного тела к выемке применяются два метода - верхняя и нижняя подсечка. В процессе отбойки наклонных слоев породного массива, очистное пространство заполняется пустыми породами. Для этой цели используется погрузочно-доставочная машина (ПДМ), которая транспортирует материал выемки из верхней подсечки. При наличии высокой устойчивости боковых пород, формирование закладочного массива происходит с некоторым отставанием от фронта отбойки [11].

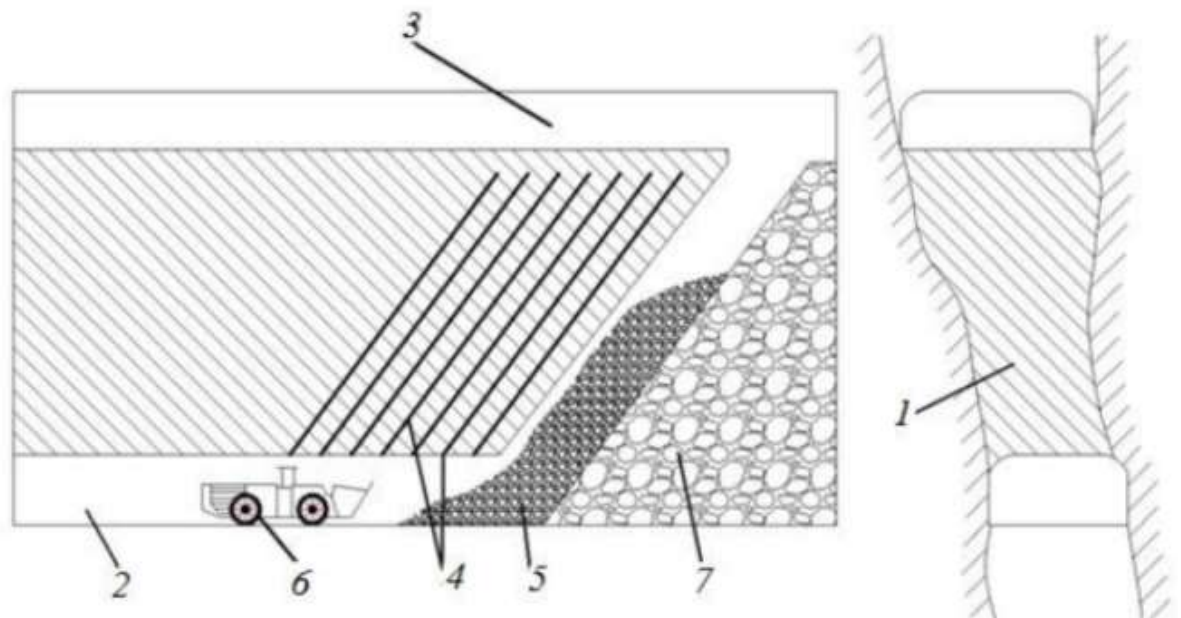


Рисунок 1.1 – Схема разработки наклонными слоями с механической закладкой с применением ПДМ на руднике «Локербай»: 1 – рудное тело; 2 – нижний горизонт; 3 – верхняя подсечка; 4 – скважины; 5 – отбитая руда; 6 – ПДМ; 7 – закладочный массив

При осуществлении разработки угольных и соляных месторождений используется механическая закладка, которая включает использование машин с метательным действием. Для создания плотных закладочных массивов используются фрагментированные породы, такие как шлаки, золы, породы от проходческих работ и другие подобные материалы. Максимальная

размерность фрагментов составляет не более 120 мм, в зависимости от конструкции используемых машин [12, 35].

На Верхнекамском и Солегорском калийных рудниках для строительства закладочных массивов применялись машины с метательным роторным и ленточно-барабанным механизмом, такие как МР-1, МР-2 и МР-5. Производительность указанных машин составляла соответственно 130, 300 и 700 тонн в час. Дальность метания материала достигала 12 метров, а скорость вылета закладочного материала составляла 20 метров в секунду. В качестве закладочного материала использовались отходы и соли от проходческих работ с размерностью до 70 мм [12].

К преимуществам машин метательного действия можно отнести: сравнительно небольшое энергопотребление, простоту конструкции, низкие эксплуатационные затраты. К недостаткам этого типа машин относятся: большие габариты и вес, интенсивное изнашивание метательной части, ограниченная возможность подачи закладочных материалов [12].

### **1.1.2. Геотехнология с пневматической закладкой**

В основе пневматической закладки лежит использование энергии сжатого воздуха для транспортирования закладочных материалов по трубопроводу в выработанное пространство [11, 23].

В качестве закладочного материала в основном применяют дробленые отвальные породы и отходы обогащения руд [11, 23].

Закладочные комплексы устанавливаются стационарно на поверхности или под землей. Основными составляющими закладочного комплекса помимо закладочных машин являются дробильные машины и классификаторы для разделения материала по крупности [12].

Из анализа работы пневматических закладочных комплексов на горных предприятиях установлено, что для возможности создания закладочного массива, имеющего достаточную плотность, гранулометрический состав



шихты из дробленых пород должен находиться в соотношениях, указанных в таблице 1.1 [22].

Таблица 1.1 – Соотношения гранулометрического состава шихты из дробленых пород для возведения закладочного массива с достаточной плотностью [22]

Размер фракции, мм	0-10	10-20	20-50
Содержание, %	10-15	20-25	55-60

Достоинства пневматической закладки [11]:

- возможность транспортирования закладочного материала на большое расстояние;
- возможность использовать отходы производства как закладочный материал;
- сравнительно низкая трудоемкость возведения закладочного массива.

Недостатки пневматической закладки [11]:

- сравнительно высокое потребление электроэнергии (10–15 кВт/ч на 1 м<sup>3</sup> закладочного материала);
- интенсивное изнашивание элементов закладочного комплекса: трубопроводов, арматуры и оборудования;
- высокое пылеобразование;
- значительные капитальные и эксплуатационные затраты на закупку, обслуживание и ремонт оборудования;
- значительная усадка массива (15-30%);
- ограниченная область использования по горно-геологическим условиям.

Из-за этих недостатков пневматическая закладка выработанного пространства практически не осуществляется в горной промышленности [11].

### 1.1.3. Геотехнология с гидравлической закладкой

Сущностью гидравлической закладки является смешивание закладочного материала с водой и дальнейшее транспортирование

получившейся пульпы по трубопроводам в выработанное пространство. Закладочный массив формируется твердой фракцией гидросмеси, а вода после дренирования и фильтрации откачивается на поверхность для повторного использования [11, 12, 23].

В качестве закладочного материала при гидравлической закладке в основном используются классифицированные отходы обогащения руд, дробленая порода крупностью до 60 мм, природный песок и т.п. [11, 23].

Основными составляющими комплекса гидравлической закладки являются: смесительные устройства, насосное оборудование, трубы (желоба).

Применение гидравлической закладки возможно при разработке месторождения горизонтальными слоями (рисунок 1.2), а также для заполнения вторичных камер при камерно-целиковой добыче [12].

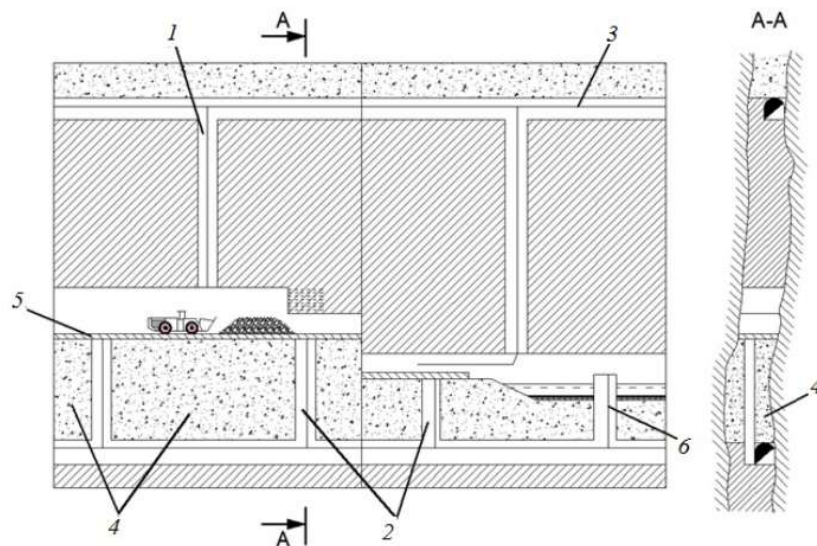


Рисунок 1.2 – Схема разработки горизонтальными слоями с гидравлической закладкой и бетонным настилом: 1 – восстающие; 2 – рудоспуски и ходовые восстающие; 3 – трубопровод закладочного комплекса; 4 – закладочная гидросмесь; 5 – настил из бетона; 6 – дренажная труба

Доставка закладочной гидросмеси в выработку производится естественным или искусственным напором [22]. Расстояние доставки самотеком зависит от плотности гидросмеси, которая обычно достигает 1100-1500 кг/м<sup>3</sup>. Объемное соотношение твердого материала к воде как правило составляет от 1:2 до 1:5. Диаметр труб выбирается в зависимости от

крупности закладочного материала, глубины разработки и плотности гидросмеси (чаще всего 150-220 мм) [22].

Достоинства гидравлической закладки [12]:

- гидравлическая закладка позволяет доставлять материал в места, куда трудно или невозможно достичь другим способом, что снижает затраты на доставку;

- гидравлическая закладка позволяет получить массив с высокой плотностью и прочностью, что является важным для обеспечения стабильности и безопасности;

- гидравлическая закладка позволяет перевозить материал на большие расстояния без необходимости выполнять дополнительные перегрузки, что снижает время и затраты на транспортировку;

- высокая производительность работ (до 500 м<sup>3</sup>/ч).

Недостатки гидравлической закладки [12]:

- высокий расход воды;

- интенсивное гидроабразивное изнашивание традиционных стальных трубопроводов и других элементов гидротранспортных систем;

- значительная усадка массива (10-30%);

- высокие капитальные затраты для строительства гидрозакладочного комплекса.

#### **1.1.4. Геотехнология с твердеющей закладкой**

В основе технологий с твердеющей закладкой лежит применение литой закладочной смеси (ЛТС), состоящей из вяжущих материалов, мелкозернистого заполнителя и воды, которая является несущей средой и реагентом процесса твердения [11, 23]. В качестве вяжущих материалов используются: специально обработанные металлургические шлаки, гипс, ангидрит, портландцемент и др. В качестве мелкозернистого заполнителя используются: пески, хвосты обогащения руд, щебень, измельченная порода с шахтных отвалов и др. Кроме того, в закладочную смесь могут добавляться

активизаторы (цемент, шламы и др.) для повышения гидравлической активности вяжущего материала и пластификаторы (известняк, глина и др.) для улучшения транспортабельности гидросмеси и повышения прочности закладочного массива [11, 23, 35, 36, 136].

Существует 3 способа возведения закладочного массива с использованием технологий твердеющей закладки [12, 22]:

- 1) литой;
- 2) инъекционный;
- 3) гидрозакладочный.

При литой твердеющей закладке (ЛТЗ) используются в основном такие вяжущие компоненты как шлаки и цемент. Заполнитель с водой составляют 85-90 % литой твердеющей смеси. К основным характеристикам, которыми должны обладать заполнители относятся: транспортабельность, низкая стоимость, отсутствие вредных для экологии примесей и предел прочности, превышающий на 10-15 % нормативную прочность закладки. Из экологических и экономических соображений заполнителем в основном служат отходы рудника и обогатительного комбината [12, 22, 35].

Кроме свойств ЛТС на качество литой твердеющей закладки существенное влияние оказывает технология производства и тип применяемого оборудования.

Достоинства литой твердеющей закладки [11]:

- возможность полной автоматизации процессов приготовления и транспортирования ЛТС к месту закладки;
- возможность использования отходов рудника и горно-обогатительного производства в качестве заполнителя;
- возможность создания искусственного массива с высокими прочностными характеристиками;
- высокий уровень качества и полноты извлечения запасов полезного ископаемого.

Недостатки литой твердеющей закладки [11]:

- высокие капитальные затраты на закупку оборудования и строительство закладочного комплекса;
- высокие издержки производства, которые могут составлять до 20-30 % от себестоимости добычи полезного ископаемого.

Из-за своих достоинств литая твердеющая закладка наиболее распространена на подземных рудниках [11, 23].

Инъекционный способ возведения закладочного массива подразумевает подачу сыпучего материала в выработанное пространство с последующим нагнетанием в кусковую насыпь вяжущего раствора, который проникает в пустоты и после затвердевания превращает сыпучий массив в монолит [13].

Преимуществами инъекционной закладки по сравнению с литой твердеющей являются [12]:

- меньшие производственные издержки;
- более благоприятные условия доставки закладочной смеси;
- возможность использовать для проведения закладочных работ проходческие породы без их перемещения на поверхность.

Недостатками инъекционной закладки по сравнению с литой твердеющей являются [22]:

- неравномерная прочность возводимого искусственного массива;
- сложность равномерного распределения вяжущего раствора в закладочной смеси.

Гидрозакладочный способ возведения твердеющей закладки основан на приготовлении гидросмеси, состоящей из заполнителя и вяжущих добавок, и последующей её транспортировке по трубопроводу в выработанное пространство. Обычно в качестве заполнителя используются обесшламленные отходы обогащения, иногда также применяются дробленые породы, пески и шлаки [23, 35, 139].

Для транспортировки гидросмеси используются два способа: гравитационный и напорный с помощью насоса. Соотношение высоты и длины трубопровода не превышает 1:10. Чтобы избежать заиливания

трубопровода, минимальная скорость движения гидросмеси классифицированных хвостов составляет не менее 1,5 м/с [11].

Диаметр трубы  $d$  рассчитывается согласно выражению (1.1) зависит от производительности установки и выбранной скорости движения гидросмеси  $v$  [11, 23]:

$$d = \sqrt{\frac{400}{\pi v}}, \quad (1.1)$$

где  $d$  – диаметр трубы, м;

$v$  – скорость движения гидросмеси, м/с.

В практике распространенный диаметр трубопровода составляет 76–127 мм [11, 22].

### 1.1.5. Закладочные смеси, их характеристики и свойства

Основными компонентами для приготовления твердеющих закладочных смесей являются: связующие материалы, наполнитель и вода [11, 23].

В горнорудной промышленности используют различные вяжущие материалы, такие как цементы, известь, гипс, ангидрит, молотые гранулированные шлаки, котельные золы, зола-унос ТЭЦ и пирротинсодержащие хвосты обогатительных фабрик, и другие [23, 98, 143].

Пески с одинаковым модулем крупности могут иметь разное соотношение частных остатков на стандартных ситах. Поэтому для классификации песков используется второй критерий - полный остаток на сите с размером отверстий 0,63 мм. Частицы песка размером от 0,05 до 0,005 мм считаются пылевидными, а частицы размером менее 0,005 мм - глинистыми [22].

Мелкозернистые и пылевидные фракции также могут использоваться для закладочных работ, но из-за большой удельной площади поверхности наполнителя требуется больше вяжущих материалов. Суммарная площадь поверхности зерен в единице объема обратно пропорциональна их диаметру.

Крупный песок требует меньшего количества вяжущего раствора для покрытия зерен [11, 23, 75, 97].

Средний размер зерен песка может быть следующим: крупные - 0,5 мм, средние - 0,35 мм, мелкие и очень мелкие - 0,25 мм.

Хвосты обогатительных фабрик имеют следующую среднюю крупность в миллиметрах: железные - 0,03-0,66, молибденовые - 0,095-0,3, полиметаллические - 0,05-0,3. Хвосты обогащения выдаются в виде пульпы с соотношением твердых веществ к жидкости от 1:20 до 1:30. Их необходимо обезвоживать, так как общее количество воды в 1 м<sup>3</sup> закладки не должно превышать 400-500 литров. Отходы обогащения содержат много воды, которая поступает со шлаком из мельницы, поэтому влажность заполнителя не должна превышать 15%. Пульпа сгущается в гидроциклонах до содержания твердых веществ 12-60%, а в вакуум-фильтрах до влажности 17% [11, 22, 78].

Хвосты обогащения применялись в твердеющей закладке в 1970 году на подземном Гайском руднике. Одна камера объемом 7 тыс. м<sup>3</sup> была заполнена. Испытания керна показали, что закладочный массив имел прочность, не ниже чем при использовании природного песка [11, 29].

Хвосты обогащения содержат определенное количество флотореагентов, таких как фенол, полиакриламид, ксантогенат и другие. Увеличение содержания этих флотореагентов до 100% от обычного расхода на 9% снижает прочность смеси на основе доменных граншлаков. В отвальных хвостах содержание флотореагентов невелико. Ксантогенат разлагается на улетучивающийся изобутиловый спирт и щелочь, которая способствует повышению активности вяжущего материала. Наличие СаО (до 11,5%) в некоторых хвостах также увеличивает активность вяжущего. Определение пригодности отвальной породы для использования в качестве заполнителя производится путем испытания ее на прочность, размягчение при увлажнении и наличие вредных примесей. Наличие склонных к самовозгоранию компонентов, таких как пирит и органические соединения,

не является препятствием для использования их в закладке из-за незначительной газопроницаемости [23, 27].

Рудничные воды часто содержат большое количество растворенных в них кислот или солей, которые агрессивны по отношению к бетону [145]. Наличие вредных примесей в воде негативно влияет на бетон, вызывая выщелачивание портландцемента. Воду с показателем кислотности  $\geq 4$  и содержанием сульфатов до 2,7 г/л в пересчете на ионы  $\text{SO}_3$ , а также других солей до 5 г/л используют для бетонных работ. Сточные воды с примесями растительных масел не подходят для бетонирования. Слегка щелочные воды не оказывают влияния на бетон, но ускоряют процесс его схватывания. Величина pH (водородный показатель) служит мерой активной кислотности воды. Для воды железорудных шахт pH составляет 6-8 [12, 23].

Наличие свободной углекислоты до 15-20 мг/л и ее солей в шахтной воде не представляет опасности для цемента.

Смеси на основе шлаковых цементов, в которых выделяется небольшое количество свободной гидроокиси кальция и содержится некоторое количество трехкальциевого алюмината, устойчивы к агрессивному воздействию минерализованных вод. Аналогичные свойства обладают вяжущие из молотых шлаков, близкие по химическому составу к шлаковому цементу. Вода с кислой реакцией (pH=1) не ослабляет образцы смеси, а использование щелочной воды, включая содержащуюся в хвостах обогащения гидроокись кальция, даже ускоряет процесс твердения [11, 23, 77, 146].

При использовании твердеющей закладки при нисходящем порядке горных работ с понижением уровня горных работ повышаются требования к реологическим и прочностным свойствам закладочных смесей [13, 22].

Выбор материалов для приготовления закладочных смесей на горнодобывающих предприятиях зависит от множества факторов, включая наличие необходимого материала в близости от закладочного комплекса, его стоимость, физико-механические и химические свойства, а также



технологические особенности их подготовки (дробление, помол, отсев и т.д.). Однако подбор материалов с оптимальным соотношением цены и качества является сложной задачей, поэтому предприятия часто выбирают местные материалы, которые не всегда соответствуют нормативным требованиям [22, 23, 93, 151].

### 1.1.6. Типы закладочных массивов и характеристика способов их возведения

Как отмечалось в разделе 1, известны 5 типов закладки выработанного пространства. Способы возведения закладочных массивов и их характеристики в соответствии с типом показаны в таблице 1.2 [11-13, 22, 23, 74, 83, 92].

Таблица 1.2 – Способы возведения закладочных массивов и их характеристики в соответствии с типом [11-13, 22, 23, 74, 83, 92]

Тип закладки	Способ возведения	Характеристика способа возведения
Сухая закладка	Самотечный	Заполнение выработки закладочным материалом свободным падением
	Механический	Заполнение выработки закладочным материалом машинами механического действия
	Пневматический	Заполнение выработки закладочным материалом под действием сжатого воздуха
Гидравлическая закладка	Гидравлический	Заполнение выработки закладочным материалом, транспортируемым водой по трубам
Твердеющая закладка	Литой	Заполнение выработки готовой закладочной смесью, содержащей вяжущие вещества и воду
	Инъекционный	Заполнение выработки закладочной смесью с последующим добавлением вяжущего вещества
	Гидравлический	Заполнение выработки закладочным материалом, транспортируемым водой по трубам
Ледяная закладка	Механо-гидравлический	Заполнение выработки закладочным материалом с последующим послойным замораживанием
Блочная закладка	Механо-гидравлический	Заполнение выработки каменными блоками, скрепляемыми между собой вяжущим раствором

В зависимости от физико-механических свойств закладочные массивы делятся на твердеющие, сыпучие и комбинированные [23].

Комбинированный закладочный массив представляет собой последовательность периодически чередующихся по глубине и простиранию сыпучих и твердеющих закладочных слоев [23, 152].

Однако наиболее распространены сплошные твердеющие закладочные массивы, где пространство, созданное внутри камеры или слоя, заполняется твердеющей смесью. В результате образуются смежные искусственные массивы, соприкасающиеся друг с другом [11, 12, 22, 23].

### **1.1.7. Анализ опыта проведения работ по закладке выработанного пространства**

Твердеющая закладка в нашей стране впервые была испытана на крутом пласте шахты «Центральная» в Кузбассе. Согласно системе разработки, предложенной И.Н. Казаниным в 1937 году, на месте угольных целиков были возведены бетонные столбы со сводчатым бетонным потолком. В качестве заполнителя использовались песок и горелые породы отвалов, а вяжущим элементом служил цемент марки 250-300. Приготовление бетона происходило на поверхности, далее по трубам его спускали в шахту на глубину 50 м, а затем перемещали к месту укладки самотеком по металлическим решатакам или конвейером РТ-60. В двух из трех отработанных опытных камерах был возведен бетонный свод со столбами, которые оказались достаточно прочными и во время наблюдений продолжительностью 1 год не были подвержены разрушению. Также при данной системе разработки значительно снизились потери угля и его зольность в сравнении с традиционной на то время камерной системой, производительность труда забойщиков увеличилась [11].

В последующие годы твердеющая закладка нашла широкое применение на рудниках цветной металлургии [11, 24].

В приложении А приведены сравнительные показатели различных систем разработки с закладкой, применяемых в рудниках [11, 23].

Из анализа работы подземных рудников в России установлено, что большинство из них работают на глубине более 500 метров с использованием камерных и слоевых систем разработки. В таких условиях эффективное управление горным давлением и сдвижением массива становится ключевым фактором для успешной работы предприятий. Одним из решений этой проблемы является применение систем разработки, в которых выработанное пространство заполняется твердеющими смесями. Это радикальное средство позволяет улучшить полноту и качество извлечения рудных запасов, использовать отходы различных производств, а также сохранять гидрологический режим и поверхность регионов, где происходит добыча полезных ископаемых [2-5, 11-13, 18, 19, 22, 23].

При проведении закладочных работ наиболее часто применяются твердеющие смеси с крупным наполнителем и литые.

Смеси с крупным наполнителем обеспечивают высокую прочность искусственного массива, но требуют большого количества дорогостоящего вяжущего вещества, такого как цемент [12, 22, 51]. Транспортировка таких смесей в подземных условиях становится сложной, увеличивается риск закупорки, износа и отказов в трубопроводах [23, 53, 54, 61]. Поэтому в рудниках предпочитают использовать литые твердеющие смеси. Однако материалы (Приложение А), используемые в настоящее время для приготовления и транспортировки таких смесей (щебень, песок, гравий, цемент), характеризуются высокой стоимостью. Это снижает конкурентоспособность систем разработки с твердеющей закладкой и ограничивает их применение в добыче ценных руд [22, 33-36].

## **1.2. Закладочные комплексы как система, их состав и основные элементы**

Кроме свойств компонентов литой твердеющей смеси на качество литой твердеющей закладки значительное влияние оказывает технология производства и применяемое оборудование [11-13, 18, 23, 55, 60, 65].

Под закладочным комплексом понимается совокупность технических объектов для приготовления, временного хранения и транспортирования закладочной смеси. В состав закладочных комплексов входит оборудование для измельчения, приготовления и транспортирования закладочной смеси [11, 23, 26].

Существующие закладочные комплексы разделяются на постоянные и участковые, на подземные и поверхностные. Участковые используются при автономной отработке удаленных участков месторождений и имеют невысокую производительность (как правило, не более 300 м<sup>3</sup>/сутки). В состав постоянных закладочных комплексов входят дробильное и помольно-смесительное отделения, крытый склад материалов для приготовления закладочной смеси, а также гидротранспортная система, включающая насосное оборудование и протяженные трубопроводы [12, 23, 70].

На сегодняшний день на горных предприятиях чаще всего используются однотипные закладочные комплексы с цементным вяжущим, которые представляют собой бетоносмесительные устройства (рисунок 1.3) [11].

Процесс приготовления литой твердеющей смеси включает несколько этапов. Сначала компоненты смеси подаются в закладочный комплекс, где они дозируются, измельчаются и перемешиваются в специальных смесительных устройствах. На рисунке 1.3 показана принципиальная схема такого закладочного комплекса [11].

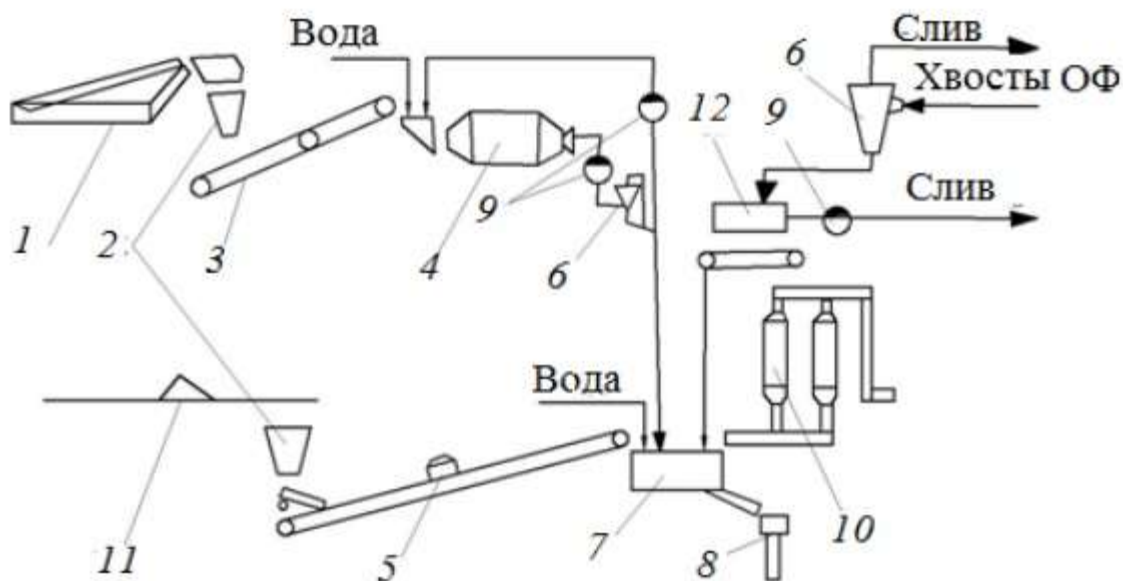


Рисунок 1.3 – Принципиальная схема закладочного комплекса литой смеси:

1 – склад 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

Свойства приготовленной смеси должны сохраняться в течение всего времени ее транспортирования до момента укладки в выработанное пространство. Приготовленные закладочные смеси подаются в выработанное пространство по трубопроводам [11, 23, 70].

### 1.3. Транспортные трубопроводы

В настоящее время в гидротранспортных системах используют стальные (рисунок 1.4а), биметаллические (рисунок 1.4б) и синтетические (из полиэтилена и полипропилена, рисунок 1.4в), а также стальные трубы, футерованные резиной или керамикой (рисунок 1.4г) [25, 48, 59, 63, 69, 70].

Наиболее распространены стальные трубы. Их изготавливают из стали марок 2, 3, 4, 5, 6, 10, 20, 45, 40Х, 30ХГСА, 15ХМ, 12ХН2. Это бесшовные трубы горячекатаные (диаметр 25-820 мм), холоднокатаные и холоднотянутые (диаметр 9-200 мм) и электросварные трубы со спиральным швом (диаметр 150-1420 мм). Толщина стенок трубопровода составляет 4-25 мм. Рабочее давление в трубопроводе определяется по формуле (1.2) [70]:

$$P = \frac{2\delta R}{k_{II}(D_H 2\delta)}, \quad (1.2)$$

где  $\delta$  – толщина стенки трубопровода, мм;

$D_H$  – наружный диаметр трубопровода, мм;

$k_{II}=1\div 1,5$  – коэффициент перегрузки;

$R$  – сопротивление трубопровода, Па.



Рисунок 1.4 – Трубы, используемые для транспортирования закладочных гидросмесей: а – стальная; б – биметаллическая; в – полиэтиленовая; г – стальная, футерованная резиной

Сопротивление трубопровода определяется по формуле (1.3) [70]:

$$R = \frac{\sigma_p m}{k_o k_H}, \quad (1.3)$$

где  $m=0,6\div 0,9$  – коэффициент, характеризующий условия работы;

$k_H$  – коэффициент надежности ( $k_H=1$  при  $D\leq 1000$  мм;  $k_H=1,05$  при  $1000<D<1200$  мм;  $k_H=1,15$  при  $1200<D<1600$  мм);

$k_o=1,34\div 1,55$  – коэффициент безопасности;

$\sigma$  – временное сопротивление разрыву трубной стали, Па.

К преимуществам стальных труб относятся [70, 122]:

– относительно невысокая стоимость;

- простота изготовления;
- возможность выдерживать высокое рабочее давление;
- простота и скорость монтажа трубопровода.

К основным недостаткам стальных труб можно отнести:

- интенсивный гидроабразивный износ;
- низкая коррозионная стойкость;
- высокая шероховатость поверхности, которая увеличивает потери напора при транспортировании гидросмеси.

Прочностные характеристики стальных труб показаны в таблице 1.3 [70].

Таблица 1.3 – Прочностные характеристики стальных труб

<b>Марка стали</b>	<b>Временное сопротивление разрыву, МПа, не менее</b>	<b>Предел текучести, МПа, не менее</b>
Ст2сп	350	220
Ст3сп	390	240
Ст5сп	500	280
Ст6сп	600	310
10	360	220
20	420	250
45	600	330
40Х	670	—
30ХГСА	700	—
15ХМ	440	230
12ХН2	550	400

Применяемые в системах гидротранспорта закладочных комплексов стандартные стальные трубопроводы имеют невысокий ресурс и тенденцию к быстрому увеличению параметра шероховатости внутренних стенок. Одной из основных причин недостаточной эффективности применения закладочных комплексов горных предприятий является интенсивный гидроабразивный износ его транспортных трубопроводов, который приводит к росту шероховатости внутренней поверхности, что в свою очередь определяет величину потерь напора потока. Замена изношенных трубопроводов на

новые, а также повышенное энергопотребление за счет необходимости откачивать отделившуюся от массива воду, являются основными статьями расходов при эксплуатации гидротранспортных систем закладочных комплексов [14-16, 20, 21, 34, 85-87, 104, 108, 132, 143].

Для защиты трубопроводов гидротранспортных систем от гидроабразивного воздействия на горных предприятиях в настоящее время применяются следующие решения [70, 123, 135, 141, 146-150]:

- 1) применение биметаллических труб;
- 2) применение труб из синтетических материалов (полиэтилена или пропилена);
- 3) применение стальных труб с футеровкой внутренней поверхности материалами более стойкими к гидроабразивному износу, чем сталь.

Биметаллические (двухслойные) трубы применяются при транспортировании высокоабразивных и агрессивных гидросмесей. Внутренняя поверхность этих труб представляет собой тонкий защитный слой из сплава стали с хромом, титаном, молибденом, ванадием и др. [70]. Биметаллические трубы не получили широкого распространения из-за их высокой стоимости и сложности изготовления.

Синтетические трубы, изготовленные из полиэтилена или пропилена, в последние годы все чаще применяются в гидротранспортных системах закладочных комплексов [23, 70]. Такие трубы характеризуются высокой износостойкостью к абразивным гидросмесям. Длина труб 6-12 м, наружный диаметр 125-650 мм. Синтетические трубы имеют значительно меньшие гидравлические сопротивления и стоимость (на 20-30% ниже), чем у стальных труб. К их недостаткам следует отнести высокую хрупкость и низкую жесткость. Соединение синтетических труб между собой производят контактной сваркой или применяют специальные фитинги (зажимные, компрессионные, терморезистентные). Для соединения синтетических труб с арматурой или трубами из других материалов используют фланцевые или резьбовые соединения [69, 131].



Футерованные трубы. Футеровка трубопроводов представляет собой нанесение специального покрытия на элементы, которое предназначено для защиты поверхностей от возможных химических, тепловых, механических или коррозионных повреждений [70].

Футеровка трубопроводов позволяет получать максимально долговечное защитное покрытие, которое, позволяет значительно увеличить срок эксплуатации всей системы трубопровода в целом [14, 107, 108].

В качестве футерующего слоя трубопроводов на горных предприятиях используются самые различные материалы – каменное литье, керамика, стекло, а также полимерные материалы. Эти покрытия позволяют защитить трубы от абразивного воздействия перекачиваемых гидросмесей.

Трубы, футерованные каменным литьем, позволяют транспортировать материалы с высокой температурой, абразивностью и кислотностью. Вкладыши элементов каменного литья отливаются из горных пород близких к базальту в электродуговых или газовых печах. Процесс плавки камня аналогичен плавке металла, температура плавления практически идентичны. Производство камнелитых изделий является более энергоемким процессом, чем производство стали. В процессе футеровки вкладыши помещают в металлическую трубу, а пространство между вкладышем и трубой заполняют строительным раствором [113].

Стекланные покрытия обладают рядом преимуществ, которые делают их востребованными как в России, так и за рубежом. Они характеризуются высокой чистотой поверхности, антикоррозионной стойкостью, прочностью, теплостойкостью и микротвердостью. Именно поэтому остеклованные трубы широко применяются в различных отраслях, включая системы теплофикационных сетей, транспортировку агрессивных сред, газонефтепроводы, а также в теплообменниках, конденсаторах и других устройствах. В России особенно распространен метод однослойной технологии остеклования с использованием стеклянных цилиндрических

баллонов, известный как технология баллонного остеклования, применяемый в горной промышленности [70].

К недостаткам остеклованных труб следует отнести [70]:

- высокую трудоемкость и сложность соединения труб между собой;
- высокую энергоемкость изготовления;
- высокую стоимость;

– ограниченную область применения для перекачивания по ним абразивных гидросмесей: крупные куски породы быстро разрушают стеклянное покрытие.

Футеровка керамикой. Трубопроводы с керамической футеровкой служат для транспортировки абразивных, сыпучих веществ и служат заменой металлических трубопроводов, которые подвержены быстрому износу в результате истираний, а также воздействию абразивных материалов, транспортируемых в них [69, 70].

Керамика получила широкое распространение благодаря своим механическим свойствам.

Высокая твердость и износостойкость, модуль упругости, общая прочность и прочность на изгиб позволили применять керамику там, где имеются высокие механические нагрузки.

К недостаткам труб с керамической футеровкой относятся:

- высокая стоимость;
- высокая трудоемкость при изготовлении;
- высокие потери напора при транспортировании гидросмесей по таким

трубам, обусловленные наличием большого количества стыков между керамическими плитками.

Футеровка труб полимерными материалами. Футеровка трубопроводов резиной не получила широкого распространения в горной промышленности из-за интенсивного гидроабразивного износа.

Перспективным решением на сегодняшний день является применение полиуретана для футеровки трубопроводов, работающих в системах

гидротранспорта горных предприятий при перекачивании абразивных гидросмесей [107, 108].

Среди основных преимуществ полиуретановой футеровки можно выделить высокую стойкость к гидроабразивному изнашиванию, неподверженность коррозии, низкую адгезию и низкую шероховатость поверхности, которая влияет на потери напора [99-101, 103-105, 107, 108].

#### **1.4. Обзор и анализ теоретических и экспериментальных исследований по улучшению эксплуатационных характеристик трубопроводов закладочных комплексов**

Исследования по улучшению эксплуатационных характеристик транспортных трубопроводов закладочных комплексов в основном проводятся по трем направлениям:

- 1) снижение потерь напора в трубопроводе;
- 2) повышение ресурса трубопровода;
- 3) повышение прочностных характеристик трубопровода для повышения давления в системе.

На потери напора в горизонтальном участке трубопровода главным образом оказывает влияние величина шероховатости внутренней поверхности трубы [99-101, 103-105, 107, 108].

В работе [130] автор отмечает, что трубопроводы из полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) широко используются при закладочных работах из-за их преимуществ по сравнению со стальной таких как: малый вес, низкая величина шероховатости внутренней поверхности, гибкость, а также высокая коррозионная стойкость и износостойкость. Однако область применения труб из полиэтилена ограничена из-за низкого максимально допустимого рабочего давления. Для решения этой проблемы ученый предлагает использовать для закладочных работ полиэтиленовый трубопровод, армированный стальной проволокой (ПЭТАС, с англ. технология SRCP - steel wire reinforced composite polyethylene pipe). Такой

трубопровод обладает всеми преимуществами трубопровода из ПЭВП, при этом способен выдерживать высокое рабочее давление.

На рисунке 1.5а изображена полиэтиленовая труба, которая имеет армирование стальной проволокой. Она состоит из внутреннего слоя полиэтилена ПЭ100 (1), на который наносятся поперечно-спирально навитые слои стальной проволоки (3). Затем эти слои покрываются защитным слоем полиэтилена ПЭ100 (4). Оба конца слоя стальной проволоки покрыты клеем (2), который обеспечивает соединение полиэтилена с металлом. Количество и диаметр стальной проволоки варьируются в зависимости от номинального давления трубы. На рисунке 1.5б показан процесс намотки стальной проволоки на трубу.

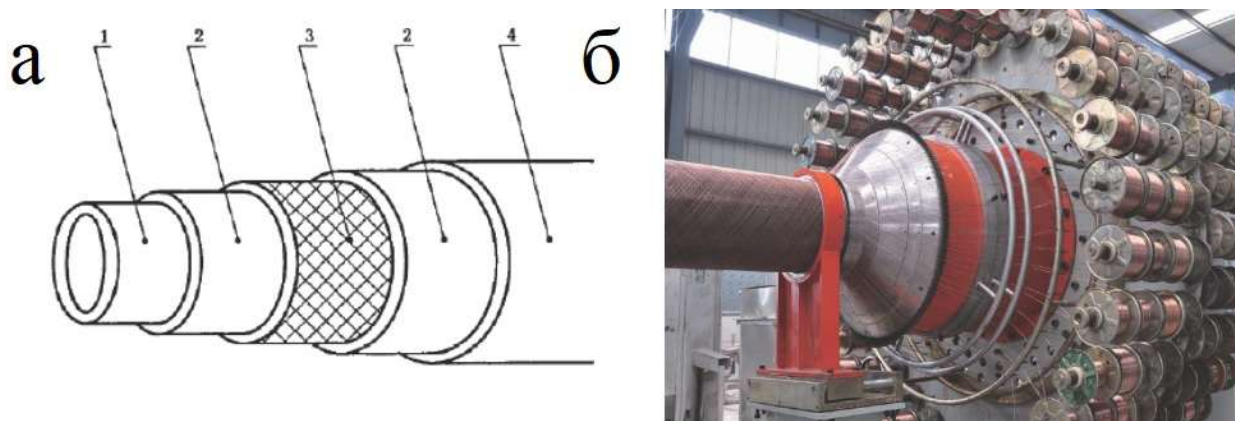


Рисунок 1.5 – а – конструкция трубы ПЭТАС; б – процесс армирования трубы стальной проволокой

Полиэтиленовые трубы, армированные стальной проволокой (ПЭТАС), изготавливают с внешним диаметром до 200 мм с номинальным давлением до 7 МПа. При увеличении диаметра свыше 200 мм номинальное давление снижается. Для максимально доступного диаметра в 1000 мм оно составляет 1,25 МПа. В исследовании говорится, что при проведении испытания на выявление отказа, разрыв ПЭТАС произошел при давлении 22,4 МПа, что более чем в 3 раза превышает номинальное значение 7 МПа. Также автор предлагает вместо стандартного фланцевого соединения таких труб использовать механические муфты с канавками. Это связано с тем, что

фланцы дороги, медленны в установке и существенно увеличивают вес трубы.

Преимущества использования ПЭТАС, в сравнении с традиционными стальными трубами ученый аргументирует тем, что:

- вес ПЭТАС на 25% меньше, чем у трубы из стали 80, что снижает трудоемкость и увеличивает безопасность монтажа таких труб;

- внутренняя поверхность ПЭТАС изготовлена из полиэтилена - материала с меньшим коэффициентом трения, что снижает потери напора в трубопроводе;

- внешняя и внутренняя поверхности ПЭТАС изготовлены из полиэтилена, который не подвержен коррозии;

- полиэтилен обладает лучшими износостойкими свойствами по сравнению с углеродистой сталью, и, таким образом, ПЭТАС обеспечивает меньший износ системы и меньшие затраты на техническое обслуживание труб;

- полиэтилен, армированный стальной проволокой является полужестким материалом, соответственно ПЭТАС могут быть изогнуты во время их установки. Требуется меньше угловых фитингов и достигается более высокая скорость установки по сравнению со сталью. Скорость установки ПЭТАС аналогична традиционным полиэтиленовым трубам, поэтому примерно в 3-4 раза выше, чем у стали.

Также автор приводит сравнение затрат на 100 метров трубопроводной системы из ПЭТАС и труб из стали 80. Затраты включают стоимость труб, стоимость соединительных и крепежных материалов (муфты, болты, колена, кронштейны и др.) и стоимость монтажа. В итоге получилось, что при стоимости ПЭТАС большей на 16%, чем труб из стали 80, суммарные затраты на трубопроводную систему из стальных труб на 59% выше, чем на аналогичную трубопроводную систему из ПЭТАС. Это обусловлено меньшей стоимостью соединительных и крепежных материалов в системе

ПЭТАС в 1,6 раз, а также тем, что скорость монтажа ПЭТАС в 3,6 раз превышает скорость установки стальных труб.

В заключении исследователь утверждает, что ПЭТАС может быть использована как для полной замены стальных трубопроводов, так и для комбинирования с ними для обеспечения оптимальной конфигурации гидротранспортной системы закладочного комплекса [130].

В работе [126] автор исследует характеристики полиэтилена сверхвысокой молекулярной массы (СВМПЭ, с англ. UHMWP - ultra-high molecular weight polyethylene) в сравнении с уже применяемым полиэтиленом ПЭ100 (PE100) и полиэтиленом высокого давления ПЭВД (HDPE) для возможности применения СВМПЭ в трубопроводах гидротранспортных систем закладочных комплексов. СВМПЭ традиционно считается наиболее стойким к ударам и истиранию из всех полиэтиленов, но он также имеет технически неограниченное количество марок (молекулярных масс), как установлено в стандарте ISO 11542, который определяет материалы только по их минимальному индексу текучести расплава - атрибуту, не связанному напрямую с абразивными или ударными характеристиками.

Ученый отмечает, что любой полиэтилен с молекулярной массой больше  $1,5 \times 10^6$  г/моль, скорее всего, будет считаться СВМПЭ на основании индекса текучести расплава. Однако это может ввести в заблуждение, поскольку характеристики трубы не имеют ничего общего с индексом текучести расплава.

В работе рассмотрено три основных класса полиэтиленов с молекулярными массами:  $1,5 \times 10^6$  г/моль;  $3,5 \times 10^6$  г/моль;  $8,2 \times 10^6$  г/моль и установлено, что по мере увеличения молекулярной массы с  $3,5 \times 10^6$  до  $8,2 \times 10^6$  г/моль стойкость к истиранию значительно повышается (в соотношении 3:1), а ударная вязкость снижается со 120 до 100 кДж/м<sup>2</sup>. Было проведено исследование стойкости различных материалов к истиранию в барабане (рисунок 1.6) и сравнение их ударной вязкости (рисунок 1.7).

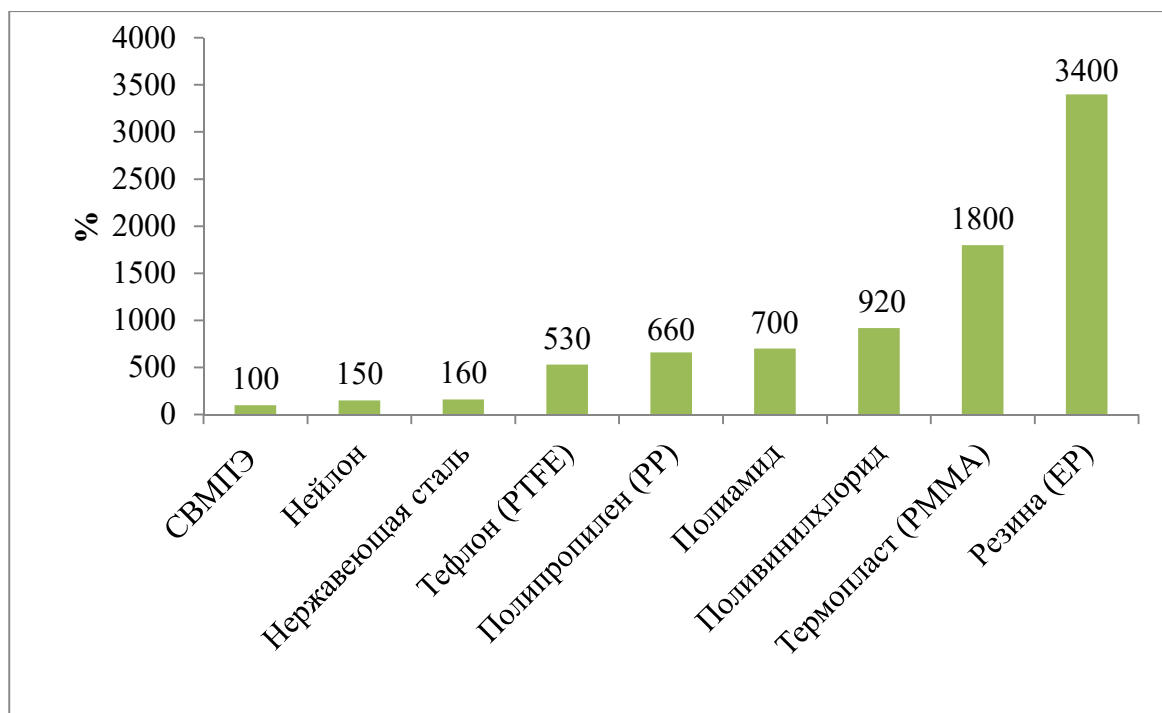


Рисунок 1.6 - Сравнительные потери объема материалов при истирании на барабане от базовой линии 100% - СВМПЭ ( $3,5 \times 10^6$  г/моль)

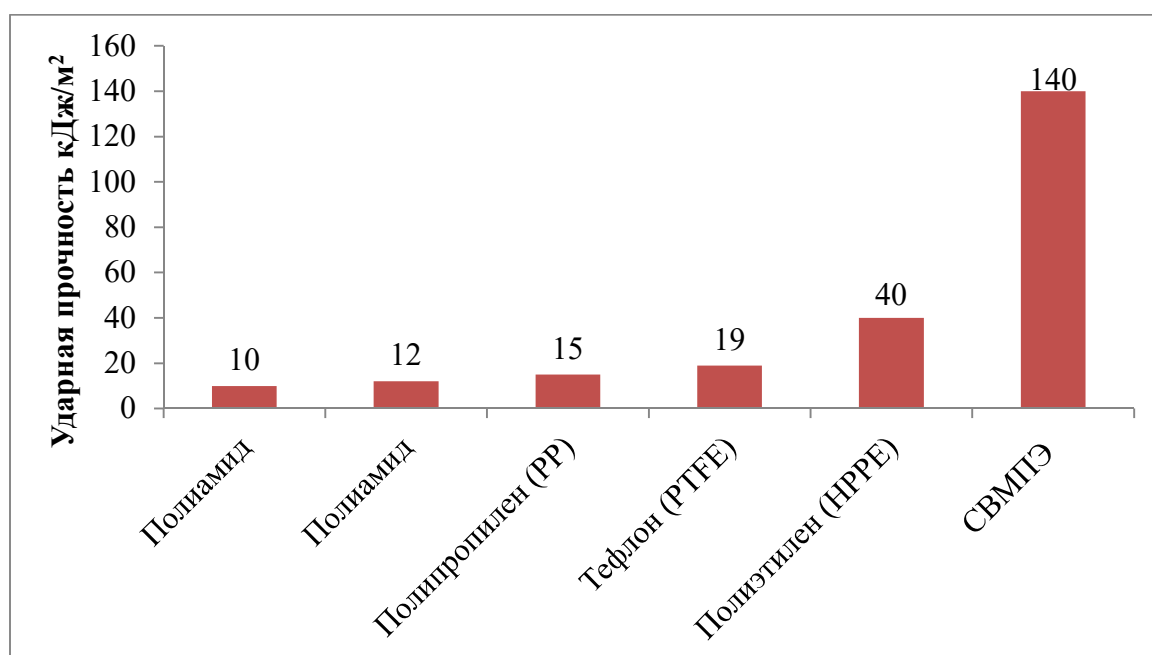


Рисунок 1.7 - Ударная прочность материалов по Изоду (ISO 180, ISTM D256)

Из диаграмм на рисунках 1.6 и 1.7 видно, что СВМПЭ обладает значительно большей стойкостью к истиранию и ударной прочностью по Изоду по сравнению с другими исследуемыми материалами. Помимо этих преимуществ, автор указывает на низкую величину шероховатости поверхности материала СВМПЭ. Так, коэффициент трения (ISO 8295) для

СВМПЭ марок WearPro и EnergyPro составляет 0,05 по сравнению с 0,28-0,35 для ПЭ100 или 0,6 для стали. Такой низкий коэффициент трения может существенно снизить потери напора в трубопроводе и уменьшить затраты электроэнергии на транспортирование закладочной гидросмеси.

Ученый проводит исследование на истирание ПЭ100 и многих образцов СВМПЭ от различных производителей. Принимая во внимание различие технологий изготовления материалов, а также неспособность большинства производителей производить трубы (как правило, предлагают вкладыши), автор для сравнения выбрал формованный лист. Кроме того, чтобы избежать каких-либо проблем с торговыми марками, он перечислил производителей по странам происхождения, а не по торговым маркам [126].

Исследователь обращает внимание, что WearPro+ представляет материал с молярной массой  $8,2 \times 10^6$  г/моль, WearPro представляет собой материал с молярной массой  $4,5 \times 10^6$  г/моль, EnergyPro представляет собой материал с молярной массой  $2,5 \times 10^6$  г/моль.

Испытания проводились в барабане с использованием пульпы на основе кварцевого песка с массовой концентрацией 70% и диаметром твердых частиц от 0,5 до 3 мм. Скорость вращения барабана постоянная - 2800 об/мин, время испытания образцов - 6 часов, гидросмесь состояла из 1,5 кг кварцевого песка и 650 мл воды. Результаты исследования образцов ПЭ100 и СВМПЭ на истирание показаны в таблице 1.4 и на рисунке 1.8 [126].

При испытаниях на барабанной машине отношение изнашивания образцов из полиэтилена к изнашиванию образцов из СВМПЭ составляло 3:1, однако при испытаниях по стандарту EN 295 это отношение стремится к бесконечности, т.к. у образца из СВМПЭ толщина стенки не уменьшилась. Ученый связывает это с переходом от ударного к абразивному изнашиванию, потому что испытание на барабанной машине проводилось при высоких оборотах, заставляя мелкие твердые частицы действовать с высокой ударной силой по поверхности [126].



Таблица 1.4 - Результаты испытаний на изнашивание образцов из полиэтилена [126]

Образец	Масса начальная, г	Масса после наработки, г	Потеря массы, %
ПЭ100	4,47	2,46	44,96
ПЭ100	4,47	2,53	43,40
СВМПЭ-1(Германия)	4,82	3,46	28,21
СВМПЭ-2(Германия)	4,55	2,86	37,14
СВМПЭ-3(Германия)	4,31	3,22	25,20
СВМПЭ-4(Германия)	4,27	3,25	23,80
СВМПЭ-5(Германия)	5,71	4,67	18,20
СВМПЭ-6(Германия)	5,52	4,60	16,66
СВМПЭ-7(Германия)	6,28	5,16	17,80
СВМПЭ-1(США)	4,46	2,99	32,90
СВМПЭ-2(США)	4,39	2,85	35,00
СВМПЭ-3(США)	4,31	3,22	25,20
СВМПЭ-1(Китай)	4,46	2,99	32,90
СВМПЭ-2(Китай)	4,39	2,85	35,00
СВМПЭ-3(Китай)	4,81	3,61	26,81
СВМПЭ-4(Китай)	4,82	3,98	25,10
СВМПЭ-1(Австралия)	4,93	3,98	19,26
СВМПЭ-2(Австралия)	4,74	3,90	17,72
СВМПЭ-1(EnergyPro)	4,93	3,51	28,80
СВМПЭ-2(EnergyPro)	4,70	3,28	30,21
СВМПЭ-1(WearPro)	4,83	3,89	19,46
СВМПЭ-2(WearPro)	4,78	3,93	17,78
СВМПЭ-1(WearPro+)	6,49	5,41	15,40
СВМПЭ-2(WearPro+)	6,37	5,29	16,90

Исходя из данных таблицы 1.4 и диаграммы на рисунке 1.8, мы видим, что износостойкость у образцов СВМПЭ с молярной массой  $8,2 \times 10^6$  г/моль практически в 3 раза превышает значения у образцов из ПЭ100. Также стоит отметить, что расхождения в потере масс у образцов с молярной массой  $8,2 \times 10^6$  г/моль и образцов с молярной массой  $4,5 \times 10^6$  г/моль незначительные и составляют около 1-4%.

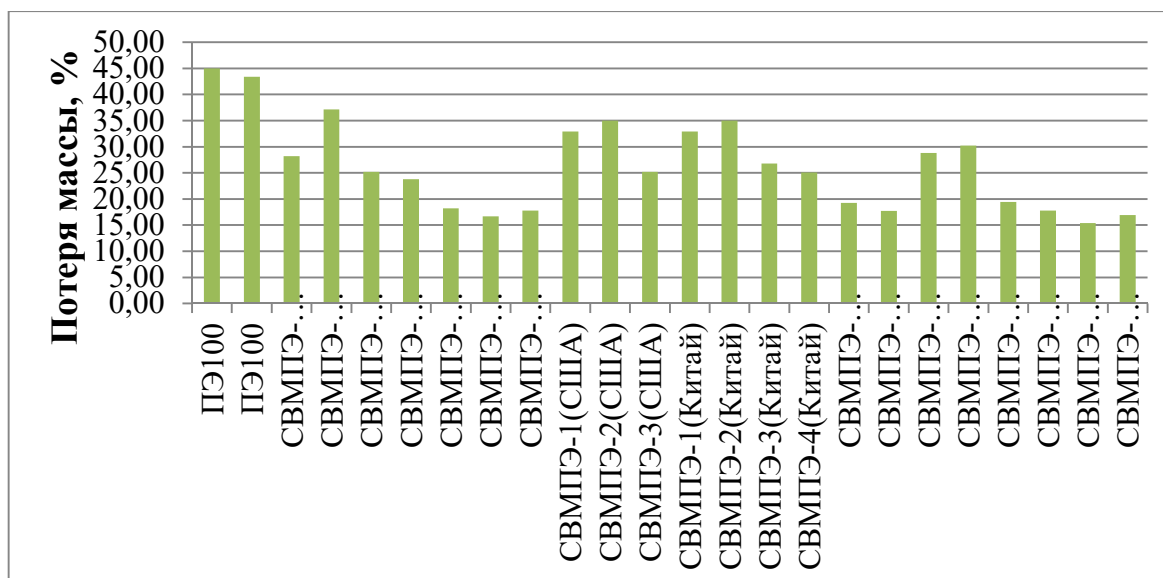


Рисунок 1.8 – Потеря массы образцов после испытания на истирание

Далее в работе показаны результаты исследования износостойкости трубчатых образцов из углеродистой стали, полиэтилена ПЭ100 и СВМПЭ с условием контакта абразива по образцу по стандарту EN 295. Был произведен замер толщины стенки трубы изначально и после 1 миллиона циклов испытаний, в качестве гидросмеси использовалась стекловидная глина. Результаты испытаний показаны в таблице 1.5 [126].

Таблица 1.5 – Результаты испытаний образцов из различных материалов по стандарту EN 295 [126]

Материал образца трубы	Толщина стенки изначально, мм	Толщина стенки после 1 млн. циклов, мм	Среднее уменьшение толщины стенки, мм	Уменьшение толщины стенки, %
Полиэтилен ПЭ100	6,67	6,37	0,30	4,48
Углеродистая сталь	5,57	5,54	0,03	0,37
СВМПЭ WearPro	6,84	6,84	0,00	0,00

На основе проведенного исследования можно сделать вывод, что СВМПЭ является наиболее ударопрочным и стойким к истиранию материалом по сравнению с полиэтиленом ПЭ100 и сталью. СВМПЭ подходит как для изготовления труб, так и для изготовления вставок в стальные трубы, однако возможность его применения в гидротранспортных системах закладочных комплексов обусловлена, главным образом, экономической целесообразностью.

В работе [142] проведено исследование проблемы интенсивного гидроабразивного изнашивания трубопроводов гидротранспортной системы закладочного комплекса. Были испытаны трубы с индукционной закалкой, трубы с двойными стенками, трубы с керамической футеровкой и трубы с углеродным покрытием. По результатам стендовых испытаний наименьшее изнашивание оказалось у труб с керамической футеровкой. В связи с этим было принято решение использовать для закладочных работ трубопровод с керамической футеровкой на вертикальных участках.

Обсадная колонна скважины с керамической футеровкой не могла быть установлена таким же образом, как и обсадная колонна без футеровки, поскольку обсадная колонна без футеровки имела сварные соединения, а обсадные трубы с керамической футеровкой имели резьбу. Большинство повреждений, возникающих во время транспортировки и установки, были ограничены резьбовыми концами и не затрагивали облицовку из керамического композита. Любая поврежденная облицовка обычно ремонтировалась с использованием заплат в полевых условиях. На сегодняшний день все скважины пробурены и обсажены, и большинство из них в настоящее время находится в эксплуатации. Самая длинная действующая скважина, в которой, как ожидается, также будет наблюдаться наибольший износ, находится на глубине от поверхности до 487 м под землей, и в ней было пропущено 3,48 млн. тонн закладочной смеси. Средние значения изнашивания оказались меньше расчетных: обследование, в ходе которого производились измерения внутреннего диаметра с интервалом в один сантиметр, показало, что средняя скорость износа футеровки составляет 0,92 мм/млн.т по сравнению с конструкцией 1,1 мм/млн.т. Скорость изнашивания была самой высокой в верхней части ствола скважины, так как подземная распределительная система питается самотеком, что требует, чтобы давление на поверхности было близко к нулю, и приводит к тому, что верхняя часть скважины обычно работает в режиме слабого потока. Оценка изнашивания проводилась акустическим методом, а также с помощью

телекамеры, установленной на лебедке. Результаты исследования приведены в таблице 1.6 [142].

В работе было показано, что после заполнения первых 3,48 млн. тонн закладочной смеси в веденных в эксплуатацию вертикальных трубопроводах скорость изнашивания и свойства сцепления футеровки соответствуют проектным критериям или превышают их. Доверие к этому материалу с тех пор привело к решению установить этот облицованный трубопровод на всех основных секциях горизонтального контура.

Таблица 1.6 – Результаты акустических съемок скважины с керамической футеровкой от поверхности до глубины 487 м под землей после заполнения 3,48 млн. тонн закладочной смеси [142]

Глубина, м	Средний износ футеровки, мм	Средняя скорость износа футеровки, мм/млн.т	Износ футеровки более 1,3 мм/млн.т (% показаний)
30-80	3,5	1,01	11,6
80-130	2,8	0,80	1,6
130-180	3,0	0,85	0,1
180-230	3,0	0,85	3,6
230-280	3,2	0,92	3,5
280-330	3,2	0,91	2,3
330-380	3,2	0,92	2,6
380-430	3,2	0,92	2,8
430-480	3,3	0,95	4,6

Полученная в результате экономия затрат на монтажные работы и замену материалов является значительной, с дополнительными преимуществами повышенной эксплуатационной стабильности и снижения нагрузки на профилактическое обслуживание. Это изменение, однако, потребует некоторой модификации методов установки, эксплуатации и технического обслуживания. Не следует упускать из виду потенциальную долгосрочную экономическую выгоду от этих футеровок труб из-за текущего уровня на капитальные или эксплуатационные расходы [142].

## 1.5. Подготовка закладочных материалов

Как сообщалось в разделе 1.1.5, основными компонентами для приготовления твердеющих закладочных смесей являются: связующие материалы, заполнитель и вода. Большинство используемых при закладочных работах материалов нужно подвергать дополнительной переработке: дроблению, измельчению, промывке, грохочению, классификации, магнитной сепарации, дешламации и др. [11, 23, 138, 140].

В зависимости от применяемых материалов, они требуют разного вида переработки. Цемент и золы необходимо доизмельчать для повышения активности, шлаки требуют мокрого измельчения, скальные породы - дробления и измельчения, хвосты обогащения необходимо обезвоживать и дешламировать.

Гранулометрический состав заполнителя определяют седиментационными и ситовыми методами [23].

Подготовка заполнителя из отвальных пород состоит из дробления, грохочения, иногда измельчения и классификации. Существуют 4 основных схемы подготовки заполнителя из крупнокускового материала [23]:

- 1) Схема открытого цикла в одну стадию дробления;
- 2) Схема двухстадийного дробления с совмещенным грохочением во второй стадии;
- 3) Схема трехстадийного дробления с предварительным грохочением во второй и третьей стадии;
- 4) Схема двухстадийного дробления с предварительным и контрольным грохочением во второй стадии.

Основное технологическое оборудование для подготовки заполнителя из отвальных пород это - бункер, питатель, дробилка (щековая, конусная или молотковая), ленточный конвейер и грохот [23].

Различают 3 степени дробления: крупное ( $D_n=1200-1500$  мм,  $d_n=300-100$  мм), среднее ( $D_n=350-100$  мм,  $d_n=100-40$  мм) и мелкое ( $D_n=100-40$  мм,  $d_n=30-$

5 мм), где  $D_n$  и  $d_n$  - номинальная крупность материала до и после дробления. Общая степень дробления равна произведению их степеней в отдельных стадиях [23].

В первой стадии дробления используют в основном щековые дробилки, во второй и третьей - конусные и молотковые. Молотковые дробилки используют для дробления некрепких горных пород, имеющих низкую абразивность.

Операции предварительного грохочения используют для уменьшения количества материала, поступающего в операцию дробления за счет отсева мелочи. Наиболее широкое распространение в закладочных комплексах получили колосниковые и вибрационные грохоты. Основным показателем грохочения - его эффективность, определяемая отношением количества подрешетного продукта к общему его количеству данной крупности, находящегося в исходном материале. Эффективность грохочения на колосниковых грохотах 60-70%, на вибрационных 65-85% [23].

Тонкомолотые хвосты обогатительных фабрик широко используют в качестве заполнителя закладочной смеси. С уменьшением фракции заполнителя возрастает удельная площадь поверхности, что приводит к повышению расхода вяжущего [19, 23, 30, 50, 58].

В хвостах текущей переработки содержится около 80% воды. Подготовка заполнителя состоит из операций: грохочение, классификация, обезвоживание в гидроциклонах, сгущение, фильтрация и др.

Для повышения извлечения твердого из хвостов обогащения используют сгустители, которые обезвоживают пульпу с крупностью частиц твердого до 2-4 мкм методом осаждения под действием свободного падения. Питанием часто служит слив гидроциклона. Различают сгустители с центральным и периферическим приводами [22, 56, 57].

На закладочных комплексах для сгущения слива гидроциклонов используют каналные сифонные или пластинчатые сгустители, которые представляют собой осадительную батарею.

Для глубокого обезвоживания хвостов обогащения используют вакуум-фильтры, что позволяет перевозить их на складочный комплекс автомобильным или железнодорожным, т.к. содержание воды в таких хвостах не более 10-15%.

При приготовлении складочной смеси чаще всего используются цементные вяжущие. Активность цемента возрастает при увеличении удельной площади поверхности.

Доизмельчение цемента производят вместе со шлаком, а также при механической активации складочных смесей.

Вяжущие из ангидрита, шлаков, гипса готовят путем совместного помола исходных компонентов. Материал крупностью более 15-30 мм дробят, в том числе шлаки, крупность которых иногда превышает 350 мм. Присутствие в них скрапа и застывших капель металла обусловили наличие в схеме подготовки магнитных сепараторов и металлоуловителей.

Типовая схема подготовки вяжущего выглядит следующим образом: подготовленный по крупности материал (менее 15-30 мм) со склада транспортируется в приемный бункер, затем дозируется питателем в мельницу, слив которой подается в смеситель складочных материалов.

Используют мельницы: стержневые, шаровые с центральной разгрузкой, шаровые с разгрузкой через решетку и трубные [23].

### **1.5.1. Смесительные устройства**

Для приготовления складочных смесей применяются смесительные машины, в которых основным элементом является смесительный барабан определенной вместимости. Процесс приготовления смесей состоит из нескольких последовательных операций: загрузки отмеренных компонентов (вяжущих и заполнителей) в смесительную машину, перемешивания компонентов с добавлением определенного количества воды и выгрузки готовой складочной смеси из машины. Это позволяет обеспечить

однородность и качество смеси, а также повысить эффективность процесса и сократить затраты труда. [11, 23].

Существуют два основных способа перемешивания материалов в смесительном барабане: гравитационное перемешивание и принудительное перемешивание. Кроме того, смесительные машины могут быть классифицированы по характеру работы (периодическое или непрерывное действие) и по способу установки (передвижные или стационарные).

У гравитационных смесителей объем готового замеса составляет от 65 до 3000 л, в то время как у смесителей принудительного действия этот объем варьируется от 165 до 1000 л.

Смесители непрерывного действия, которые осуществляют принудительное перемешивание материалов, имеют производительность от 5 до 60 м<sup>3</sup>/ч. В то же время гравитационные смесители непрерывного действия обладают производительностью 120 м<sup>3</sup>/ч [12].

В гравитационном смесителе исходные компоненты загружаются в барабан, который вращается с помощью лопастей. При вращении лопасти поднимают смесь на определенную высоту, затем она падает вниз и снова подхватывается другими лопастями, и так далее. Этот процесс перемешивания продолжается в течение 60-90 секунд. Готовая смесь выгружается из барабана путем его опрокидывания без остановки вращения или путем реверсивного вращения барабана. Полный рабочий цикл, включающий загрузку исходных компонентов, перемешивание и выгрузку готовой смеси, занимает 90-150 секунд. Гравитационные смесители отличаются простотой устройства и обслуживания. Они способны смешивать компоненты с крупными заполнителями размером до 120-150 мм [22].

Смесители принудительного действия с вращающимися лопастными валами широко применяются для приготовления смесей на основе цементных вяжущих веществ. Они позволяют получать смеси различной подвижности и жесткости, при этом допускается использование заполнителей размером до 70 мм. В таких смесителях смесь перемешивается



с помощью двух винтовых лопастей, которые установлены на валу. Вал приводится в движение от электродвигателя через ременную передачу и редуктор. В результате вращения лопастей происходит интенсивное перемешивание компонентов смеси. Готовая смесь выгружается через затвор, который управляется пневмоцилиндром. Это позволяет контролировать процесс выгрузки и обеспечивает удобство в использовании смесителя. Смесители принудительного действия с вращающимися лопастными валами обладают высокой эффективностью смешивания и широким спектром применения в строительной и промышленной сферах. Они позволяют получать качественные смеси на основе цемента и других материалов [11, 23].

Сейчас широко распространены вертикальные роторные смесители, которые работают на высоких скоростях движения своих рабочих органов. Эти машины особенно эффективны при приготовлении жестких смесей.

В роторном смесителе сухие компоненты подаются через загрузочный патрубок, а вода поступает через кольцевую перфорированную трубу. Смесь перемешивается лопастями, которые закреплены на державках кронштейнов в кольцевом пространстве, ограниченном внешней обечайкой смесительной чаши и внутренним стаканом. Обе эти части облицованы износостойкими плитами, которые можно заменять. Несколько кронштейнов закреплены на траверсе, которая вращается благодаря электродвигателю через редуктор. Готовую смесь разгружают через секторный затвор, который управляется пневмоцилиндром.

Бетоносмесительные установки производительностью до 30 м<sup>3</sup>/час обычно оснащены смесителями непрерывного действия. В таких горизонтальных двухвальных смесителях компоненты смеси подаются непрерывным потоком в корыто. Внутри корыта находятся два вала с лопастями, которые вращаются навстречу друг другу. Лопасти установлены под углом 40-45° к оси вала, чтобы перемещать смесь в процессе ее

перемешивания к разгрузочному затвору. Вращение валов осуществляется электродвигателем через ременную передачу, редуктор и зубчатую пару.

Техническая производительность смесителей непрерывного действия определяется объемом смеси, перемещаемой в единицу времени в осевом направлении. Она также зависит от размера лопастей, угла их установки и частоты их вращения [12, 23].

### 1.5.2. Дозаторные устройства

Традиционные комплексы для приготовления ЛТС обычно оснащены весодозаторами непрерывного действия типов СБ-71В и 4273 ДН (рисунок 1.9). Однако в системе управления этими дозаторами отсутствует функция суммирования информации по нескольким компонентам закладочной шихты и контроля пробуксовки ленты. В связи с этим внедряют систему автоматического регулирования подачи компонентов закладочной шихты в мельницу и контроля работы весодозаторов на этапе подготовки шихты. Эта система имеет два канала [11, 23].



Рисунок 1.9 – Весодозатор непрерывного действия СБ-71В

Первый канал отвечает за регистрацию подачи компонентов шихты и суммирование их количества. Его функционирование следующее: сигналы с тензопреобразователей весодозаторов передаются на преобразователи напряжения-тока типа Ф 7029, которые выдают унифицированный выходной сигнал в диапазоне 0-5 МА. Затем эти сигналы направляются на самопишущие приборы (СП) - сумматоры А-04, где регистрируется масса компонентов шихты на диаграммной ленте.

Второй канал контроля состоит из следующих блоков: узел встройки магнитов (М), узел встройки герконовых выключателей (ГВ), электронный блок управления устройством сигнализации (БУУС), световое табло (СТ) и электрический звонок (ЭЗ). Работа этого канала заключается в следующем: в рабочем состоянии ведомый барабан дозатора вращается, что приводит к постоянным изменениям положения магнитов относительно герконовых выключателей. В результате контакты герконовых выключателей срабатывают с частотой, пропорциональной вращению ведомого барабана. Электронное реле блока управления устройством сигнализации настроено на минимальную частоту срабатывания герконовых выключателей. На световом табло отображается информация о трех состояниях: в аварийном режиме лампочка мигает с определенной частотой, при оперативном отключении дозатора лампочка не горит, а при работе дозатора в рабочем режиме лампочка горит постоянно. При пробуксовке ленты дозатора включается дополнительная звуковая сигнализация [11].

Суммарная масса шихты, подаваемой перед мельницей, измеряется конвейерными весами и является управляющим сигналом для работы дозаторов [11].

### **1.5.3. Вспомогательное оборудование (насосы, вибраторы, пневмоактиваторы)**

Если закладочная смесь должна быть доставлена на расстояние, превышающее максимально допустимую длину самотечного

транспортирования, то используется напорное транспортирование с помощью различных типов насосных устройств, чтобы удлинить путь доставки закладочной смеси. Самыми распространенными типами насосного оборудования для транспортировки закладочных смесей являются центробежные шламовые и песковые насосы [12, 26, 33, 47].

В настоящее время в зарубежных горных предприятиях и некоторых предприятиях России применяются специальные насосы поршневой конструкции.

Шламовые насосы используются для перекачивания гидросмесей с высокой плотностью твердых фракций (до 2 500 кг/м<sup>3</sup>). Горизонтальные одноступенчатые насосы типа Ш (шламовые) предназначены для перекачивания гидросмеси с мелкой твердой фракцией плотностью от 1 200 до 2 500 кг/м<sup>3</sup>, с максимальным размером твердых частиц до 20 мм [26].

Песковые насосы с боковым входом предназначены для перекачивания различных гидросмесей, таких как песчаные, гравийные, продукция флотации руд и других, с водородным показателем среды рН от 6 до 12 единиц и температурой до +70 °С. Они могут перекачивать гидросмесь с концентрацией твердого вещества до 40% по объему, плотностью до 2 200 кг/м<sup>3</sup> и размером твердых включений до 6 мм [26].

Для перемещения закладочных смесей по трубопроводам с большой высотой подъема и необходимостью создания высокого начального давления можно использовать поршневые гидравлические насосы. Эти насосы способны перекачивать среды с содержанием твердых частиц до 70%, что также позволяет сократить расход воды и цемента. Такие насосы обеспечивают возможность транспортировки материалов с размером твердых частиц до 80 мм на расстояние до 3000 м и на высоту свыше 600 м [26].

При перевозке руды из воронок и траншей, а также при оборудовании разгрузочных пунктов (рудоспусков и породоспусков), широко используются питатели и конвейеры. Питатели - это конвейеры длиной не более 10 метров, которые обычно используются для загрузки руды в вагоны электровозной

откатки, автосамосвалы и другие конвейеры. Наиболее распространены вибрационные питатели различных конструкций. Они широко применяются в подземных рудниках при системах разработки этажного обрушения с площадным выпуском руды, особенно на горных предприятиях Алтае-Саянского региона, Урала, Курской магнитной аномалии (КМА) и др. [11, 23, 55].

Вибрационный питатель - это установка, которая используется для перемещения раздробленной горной массы с помощью вибрационных сил. В результате воздействия этих сил, сыпучий материал приобретает текучесть путем снижения внутреннего трения.

Конструктивно вибрационный питатель состоит из рабочего органа (лотка), привода, вибратора и элементов крепления. Лоток вибрационного питателя может осуществлять как направленные, так и ненаправленные колебания [55].

Питатели с ненаправленными колебаниями получили широкое распространение. Угол наклона их составляет  $14-24^\circ$  в сторону разгрузки горной массы. Чем больше угол наклона, тем выше эффективность работы установки. Если угол превышает  $24^\circ$ , возможно самопроизвольное истечение руды. Питатели закрепляются в выработке с помощью канатов или цепей.

В качестве вибраторов используются дисбалансы, представляющие собой вращающиеся металлические секторы с смещенным центром тяжести. Широко распространены виброплощадки ВДПУ, разработанные в ИГД СО РАН и известные под названием «Сибирячка». Один питатель может быть установлен на одну или две выпускные выработки. Эти машины хорошо функционируют при работе под завалами [23].

Производительность при использовании виброустановок для погрузки в вагоны при наличии негабаритных грузов может достигать 400-500 тонн в смену и более, что составляет примерно 10-15% от общего объема погрузки. При погрузке руды через торцевой выпуск, вибрационные питатели используются вместе с вибрационными конвейерами. На Зыряновском

руднике был установлен виброкомплекс, состоящий из вибропитателя ВП-2 и секционного конвейера длиной 50 метров, который обеспечивал производительность на выпуске до 600 тонн в смену.

Однако в современных условиях вибрационные питатели постепенно заменяются самоходным оборудованием высокой производительности из-за значительных затрат на монтаж и демонтаж [23].

## **1.6. Выводы по главе 1**

1. Анализ мирового опыта разработки месторождений полезных ископаемых подземным способом показал, что на около 40% рудников используются системы разработки с закладкой.

2. Установлено, что наиболее распространенным способом заполнения выработанного пространства на рудниках является литая твердеющая закладка, основными компонентами которой являются: связывающее вещество, твердый наполнитель и несущая среда (чаще вода). Суть способа заключается в заполнении выработки готовой закладочной смесью, после чего происходит отверждение материала в выработанном пространстве и набор нормативной прочности для достижения требуемой несущей способности формируемого массива.

3. Используемые в гидротранспортных системах закладочных комплексов стандартные стальные трубопроводы имеют недостаточный ресурс и интенсивный рост шероховатости внутренних стенок. Одной из основных причин недостаточной эффективности закладочных комплексов горных предприятий является интенсивный гидроабразивный износ его транспортных трубопроводов, который влечет за собой изменение шероховатости внутренней поверхности, что в свою очередь определяет потери напора при гидротранспортировании. Замена изношенных трубопроводов на новые, а также повышенное энергопотребление являются основными статьями расходов при эксплуатации гидротранспортных систем закладочных комплексов.

4. На основе анализа литературных источников установлено, что применение полиуретанового покрытия внутренней поверхности трубопроводов в гидротранспортных системах горно-обогатительных комбинатов существенно влияет на снижение потерь напора в системе и на увеличение ресурса. Для установки возможности использования полиуретанового покрытия в трубопроводах гидротранспортных систем заводских комплексов необходимо провести дополнительные теоретические и экспериментальные исследования.

## ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОТРАНСПОРТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Потери напора в трубопроводах (гидротранспортных систем) и их интенсивное гидроабразивное изнашивание в результате контакта с перекачиваемой гидросмесью являются актуальными проблемами на горных предприятиях. В этом направлении проведено множество исследований отечественными и зарубежными учёными. Несмотря на это, задачи по снижению потерь напора при транспортировании закладочных гидросмесей и увеличению срока службы трубопроводов гидротранспортных систем закладочных комплексов решены частично [6-9, 30, 47, 69, 70, 84, 90, 91, 99-109].

На потери напора в транспортных трубопроводах закладочных комплексов основное влияние оказывают силы сопротивления трения гидросмеси о внутреннюю поверхность труб, а также местные сопротивления.

Эффективность трубопроводного транспорта при закладке выработанного пространства определяется гидроабразивным изнашиванием внутренней поверхности труб, вплоть до аварийных ситуаций. Анализ исследований показал, что основные факторы, влияющие на интенсивность гидроабразивного изнашивания трубопровода закладочного комплекса, можно разделить на две группы [14, 17, 20, 108]:

1) факторы, определяющие величину кинетической энергии потока абразивной гидросмеси, такие как:

- минералогический и гранулометрический состав, транспортируемого материала;
- скорость прохождения частиц наполнителя;
- угол воздействия частицы на рабочую поверхность (угол атаки);



- форма частиц;
- концентрация гидросмеси;
- время воздействия частиц.

2) факторы, определяемые физико-механическими свойствами изнашиваемого и изнашивающих материалов.

## **2.1. Влияние свойств гидросмеси на транспортабельность**

Гидросмесь – это механическая смесь воды и измельченных до определенной крупности твердых частиц.

При движении гидросмеси твердые частицы в ней подвержены силе тяжести и стремятся опуститься вниз. Когда движение прекращается, эти частицы оседают на дно. Таким образом, гидросмесь может существовать только в состоянии движения. Физические свойства гидросмеси в значительной степени зависят от свойств ее жидкой и твердой фаз. Присутствие твердых частиц в гидросмеси значительно изменяет структуру потока по сравнению с потоком чистой воды. В различных технологических процессах условия определяют состав твердых частиц по их размеру, концентрации в потоке гидросмеси и другим характеристикам [7].

На процесс гидротранспортирования оказывают влияние крупность транспортируемых фракций и их плотность, от которых зависят пульсационные характеристики потока и интенсивность турбулентности. При попадании мелких частиц в турбулентный поток происходит их слияние. С ростом размеров частиц появляется их скольжение в потоке и происходит отставание твердой фазы от жидкой, что в результате увеличивает сопротивления. Скольжение частиц в потоке вызывает рост волнового числа турбулентности и приводит к изменению ее энергетического спектра. Крупные частицы опускаются на дно или попадают в другие слои жидкости, имеющие другие мгновенные характеристики. Отставание частиц и выпадение их из потока способствуют увеличению его турбулизации [7].

Большое влияние на процесс гидротранспортирования оказывает гранулометрический состав материала. Особенное влияние на гидротранспортирование оказывают тонкодисперсные частицы, увеличение содержания которых в гидросмеси вызывает повышение ее вязкости. В тонкодисперсных гидросмесях большой концентрации проявляются реологические свойства [7, 75].

Для оценки гранулометрического состава материала принята средневзвешенная крупность. По этому параметру гидросмеси классифицируются следующим образом [7]:

- крупнозернистые гидросмеси (размер зерен свыше 20 мм);
- мелкозернистые гидросмеси (размер зерен 10- 20 мм);
- песчаные гидросмеси (размер зерен до 10 мм).

Хрупкость транспортируемого материала характеризует интенсивность изменения гранулометрического состава в результате разрушения при движении, что также может свидетельствовать о пористости материала. В свою очередь это может приводить к изменению формы и размеров частиц. По форме частиц наполнителя в гидросмеси принята следующая классификация [7]:

- Полидисперсные гидросмеси (содержат разнородные по размерам частицы);
- Коллоидные гидросмеси (частицы твердой фазы с диаметром до 1 мкм);
- Структурные гидросмеси (частицы твердой фазы диаметром 1-50 мкм);
- Тонкодисперсные гидросмеси (частицы твердой фазы диаметром 50-150 мкм);
- Грубодисперсные (мелкофракционные) гидросмеси (частицы твердой фазы диаметром от 100-150 мкм до 1,5-3 мм);
- Неоднородные грубодисперсные гидросмеси (частицы твердой фазы диаметром свыше 1,5-2 мм).

Твердость транспортируемого материала влияет на интенсивность изнашивания рабочих поверхностей насосов и оборудования [7].

### 2.1.1. Кинематические характеристики взвесенесущих потоков

Частицы твердого материала, которые вносятся в формируемый поток гидросмеси, движутся по траекториям, определяемым сложным характером сил взаимодействия жидкости, твердой частицы и стенок трубопровода, ограничивающих поток. Некоторые частицы движутся вблизи нижней стенки трубопровода и можно наблюдать, что при определенных условиях концентрация твердых частиц изменяется по глубине потока, увеличиваясь в направлении дна. Характер изменения концентрации частиц в поперечном сечении трубопровода зависит от гидравлической крупности частиц и степени турбулентности потока гидросмеси [7, 111, 116].

На рисунке 2.1 показана схема сил, действующих на частицу твердого материала в потоке жидкости. Условием взвешивания и движения частицы материала в жидкости является равенство всех возникающих при этом сопротивлений ( $F_{Ar}$ ,  $F_w$ ,  $F_M$ ,  $F_1$ ) силе веса частицы  $G_s$ . Прежде всего на частицу действует архимедова сила  $F_{Ar}$ , вблизи стенки трубы возникает сила  $F_w$ , вызванная асимметричным обтеканием твердой частицы жидкостью в результате изменения скорости в направлении стенки трубы. При обтекании вращающихся частиц возникает циркуляция жидкости. С циркуляцией связано возникновение силы  $F_M$ . Эта сила направлена всегда от стенки трубы, относительно которой вращение частицы и ее движение имеют противоположные направления, к стенке, относительно которой вращение частицы и ее движение совпадают по направлению. Возникновение силы  $F_M$  связано с эффектом Магнуса. Значение силы  $F_M$  возрастает с увеличением средней скорости потока. Для условий гидравлического транспорта величина силы  $F_M$  относительно мала по сравнению с пневмотранспортом, где она может быть в 5-15 раз больше силы веса твердой частицы.

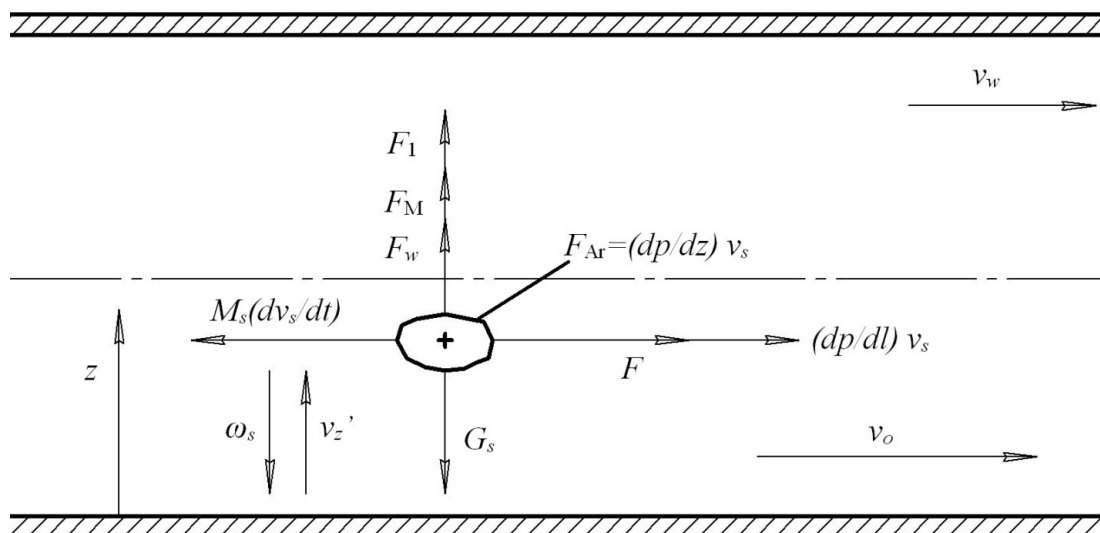


Рисунок 2.1 – Схема сил, действующих на частицу твердого материала в потоке:

$G_s$  – сила веса частицы;  $F$  – сила, действующая на твердую частицу, при течении жидкости;  $F_1$  – вертикальная составляющая силы  $F$ , возникающая при развитом турбулентном потоке вблизи дна;  $F_{Ar}$  – архимедова сила;  $F_w$  – сила, вызванная асимметричным обтеканием твердой частицы жидкостью в результате изменения скорости в направлении стенки трубы;  $F_M$  – сила Магнуса;  $v_w$  – скорость жидкой фазы;  $v_0$  – скорость осаждения частицы;  $v_s$  – скорость твердой фазы;  $v_z$  – поперечная скорость;  $M_s$  – сила трения;  $\omega_s$  – гидравлическая крупность (скорость свободного осаждения твердых частиц в спокойной воде).

Транспортируемые потоком твердые частицы в своем относительном движении прилагают к потоку несущей их жидкости мгновенные силы, которые являются добавочными по отношению к силам внутреннего трения самой жидкости, текущей с той же скоростью. Эти силы создают дополнительное гидроаэромеханическое сопротивление движению несущей жидкости. Воздействие твердых частиц на поток несущей жидкости различно в зависимости от их крупности, формы и концентрации. Мелкие частицы образуют однородные гидросмеси повышенной плотности. Эти частицы увеличивают внутреннее (турбулентное) трение. Величина воздействия мелких частиц определяется объемной концентрацией их в потоке. Более

крупные частицы образуют неоднородные гидросмеси, имеющие ядро потока с максимальной концентрацией твердых частиц. При приближении скорости движения гидросмеси к критической, образуется подвижный слой придонной части с повышенной концентрацией твердых частиц. Этот слой воздействует на поток несущей среды аналогично стенкам с высокой шероховатостью. Толщина, плотность и скорость движения подвижного слоя зависят от средней скорости потока, плотности и размера твердых частиц. При увеличении средней скорости потока гидросмеси уровень взвешивания твердых частиц возрастает, а толщина подвижного слоя на дне уменьшается, что приводит к снижению гидродинамического воздействия твердых частиц на поток гидросмеси. При увеличении скорости движения частиц и уменьшении содержания тонкодисперсных частиц повышенной плотности в транспортируемом материале начинает проявляться сопротивление взвешиванию твердых частиц в потоке.

Физическая модель потока тонкодисперсных и мелкофракционных гидросмесей описывается зависимостью (2.1) [7]:

$$i_r = \lambda_r \frac{\rho_H v^2}{2gD}, \quad (2.1)$$

где  $i_r$  – удельные гидравлические сопротивления движению гидросмеси, Па;

$\lambda_r$  – коэффициент удельных гидравлических сопротивлений;

$\rho_H$  – плотность несущей среды, т/м<sup>3</sup>;

$D$  – диаметр трубопровода, м;

$v$  – скорость движения гидросмеси, м/с.

Для разнофракционных гидросмесей значение удельных гидравлических сопротивлений рассчитывается по формуле (2.2) [7]:

$$i_r = i_{Г.К} + \Delta i, \quad (2.2)$$

где  $i_{Г.К}$  – удельные сопротивления от гидравлической крупности твердого, Па;

$\Delta i$  – сопротивление взвеси твердого в потоке, Па.

В работе В.Н. Покровской [70] говорится, что дискретные твердые тела с плотностью выше, чем у транспортирующей жидкости, могут

перемещаться в ней прямолинейно и равномерно при условии, что со стороны потока жидкости к этим телам будут приложены нейтрализующие их силы и силы трения о стенки трубопровода. Силы, приложенные к потоку жидкости со стороны транспортируемых твердых частиц, являются добавочными по отношению к силам внутреннего трения в потоке чистой жидкости. Эти силы создают добавочные гидравлические сопротивления движению потока [70].

В турбулентном потоке причиной взвешивания и транспортирования твердых частиц является перемешивание жидкости, создающее подъемную и лобовую силы при обтекании их, которые обуславливаются взаимодействием комплекса факторов (плотность и вязкость жидкости, шероховатость трубопровода, диаметр трубопровода, формой частиц и др.). Находясь на дне потока, частица поднимается в результате действия на неё подъемной силы или перемещается вдоль трубопровода перекачиванием (или волочением) из-за действия лобовой силы. После попадания в зону турбулентного перемешивания твердая частица перемещается вверх только под действием вертикальной составляющей скорости потока, если эта составляющая больше гидравлической крупности. В каждый данный момент времени вертикальная составляющая скорости потока имеет различное значение, поэтому частица, находясь в непрерывном движении, будет подниматься или опускаться. Наряду с этим она вместе с жидкостью будет передвигаться в направлении потока со скоростью, близкой к ее среднему значению [70].

В результате взаимодействия потока жидкости со стенками трубопровода возникают и поддерживаются крупномасштабные возмущения, ограниченные этими стенками. Вихри, вызванные этим возмущением, распадаясь на меньшие по масштабу, образуют вместе с непрерывным вихреобразованием у стенок спектр пульсаций локальных скоростей различной частоты. Существование крупномасштабных образований с размерами, близкими к глубине потока, подтверждаются постоянством и величиной числа Струхала для низкочастотных пульсаций скорости и

визуальными наблюдениями. Наблюдая за движением потока воды в открытых руслах, можно заметить регулярно чередующиеся зоны, вызванные восходящими потоками в виде растекающихся водных бугров, и смежные зоны нисходящих потоков с водными ложбинами, а иногда и с водоворотами. Взвешивание твердых частиц плотностью больше плотности жидкости вызывается главным образом наличием в нем крупномасштабных пульсаций. Устойчивое содержание взвеси в потоке является следствием динамического равновесия, установившегося в результате непрерывного подъема со дна или придонной области частиц, увлекаемых восходящими потоками, и опускания на дно или в придонную область других частиц. Следовательно, в потоке жидкости существует система восходящих и нисходящих токов, охватывающих в основном всю его глубину. В нисходящей зоне давление будет выше среднего в связи с уменьшением скорости и восстановления потенциальной энергии. С удалением от дна и стенок русла давление понижается, поэтому в этих зонах существует относительный дефицит давления. Содержание твердых частиц в восходящей зоне вызывает соответствующее увеличение средней плотности потока. Дефицит давления в восходящих зонах потока уравнивается увеличением концентрации и плотности потока в этих зонах [70].

Присутствие твердых частиц в потоке жидкости значительно изменяет распределение средних продольных скоростей. В случае движения однородной жидкости в круглой горизонтальной трубе с постоянной шероховатостью, эпюры распределения средних продольных скоростей симметричны для всех диаметров. Однако, наличие твердых частиц в потоке нарушает симметрию эпюр относительно оси потока (в вертикальной плоскости). Степень асимметрии определяется тем, что пик максимальной скорости не совпадает с осью трубы и смещается вверх. Градиенты скоростей в верхней части потока оказываются меньше, чем в нижней. Таким образом, эпюра скоростей при движении гидросмеси вытянута в направлении движения потока и смещена вверх относительно оси.

В исследовании [111] установлено, что в потоке гидросмеси в зависимости от режима транспортирования имеют место два вида распределения концентрации твердой фазы по сечению потока. Первый вид распределения наблюдается при транспортировании тонкодисперсных гидросмесей с критической скоростью. Он представлен концентрическими слоями, расположенными вокруг ядра, совпадающего с геометрической осью потока и имеющего максимальную плотность гидросмеси. При этом локальные значения концентрации твердой фазы послойно снижаются и достигают близких к нулю значений в пристенной зоне потока. Расположение слоев совпадает с линиями изотак, построенными для данных условий движения потока. Снижение средней скорости потока вызывает смещение динамической оси ядра концентрации потока. Нижняя граница смещения ядра соответствует  $1/3$  диаметра трубопровода. Второй вид распределения имеет место при частичном заилении трубопровода, т.е. при скорости движения гидросмеси менее критической. В этом случае максимальная концентрация гидросмеси соответствует нижнему слою потока.

Как показали исследования, концентрация твердой фазы по глубине потока распределяется неравномерно даже при значительной скорости движения гидросмеси (более 6 м/с), малой концентрации и небольшой плотности твердых частиц.

На основе анализа экспериментальных данных в работе [75, 80, 91] определено, что твердые частицы по крупности распределяются по глубине потока аналогично концентрации. Более крупные частицы перемещаются в придонной зоне потока, а более мелкие — у верхней стенки трубопровода. Наибольшая неравномерность наблюдается при скорости потока гидросмеси, близкой к критической. С увеличением скорости потока гидросмеси более крупные частицы из нижних слоев перемещаются в верхние, в результате чего происходит перераспределение частиц по глубине потока и распределение крупности частиц становится более равномерным.



Асимметрия распределения продольных скоростей движения гидросмеси по глубине вызывается наличием в потоке твердых частиц, плотность которых отлична от плотности жидкости. Чем больше концентрация твердых частиц, их плотность и крупность, тем большая асимметрия скоростного поля. Аналогичное распределение продольных скоростей по глубине потока наблюдалось при движении однородной жидкости между двумя стенками с резко различной шероховатостью. Это обстоятельство позволило предположить, что влияние твердых частиц на характер распределения продольных скоростей по глубине потока гидросмеси аналогично влиянию различной величины шероховатости противоположных стенок трубопровода для потока однородной жидкости.

В процессе гидроабразивного изнашивания участвуют три тела [20]:

- основное тело, износостойкость которого рассматривается;
- изнашивающий материал – абразив;
- промежуточное тело – среда.

Молекулярно-кинетическая теория трения позволяет объяснить изнашивание трубопроводов как результат механического воздействия на их поверхность потока гидросмеси.

Природа разрушений может быть объяснена тем, что изнашиваемая поверхность материала подвергается одновременной «бомбардировке» абразивными частицами и гидравлическим ударам воды [20].

Поскольку область воздействия при этом очень мала, то зона максимальных напряжений имеет величину порядка одного или нескольких десятков микрон и соизмерима с размерами отдельных структурных составляющих материала, следовательно, сопротивляемость материала гидроабразивному износу (износостойкость) определяется, главным образом, структурой и свойствами её составляющих. При наличии в сплаве слабой структурной составляющей его износостойкость резко снижается.

Величина максимальных напряжений весьма значительна и для большинства материалов превышает предел текучести.

Повторные действия напряжений приводят к циклической пластической деформации. И.В. Крагельский [7] высказывает, а затем предлагает количественную теорию изнашивания твердых тел, исходя из усталостной природы этого явления. При этом он указывает, что при пластическом оттеснении материала возможно отделение частиц металла вследствие малоциклового усталости.

Для пластических материалов разрушение происходит при наличии больших тангенциальных усилий, обеспечивающих отделение пластически деформируемых микронеровностей поверхности.

При ударе под прямым углом износ будет менее значителен, так как при этом большая часть энергии частицы расходуется на пластическую деформацию поверхности без отделения микрочастиц от последней.

Для твердых и хрупких металлов максимум износа наступит при падении частиц под прямым углом.

Практически твердые материалы пластически не деформируются, и для отделения микрочастиц с их поверхности необходим наибольший ударный импульс. Подтверждением этого являются опыты В.Н. Кашеева [7] по исследованию на изнашивание сплавов из меди и алюминия свободно летящими абразивными частицами электрокорунда в зависимости от угла удара. Эти сплавы обладают резко меняющимися механическими свойствами: от сплавов типично пластичных и мягких до сплавов типично хрупких и чрезвычайно твёрдых.

Опыты показали, что для мягких пластичных сплавов максимальное изнашивание имеет место при малых углах атаки, а для более твёрдых и более хрупких сплавов – наибольшее изнашивание при ударе под прямым углом.

### **2.1.2. Межфазовое динамическое равновесие потока гидросмеси**

Уравнение динамического равновесия (2.3) между внешними силами, действующими на объем смеси, и силами сопротивления движению в

системе координат  $x$ – $y$  (где  $x$  представляет направление движения, а  $y$  – вертикальная координата потока), выглядит следующим образом [7]:

$$p = p_{\text{турб}} + p_{\text{min}} + p_{\text{max}}, \quad (2.3)$$

где  $p$  – внешняя движущая сила, Н;

$p_{\text{турб}}$  – сила сопротивления, обусловленная турбулентным перемешиванием, Н;

$p_{\text{min}}$  – сила сопротивления, обусловленная содержанием мелких частиц в потоке гидросмеси, Н;

$p_{\text{max}}$  – сила сопротивления, обусловленная обтеканием жидкостью крупных частиц, Н.

Внешняя движущая сила  $p$  определяется по формуле (2.4) [7]:

$$p = \pi r^2 L \frac{dp}{dx}, \quad (2.4)$$

где  $\frac{dp}{dx}$  – градиент давления в направлении движения, Па/м;

$r$  – радиус трубы, м;

$L$  – длина трубы, м.

Сила сопротивления  $p_{\text{турб}}$ , обусловленная турбулентным перемешиванием определяется по формуле (2.5) [7]:

$$p_{\text{турб}} = 2\pi r L \tau_{\text{турб}}, \quad (2.5)$$

где  $r$  – радиус трубы, м;

$L$  – длина трубы, м;

$\tau_{\text{турб}}$  – касательное напряжение на стенке трубы, вызванное турбулентным перемешиванием потока гидросмеси, Па.

Сила сопротивления  $p_{\text{min}}$ , обусловленная содержанием мелких частиц в потоке гидросмеси определяется по формуле (2.6) [7]:

$$p_{\text{min}} = 2\pi r L \tau_{\text{min}}, \quad (2.6)$$

где  $r$  – радиус трубы, м;

$L$  – длина трубы, м;

$\tau_{min}$  – касательное напряжение на стенке трубы, вызванное присутствием мелких частиц в потоке гидросмеси, Па.

Сила сопротивления  $p_{max}$ , вызванная обтеканием жидкостью крупных частиц определяется согласно выражению (2.7) [7]:

$$p_{max} = gL \int_0^D c_{об} (\rho_{мс} - \rho_0) \frac{d'_0}{d_{круп}} D \left[ 1 - \left( 1 - \frac{y}{r} \right)^2 \right]^{0.5} dy, \quad (2.7)$$

где  $D$  – диаметр трубы, м;

$L$  – длина трубы, м;  $g$  – ускорение свободного падения м/с<sup>2</sup>;

$r$  – радиус трубы, м;  $\rho_{тв}$  – плотность гидросмеси, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_0$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$d_0$  – средний диаметр мелких частиц, м;

$d_{круп}$  – средний диаметр крупных частиц, м;

$c_{об}$  – объемная концентрация твердых частиц в гидросмеси, %.

Силы сопротивления для гидросмесей с высокой концентрацией разных фракций будут увеличены из-за трения между насыщенным слоем гидросмеси и окружающими его слоями течения. Другими словами, силы сопротивления возрастут на величину, обусловленную трением между насыщенным слоем гидросмеси и смежными слоями течения, тогда уравнение динамического равновесия имеет вид (2.8) [7]:

$$P = P_{турб} + P_{min} + P_{max} + P_{прд}, \quad (2.8)$$

где  $P_{прд}$  – сила сопротивления движению придонного слоя, Н.

Сила сопротивления движению придонного слоя  $P_{прд}$  определяется по формуле (2.9) [7]:

$$P_{прд} = 0,9 g f c_{прд} (\rho_{мс} - \rho_0) \cdot \left( \frac{S_{прд}}{S} \right) \cdot L \pi r^2 \quad (2.9)$$

где  $S_{прд}$  – площадь поперечного сечения придонного слоя материала, м<sup>2</sup>;

$S$  – площадь поперечного сечения потока гидросмеси, м<sup>2</sup>;

$c_{прд}$  – объемная концентрация твердых частиц в придонном слое потока, %;

$f$  – коэффициент трения твердых частиц о стенки трубы.

### 2.1.3. Критическая скорость потока гидросмеси

В работах [7, 28] установлено, что критические скорости при движении гидросмесей определяют энергетически выгодный режим транспортирования, обусловленный полным взвешиванием в потоке несущей жидкости частиц транспортируемого материала. На критическую скорость движения гидросмеси оказывают влияние различные факторы. Основными из них являются гидравлические сопротивления, крупность транспортируемых фракций, диаметр трубопровода, концентрация и средняя скорость движения гидросмеси. Большое влияние на критическую скорость движения гидросмеси оказывает крупность частицу в определенных пределах. Вне этих пределов критическая скорость движения гидросмеси не зависит от крупности частиц. Крупность частиц, при которых возникает эффект стабилизации критической скорости движения гидросмеси, находится в пределах 2-10 мм.

Значительное влияние на критическую скорость оказывает диаметр трубопровода. С уменьшением диаметра трубопровода стабилизация критической скорости гидросмеси наступает при меньшей однородности (рисунок 2.2).

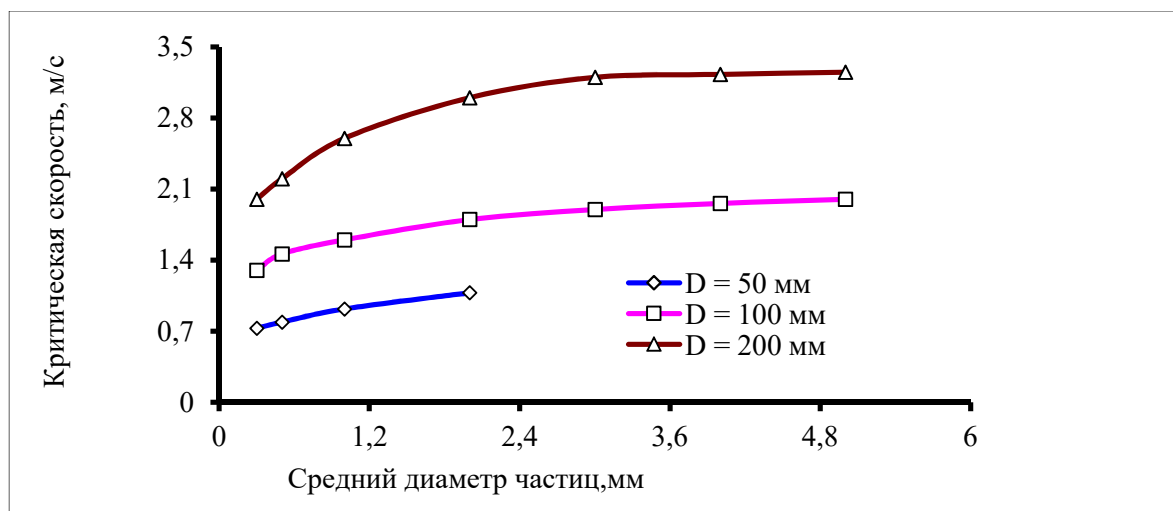


Рисунок 2.2 – График зависимости критической скорости гидросмеси от среднего диаметра твердых частиц

Большое влияние на критическую скорость движения гидросмеси оказывает также концентрация твердого. При этом имеет место критическое значение объемной концентрации, которое находится в пределах 12-15% твердого. С увеличением концентрации гидросмеси критическая скорость ее движения возрастает пропорционально увеличению концентрации. Затем критическая скорость движения уменьшается для гидросмесей, не имеющих в своем составе тонкодисперсных частиц или имеющих их в незначительном количестве, она остается постоянной до предельного увеличения концентрации гидросмеси. Для гидросмесей с большим содержанием тонкодисперсных частиц (при концентрации 20-25% твердого) значение критической скорости достигает некоторого минимального значения и становится постоянным (рисунок 2.3). Это объясняется насыщением несущей жидкости мельчайшими частицами материала и повышением ее плотности, в результате чего несущая жидкость приобретает свойства тяжелой жидкости. Более крупные частицы в потоке находятся во взвешенном состоянии. Поток становится динамически и статически устойчивым. Стабилизация критической скорости движения гидросмеси с увеличением концентрации твердой фазы обеспечивает устойчивость и надежность режима транспортирования.

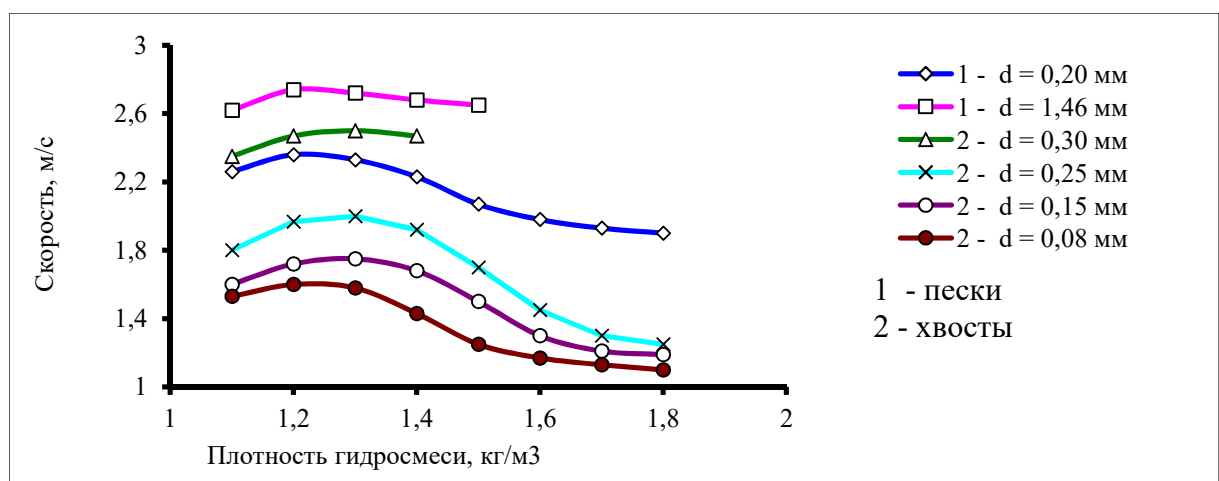


Рисунок 2.3 – График зависимости критической скорости тонкодисперсной гидросмеси от объемной концентрации твердого

Для определения критической скорости движения гидросмеси рекомендована формула (2.10), установленная в ЛГИ им. Г.В. Плеханова [7, 70]:

$$v_{кр} = \sqrt{2gD \frac{\lambda_B + \lambda_T}{\lambda_B} \cdot \frac{\rho_B + \rho_T}{\rho_B}}, \quad (2.10)$$

где  $\lambda_B$  – коэффициент гидравлических сопротивлений движению воды;

$\lambda_T$  – коэффициент гидравлических сопротивлений движению твердой фазы;

$\rho_T$  – плотность твердого, т/м<sup>3</sup>;

$\rho_B$  – плотность твердого, т/м<sup>3</sup>.

Рабочая скорость гидросмеси принимается на 15-25% выше критической скорости.

#### 2.1.4. Вязкость гидросмесей

Гидросмеси, содержащие 6-12 % (по объему) твердых частиц крупностью 1-20 мкм, называются структурными гидросмесями. В таких гидросмесях твердые частицы взаимодействуют между собой и с несущей жидкостью. В основе механизма их взаимодействия лежат физико-химические явления на поверхности раздела фаз. Поэтому поток структурной гидросмеси характеризуется иным законом внутреннего трения, чем поток ньютоновской жидкости. При небольших напряжениях сдвига гидросмеси перестают течь и испытывают только упругие деформации. Основное их свойство – сохранение в статическом состоянии касательных напряжений. Важнейшее отличие структурных гидросмесей от ньютоновских жидкостей заключается в способности их образовывать сплошную пространственную структуру. Условия течения структурных гидросмесей оцениваются структурной вязкостью и предельными напряжениями сдвига  $\tau$ . В отличие от ньютоновских жидкостей структурные гидросмеси находятся в покое до тех пор, пока динамические напряжения сдвига не достигнут максимальной величины  $\tau_{max}$ . При этом возникает упругая деформация, т. е. от  $\tau$  до  $\tau_{max}$  гидросмесь ведет себя как твердое тело [7].

Реологические характеристики структурных гидросмесей, образуемых измельчением материалов, устанавливаются экспериментально. На базе многочисленных исследований [116, 119, 121, 137], выполненных применительно к разнообразным условиям, в первом приближении установлен механизм появления аномальных свойств структурных гидросмесей. Реологические параметры их определяются концентрацией твердых частиц. При уменьшении крупности твердых частиц резко возрастает величина напряжений сдвига. Вязкопластичные свойства проявляются особенно существенно при концентрации гидросмеси 0,25-0,30 и содержании минимальной крупности более 35%.

Большое влияние на реологические характеристики оказывает температура гидросмесей (особенно в диапазоне свыше 40°C).

Меловые гидросмеси проявляют свойства тикстропии (загустевания). Чем дольше гидросмесь находится в неподвижном состоянии, тем интенсивнее в ней протекает этот процесс. Данное явление при высоких концентрациях может затруднить запуск насоса. Добавление глинистых присадок устраняет действие тикстропии [89]. При плотности гидросмеси 1400 кг/м<sup>3</sup> она удерживает во взвешенном состоянии куски мела крупностью до 75 мм.

Схватывающиеся гидросмеси (цементные или бетонные) имеют наиболее благоприятные реологические характеристики сразу после приготовления [89, 128, 133]. Практика показывает, что промежутки времени между приготовлением и перекачиванием смеси на бетонном заводе не должны быть более 1 ч.

При напряжениях сдвига, значительно превышающих предельные, структурные гидросмеси ведут себя как ньютоновские жидкости. На реологических кривых эта область соответствует прямолинейной части графиков. Следует отметить, что при  $C > C_{кр}$  для многих гидросмесей в пределах практических значений скоростей не удается получить полного разрушения структур в потоке. Поэтому наблюдаются существенные



различия параметров течения при турбулентном режиме для гидросмеси однородной жидкости.

Примером приобретения гидросмесью реологических свойств с увеличением концентрации может служить технологическое сырье, которое может транспортироваться по трубопроводам в двух различных качественных состояниях, определяемых концентрацией твердой фазы. В этой связи вводится понятие критическая концентрация  $C_{кр}$ . При концентрации гидросмеси менее критической ее течение соответствует закономерностям, присущим вязкой (ньютоновской) жидкости. При концентрации же гидросмеси выше критической она приобретает свойства, присущие вязкопластичным (неньютоновским) жидкостям [7].

Закладочные гидросмеси на основе хвостов обогащения железной руды при концентрации критической обладают свойствами неньютоновских жидкостей, у которых при возрастании скорости сдвига увеличивается эффективная вязкость. Для описания кривой течения таких жидкостей используют модель (2.11) Оствальда-де Вааля (Ostwald-de Waele), основной реологической характеристикой которого является скорость сдвига:

$$\tau = K \left( \frac{dv}{dy} \right)^n, \quad (2.11)$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига, Па;

$K$  – показатель консистенции;

$n$  – показатель течения, причем  $n > 1$ .

Основным параметром в уравнении Оствальда-де Вааля (Ostwald-de Waele) является вязкость гидросмеси, которая представляет собой функцию концентрации твердых частиц.

## **2.2. Потери напора при гидротранспорте закладочной смеси**

Известно, что при перемещении жидкости в трубопроводе коэффициент гидравлических сопротивлений представляет из себя сложную функцию (2.12) значения числа Рейнольдса, которая характеризует режим течения

жидкости, и коэффициента относительной шероховатости внутренней поверхности трубы [141, 144], т.е.:

$$\lambda = f(\varepsilon, Re), \quad (2.12)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент относительной шероховатости;

$Re$  – число Рейнольдса.

Для определения значения числа Рейнольдса в гидротранспортной системе действующего закладочного комплекса используют формулу (2.13):

$$Re = \frac{2vR\rho}{\eta}, \quad (2.13)$$

где  $v$  – средняя скорость гидросмеси в трубопроводе, м/с;

$R$  – гидравлический радиус потока;

$\rho$  – плотность закладочной гидросмеси, кг/м<sup>3</sup>;

$\eta$  – динамический коэффициент вязкости закладочной гидросмеси, Па·с.

В случае, когда определенное число Рейнольдса отражает, что режим течения гидросмеси является развитым турбулентным, то коэффициент гидравлических сопротивлений  $\lambda$  определяется только коэффициентом относительной шероховатости  $\varepsilon$  по формуле Шифринсона (2.14) и не зависит от величины числа Рейнольдса:

$$\lambda = 0,11\varepsilon^{0,25} \quad (2.14)$$

Если при расчете числа Рейнольдса получится, что режим течения гидросмеси является ламинарным, то коэффициент гидравлических сопротивлений  $\lambda$  не зависит от шероховатости внутренней поверхности трубопровода и определяется по формуле Стокса (2.15):

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (2.15)$$

В случае, если  $2300 < Re \leq 10000$ , то коэффициент гидравлических сопротивлений  $\lambda$  также зависит только значения числа Рейнольдса и определяется по формуле Блазиуса (2.16), т.к. высота неровностей покрыта пленкой жидкости и шероховатость внутренней поверхности трубопровода не влияет на потери напора:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} \quad (2.16)$$

Анализ работы закладочных комплексов показал, что, как правило, течение гидросмеси в трубопроводах их гидротранспортных систем происходит в турбулентном режиме. В таком случае на величину гидравлических сопротивлений определяющее значение оказывает величина шероховатости внутренней поверхности трубопроводов [7].

Полученные экспериментальные значения потерь напора гидросмеси описываются известной формулой для определения гидравлического уклона Дарси-Вейсбаха (2.17) [6-8, 108]:

$$I_{см} = \lambda \frac{v^2}{2gD} \cdot \frac{\rho_{см}}{\rho_0}, \quad (2.17)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлических сопротивлений;

$v$  – средняя скорость потока пульпы в трубопроводе, м/с;

$D$  – диаметр трубопровода, м;

$\rho_{см}$  – плотность пульпы, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_0$  – плотность оборотной воды, кг/м<sup>3</sup>.

### 2.2.1. Оценка шероховатости внутренней поверхности трубопроводов

Внутренняя поверхность трубопровода, независимо от его материала, не бывает абсолютно гладкой и имеет характерную шероховатость. Это обусловлено присутствием микро-впадин, бугорков и других дефектов поверхности, образующихся при изготовлении, а также при физическом, химическом, термическом или ином воздействии на материал внутренней поверхности трубопровода. Шероховатость может образовываться неравномерно, большими участками, либо иметь равномерное распределение по всей длине или большей части трубопровода.

Шероховатость поверхности – это совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенная, например, с помощью базовой длины (ГОСТ 25142-82) [41].

Оценка шероховатости поверхности производится профильным методом специальными приборами – контактными профилометрами (профилографами) и регламентируются ГОСТом 19300-86. Измерение параметров и профиля шероховатости происходит по системе средней линии при температуре окружающей среды в диапазоне 10-35°C и относительной влажности 45-80% [39].

В зависимости от назначения профилометры делятся на 3 типа (рисунок 2.4):

1. лабораторные (стационарные);
2. цеховые для контроля окончательно обработанных поверхностей (стационарно-переносные);
3. цеховые для межоперационного контроля (портативные).



Рисунок 2.4 – Типы профилометров: а – стационарный профилометр Mitutoyo SurfTest SV-2100; б– стационарно-переносной профилометр Mitutoyo SurfTest SJ-410; в – портативный профилометр Mitutoyo SurfTest SJ-210

Номинальная амплитудно-частотная характеристика профилометра определяется уравнением (2.18):

$$K_{ном} = \frac{1}{1 + 0,333 \left( \frac{\lambda}{\lambda_B} \right)^2}, \quad (2.18)$$

где  $\lambda$  – длина волны синусоидального входного сигнала, м;

$\lambda_B$  – отсечка шага, м.

Контактный профилометр состоит из нескольких основных компонентов. Одним из них является генератор сигналов, который оснащен индуктивным датчиком-щупом с алмазной иглой. Также в профилометре присутствуют блок обработки сигналов от генератора и блок вывода измеренных значений. Игла профилометра перемещается вдоль исследуемой поверхности, при этом она расположена перпендикулярно плоскости поверхности. Во время перемещения щупа, игла начинает колебаться из-за шероховатости поверхности. Эти механические колебания преобразуются в цифровой сигнал, который затем обрабатывается блоком обработки сигналов. Обработка нескольких сигналов позволяет вычислить среднее значение параметра, что представляет собой количественную характеристику неровности участка поверхности на определенной длине.

### 2.2.2. Определение коэффициентов шероховатости труб с покрытием

Коэффициент относительной шероховатости внутренней стенки трубы является расчетной величиной, характеризующей коэффициент гидравлических сопротивлений, и определяется по формуле (2.19) [7, 102, 107, 108]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{D}, \quad (2.19)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент относительной шероховатости;

$\Delta$  – абсолютная шероховатость внутренней поверхности трубопровода, мм;

$D$  – внутренний диаметр трубопровода, мм.

Как видно из выражения (2.19), значение коэффициента относительной шероховатости зависит от диаметра трубопровода.

Значения абсолютной шероховатости внутренних поверхностей стальных и футерованных полиуретаном труб, измеренные профилометром, позволяют определить величины коэффициентов относительной шероховатости для трубопроводов систем гидротранспорта закладочных комплексов [6-9].

В области развитого турбулентного движения коэффициент гидравлических сопротивлений  $\lambda$  является функцией только относительной шероховатости внутренней поверхности трубопровода (2.20):

$$\lambda = f\left(\frac{\Delta}{D}\right), \quad (2.20)$$

и увеличивается с возрастанием  $\frac{\Delta}{D}$ . Потери напора на трение в этой области течения не зависят от вязкости гидросмеси и пропорциональны квадрату средней скорости потока, т.е.  $h_{тр} \cong v^2$  – (квадратичный закон сопротивления).

Методика, используемая в гидравлике для определения абсолютной шероховатости  $\Delta$ , учитывает факт, что естественная шероховатость (геометрическая  $Ra=\Delta$ ) всегда представляет собой неоднородную структуру. Выступы и впадины шероховатости имеют различные формы, расположение и размеры. Микрорельеф поверхности внутренних стенок труб зависит от нескольких факторов, таких как материал трубы, метод ее изготовления, физико-химические свойства перекачиваемой жидкости и продолжительность эксплуатации.

Из-за многообразия неправильных форм проявления естественной шероховатости (рисунок 2.5а), невозможно установить осредненное значение высоты бугорков, которое бы отражало влияние шероховатости на потерю напора, с помощью геометрического метода. Поэтому параметр шероховатости рассматривается как условная величина, которая определяется с использованием специальной шкалы искусственной однородной шероховатости (рисунок 2.5б).

Для создания данной шкалы использовались зерна песка определенного размера, которые были приклеены на гладкую поверхность трубы. Набор таких труб с различными диаметрами зерен  $\Delta$  предоставляет ряд значений относительной шероховатости  $\frac{\Delta}{D}$ . Значения относительной шероховатости  $\lambda$  получены с использованием функции, разработанной И. Никурадзе (2.21):

$$\lambda = \frac{1}{\left(21\lg\frac{\Delta}{D} + 1,14\right)^2}, \quad (2.21)$$

Эта шкала используется для определения абсолютной шероховатости путем сопоставления ее с размером зерен песка искусственной шероховатости, который обладает таким же гидравлическим сопротивлением в квадратичной зоне, как и неоднородная поверхность.

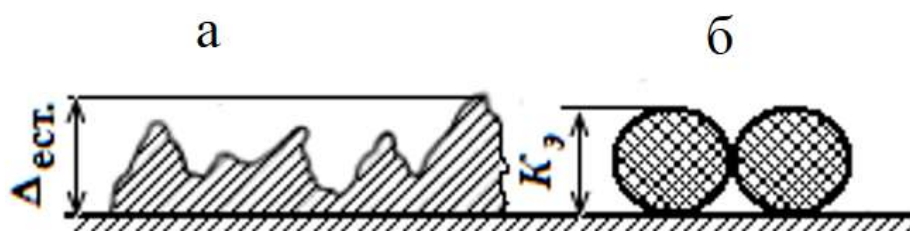


Рисунок 2.5 – а – естественная шероховатость; б – эквивалентная шероховатость

Путем проведения исследований на 13 образцах труб из полиэтилена низкого и высокого давления диаметрами от 25 до 400 мм, а также анализа результатов исследований, выполненных Г.А. Трухиным на двух железобетонных коллекторах диаметрами 1,6 и 1,94 м, и ВНИИ ВОДГЕО на восьми водоводах из различных материалов диаметрами от 0,7 до 1,2 м, была установлена математическая зависимость (2.22), позволяющая определить связь между эквивалентной и естественной шероховатостью [46, 71-73, 76, 95, 96]:

$$K_{Э} = 2 \cdot Ra^{1,33}, \quad (2.22)$$

где  $K_{Э}$  – значение эквивалентной шероховатости, мкм;

$Ra$  – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм.

В соответствии с ГОСТ 8.586 1-2005 (ISO 5167-2003), эквивалентная шероховатость стальных трубопроводов определяется согласно выражению (2.23) [43]:

$$K_{Э} = \pi Ra, \quad (2.23)$$

где  $K_{Э}$  – значение эквивалентной шероховатости, мкм;

$Ra$  – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм.

### 2.3. Местные сопротивления

Известно, что удельные потери напора (2.24) эквивалентны энергии потока, расходуемой на преодоление сил сопротивлений трения жидкости о внутренние поверхности трубопровода и потери на местных сопротивлениях [7], т.е.:

$$h_{\text{ном}} = h_{\text{тр}} + h_{\text{местн}} , \quad (2.24)$$

где  $h_{\text{ном}}$  – общие потери в трубопроводе, м;

$h_{\text{тр}}$  – потери на трение, м;

$h_{\text{местн}}$  – потери на местных сопротивлениях (задвижки, повороты, узлы переключений и т.п.), м.

Потери на преодоление местных сопротивлений зависят от величины коэффициента местных сопротивлений  $\xi$ , т.е.:

$$\Delta h_{\text{местн}} = \xi \frac{v^2}{2g} , \quad (2.25)$$

где  $v$  – средняя скорость потока жидкости, м/с;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Традиционно, величина потерь на местных сопротивлениях остается постоянной и учитывается в формуле потерь напора некоторым коэффициентом.

### 2.4. Выводы по главе 2

1. По результатам проведенных теоретических исследований анализа технологии закладки выработанного пространства, особенности которой заключаются в создании массива с требуемыми прочностными характеристиками, установлено, что закладочные гидросмеси на основе хвостов обогащения железной руды при концентрации критической обладают свойствами неньютоновских жидкостей, у которых при возрастании скорости сдвига увеличивается эффективная вязкость. Для описания течения таких жидкостей используют модель степенного закона



Оствальда-де-Вааля (Ostwald-de Waele), основным параметром в которой выступает вязкость гидросмеси, которая представляет собой функцию концентрации твердых частиц.

2. Величина удельных потерь напора потока гидросмеси в транспортном трубопроводе закладочного комплекса зависит от совокупности характеристик, определяющих внешнее и внутреннее сопротивление движению потока, а именно изменение шероховатости поверхности и концентрация закладочной гидросмеси.

3. Анализ функционирования существующих закладочных комплексов в геотехнологии закладки выработанного пространства показал, что транспортирование закладочной смеси в трубопроводе закладочного комплекса осуществляется в области развитого турбулентного движения. При этом коэффициент гидравлических сопротивлений является функцией относительной шероховатости внутренней поверхности трубопровода и увеличивается с возрастанием соотношения естественной шероховатости и внутреннего диаметра русла.

4. На основе анализа результатов исследований установлена математическая зависимость эквивалентной шероховатости полиуретановой поверхности от естественной шероховатости:  $K_{\Sigma} = 2Ra^{1,33}$ .

## **ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ИЗМЕНЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ**

Стальные трубопроводы, наиболее часто применяемых при проведении закладочных работ, имеют высокую начальную шероховатость. В процессе эксплуатации шероховатость возрастает вследствие интенсивного гидроабразивного износа внутренней поверхности трубопровода и приводит к снижению напорных характеристик закладочного комплекса. Одним из путей повышения эксплуатационных характеристик трубопроводов закладочных комплексов является использование полимерных материалов в качестве внутреннего покрытия стенок труб [10, 81, 82, 124, 125].

На сегодняшний день представлен ряд стандартов для определения стойкости полимерных материалов к абразивному износу [52, 107]:

1) ГОСТ 11012. Испытания на барабанной машине с условием контакта образцом по абразиву. В качестве образца используется прямоугольная призма 10x10 мм и высотой 10-20 мм или цилиндр диаметром 10 мм и высотой 10-20 мм. В качестве абразива используется шкурка (Н12) по ГОСТ 13364. Размер дорожки трения составляет 10 мм X 15 м. Возможно испытание практически всех видов пластиков [37].

2) ISO 4649. Испытания на барабанной машине с условием контакта образцом по абразиву. В качестве образца используется цилиндр диаметром 16 мм и высотой 6 мм. В качестве абразива используется шкурка (Н12) по ГОСТ 13364. Размер дорожки трения составляет 10 мм X 15 м. Этот стандарт используется, в основном, для определения износостойкости полиуретанов, резин и пластмасс [40].

3) ISO 9352. Стандарт подразумевает испытания по схеме колесной пары с условием контакта абразивом по образцу. В качестве образцов используются диски толщиной 3-6 мм и радиусом 48 мм. В качестве абразива используется шкурка (Н40, Н32, Н12, Н4) по ГОСТ 13364. Размер дорожки

трения составляет 10 мм X 283 м. Возможно испытание практически всех видов пластиков [42].

4) DIN 52108. Испытания при трении по влажному и сухому песку с условием контакта образцом по абразиву. В качестве образцов используются квадратные пластины или кубики с длиной стороны  $71 \pm 1,5$  мм. В качестве абразивов используются влажный и сухой пески. Размер дорожки трения составляет 200 мм X 221 м. Возможно испытание практически всех видов пластиков [117].

5) EN 295-3. Испытания стойкости к гидроабразивному износу трубчатых образцов с условием контакта абразивом по образцу. В качестве образцов используются трубы диаметром 110-630 мм, разрезанные пополам вдоль оси, длиной 1 м. В качестве абразива используется овализованный кварцевый абразив со средним диаметром частиц 6 мм. Стандарт применяется для оценки износостойкости, в основном, керамических и пластмассовых труб [118].

Из перечня вышеописанных методов, прямо оценить стойкость полимерных труб к гидроабразивному изнашиванию позволяет только стандарт EN 295-3. Его принцип применения основан на измерении величины износа трубы гидросмесью, перемещение которой происходит путем изменения наклона на  $\pm 22,5$  градуса с частотой 20 циклов в минуту. Оценка износа трубы проводится по результатам измерения уменьшения толщины стенки. Испытание проводят 100000 циклов, что составляет 100 км пробега потока гидросмеси.

### **3.1. Описание экспериментальной гидротранспортной установки**

Перечисленные выше стандарты позволяют весьма поверхностно оценить стойкость полимерных материалов к гидроабразивному изнашиванию для возможности их использования в качестве трубопроводов и покрытий деталей насосов в системах гидротранспорта закладочных

комплексов, так как условия испытаний существенно отличаются от реальных [107].

На кафедре транспортно-технологических процессов и машин Санкт-Петербургского горного университета предложена методика экспериментальных исследований на гидроабразивный износ внутренних рабочих поверхностей трубопроводов систем гидротранспорта. Программа исследований включает воспроизведение непрерывного процесса транспортирования абразивной гидросмеси с заданными параметрами по замкнутому контуру трубопровода, состоящего из образцовых участков труб с футеровкой, выполненной из материалов с различными физико-механическими свойствами рабочей поверхности. Для проведения экспериментальных исследований был спроектирован, изготовлен и смонтирован гидротранспортный стенд (рисунок 3.1) [107]

В качестве объектов исследования могут быть использованы: элементы участков трубопроводной системы, рабочее колесо центробежного насоса, корпус насоса и другие проточные части гидротранспортного стенда из различных материалов [107, 108].

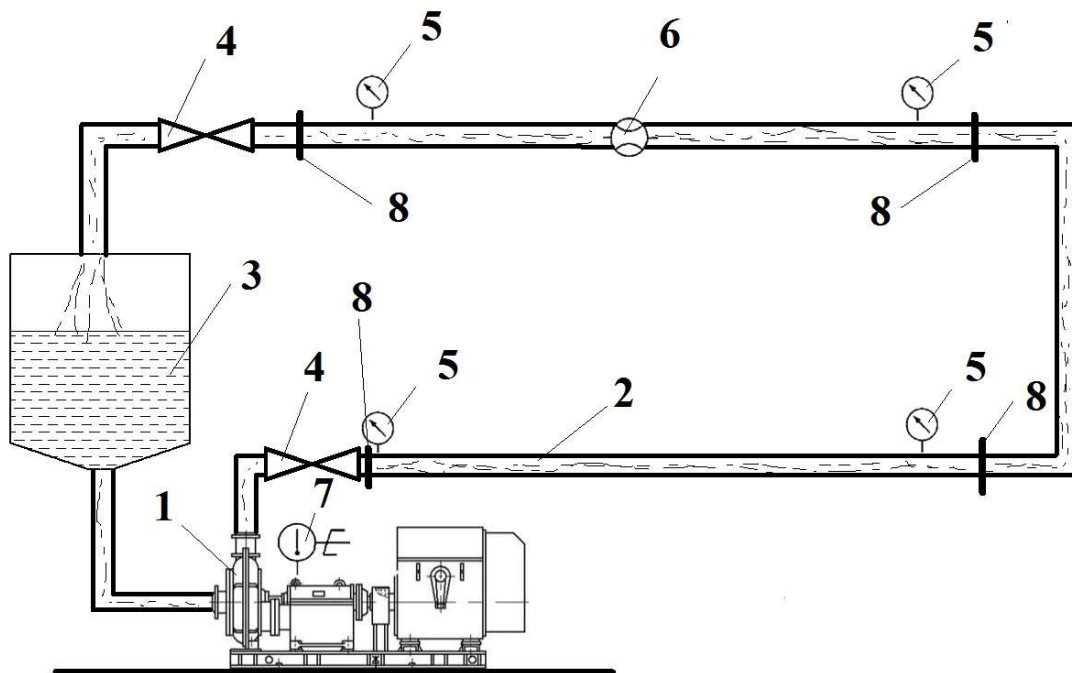


Рисунок 3.1 – Схема экспериментального гидротранспортного стенда

Основными элементами лабораторной установки являются (рисунок 3.1): 1 – центробежный песковый насос П12,5 с асинхронным электроприводом (основной и резервный); 2 – система трубопроводов; 3 – расходный бак; 4 – запорные клапаны; контрольно-измерительная аппаратура (5 – реле давления, 6 – расходомер, 7 – датчик температуры); 8 – фланцевое присоединение частей трубопровода.

Экспериментальный гидротранспортный стенд позволяет проводить исследования гидроабразивного износа образцов труб и футеровок трубопроводов, изготовленных из различных материалов, таких как: стали, чугуны, пластмассы, полиуретаны, резины и др. Общий вид экспериментального стенда показан на рисунке 3.2 [107].



Рисунок 3.2 – Общий вид экспериментального стенда

Для наработки шероховатости и оцениваемой величины гидроабразивного износа на внутренней поверхности исследуемых образцов, гидросмесь непрерывно перекачивалась по замкнутому участку трубопровода. Электронное реле давлений Wika PSD-4 (рисунок 3.3б) измеряет и отображает текущее давление в системе. Расход и объем перекаченной гидросмеси контролируется при помощи ультразвукового

расходомера Portaflow D550 (рисунок 3.3в). Шероховатость поверхностей экспериментальных образцов измерялась контактным профилометром (рисунок 3.3г) [107].

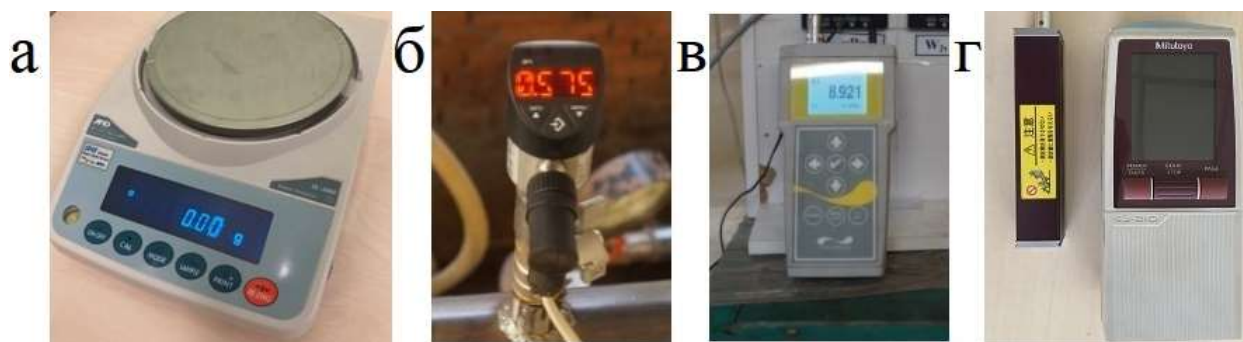


Рисунок 3.3 – Контрольно-измерительные приборы экспериментального гидротранспортного стенда: а – весы AND DL-5000; б – электронное реле давлений Wika PSD-4; в – ультразвуковой расходомер Portaflow D550; г – контактный профилометр Surfetest SJ-210

В качестве транспортируемого абразивного материала использовалась гидросмесь на основе хвостов обогащения железной руды с массовой концентрацией 10%, 20% и 30%. При этом, конструктивные возможности экспериментального стенда позволяют перекачивать подобную гидросмесь с массовой концентрацией в диапазоне 10-70%. Гранулометрический состав используемых в исследовании хвостов обогащения приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Средний гранулометрический состав гидросмеси

Размер фракции, мм	+2	1-2	0,5-1	0,25-0,5	0,1-0,25	0,05-0,1	0-0,05	Итого
Содержание фракции, %	0,1	0,7	1,5	3,5	9,0	8,8	76,4	100

На основании исследования гранулометрического состава можно сделать вывод, что используемая в эксперименте гидросмесь на основе хвостов обогащения железной руды является полидисперсной гидросмесью с преобладанием частиц твердой фазы в диапазоне диаметров 1-50 мкм.

Плотность гидросмеси при массовой концентрации 10% составляет 1079 кг/м<sup>3</sup>, при массовой концентрации 20% – 1163 кг/м<sup>3</sup>, при массовой концентрации 30% – 1258 кг/м<sup>3</sup>.

### 3.2. Подготовка экспериментальных образцов трубопроводов

Для выполнения лабораторных исследований были подготовлены 4 типа экспериментальных образцов труб  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой двух производителей: ООО «ПКФ «Уретан Тех-М» и АО «СОМЕКС», а также стальной образец  $Dy50$  по ГОСТ 10704-91 производства компании АО «ВМЗ». Рабочий чертеж образца с полиуретановой футеровкой и общий вид опытных образцов труб приведены на рисунках 3.4 и 3.5.

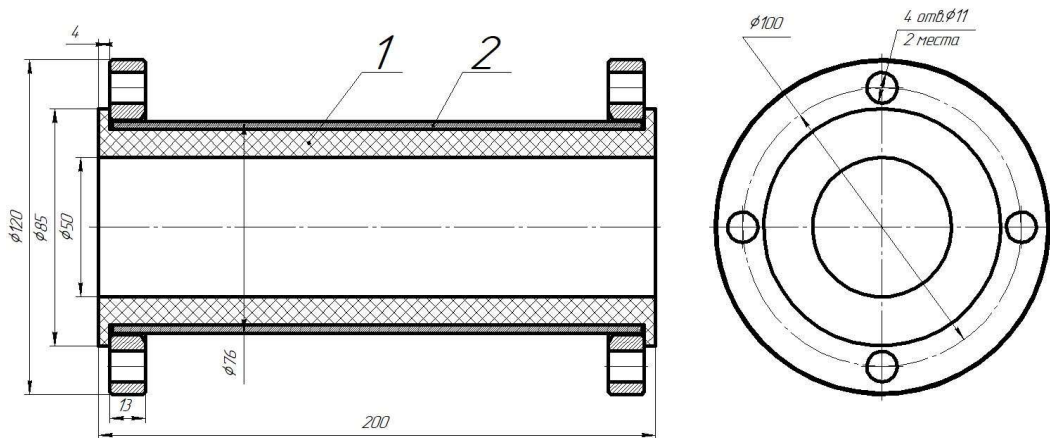


Рисунок 3.4 – Чертеж экспериментального образца трубы с полиуретановой футеровкой, где 1 – полиуретановая вставка и 2 – стальная труба



Рисунок 3.5 – Общий вид экспериментальных образцов труб

Характеристики внутренних поверхностей опытных образцов приведены в таблице 3.2. Значения твердости полиуретановых покрытий были предоставлены производителями футерованных образцов труб. Средние значения параметра начальной шероховатости  $Ra$  были вычислены по результатам лабораторных замеров профилометром SurfTest SJ-210 (рисунок 3.3г). Спектрограммы начальных шероховатостей внутренних поверхностей исследуемых образцов труб приведены на рисунке 3.7 [16, 108].

Таблица 3.2 – Характеристики экспериментальных образцов труб  $Dy50$

Тип трубы	Изготовитель	Футеровка	Твердость по Шору, А	Начальная шероховатость, $Ra$ , мкм
Стальная, футерованная (образцы P1-1, P1-2, P1-3)	ООО «ПКФ «Уретан Тех-М»	полиуретан СКУ-7Л	95	0,215
Стальная, футерованная (образцы P2-1, P2-2, P2-3)	АО «СОМЕКС»	полиуретан Е-83	83	1,457
Стальная, футерованная (образцы P3-1, P3-2, P3-3)	АО «СОМЕКС»	полиуретан N-802	90	2,638
Стальная ГОСТ 10704-91 (образцы Ст3-1, Ст3-2, Ст3-3)	АО «ВМЗ»	без футеровки	HRC35	8,757

Из данных таблицы 3.2 видно, что образцы отличаются друг от друга твердостью поверхности и величиной параметра  $Ra$  начальной шероховатости. Отдельно стоит отметить, что величина параметра твердости у образцов с полиуретановым покрытием отличается незначительно – минимальная твердость по Шору – 83А, максимальная 95А.

### 3.3. Обоснование времени и рабочих интервалов проведения экспериментальных исследований

Из практики применения гидротранспорта известно, что установившаяся величина шероховатости стальных трубопроводов достигается ориентировочно после одного месяца непрерывной работы трубопровода, что соответствует 720 ч. При этом средняя скорость потока при самотечном



транспортировании закладочной гидросмеси составляет 0,5-0,7 м/с (реже 1,5-2,0 м/с) в зависимости от диаметра трубопровода. Эти данные использовались для определения общего времени движения гидросмеси по трубопроводу и опытным образцам труб до наработки установившейся шероховатости внутренней поверхности.

Расчет длины контакта гидросмеси с рабочей поверхностью трубопровода проведем по формуле (3.1):

$$L_k = v_{cp} T \quad (3.1)$$

где  $L_k$  – длина контакта гидросмеси с рабочей поверхностью трубопровода, м;

$v_{cp}$  – средняя скорость потока гидросмеси, м/с;

$T$  – время контакта гидросмеси с рабочей поверхностью трубопровода, с.

За 720 часов непрерывной работы реального трубопровода при средней скорости потока 0,7 м/с гидросмесь находится в контакте с рабочей поверхностью трубы на протяженности, равной, м:

$$L_k = 0,7 \cdot 3600 \cdot 720 = 1,814 \cdot 10^6$$

При проведении пуско-наладочных работ лабораторной установки было осуществлено 3 тестовых запуска продолжительностью 2 часа каждый с использованием гидросмесей различных концентраций. В первом тестовом цикле массовая концентрация твердого в гидросмеси составляла 10%, во втором – 20%, в третьем – 30%. По результатам измерений ультразвукового расходомера Portaflow D550 средняя скорость потока составила 1,9 м/с, в независимости от концентрации гидросмеси. Исходя из этого, рассчитаем минимальное время эксплуатации экспериментальной гидротранспортной установки до наработки установившейся величины шероховатости рабочей поверхности трубопровода по формуле (3.2):

$$T_{раб} = \frac{L_k}{v_{cp}}, \quad (3.2)$$

где  $L_k$  – длина контакта гидросмеси с рабочей поверхностью трубопровода, м;

$v_{cp}$  – средняя скорость потока гидросмеси, м/с.

Таким образом, время эксплуатации лабораторной установки до наработки установившейся величины шероховатости поверхности исследуемых образцов составит, ч:

$$T_{\text{раб}} = \frac{1,814 \cdot 10^6}{1,9 \cdot 3600} = 265$$

Принимаем, что общее время работы лабораторной установки по перекачиванию заданной гидросмеси должно быть не менее  $T_{\text{раб}} \approx 265$  ч. Фактическое время работы экспериментальной установки составило  $T_{\text{раб}} = 600$  ч (т.е. превышение минимального расчетного времени составило 335 часов).

Для определения характера и динамики изменения значений шероховатости полиуретановых покрытий опытных образцов труб, общее время работы  $T_{\text{раб}} = 1800$  ч включало 3 цикла испытаний по 600 ч. В первом цикле использовалась гидросмесь с массовой концентрацией твердого 10%, с каждым следующим циклом концентрация увеличивалась на 10% и составляла 20% и 30%, соответственно. Каждый цикл испытаний делился на временные интервалы продолжительностью 100 часов. После завершения каждого такого интервала экспериментального исследования установка отключалась, исследуемые образцы труб демонтировались, и производилась оценка наработанной шероховатости и величины износа.

### **3.4 Определение величины наработанной шероховатости экспериментальных образцов труб**

Перед запуском первого цикла испытаний измерялась относительная шероховатость и масса каждого исследуемого образца трубопровода. Масса исследуемых образцов фиксировалась с помощью высокоточных весов AND DL-5000 (рисунок 3.3а).

Для измерения фактических значений параметра шероховатости поверхности  $Ra$  использовался контактный профилометр SurfTest SJ-210 (рисунок 3.3г). Этот прибор представляет собой индуктивный датчик с алмазной иглой, имеющей радиус 2 мкм, и опорой на измеряемую

поверхность. Датчик генерирует импульсы, которые проходят через электронный усилитель. Механические колебания иглы, возникающие при этом, преобразуются в цифровой сигнал. Путем обработки нескольких таких сигналов прибор вычисляет среднее значение параметра - количественную характеристику неровности участка, рассчитываемую на определенную длину. Испытуемые образцы неподвижно фиксировались на специально разработанном штативе, который позволяет высоту полки размещения щупа профилометра. Прибор сертифицирован Госстандартом РФ, внесен в Государственный реестр средств измерений и соответствует международным стандартам (ISO 8503) Общий вид установки для определения шероховатости экспериментальных образцов труб показан на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Общий вид установки для оценки шероховатости образцов труб

Значение начальной шероховатости определяется технологией изготовления образца, которая у каждого производителя уникальна. Для гидравлического транспортирования закладочной смеси предпочтительна наименьшая шероховатость поверхности русла, так как ее величина влияет на удельное сопротивление потока гидросмеси, возникающее за счет трения о внутреннюю поверхность трубопровода [107]. Измерения начальной

шероховатости  $Ra$  поверхностей покрытий опытных образцов производились по трём внутренним образующим на длине образца с поворотом на  $120^\circ$  с каждой из двух сторон. Общее число измерений шероховатости для одного элемента равно 6. Полученные значения усреднялись. Среднее арифметическое значение  $Ra$  принято в качестве величины абсолютной шероховатости поверхности  $\Delta$ . Результаты каждого измерения выводились на экран ПК в виде спектрограммы соответствующих значений  $Ra$  (мкм). Спектрограммы начальных шероховатостей исследуемых поверхностей приведены на рисунке 3.7. Выполненная оценка изменения шероховатости позволила предварительно оценить и сопоставить значения коэффициентов шероховатости и коэффициентов гидравлических сопротивлений образцов труб из различных материалов, а также определить удельные потери напора.

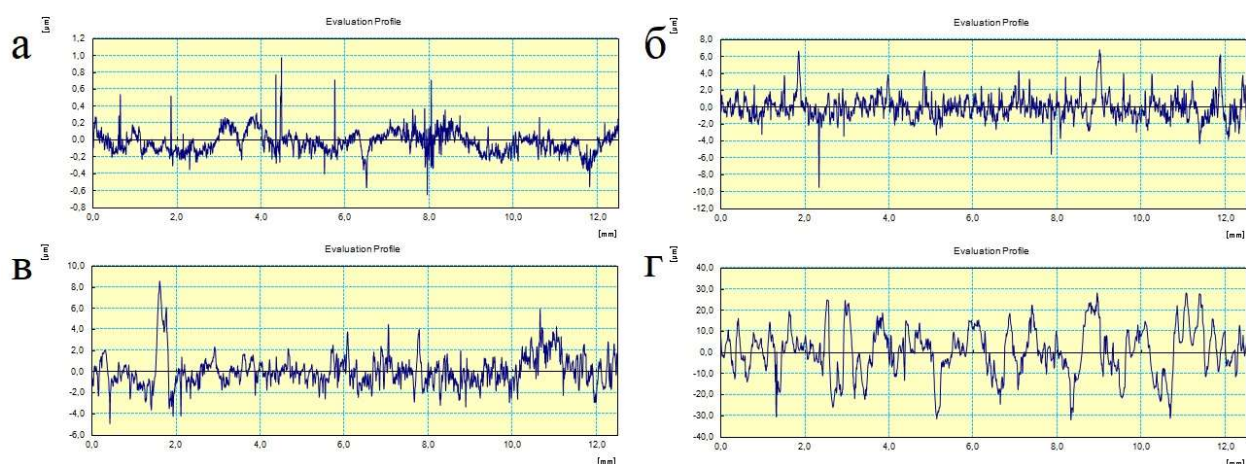


Рисунок 3.7 – Спектрограммы начальных шероховатостей внутренних поверхностей экспериментальных образцов труб, замеренных по условной линии А: а – образец Р1-3; б – образец Р2-3; в – образец Р3-3; г – образец Ст3-3

После завершения каждого интервала испытаний, продолжительностью 100 ч, экспериментальный стенд останавливался для демонтажа образцов. Далее испытуемые элементы тщательно промывались и высушивались. Сушка металлического образца проводилась естественным образом при комнатной температуре продолжительностью 24 ч. Сушка образцов с внутренним полиуретановым покрытием осуществлялась в печи при

температуре 70 - 90°C продолжительностью также 24 ч. Перед измерением шероховатости профилометром внутренние поверхности исследуемых образцов подвергались визуальной оценке (рисунок 3.8).

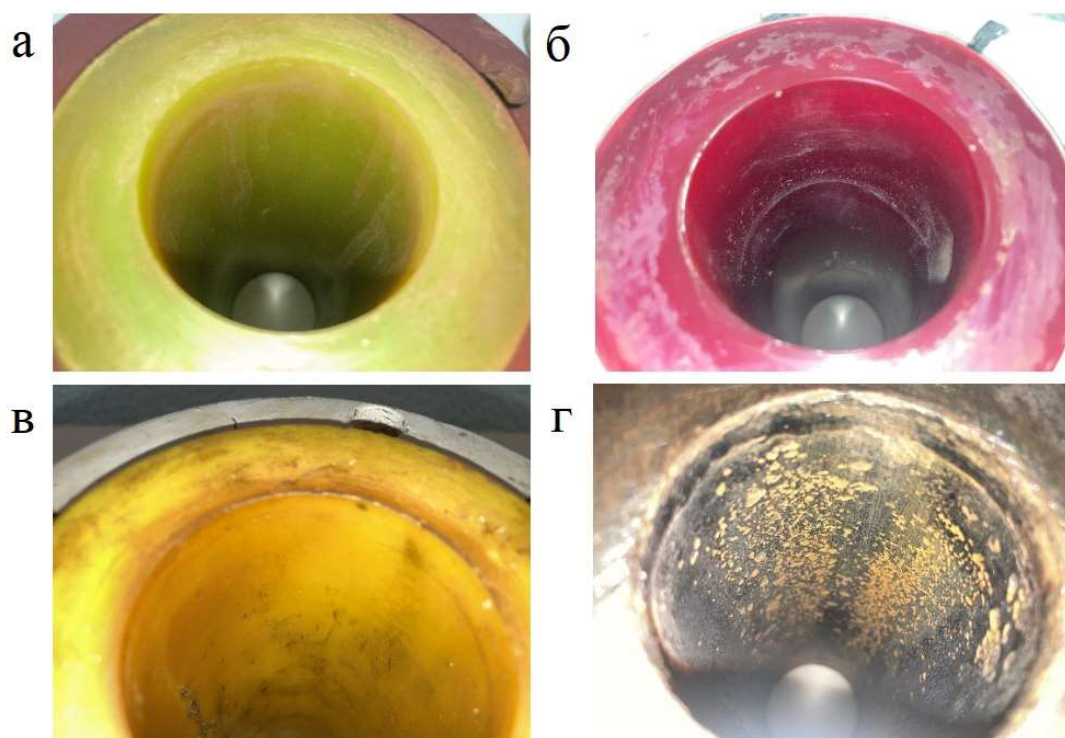


Рисунок 3.8 – Состояние внутренней поверхности экспериментальных образцов труб после наработки 600 ч при массовой концентрации гидросмеси – 30%: а – образец P1-3; б – образец P2-3; в – образец P3-3; г – образец Ст3-3

На основе визуальной оценки установлено, что шероховатость стального образца значительно возросла в сравнении с образцами с полиуретановой футеровкой (рисунок 3.8). Также виден различный характер изнашивания поверхностей в зависимости от материала:

- поверхность стального образца характеризуется многочисленными кратерами (выбоинами) неправильной формы и разной глубины площадью до 1 см<sup>2</sup>, которые подвержены коррозии;

- поверхность образцов с полиуретановым покрытием гладкая, с высоким коэффициентом отражения света, изредка встречаются неглубокие порезы поверхности в виде линий длиной до 1,5 см и незначительной шириной.

После проведения визуальной оценки состояния поверхностей производились замеры шероховатостей профилометром. Спектрограммы шероховатостей поверхностей после 600 ч наработки при массовой концентрации гидросмеси 30% приведены на рисунке 3.9.

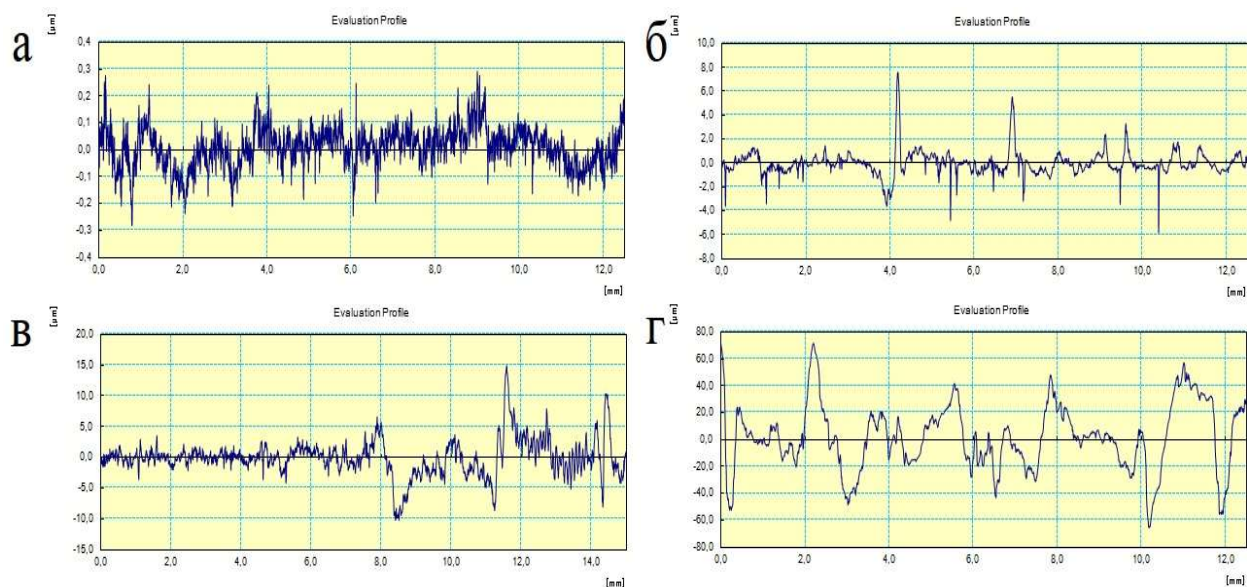


Рисунок 3.9 – Спектрограммы установившихся шероховатостей внутренних поверхностей экспериментальных образцов труб после 600 ч наработки при массовой концентрации гидросмеси – 30%, замеренных по условной линии А: а – образец Р1-3; б – образец Р2-3; в – образец Р3-3; г – образец Ст3-3

Измеренные значения параметров шероховатости приведены в приложении Б. Рассчитанные средние значения параметра шероховатости  $Ra$  поверхностей исследуемых образцов после каждого цикла испытаний продолжительностью 100 ч приведены в таблице 3.3.

На основе данных таблицы 3.3 были построены графики изменения шероховатости внутренней поверхности экспериментальных образцов трубопровода от времени наработки при перекачивании гидросмесей с массовыми концентрациями 10%, 20% и 30% (Приложение В). На рисунках 3.10, 3.11 и 3.12 представлены сводные графики изменения шероховатости  $Ra$  исследуемых поверхностей от времени наработки при перекачивании гидросмесей с массовыми концентрациями 10%, 20% и 30%.

Таблица 3.3 – Средние значения параметра шероховатости  $Ra$  внутренних поверхностей исследуемых образцов в зависимости от времени наработки и массовой концентрации гидросмеси

Массовая концентрация гидросмеси $\omega_{ТВ}$ , %	Наработка $t_{\text{раб}}$ , ч	Среднее значение шероховатости поверхности $Ra$ , мкм			
		Образец P1-1	Образец P2-1	Образец P3-1	Образец Ст3-1
10	0	0,212	1,493	2,641	8,651
	100	0,202	1,524	2,594	11,347
	200	0,184	1,422	2,473	13,073
	300	0,171	1,278	2,372	15,779
	400	0,172	1,311	2,278	16,607
	500	0,157	1,268	2,284	15,176
	600	0,166	1,243	2,311	15,279
—		Образец P1-2	Образец P2-2	Образец P3-2	Образец Ст3-2
20	0	0,218	1,446	2,670	8,913
	100	0,195	1,434	2,648	13,148
	200	0,189	1,361	2,459	16,067
	300	0,170	1,273	2,482	19,464
	400	0,163	1,218	2,380	18,592
	500	0,167	1,260	2,276	18,683
	600	0,161	1,236	2,301	18,367
—		Образец P1-3	Образец P2-3	Образец P3-3	Образец Ст3-3
30	0	0,215	1,432	2,602	8,707
	100	0,193	1,457	2,550	14,187
	200	0,197	1,355	2,554	18,169
	300	0,179	1,313	2,375	21,735
	400	0,180	1,294	2,288	22,298
	500	0,173	1,276	2,324	22,083
	600	0,165	1,256	2,293	21,812

Значения параметра шероховатости  $Ra$  полиуретановых футеровок за общее время наработки 600 ч изменились незначительно. Так, у образца с полиуретановой футеровкой P2-2 при взаимодействии с гидросмесью с массовой концентрацией твердого  $\omega_{ТВ}=20\%$  начальная средняя шероховатость  $Ra$  снизилась на 1%, а в последующие 200 ч наработки наблюдалось снижение параметра шероховатости  $Ra$  еще на 13,6%. Во интервале наработки от 300 до 600 ч среднее значение параметра

шероховатости  $Ra$  практически не изменялось и находилось в диапазоне 1,218-1,273 мкм. Это позволяет сделать вывод, что в первые 300 ч работы происходит приработка внутренней поверхности и достижение уровня значений установившейся шероховатости. Так как средняя скорость транспортирования гидросмеси в лабораторном стенде равна 1,9 м/с, а скорость самотечного транспортирования гидросмеси в закладочном комплексе составляет 0,5-0,7 м/с, то можно сделать предположение, что в реальных условиях установившиеся значения шероховатости полиуретановой футеровки наступят через 700-800 ч наработки. Подобная динамика характерна для всех исследуемых образцов с полиуретановыми футеровками при взаимодействии с гидросмесями с массовыми концентрациями 10%, 20% и 30%. Отличие заключается в уровне начальной шероховатости образца, которая определяется технологией нанесения слоя полиуретана. Значения средней установившейся шероховатости  $Ra$  образцов с полиуретановой футеровкой составляют, соответственно:  $Ra_{P1}=0,169$  мкм;  $Ra_{P2}=1,269$  мкм;  $Ra_{P3}=2,33$  мкм.

Значения параметра шероховатости  $Ra$  стального образца трубы СтЗ значительно превышают величину шероховатостей  $Ra$  образцов с полиуретановой футеровкой. Приработка поверхности стальной трубы наступает через 300 ч. За время приработки наблюдается существенный рост значений средней шероховатости  $Ra$ : на 82 %, 118% и 149% при массовой концентрации гидросмеси 10%, 20% и 30% соответственно. В последующие 300 ч значения средней шероховатости  $Ra$  поверхности стальной трубы меняются незначительно. Значение средней установившейся шероховатости  $Ra$  стальных труб составляет  $Ra_{СтЗ-1}=15,71$  мкм;  $Ra_{СтЗ-2}=18,778$  мкм;  $Ra_{СтЗ-3}=21,982$  мкм при массовых концентрациях гидросмеси 10%, 20% и 30% соответственно. Из этого следует, что значения установившейся шероховатости поверхностей стальных труб находятся в зависимости от времени наработки и от массовой концентрации гидросмеси.



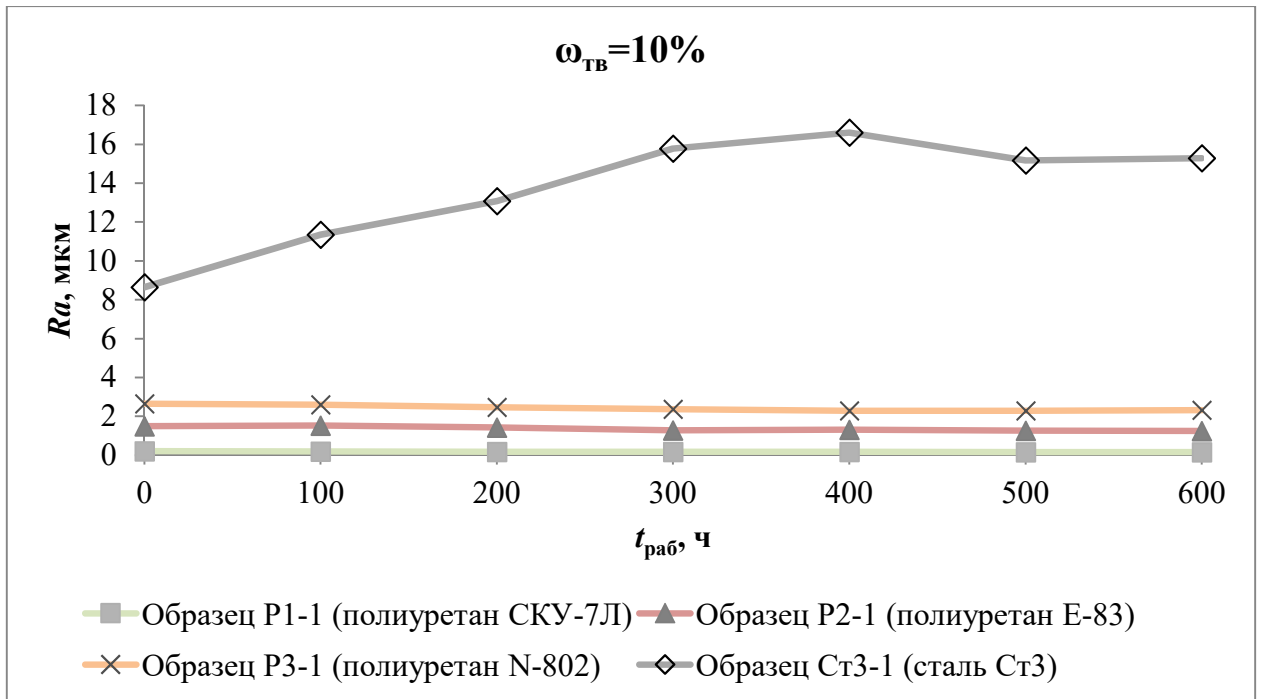


Рисунок 3.10 – Изменение шероховатости  $Ra$  исследуемых образцов труб от времени наработки  $t_{\text{раб}}$  (массовая концентрация гидросмеси  $\omega_{\text{ТВ}}=10\%$ )

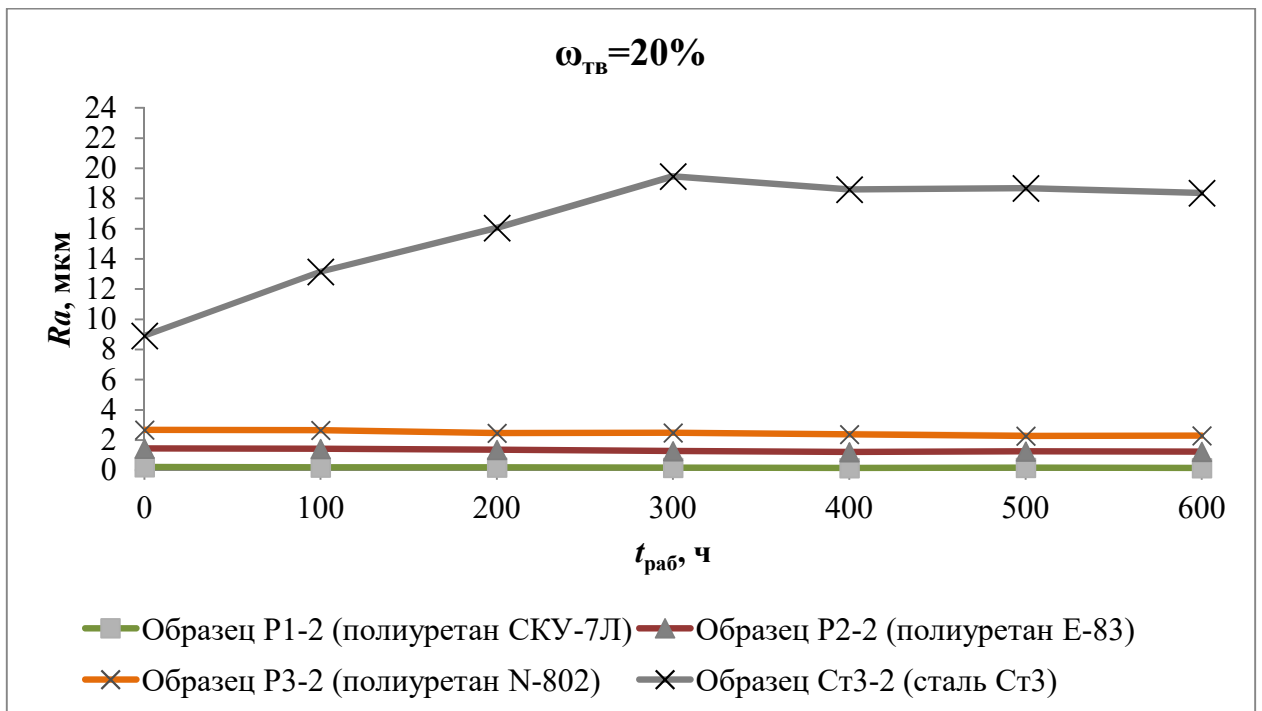


Рисунок 3.11 – Изменение шероховатости  $Ra$  исследуемых образцов труб от времени наработки  $t_{\text{раб}}$  (массовая концентрация гидросмеси  $\omega_{\text{ТВ}}=20\%$ )

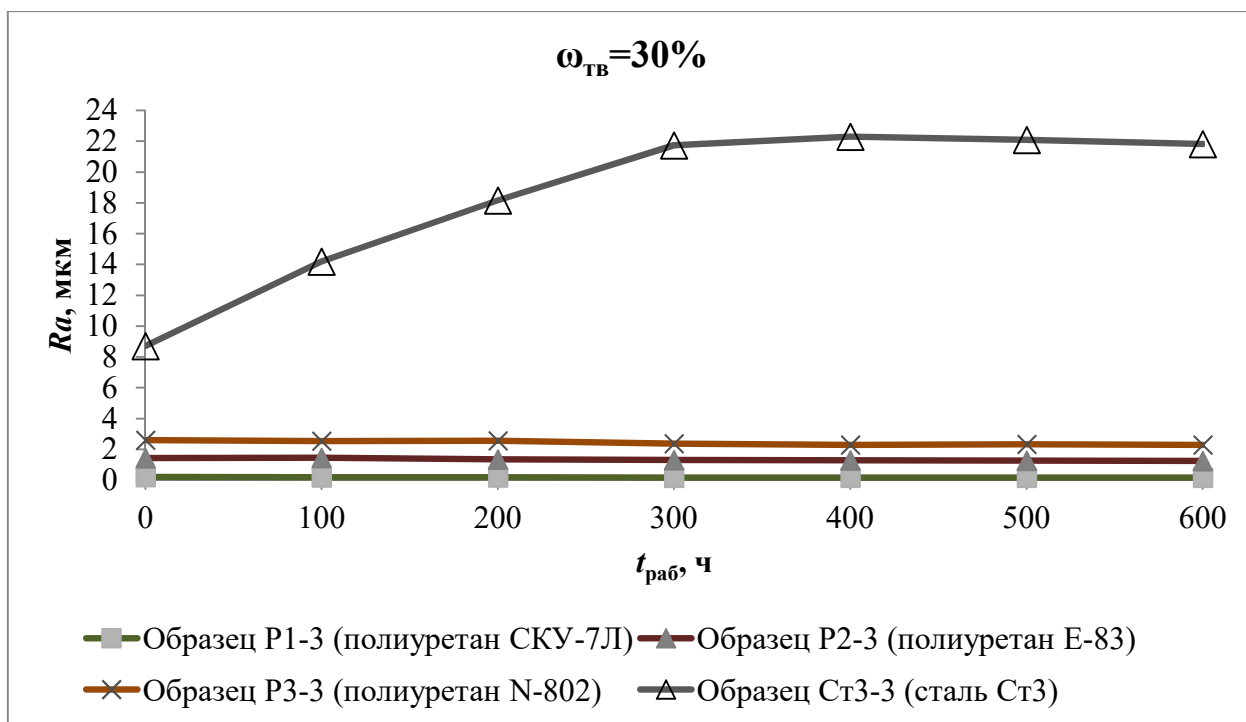


Рисунок 3.12 – Изменение шероховатости  $Ra$  исследуемых образцов труб от времени наработки  $t_{раб}$  (массовая концентрация гидросмеси  $\omega_{ТВ}=30\%$ )

Анализируя зависимости, представленные на рисунках 3.10, 3.11 и 3.12 можно сделать вывод, что твердость полиуретановой футеровки в диапазоне от 83А до 95А не оказывает значительного влияния на динамику изменения величины параметра шероховатости  $Ra$ , поэтому возможно рассматривать средние значения установившейся шероховатости  $Ra$  опытных образцов.

Зависимости изменения параметра шероховатости  $Ra$  полиуретановых футеровок от времени наработки аппроксимируются уравнением прямой линии (3.3):

$$Ra_t = Ra_0 - kt_{раб}, \quad (3.3)$$

где  $Ra_0$  – среднее значение начальной шероховатости, мкм;

$t_{раб}$  – время наработки, ч;

$k$  – параметр наработки, мкм/ч (для образца P1  $k_{P1}=9 \cdot 10^{-5}$  мкм/ч, для образца P2  $k_{P2}=4 \cdot 10^{-4}$  мкм/ч и для образца P3  $k_{P3}=6 \cdot 10^{-4}$  мкм/ч).

Зависимость изменения параметра шероховатости  $Ra$  до установившихся значений стального трубопровода от времени эксплуатации аппроксимируется выражением (3.4):

$$Ra_t = Ra_0 + kt_{\text{раб.уст.}}, \quad (3.4)$$

где  $Ra_0$  – среднее значение начальной шероховатости;

$t_{\text{раб.уст.}}$  – время наработки, ч ( $t_{\text{раб.уст.}}=300$  ч);

$k$  – параметр наработки, мкм/ч (при концентрации 10%:  $k=2,3 \cdot 10^{-2}$  мкм/ч; при концентрации 20%:  $k=3,5 \cdot 10^{-2}$  мкм/ч; при концентрации 30%:  $k=4,3 \cdot 10^{-2}$  мкм/ч).

Зависимость изменения параметра установившейся шероховатости  $Ra$  стального трубопровода от времени эксплуатации аппроксимируется выражением (3.5):

$$Ra_t = Ra_{300} - kt_{\text{раб}}, \quad (3.5)$$

где  $Ra_{300}$  – среднее значение установившейся шероховатости после 300 ч эксплуатации, мкм;

$t_{\text{раб}}$  – время наработки, ч ( $t_{\text{раб}} > 300$  ч);

$k$  – параметр наработки, мкм/ч (при концентрации 10%:  $k=1,7 \cdot 10^{-3}$  мкм/ч; при концентрации 20%:  $k=3,7 \cdot 10^{-3}$  мкм/ч; при концентрации 30%:  $k=2,4 \cdot 10^{-3}$  мкм/ч)

Так как величина установившейся шероховатости параметра  $Ra$  у всех образцов наступила при наработке экспериментального стенда 300 ч, то для расчета значений эквивалентной шероховатости  $K_{\text{Э}}$  поверхностей были приняты средние значения установившейся шероховатости  $Ra$  из временных интервалов 300–600 ч наработки. Расчет значений эквивалентной шероховатости  $K_{\text{Э}}$  для образцов с полиуретановой футеровкой выполнен согласно выражению (2.22). Эквивалентная шероховатость  $K_{\text{Э}}$  рабочей поверхности стального образца трубы без футеровки рассчитана согласно выражению (2.23). Рассчитанные значения параметра установившейся шероховатости  $Ra$  и значения эквивалентной шероховатости  $K_{\text{Э}}$  поверхностей исследуемых образцов труб приведены в таблице 3.4.

Сравнение значений в таблице 3.4 показывает, что установившаяся шероховатость  $Ra$  стальной поверхности в среднем выше в 12-18 раз, чем у полиуретановых поверхностей. Значения эквивалентной шероховатости  $K_{\text{Э}}$  рабочей поверхности стальной трубы без футеровки возрастает с увеличением концентрации гидросмеси с 10% до 30%. Значения

эквивалентной шероховатости  $K_{\text{Э}}$  рабочих поверхностей у труб с полиуретановыми футеровками практически не изменяется с увеличением концентрации гидросмеси с 10% до 30%. Значения эквивалентной шероховатости  $K_{\text{Э}}$  рабочей поверхности стальной трубы без футеровки в среднем в 20 раз выше, чем у труб с полиуретановыми футеровками.

Таблица 3.4 – Значения параметра установившейся шероховатости  $Ra$  и значения эквивалентной шероховатости  $K_{\text{Э}}$  поверхностей исследуемых образцов труб, где  $\omega_{\text{ТВ}}$  – массовая концентрация гидросмеси, %;  $Ra$  – среднее значение установившейся шероховатости, мкм;  $K_{\text{Э}}$  – величина эквивалентной шероховатости, мкм

$\omega_{\text{ТВ}}$ , %	$Ra$ , мкм	$K_{\text{Э}}$ , мкм	$Ra$ , мкм	$K_{\text{Э}}$ , мкм	$Ra$ , мкм	$K_{\text{Э}}$ , мкм	$Ra$ , мкм	$K_{\text{Э}}$ , мкм
10	Образец P1-1		Образец P2-1		Образец P3-1		Образец Ст3-1	
	0,166	0,184	1,275	2,763	2,311	6,095	15,710	49,354
20	Образец P1-2		Образец P2-2		Образец P3-2		Образец Ст3-2	
	0,165	0,182	1,247	2,681	2,360	6,265	18,776	58,988
30	Образец P1-3		Образец P2-3		Образец P3-3		Образец Ст3-3	
	0,174	0,196	1,285	2,791	2,320	6,125	21,982	69,059

Измеренные профилометром величины шероховатости  $Ra$  внутренней поверхности образцов стальных труб и труб с полиуретановым покрытием (таблица 3.3) позволяют определить величину коэффициента относительной шероховатости  $\varepsilon$  рабочей поверхности труб, выполненных из различных материалов, системы гидротранспорта закладочного комплекса (таблица 3.5) по формуле (2.19). Для расчета приняты средние значения установившейся шероховатости  $Ra$  при массовых концентрациях гидросмеси 10%, 20% и 30%, диаметр экспериментальных образцов труб  $Dy50$ .

Таблица 3.5 – Коэффициент относительной шероховатости поверхности стальных труб и труб с полиуретановым покрытием

Материал рабочей поверхности трубы	Коэффициент относительной шероховатости $\varepsilon \cdot 10^{-6}$		
	$\omega_{ТВ}=10\%$	$\omega_{ТВ}=20\%$	$\omega_{ТВ}=30\%$
Полиуретан P1	3,33	3,30	3,49
Полиуретан P2	25,50	24,93	25,70
Полиуретан P3	46,23	47,20	46,40
Сталь Ст3	314,20	375,53	439,64

Гистограмма распределения коэффициентов относительной шероховатости  $\varepsilon$  для стальных и труб с полиуретановым покрытием при массовых концентрациях гидросмеси 10%, 20% и 30%, приведена на рисунке 3.13.

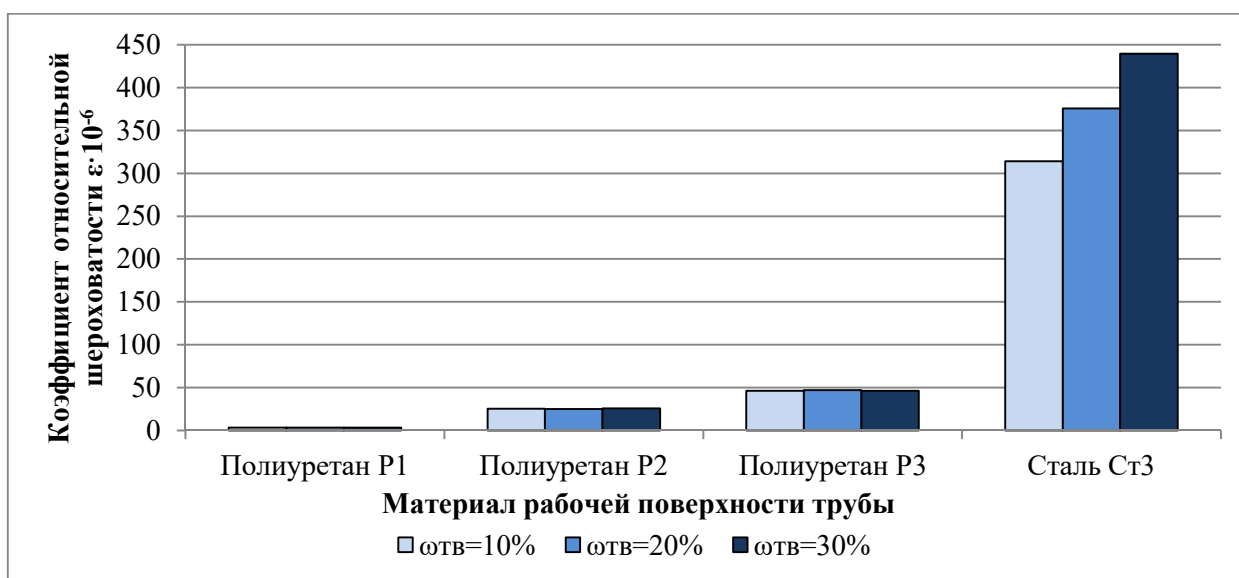


Рисунок 3.13 – Зависимость коэффициента относительной шероховатости  $\varepsilon$  рабочей поверхности трубы от массовой концентрации гидросмеси

Согласно данным, представленным в таблице 3.5 и на рисунке 3.13 можно сделать вывод, что значения коэффициентов относительной шероховатости у труб  $Dy50$  с полиуретановой рабочей поверхностью при массовых концентрациях гидросмеси 10%, 20% и 30% практически не меняются. У трубы со стальной рабочей поверхностью с увеличением массовой концентрации гидросмеси с 10% до 30% значения коэффициента относительной шероховатости  $\varepsilon$  существенно возрастают. При массовой концентрации гидросмеси 10% значения коэффициента относительной

шероховатости  $\varepsilon$  стальной рабочей поверхности превышают показатели полиуретановых рабочих поверхностей более, чем в 6 раз. При массовой концентрации гидросмеси 20% значения коэффициента относительной шероховатости  $\varepsilon$  стальной рабочей поверхности превышают показатели полиуретановых рабочих поверхностей более, чем в 8 раз. При массовой концентрации гидросмеси 30% значения коэффициента относительной шероховатости  $\varepsilon$  стальной рабочей поверхности превышают показатели полиуретановых рабочих поверхностей более, чем в 9 раз.

### 3.5. Оценка коэффициента гидравлических сопротивлений и потерь напора

Как было отмечено в главе 2, при развитом турбулентном режиме течения гидросмеси (квадратичная зона трения), коэффициент гидравлических сопротивлений  $\lambda$  не зависит от числа Рейнольдса и определяется величиной коэффициента относительной шероховатости  $\varepsilon$ , [107] в соответствии с формулой Шифрисона (2.14). Значения коэффициента гидравлических сопротивлений  $\lambda$  при массовых концентрациях гидросмеси 10%, 20% и 30% для рассматриваемых образцов труб определены по формуле (2.14) и приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Коэффициенты гидравлических сопротивлений внутренней поверхности стальных и труб с полиуретановой футеровкой внутренней поверхности

Материал рабочей поверхности трубы	Коэффициент гидравлических сопротивлений $\lambda \cdot 10^{-3}$		
	$\omega_{ТВ}=10\%$	$\omega_{ТВ}=20\%$	$\omega_{ТВ}=30\%$
Полиуретан Р1	4,7	4,7	4,8
Полиуретан Р2	7,8	7,8	7,8
Полиуретан Р3	9,1	9,1	9,1
Сталь Ст3	14,6	15,3	15,9

На основе данных таблицы 3.6 построена сравнительная гистограмма коэффициентов гидравлических сопротивлений для стального трубопровода и трубопроводов с полиуретановой футеровкой (рисунок 3.14).

Анализ данных, представленных в таблице 3.6 и на рисунке 3.14, позволяет сделать вывод, что коэффициент гидравлических сопротивлений у труб с полиуретановой футеровкой в 2 раза ниже, чем у традиционных стальных труб без футеровки.

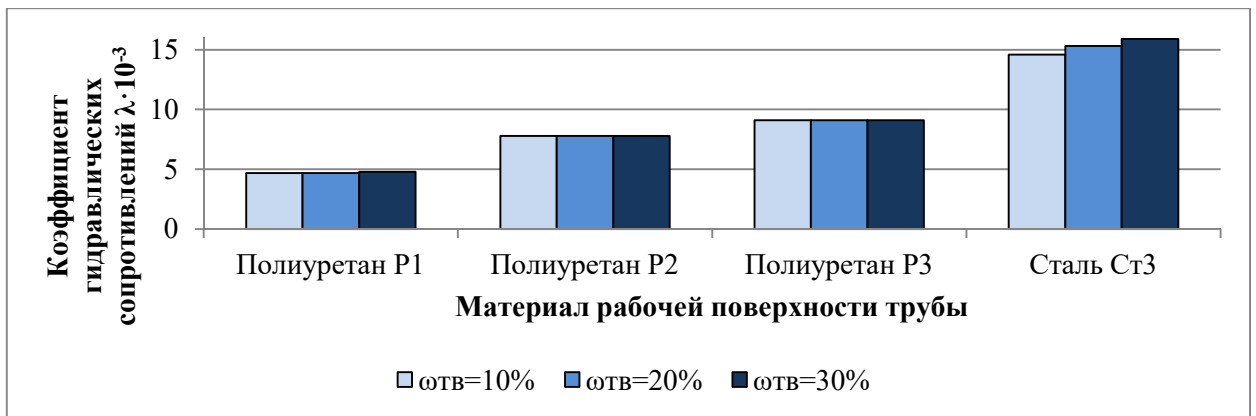


Рисунок 3.14 – Коэффициент гидравлических сопротивлений  $\lambda$  стальных труб и труб с полиуретановой футеровкой при массовой концентрации гидросмеси 10%, 20% и 30%

В соответствии с полученными результатами выполненных исследований, было сформулировано первое научное положение: **применение полиуретановой футеровки рабочей поверхности трубопровода позволяет снизить в среднем в 20 раз величину её эквивалентной шероховатости и в 2 раза уменьшить коэффициент гидравлических сопротивлений за время приработки трубопровода в сравнении с традиционным стальным трубопроводом без футеровки.**

Удельные потери напора потока закладочной смеси I с массовыми концентрациями 10%, 20% и 30% в трубопроводе с полиуретановой футеровкой СКУ-7Л (опытные образцы P1-1; P1-2; P1-3), рассчитаны на основе измеренных значений параметра шероховатости  $Ra$  по формуле Дарси-Вейсбаха (2.17) после проведения каждого цикла испытаний продолжительностью 100 ч. Подобным образом были рассчитаны значения

удельных потерь напора для образцов с полиуретановыми футеровками Е-83 (опытные образцы Р2-1; Р2-2; Р2-3), N-802 (опытные образцы Р3-1; Р3-2; Р3-3), а также для стальных образцов (ГОСТ 10704-91) марки Ст3 (опытные образцы Ст3-1; Ст3-2; Ст3-3). Полученные значения удельных потерь напора потока закладочной смеси приведены в таблицах 3.7, 3.8, 3.9 и 3.10 соответственно.

Таблица 3.7 – Удельные потери напора для трубопровода  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой СКУ-7Л в зависимости от времени эксплуатации и массовой концентрации гидросмеси

Наработка, ч	Удельные потери напора $I \cdot 10^{-3}$ , м/м		
	Концентрация гидросмеси 10%	Концентрация гидросмеси 20%	Концентрация гидросмеси 30%
100	19,65	21,01	22,66
200	19,20	20,83	22,78
300	18,85	20,29	22,24
400	18,89	20,07	22,28
500	18,47	20,21	22,06
600	18,70	20,01	21,79

Таблица 3.8 – Удельные потери напора для трубопровода  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой Е-83 в зависимости от времени эксплуатации и массовой концентрации гидросмеси

Наработка, ч	Удельные потери напора $I \cdot 10^{-3}$ , м/м		
	Концентрация гидросмеси 10%	Концентрация гидросмеси 20%	Концентрация гидросмеси 30%
100	32,59	34,59	37,57
200	32,02	34,14	36,89
300	31,19	33,58	36,60
400	31,38	33,21	36,47
500	31,17	33,49	36,34
600	30,97	33,33	36,19



Таблица 3.9 – Удельные потери напора для трубопровода  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой N-802 в зависимости от времени эксплуатации и массовой концентрации гидросмеси

Наработка, ч	Удельные потери напора $I \cdot 10^{-3}$ , м/м		
	Концентрация гидросмеси 10%	Концентрация гидросмеси 20%	Концентрация гидросмеси 30%
100	37,22	40,32	43,21
200	36,78	39,58	43,22
300	36,40	39,67	42,45
400	36,03	39,26	42,05
500	36,05	38,82	42,22
600	36,16	38,93	42,07

Таблица 3.10 – Удельные потери напора для стального трубопровода  $Dy50$  Ст3 (ГОСТ 10704-91) без футеровки в зависимости от времени эксплуатации и массовой концентрации гидросмеси

Наработка, ч	Удельные потери напора $I \cdot 10^{-3}$ , м/м		
	Концентрация гидросмеси 10%	Концентрация гидросмеси 20%	Концентрация гидросмеси 30%
100	53,82	60,19	66,36
200	55,76	63,28	70,59
300	58,45	66,39	73,83
400	59,20	65,64	74,30
500	57,89	65,72	74,12
600	57,98	65,44	73,89

На основе проведенного анализа получены зависимости удельных потерь напора от времени эксплуатации и от массовой концентрации закладочной гидросмеси (рисунок 3.15).

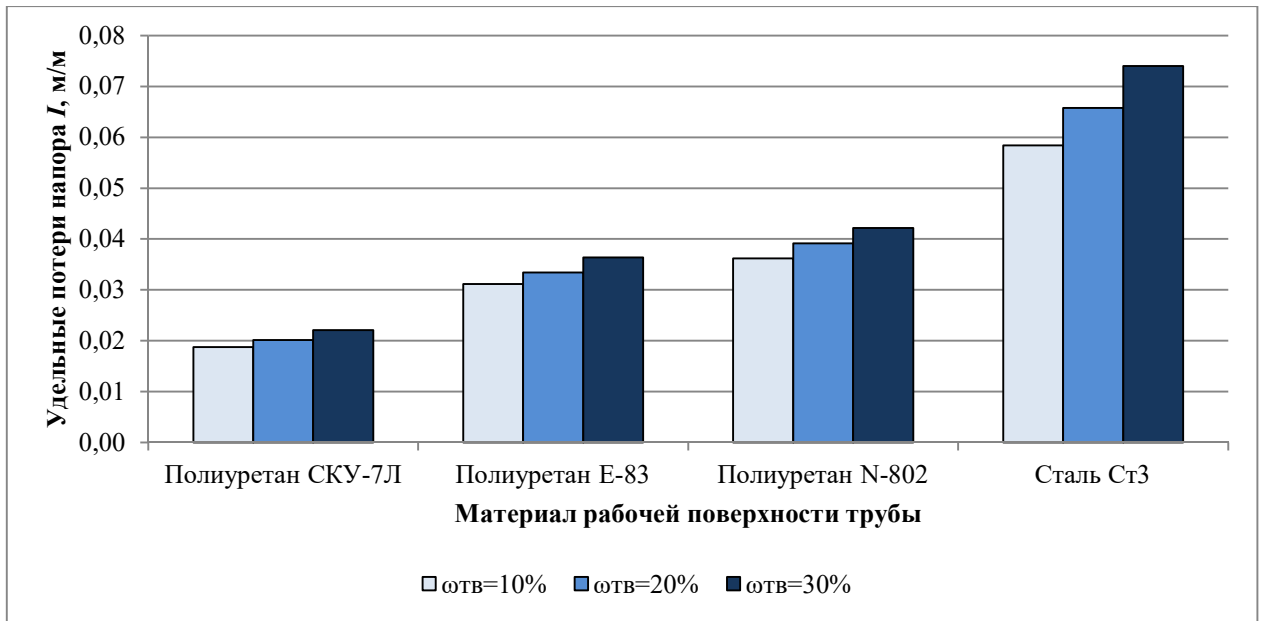


Рисунок 3.15 – Зависимость удельных потерь напора в трубопроводах от массовой концентрации закладочной гидросмеси

Полученные данные позволяют сделать вывод, что величина удельных потерь напора потока в трубопроводах с полиуретановой футеровкой находится в линейной зависимости от массовой концентрации гидросмеси [15]. Величина удельных потерь напора в стальном трубопроводе без футеровки значительно выше, чем в трубопроводах с полиуретановой футеровкой рабочих поверхностей, и зависят как от массовой концентрации гидросмеси, так и от времени наработки. Аппроксимация зависимостей удельных потерь напора от массовой концентрации гидросмеси в диапазоне 10-30% показала, что удельные потери напора в трубопроводах с полиуретановой футеровкой рабочих поверхностей описываются линейной функцией (3.6):

$$I_{\Pi} = I_0 + 2,7 \cdot 10^{-4} \omega_{ТВ}, \quad (3.6)$$

где  $I_{\Pi}$  – удельные потери напора потока в трубопроводе с полиуретановой футеровкой рабочей поверхности, м/м;  $I_0$  – удельные потери напора, рассчитанные на основе значений начальной шероховатости полиуретановой футеровки рабочей поверхности трубопровода, м/м;  $\omega_{ТВ}$  – массовая концентрация гидросмеси, %.

В соответствии с полученными результатами было сформулировано второе научное положение: **удельные потери напора в трубопроводах с полиуретановой футеровкой рабочей поверхности при перемещении абразивной гидросмеси, приготовленной с использованием хвостов обогащения, находятся в линейной зависимости от массовой концентрации гидросмеси.**

### **3.6. Выводы по главе 3**

1. В результате выполненных экспериментальных исследований изменения шероховатости рабочей поверхности труб с полиуретановой футеровкой установлено, что среднее значение параметра шероховатости  $Ra$  со временем наработки меняется незначительно. Начальное значение параметра шероховатости  $Ra$  поверхности полиуретановой футеровки зависит от технологии изготовления изделия. Твердость по Шору полиуретановой футеровки в диапазоне 83-95 А не влияет на характер и динамику изменения значений параметра шероховатости  $Ra$  при перекачивании гидросмесей с массовой концентрацией 10%, 20% и 30%. Установившиеся значения шероховатости полиуретановой футеровки наступают через 700-800 ч наработки в реальных условиях работы закладочного комплекса при транспортировании гидросмесей с массовой концентрацией 10%, 20% и 30%.

2. На основе выполненных экспериментальных исследований изменения коэффициента гидравлических сопротивлений в исследуемых образцах труб при гидротранспорте закладочных смесей установлено, что применение полиуретановой футеровки рабочей поверхности трубопровода позволяет снизить в 20 раз величину её эквивалентной шероховатости за время приработки трубопровода в сравнении со стальным трубопроводом.

3. Результаты выполненных экспериментальных исследований по изменению потерь напора при гидротранспорте закладочных смесей показали, что применение полиуретановой футеровки рабочей поверхности

трубопровода позволяет в 2 раза уменьшить коэффициент гидравлического сопротивления за время приработки трубопровода в сравнении со стальным трубопроводом.

4. На основе проведенных экспериментальных исследований установлено, что удельные потери напора в трубопроводах с полиуретановой футеровкой рабочей поверхности при перемещении абразивной гидросмеси, приготовленной с использованием хвостов обогащения, находятся в линейной зависимости от массовой концентрации гидросмеси.

5. Установленный тренд снижения шероховатости поверхности труб с полиуретановой футеровкой на 14,6% за время приработки и расчетные значения удельных потерь напора подтверждают эффективность применения трубопроводов с полиуретановой футеровкой внутренней поверхности в системах гидротранспорта закладочных комплексов при подземных горных работах.

## **ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ТРУБОПРОВОДОВ С ПОЛИУРЕТАНОВОЙ ФУТЕРОВКОЙ В СИСТЕМАХ ГИДРОТРАНСПОРТА ЗАКЛАДОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

Разработку рекомендаций по применению трубопроводов с полиуретановой футеровкой в системах гидротранспорта закладочных комплексов и оценку экономической эффективности замены традиционных стальных трубопроводов на трубопроводы с полиуретановой футеровкой проведем на основе расчета удельных потерь напора потока закладочной гидросмеси, а также капитальных затрат на закупку 1000 м труб и эксплуатационных затрат на замену изношенных труб за 10-летний период эксплуатации. Для расчета выбраны 6 типов трубопроводов:

- 1) Стальной трубопровод  $Dy100$  из труб бесшовных горячедеформированных 114х6, Ст3сп (ГОСТ 8732-78);
- 2) Стальной трубопровод  $Dy150$  из труб бесшовных горячедеформированных 168х6, Ст3сп (ГОСТ 8732-78);
- 3) Стальной трубопровод  $Dy100$ , футерованный полиуретаном СКУ-7Л от производителя ООО «ПКФ «Уретан Тех-М»;
- 4) Стальной трубопровод  $Dy150$ , футерованный полиуретаном СКУ-7Л от производителя ООО «ПКФ «Уретан Тех-М»;
- 5) Стальной трубопровод  $Dy100$ , футерованный полиуретаном Е-83 от производителя АО «СОМЭКС»;
- 6) Стальной трубопровод  $Dy150$ , футерованный полиуретаном Е-83 от производителя АО «СОМЭКС».

### **4.1. Оценка потерь напора при транспортировании закладочных смесей**

Принимая во внимание механизм перемещения потока в пристенном слое и условия подобия гидродинамических процессов, на основе

экспериментальных данных были определены коэффициенты гидравлических сопротивлений  $\lambda$  для трубопроводов  $Dy100$  и  $Dy150$ , как наиболее распространенных в гидротранспортных системах закладочных комплексов. Произведем расчет коэффициента относительной шероховатости  $\varepsilon$  по формуле (2.19), коэффициента гидравлических сопротивлений  $\lambda$  по формуле (2.14) и величины удельных потерь напора  $I$  по формуле (2.17) для трубопроводов  $Dy100$  и  $Dy150$  из стали СтЗсп (ГОСТ 8732-78) без футеровки и стальных трубопроводов с полиуретановыми футеровками марок СКУ-7Л и Е-83 протяженностью 1000 м при транспортировании закладочных гидросмесей с массовыми концентрациями 10%, 20% и 30% и скорости потока гидросмеси 0,7 м/с. Рассчитанные значения приведены в таблицах 4.1, 4.2 и 4.3.

Таблица 4.1 – Расчетные значения коэффициента относительной шероховатости  $\varepsilon$  для трубопроводов  $Dy100$  и  $Dy150$

Массовая концентрация, %	Коэффициент относительной шероховатости $\varepsilon \cdot 10^{-6}$					
	Стальной трубопровод СтЗсп (ГОСТ 8732-78) без футеровки		Трубопровод, футерованный полиуретаном СКУ-7Л		Трубопровод, футерованный полиуретаном Е-83	
	$Dy100$	$Dy150$	$Dy100$	$Dy150$	$Dy100$	$Dy150$
10	157,1	104,7	1,7	1,1	1,3	8,5
20	187,8	125,2	1,7	1,1	1,2	8,3
30	219,8	146,5	1,7	1,2	1,3	8,6

Таблица 4.2 – Расчетные значения коэффициента гидравлических сопротивлений  $\lambda$  для трубопроводов  $Dy100$  и  $Dy150$

Массовая концентрация, %	Коэффициент гидравлических сопротивлений $\lambda \cdot 10^{-3}$					
	Стальной трубопровод СтЗсп (ГОСТ 8732-78) без футеровки		Трубопровод, футерованный полиуретаном СКУ-7Л		Трубопровод, футерованный полиуретаном Е-83	
	$Dy100$	$Dy150$	$Dy100$	$Dy150$	$Dy100$	$Dy150$
10	12,3	11,1	4,0	3,6	6,6	5,9
20	12,9	11,6	4,0	3,6	6,5	5,9
30	13,4	12,1	4,0	3,6	6,6	6,0

Таблица 4.3 – Расчетные значения удельных потерь напора  $I$  при гидротранспорте закладочной смеси со средней скоростью 0,7 м/с

Массовая концентрация, %	Удельные потери напора $I$ , м/км					
	Стальной трубопровод Ст3сп (ГОСТ 8732-78) без футеровки		Трубопровод, футерованный полиуретаном СКУ-7Л		Трубопровод, футерованный полиуретаном Е-83	
	$Dy100$	$Dy150$	$Dy100$	$Dy150$	$Dy100$	$Dy150$
10	3,33	2,01	1,07	0,64	1,78	1,07
20	3,76	2,26	1,15	0,69	1,91	1,15
30	4,23	2,55	1,26	0,76	2,08	1,25

Из полученных в таблице 4.3 результатов установлено, что при массовой концентрации гидросмеси 30% удельные потери напора в трубопроводах  $Dy100$  и  $Dy150$  с полиуретановой футеровкой меньше в среднем в 2-3 раза, в сравнении с потерями в стальной трубе без покрытия.

Исходя из этого, можно заключить, что на этапе проектирования гидротранспортной системы закладочного комплекса можно рекомендовать применение трубопроводов с полиуретановой футеровкой для увеличения как дальности транспортирования гидросмеси, так и её концентрации, благодаря снижению гидравлических сопротивлений, вызванных меньшей шероховатостью поверхности, по сравнению с шероховатостью стального трубопровода.

#### 4.2. Оценка капитальных затрат на закупку трубопроводов

Стандартный размер трубы составляет 12 метров, поэтому для прокладки 1000 м трубопровода потребуется закупка 84 труб, которые необходимо соединить между собой.

Для расчета стоимости закупки стальных трубопроводов был проведен анализ стоимости 1 погонного м трубы от поставщиков из открытых источников [31, 62, 64, 88]. Самую низкую стоимость предлагает компания ООО «ВосходСтальМетПром» – труба 114х6 Ст3сп (ГОСТ 8732-78)  $Dy100$  – 3849,00 руб./м; труба 168х6 Ст3сп (ГОСТ 8732-78)  $Dy150$  – 5499,00 руб./м [31].

На основе цен от компании ООО «ВосходСтальМетПром» рассчитаем стоимость закупки 1000 метров стальных трубопроводов:

– Стальной трубопровод  $Dy100$  из труб бесшовных горячедеформированных 114х6, Ст3сп (ГОСТ 8732-78), 1000 метров – стоимость 3 849 000 руб.;

– Стальной трубопровод  $Dy100$  из труб бесшовных горячедеформированных 168х6, Ст3сп (ГОСТ 8732-78), 1000 метров – стоимость 5 499 000 руб.

Стальные трубы соединяются между собой с помощью сварки, поэтому капитальные затраты на 1000 метров стального трубопровода будут рассчитываться по формуле (4.1):

$$C_{\text{кап.ст.}} = C_{\text{труб}} + C_{\text{электрод}}, \quad (4.1)$$

где  $C_{\text{труб}}$  – стоимость труб;

$C_{\text{электрод}}$  – стоимость электродов для сварки труб.

Сварка углеродистой конструкционной стали Ст3сп производится электродом УОНИ 13/55 [66]. Для сварки конструкции с толщиной стали 6 мм необходим электрод диаметром 4 мм [38].

Электрод УОНИ 13/55 относится к IV группе электродов, для которых коэффициент расхода составляет 1,7. Руководствуясь нормой ВСН 452-84 [32], при ручной дуговой сварке покрытыми электродами с соединением стыков типа С18 норма расхода электрода на 1м шва составит 0,975 кг. Для сварки 84 отрезков суммарные длины швов будут:

– для трубопровода 114х6 — 32 метра;

– для трубопровода 168х6 — 42,5 метра.

Таким образом, расход электродов составит:

– для трубопровода 114х6 — 31,2 кг;

– для трубопровода 168х6 — 41,5 кг.

Стоимость электрода Lincoln Electric УОНИ 13/55  $\varnothing$  4,0 мм составляет 260 руб./кг [79], поэтому затраты на электроды будут составлять:

– для трубопровода 114х6 — 8320,00 руб.;



– для трубопровода 168х6 — 10920,00 руб.

В результате, капитальные затраты на закупку стальных трубопроводов, рассчитанные по формуле (4.1) составят:

– Стальной трубопровод 114х6 Ду100 Ст3сп (ГОСТ 8732-78), 1000м – 3857320,00 руб.

– Стальной трубопровод 114х6 Ду150 Ст3сп (ГОСТ 8732-78), 1000м – 5509920,00 руб.

Для расчета капитальных затрат на закупку труб стальных, футерованных полиуретаном, были получены коммерческие предложения от компаний ООО «ПКФ «Уретан Тех-М» и АО «СОМЭКС». Стоимость включает затраты на производство 1000 метров трубопровода и метизов к ним (болты, гайки, шайбы). Сравнительные показатели по капитальным затратам приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Капитальные затраты на закупку стальных и футерованных полиуретаном трубопроводов

Диаметр и длина трубопровода	Стоимость руб., без НДС		
	Сталь Ст3сп (ГОСТ 8732-78)	Полиуретан СКУ-7Л	Полиуретан Е-83
Трубопровод Ду100, 1000 м	3 857 320,00	15 473 333,00	9 000 000,00
Трубопровод Ду150, 1000 м	5 509 920,00	22 715 000,00	11 750 000,00

Как видно из таблицы 4.4, капитальные затраты на закупку 1000 метров трубопровода, футерованного полиуретаном в 2-4 раза выше, чем стального.

### **4.3. Оценка эксплуатационных затрат на обслуживание трубопроводов**

Интенсивное гидроабразивное изнашивание трубопроводов при транспортировании закладочных гидросмесей влечет за собой повышенный расход труб. На основе экспериментов, проведенных на Джекказганском ГМК, установлено, что интенсивность гидроабразивного изнашивания стенок стальных трубопроводов при перекачивании закладочной смеси на основе

хвостов обогащения 15-18 часов в сутки составляет 2,5-3,0 мм/год, а срок службы трубопровода не превышает 1,7-2 года [34].

Высокую интенсивность изнашивания стальной трубы без футеровки подтверждают данные потери массы экспериментальных образцов Ст3-1, Ст3-2 и Ст-3, используемых в экспериментальных исследованиях проведенных в данной работе (Приложение Б).

Что касается гидроабразивного изнашивания трубопроводов с полиуретановой футеровкой, то результаты лабораторных исследований, проведенных в Санкт-Петербургском горном университете, показали, что интенсивность гидроабразивного износа полиуретановой поверхности труб минимальна в сравнении с гидроабразивным износом рабочей поверхности традиционных стальных труб без покрытия. Установлено, что толщина в 1 мм гидроабразивного износа трубопровода  $Dy50$  с полиуретановым покрытием внутренней поверхности наступает в течение 82210 часов. В связи с этим в затратах на эксплуатацию и техническое обслуживание трубопроводов с полиуретановым покрытием потеря массы труб из-за гидроабразивного изнашивания не учитывается [15]. Также производители ООО «ПКФ «Уретан Тех-М» и АО «СОМЭКС» предоставляют гарантию 10 лет на трубы, футерованные полиуретаном их производства.

Исходя из вышеизложенного проанализируем эксплуатационные затраты на замену изношенных трубопроводов за продолжительность работы закладочного комплекса в 10 лет (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Эксплуатационные затраты на замену изношенных трубопроводов за срок эксплуатации 10 лет

Диаметр и длина трубопровода	Стоимость руб., без НДС		
	Сталь Ст3сп (ГОСТ 8732-78)	Полиуретан СКУ-7Л	Полиуретан Е-83
Трубопровод $Dy100$ , 1000 м	15 429 280,00	0,00	0,00
Трубопровод $Dy150$ , 1000 м	22 039 680,00	0,00	0,00

Так как срок службы стального трубопровода составляет около 2 лет, то за 10 лет эксплуатации его необходимо будет закупить 4 раза для замены изношенного.

Замена изношенного трубопровода требует остановки закладочного комплекса, а также применения техники и труда рабочего персонала, что влечет за собой дополнительные расходы. Таким образом, мы можем сделать вывод, что 10-летняя эксплуатация стального трубопровода требует значительно больших материальных затрат, нежели трубопровода с полиуретановой футеровкой.

#### **4.4. Общая эффективность применения полиуретановой футеровки стальных трубопроводов**

Исходя из полученных значений стоимости капитальных и эксплуатационных затрат в разделах 4.2 и 4.3, суммарные расходы на первоначальную закупку и эксплуатацию трубопроводов в течение 10 лет работы закладочного комплекса составят (таблица 4.6):

Таблица 4.6 – Суммарные затраты на закупку и замену трубопроводов в течение 10 лет

Диаметр и длина трубопровода	Стоимость руб., без НДС		
	Сталь СтЗсп (ГОСТ 8732-78)	Полиуретан СКУ-7Л	Полиуретан Е-83
Трубопровод Ду100, 1000 м	19 333 500,00	15 473 333,00	9 000 000,00
Трубопровод Ду150, 1000 м	27 612 000,00	22 715 000,00	11 750 000,00

Одной из основных причин сомнений в целесообразности замены стальных трубопроводов на трубопроводы с полиуретановой футеровкой является стоимость их закупки и укладки. Капитальные затраты при использовании труб с полиуретановым покрытием выше в 2-4 раза, чем при использовании стальных труб. Однако, выполненный анализ эксплуатационных затрат на замену изношенных в процессе эксплуатации трубопроводов за период 10 лет показывает, использование трубопроводов с

полиуретановой футеровкой обеспечивает положительный экономический эффект. В случае использования трубопровода производства компании АО «СОМЭКС» с футеровкой полиуретаном Е-83 вместо традиционного стального трубопровода за 4 года эксплуатации обеспечивается полная окупаемость капитальных затрат. При использовании трубопровода производства компании ООО «ПКФ «Уретан Тех-М» с футеровкой полиуретаном СКУ-7Л окупаемость капитальных затрат наступит через 8 лет эксплуатации.

Оценка удельных потерь напора, проведенная разделе 4.1 показала, что применение трубопроводов с полиуретановой футеровкой также дает возможность увеличить дальность транспортирования гидросмеси благодаря меньшим гидравлическим сопротивлениям, вызванным шероховатостью поверхности, по сравнению со стальным трубопроводом.

#### **4.5. Выводы по главе 4**

1. Установлено, что при массовой концентрации гидросмеси 30% удельные потери напора в трубопроводах  $Dy100$  и  $Dy150$  с полиуретановой футеровкой меньше в среднем в 2-3 раза, в сравнении с потерями в стальной трубе без покрытия. На этапе проектирования гидротранспортной системы закладочного комплекса можно рекомендовать применение трубопроводов с полиуретановой футеровкой для увеличения как дальности транспортирования гидросмеси, так и её концентрации, благодаря снижению гидравлических сопротивлений, вызванных меньшей шероховатостью поверхности, по сравнению с шероховатостью стального трубопровода.

2. Закупочная стоимость стального трубопровода в 2-4 раза ниже, чем стального трубопровода, футерованного полиуретаном, а полную замену стального трубопровода из-за гидроабразивного износа необходимо производить каждые 2 года эксплуатации при том, что срок эксплуатации трубопровода с полиуретановой футеровкой составляет не менее 10 лет.

3. Суммарные затраты за 10 лет эксплуатации традиционных стальных трубопроводов СтЗпс (ГОСТ 8732-78) без футеровки  $Du100$  составляют приблизительно 19 млн. рублей против 9 млн. рублей в случае использования трубопровода с футеровкой полиуретаном марки Е-83 и 15,5 млн. рублей в случае использования трубопровода с футеровкой полиуретаном марки СКУ-7Л, который имеет наименьшую шероховатость поверхности.

4. Выполненный анализ эксплуатационных затрат на замену, изношенных в процессе эксплуатации стальных трубопроводов за период 10 лет показал, что использование трубопроводов с футеровкой полиуретаном экономически целесообразно. Оценка срока полной окупаемости капитальных затрат при использовании труб с футеровкой полиуретаном Е-83 составляет 4 года, с футеровкой полиуретаном СКУ-7Л – 8 лет.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации представлено новое технико-технологическое решение актуальной задачи – обоснован выбор значений параметров трубопроводов гидротранспортной системы, обеспечивающих снижение удельного сопротивления самотечному перемещению закладочной смеси в выработанное пространство, для повышения эксплуатационных характеристик совершенствуемых закладочных комплексов при проведение подземных работ.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. На основе анализа теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертационной работы определено, что твердеющая закладка гидросмесью является наиболее распространенной технологией заполнения подземных пустот, образующихся в результате добычи полезных ископаемых. Закладочная гидросмесь транспортируется в выработанное пространство по трубопроводам, которые являются элементами закладочного комплекса. Одним из приоритетных направлений повышения эксплуатационных характеристик транспортных трубопроводов закладочного комплекса является применение труб с полиуретановой футеровкой внутренней поверхности.

2. На основе проведенного теоретического исследования технологии твердеющей закладки выработанного пространства установлено, что величина удельных потерь напора потока гидросмеси в транспортном трубопроводе закладочного комплекса зависит от совокупности характеристик, определяющих внешнее и внутреннее сопротивление движению потока, а именно изменения шероховатости поверхности и содержания абразивных частиц в закладочной гидросмеси. Коэффициент гидравлических сопротивлений является линейной функцией абсолютной шероховатости внутренней поверхности трубопровода и увеличивается с

возрастанием соотношения абсолютной шероховатости и внутреннего диаметра русла. Потери напора на трение находятся в линейной зависимости от массовой концентрации гидросмеси.

3. На основе выполненных экспериментальных исследований изменения коэффициента гидравлических сопротивлений в исследуемых образцах труб при гидротранспорте закладочных смесей установлено, что применение полиуретановой футеровки рабочей поверхности трубопровода позволяет снизить в 20 раз величину её эквивалентной шероховатости за время приработки трубопровода в сравнении со стальным трубопроводом.

4. Результаты выполненных экспериментальных исследований по изменению потерь напора при гидротранспорте закладочных смесей показали, что применение полиуретановой футеровки рабочей поверхности трубопровода позволяет в 2 раза уменьшить коэффициент гидравлического сопротивления за время приработки трубопровода в сравнении со стальным трубопроводом.

5. Установленный тренд снижения шероховатости поверхности труб с полиуретановой футеровкой на 14,6% за время приработки и расчетные значения удельных потерь напора подтверждают эффективность применения трубопроводов с полиуретановой футеровкой внутренней поверхности в системах гидротранспорта закладочных комплексов при подземных горных работах

6. Разработаны практические рекомендации по выбору параметров трубопроводов с полиуретановой футеровкой для применения в системах гидротранспорта закладочных комплексов в соответствии с заданными характеристиками, которые нашли отражение в патенте на изобретение №2796635.

7. Выполненный анализ эксплуатационных затрат на замену, изношенных в процессе эксплуатации стальных трубопроводов за период 10 лет показал, что использование трубопроводов с футеровкой полиуретаном экономически целесообразно. Оценка срока полной окупаемости

капитальных затрат при использовании труб с футеровкой полиуретаном Е-83 составляет 4 года, с футеровкой полиуретаном СКУ-7Л – 8 лет.

8. Перспективное направление дальнейшего развития темы диссертации связано с обоснованием рациональных параметров системы гидротранспорта закладочного комплекса, позволяющего осуществлять подачу обезвоженных гидросмесей в удаленные выработки, а именно в определении зависимости изменения проходного сечения труб от концентрации и состава гидросмеси для поддержания минимума скорости, превышающей ее критическое значение, что позволит минимизировать потери напора потока закладочного материала, а также уменьшить приведенные затраты на проведение закладочных работ.



**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. 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.
2. Агафонов, В.В. Технология использования пространства горных выработок и очистных забоев для размещения отходов производства / В.В. Агафонов, А.Н. Иванов // ГИАБ. — 2010. — № 1. — С. 166-170.
3. Аглюков, Х.И. Гидрозакаладка на ЖГМК / Х.И. Аглюков, В.Д. Лаврик, У.А. Бакилов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. — 2009. — № 1. — С. 16-21.
4. Аглюков, Х.И. Устойчивость гидрозакаладочных панелей под поселком Жезказган / Х.И. Аглюков // ГИАБ. — 2008. — № 4. — С. 236-239.
5. Адигамаев, А.Э. Алгоритм оценки целесообразности применения системы разработки с закладкой выработанного пространства / А.Э. Адигамаев, П.А. Каунг, К.А. Головин, А.Б. Копылов // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2021. — № 2. — С. 121-137.
6. Александров, В.И. Определение потерь напора при гидротранспорте сгущенных пульп хвостов обогащения руд / В.И. Александров, М.А. Васильева // Инновации на транспорте и в машиностроении. Сборник трудов III международной научно-практической конференции: в 5 томах под редакцией В.В. Максарова. — 2015. — Т. 2. — С. 117-121.
7. Александров, В.И. Снижение энергоемкости гидравлического транспортирования гидросмеси при высоких концентрациях твердой фазы: дис. ... д-ра технич. наук: 05.05.06 / Александров Виктор Иванович. — СПб, 2000. — 358 с.
8. Александров, В.И. Удельная энергоемкость гидравлического транспортирования продуктов переработки минерального сырья / В.И.

Александров, И. Соброта // Записки Горного института. — 2015. — № 213. — С. 9-16.

9. Александров, В.И. Энергоемкость гидравлического транспортирования крупнодисперсных и мелкодисперсных гидросмесей / В.И. Александров, П.Н. Махараткин, С.Ю. Авксентьев // Известия вузов. Горный журнал. — 2012. — № 7. — С. 72-79.

10. Антоев, К.П. Исследование стойкости к гидроабразивному воздействию перспективных полимерных футеровочных материалов / К.П. Антоев, С.Н. Попов, Б.Н. Заровняев // Известия ТулГУ. Науки о Земле. — 2019. — № 1. — С. 185-191.

11. Анушенков, А.Н. Основы процессов производства и транспортирования закладочных смесей при подземной разработке месторождений полезных ископаемых: учеб. пособие / А.Н. Анушенков, А.Ю. Стовманенко, Е.П. Волков. — Красноярск: СФУ, 2015. — 209 с.

12. Анушенков, А.Н. Подземная геотехнология : учеб. пособие / А.Н. Анушенков, Б.А. Ахпашев, Е.П. Волков [и др.]. — Красноярск: СФУ, 2017. — 305 с.

13. Анушенков, А.Н. Производство закладочных работ. На примере Таштагольского подземного рудника: учеб. пособие / А.Н. Анушенков. — Красноярск: СФУ, 2016. — 136 с.

14. **Атрощенко, В.А.** Влияние гидроабразивного износа на ресурс насосного оборудования для перекачки хвостов обогащения / **В.А. Атрощенко**, Э.К. Абдулаев, А.И. Кужелев // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020. Сборник тезисов VII Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург. — 2020. — С. 32-36.

15. **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. – 2022. – №17-1. – С. 196-202.

16. **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. – 2022. – №17-2. – С. 299-305.

17. **Атрощенко, В.А.** Способы повышения срока службы деталей насосов в системах гидротранспорта хвостов обогащения железной руды / **В.А. Атрощенко** // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021. Сборник тезисов VIII Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург. — 2021. — С. 12-35.

18. Байконуров, О.А. Подземная разработка месторождений с закладкой / О.А. Байконуров, Л.А. Крупник, В.А. Мельников. АН КазССР. Каз. политехн. ин-т им. В.И. Ленина. — Алма-Ата: Наука, 1972. — 384 с.

19. Балах, Р.В. Разработка месторождений с закладкой хвостами обогащения / Р.В. Балах. АН КазССР, Ин-т горного дела. — Алма-Ата: Наука, 1977. — 231 с.

20. Борохович, А.И. Некоторые вопросы износа, расчета и конструирования углесосно-насосного оборудования / А.И. Борохович, И.И. Юрин, А.И. Никулин, В.А. Татьков. — Новокузнецк, — 1968. — 148 с.

21. Бранзбург, А. Пульповоды: от дармштадтского метода к дармштадтскому ресурсу / А. Бранзбург, В. Коврига, В. Пуце // Полимерные трубы. — 2015. — № 1(47). — С. 52-53.

22. Бронников, Д.М. Закладочные работы в шахтах: Справочник / Д. М. Бронников, М. Н. Цыгалов, М.И. Весков [и др.]. — М.: Недра, 1989. — 400 с.

23. 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.
24. 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.
25. 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. — 2022. — №15. — С. 93-98.
26. Ватлина, А.М. Обоснование параметров и режимов работы насосного оборудования комплекса получения закладочных смесей из текущих хвостов обогащения: дис. ... канд. технич. наук: 05.05.06 / Ватлина Анна Михайловна. — СПб, 2022. — 104 с.
27. Верхованцева, Т.В. Изучение влияния закладочных работ на сейсмический режим калийных рудников / Т.В. Верхованцева, Р.А. Дягилев // ГИАБ. — 2016. — № 12. — С. 222-224.
28. Волгина, Л.В. Влияние мелкодисперсных включений на расчет критической скорости двухфазного потока / Л.В. Волгина, М.Л. Медзвеля, О.Г. Чемерис // Вестник МГСУ. — 2014. — № 11. — С. 145-153.
29. 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. — Москва: Ин-т "Черметинформация", 1979. — 53 с.
30. Воробьев, А.С. Снижение энергозатрат трубопроводной системы при перекачке сгущенных гидросмесей хвостов обогащения полиметаллических руд на закладочные комплексы: дис. ... канд. технич. наук: 05.05.06 / Воробьев Алексей Сергеевич. — СПб, 2015. — 210 с.

31. ВосходСтальМетПром. Труба бесшовная [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://steel-ex.ru/truby/truba-goryachedeformirovannaya>.
32. ВСН 452-84 Производственные нормы расхода материалов в строительстве. Сварка трубопроводов из легированных сталей, автоматическая сварка под флюсом листовых конструкций, сварка стержней арматуры и закладных деталей, газовая резка [Электронный ресурс]. — М.: Минмонтажспецстрой СССР, 1986. — Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294846/4294846424.htm>.
33. Вяткин, А.П. Твердеющая закладка на рудниках / А. П. Вяткин, В. Г. Горбачев, В. А. Рубцов. — М.: Недра, 1983. — 168 с.
34. Гамбарьян, Л.Г. Износ и долговечность закладочных трубопроводов / Л.Г. Гамбарьян // Записки Ленинградского горного института. — 1988. — Т. 117.
35. 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.
36. 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.
37. ГОСТ 11012-2017 Пластмассы. Метод испытания на абразивный износ. — М.: Стандартинформ, 2017. — 11 с.
38. ГОСТ 14098-2014 Соединения сварные арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций. Типы, конструкции и размеры. — М.: Стандартинформ, 2015. — 40 с.
39. ГОСТ 19300-86 Профилографы-профилометры контактные. Типы и основные параметры. — М.: ИПК издательство стандартов, 1996. — 11 с.

40. ГОСТ 23509-79 (ИСО 4649-85) Резина. Метод определения сопротивления истиранию при скольжении по возобновляемой поверхности. — М.: ИПК издательство стандартов, 2001. — 11 с.
41. ГОСТ 25142-82 Шероховатость поверхности. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2018. — 16 с.
42. ГОСТ 55877-2013 (ИСО 9352:1995) Трубы и детали трубопроводов из реактопластов, армированных стекловолокном. Методы испытаний. Определение износостойкости внутренней поверхности. — М.: Стандартинформ, 2014. — 88 с.
43. ГОСТ 8.586.1-2005 (ИСО 5167-1:2003) Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования. — М.: Стандартинформ, 2007. — 48 с.
44. Демидов, Ю.В. Подземная разработка мощных рудных залежей / Ю. В. Демидов, В. Н. Аминов. — М.: Недра, 1991. — 204 с.
45. Джваршеишвили А.Г. Закладочное хозяйство шахт и рудников / А.Г. Джваршеншвили, В.А. Силагадзе, А.К. Инашвили, Ш.В. Шавгуладзе. — М.: Недра, 1978. — 280 с.
46. Добромыслов, А.Я. Таблицы для гидравлических расчетов трубопроводов из полимерных материалов, (том 2): пособие к СНиП 2.04.01-85; СНиП 2.04.03-85; СП 40-107-2003 / А.Я. Добромыслов. — М.: Изд-во ВНИИМП, 2004. — 128 с.
47. Долгий, И.Е. Обоснование параметров трубопроводного транспорта твердеющих смесей для условий Ярегского горно-химического комплекса / И.Е. Долгий, В.И. Власенко // Записки Горного института. — 2007. — Т. 172. — С. 125-131.
48. Дубцов, Н. Г. Защита системы гидротранспорта от гидроабразивного износа / Н. Г. Дубцов // Мелиорация и водное хозяйство: Материалы Всероссийской научно-практической конференции (Шумаковские чтения) с международным участием, Новочеркасск, 06–23

ноября 2018 года. Том Выпуск 16 Часть 1. – Новочеркасск: ООО "Лик", 2018. – С. 155-158.

49. Ермолович, Е.А. Дозакладка отработанных камер / Е.А. Ермолович // ГИАБ. — 2012. — № 3. — С. 13-15.

50. Ермолович, Е.А. Утилизация отходов ванадиевого производства в плотных смесях для закладки выработанного пространства / Е.А. Ермолович // ГИАБ. — 2011. — № 4. — С. 21-23.

51. Каплунов, Д.Р. Перспективы развития технологии закладки выработанного пространства при подземной разработке рудных месторождений / Д.Р. Каплунов, М.В. Рыльникова, Д.Н. Радченко // ГИАБ. — 2011. — № 12. — С. 5-10.

52. Коврига, В.В. Определение износа пластмасс с помощью единого показателя при его оценке различными методами / В.В. Коврига, В.Р. Гумен, В.В. Севастьянов, А.Л. Качалина // Пластические массы. — 2020. — № 7-8. — С. 21-22. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-7-8-21-22.

53. 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. — 2015. — № 5. — С. 252-259.

54. Кравченко, В.П. Применение твердеющей закладки при разработке рудных месторождений / В.П. Кравченко, В.В. Куликов. — М.: Недра, 1974. — 200 с.

55. Кротков, В.В. Особенности процесса гидрозакладки выработанного пространства алмазосодержащих трубок камерными питателями / В.В. Кротков // ГИАБ. — 2000. — № 5. — С. 92-94.

56. Крупник, Л.А. Закладочные смеси высокой плотности, их свойства и перспективы применения / Л.А. Крупник, Г.В. Соколов // ГИАБ. — 2005. — № 11. — С. 237-240.

57. 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.

58. Куликова, А.А. Применение хвостов обогащения в качестве закладки выработанного пространства рудников / А.А. Куликова, А.М. Ковалева // ГИАБ. — 2021. — № 2-1. — С. 144-154. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-21-0-144-154.

59. 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. — 2021. — № 3 (Специальный выпуск 5). — С. 3-10. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_3\_5\_3.

60. Лаутербах, Т. Закладка подземных пустот с помощью поршневых насосов / Т. Лаутербах // Глюкауф. — 2006. — № 2(3). — С. 40-44.

61. Леонова, Л.Б. Разработка составов и технологии закладочных смесей для горных выработок на основе техногенных материалов Урало-сибирского региона: автореф. ... дис. канд. техн. наук. 05.17.11 / Леонова Лейла Борисовна Екатеринбург. — 1992. — 21 с.

62. Линия металла СПб. Труба круглая бесшовная [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://linemet.ru/truba-besshovnaya>.

63. Макароничев, А.Г. Защита пульпопроводов от гидроабразивного износа / А.Г. Макароничев, С.В. Беляева // Неделя науки СПбПУ: Материалы научной конференции с международным участием. Инженерно-строительный институт, Санкт-Петербург, 19–24 ноября 2018 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. – С. 279-281.

64. Метинвест-сервис. Каталог продукции. Труба бесшовная [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://pkf-m.ru/truba-besshovnaya>.

65. Монтянова, А.Н. Специфические особенности закладочных работ на руднике «Мир» алмазодобывающей АК «Алроса» / А.Н. Монтянова, Д.С. Кириллов, И.В. Штауб, Е.В. Бильдушкинов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. — 2012. — № 4. — С. 10-14.



66. Нижнетагильский трубный завод Металлинвест. Справочник. Стали. Сталь СтЗпс [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.nttzm.ru/spravochnik/stali/stal-3ps>.

67. Носов, А.В. Комплексное использование доломитов при производстве твердеющих закладочных смесей / А.В. Носов, Т.Н. Черных, Л.Я. Крамар // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: сборник статей. Оренбург. — 2014. — С. 740-744.

68. Патент 2796635 Российская Федерация, МПК H01F 1/28, H01F 1/113, H01F 1/117. Магнитоактивный эластомер / Васильева М.А., **Атрощенко В.А.**, Строчилина П.С.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». — №2022120265; заявл. 25.07.2022; опубл. 29.05.2023, Бюл. №16.

69. Покровская, В.Н. Пути повышения эффективности гидротранспорта / В.Н. Покровская. — М.: Недра, 1972. — 161 с.

70. Покровская, В.Н. Трубопроводный транспорт в горной промышленности / В.Н. Покровская. — М.: Недра, 1985. — 192 с.

71. Продоус, О.А. Особенности гидравлического расчета самотечных сетей водоотведения с внутренними отложениями / О.А. Продоус, А.А. Малышева, И.А. Абросимова, А.Г. Челоненко // Вестник ТГАСУ. — 2022. — Т. 24 № 3. — С. 173-179. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-173-179.

72. Продоус, О.А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб из стали и серого чугуна с внутренними отложениями: справочное пособие, 1-е изд. / О.А. Продоус, А.А. Шипилов, П.П. Якубчик. — СПб-М.: Издательство Перо, 2021. — 242 с.

73. Продоус, О.А. Таблицы для гидравлического расчета труб напорных из полиэтилена: справочное пособие, 3-е изд., доп. / О.А. Продоус. — СПб: ООО "Свое издательство", 2017. — 243 с.

74. Райс, В.В. Определение параметров технологии с замораживаемой закладкой выработанного пространства при отработке ценных руд жильных месторождений в криолитозоне: дис. ... канд. технич. наук: 25.00.22 / Райс Виктор Владимирович. — СПб, 2019. — 215 с.

75. 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/FTPRPI20200515.

76. Рылова, И.А. Эквивалентная шероховатость напорных и безнапорных водоводов / И.А. Рылова, В.С. Боровиков // Вестник МГСУ. — 2013. — № 4. — С. 181-187.

77. Рыльникова, М.В. Особенности технологических и конструктивных решений по утилизации отходов добычи и переработки руд в выработанном пространстве рудников / М.В. Рыльникова, В.А. Ангелов, И.С. Туркин // Проблемы недропользования. — 2014. — № 2. — С. 127-134.

78. Сараскин, А.В. Технология закладки выработанного пространства на основе отходов обогащения руд / А.В. Сараскин, А.А. Гоготин // Горный журнал. — 2017. — № 9. — С. 41-45. DOI: 10.17580/gzh.2017.09.08.

79. Сварби. Lincoln Electric УОНИ 13/55 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://spb.svarbi.ru/cat/svarochnye-jelektrody/27850>.

80. Силин, Н.А. Гидротранспорт угля по трубам / Н.А. Силин, Ю.К. Витошин. — Киев: Изд-во АН УССР, 1964. — 88 с.

81. Скребнев, В.И. Исследование стойкости к гидроабразивному износу полимерных и стальных труб. Оценка основных параметров, влияющих на интенсивность износа гидротранспортных систем / В.И. Скребнев, С.Л. Сержан, Е.В. Калугина // Пластические массы. — 2020. — № 9-10. — С. 40-44. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-9-10-40-44.

82. Скребнев, В.И. Оценка работоспособности материалов для применения в качестве износостойкого слоя полимерных пульповодов / В.И. Скребнев, В.В. Битт, Е.В. Калугина, А.Н. Крючков // Пластические массы. — 2018. — № 7-8. — С. 56-59.
83. Смолдырев, А.Е. Гидро-пневмотранспорт / А.Е. Смолдырев. — М.: Металлургия, 1967. — 367 с.
84. Смолдырев, А.Е. О режимах и параметрах течения гидросмесей измельченных горных пород. / А.Е. Смолдырев // Известия вузов. Геология и разведка. — 1980. — № 1. — С. 122-127.
85. Смолдырев, А.Е. Технология и механизация закладочных работ / А.Е. Смолдырев. — Москва: Недра, 1974. — 327 с.
86. Смолдырев, А.Е. Трубопроводный транспорт. Изд.3., перераб. и доп. / А.Е. Смолдырев. — М.: Недра, 1980. — 293 с.
87. Смолдырев, А.Е. Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей / А.Е. Смолдырев, Ю.К. Сафонов. — М.: Машиностроение, 1973. — 208 с.
88. ТД Феррум. Трубы горячедеформированные бесшовные [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.metal-b2b.ru/razdel/truby/besshovnye/goryachedeformirovannye>.
89. Терехин, Е.П. Развитие гидротранспорта мело-глинистого шлама для мокрого способа производства цемента / Е.П. Терехин, И.С. Булгаков // ГИАБ. — 2018. — № 10. — С. 163-168. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-10-0-163-168.
90. Трайнис, В.В. Исследование и разработка методов расчета гидравлического транспортирования угля по трубопроводам в турбулентном и вязко-пластичном потоках: автореф. ... дис. д-ра техн. наук. / Трайнис Виулен Владимирович. — М., 1969. — 47 с.
91. Трайнис, В.В. Параметры и режимы гидравлического транспортирования угля по трубопроводам / В.В. Трайнис. — М.: Наука, 1970. — 192 с.

92. Угляница, А.В. О выборе способа экологической закладки пространства ликвидируемых подземных сооружений / А.В. Угляница, Т.Н. Санталова // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: сборник материалов XII международной научно-практической конференции, Кемерово, 22–23 ноября 2017 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2017. – С. 607.

93. 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.

94. Хайрутдинов, М.М. Подземная геотехнология с закладкой выработанного пространства: недостатки, возможности совершенствования / М.М. Хайрутдинов, И.К. Шаймярдянов // ГИАБ. — 2009. — № 1. — С. 240-250.

95. Шевелев, Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: справочное пособие, 6-е изд., доп. и перераб. / Ф.А. Шевелев, А.Ф. Шевелев. — М.: Стройиздат, 1984. — 116 с.

96. Шевелев, Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных, асбестоцементных, пластмассовых и стеклянных водопроводных труб: справочное пособие, 5-е изд., доп. / Ф.А. Шевелев. — М.: Стройиздат, 1973. — 112 с.

97. Adiansyah, J.S. A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies / J.S. Adiansyah, M. Rosano, S. Vink, G. Kei // Journal of Cleaner Production. — 2015. — № 108. — pp. 1050-1062. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.07.139.

98. 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.

99. Aleksandrov, V.I. Estimation of efficiency of hydrotransport pipelines polyurethane coating application in comparison with steel pipelines / V.I. Aleksandrov, M.A. Vasilyeva, I.B. Pomeranets // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. IPDME 2017. — 2017. — № 87. — pp. 022001. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022001.

100. Aleksandrov, V.I. Hydraulic transportation of thickened tailings of iron ore processing at Kachkanarsky GOK based on results of laboratory and pilot tests of hydrotransport system / V.I. Aleksandrov, M.A. Vasilyeva // Journal of Mining Institute. — 2018. — № 233. — pp. 471-479. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.471.

101. Alexandrov, V.I. Analysis of actual head losses in hydraulic transportation of WMS tailings along steel and polyurethane-lined slurry pipelines at Kachkanarsky GOK / V.I. Alexandrov, **V.A. Atroshchenko**, A.M. Vatlina // Obogashchenie rud. — 2021. — № 6. — pp. 53-58. DOI: 10.17580/or.2021.06.09.

102. Alexandrov, V.I. Effective parameters of tail processing of gold-bearing ore hydrotransport for Verninskaya processing factory / V.I. Alexandrov, A.V. Kopteva, S.L. Serzan // Key Engineering Materials. — 2020. — № 836. — pp. 25-35. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.836.25.

103. 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.

104. Alexandrov, V.I. Energy efficiency of hydraulic transportation of iron ore processing tailings at Kachkanarsky MPP / V.I. Alexandrov, S.A. Timukhin, P.N. Makharatkin // Journal of Mining Institute. — 2017. — № 225. — pp. 330-337. DOI: 10.18454/PMI.2017.3.330.

105. Alexandrov, V. The Kachkanarsky MCC iron ore processing tailings slurry hydraulic transport parameters / V. Alexandrov, I. Trufanova // 19th

International conference on transport and sedimentation of solid particles 24-27 september 2019, Cape Town, South Africa. — 2019. — pp. 57-65.

106. Asr, E.T. A review of studies on sustainable development in mining life cycle / E.T. Asr, R. Kakaie, M. Ataei, M.R.T. Mohammadi // *Journal of Cleaner Production*. — 2019. — № 229. — pp. 213-231. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.029.

107. **Atroshchenko, V.A.** Experimental hydrotransportation unit for testing material resistance of pipelines and parts of dredging pumps to hydroabrasive wear / **V. A. Atroshchenko**, S.Yu. Avksentiev, P.N. Makharatkin, I.S. Trufanova // *Obogashchenie rud.* — 2021. — № 3. — pp. 39-45. DOI: 10.17580/or.2021.03.07.

108. **Atroshchenko, V.A.** Increasing the efficiency of the transport pipelines of the stowing complex with the application of a polyurethane coating / **V. A. Atroshchenko**, V. I. Alexandrov // *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* — 2022. — № 10-1. — pp. 25-38. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_101\_0\_25.

109. Avksentiev, S.Yu. Influence of rheology on pressure losses in hydrotransport system of iron ore tailings / S.Yu. Avksentiev, P.N. Makharatkin // *Jr. of Industrial Pollution Control*. — 2017. — № 33(1). — pp. 741-748.

110. Belem, T. Mechanical behaviour of cemented paste backfill / T. Belem, M. Benzaazoua, B. Bussiere // *Montreal 2000: 53rd annual conference of the Canadian geotechnical society*. — 2000. — № 1. — pp. 373-380.

111. Bharathan, B. Pressure loss and friction factor in non-Newtonian mine paste backfill: Modelling, loop test and mine field data / B. Bharathan, M. McGuinness, S. Kuhar [et al.] // *Powder Technology*. — 2019. — № 344. — pp. 443-453. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.12.029.

112. Bloss, M.L. An operational perspective of mine backfill / M.L. Bloss // *Mine Fill 2014: Proceedings of the Eleventh International Symposium on Mining with Backfill*. Australian Centre for Geomechanics. — 2014. — pp. 15-30. DOI: 10.36487/ACG\_rep/1404\_0.2\_Bloss.

113. Clark, H.McI. Assessment of the erosion resistance of steels used for slurry handling and transport in mineral processing applications / H.McI. Clark, R.J. Llewellyn // *Wear*. — 2001. — № 250. — pp. 32-44.
114. Coffey, J.P. The benefits of integrating long-term tailings and mine plans / J.P. Coffey, J.D. Plunkett, A. Carneiro // *Paste 2021: 24th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*. Australian Centre for Geomechanics. — 2021. — pp. 165-176. DOI: 10.36487/ACG\_repo/2115\_15.
115. Cooke, R. Thickened and Paste Tailings Pipeline Systems: Design Procedure – Part 1 / R. Cooke // *Paste 2006: Proceedings of the Ninth International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. Australian Centre for Geomechanics. — 2006. — pp.371-381. DOI: 10.36487/ACG\_repo/663\_32.
116. Csizmadia, P. Predicting the friction factor in straight pipes in the case of Bingham plastic and the power-law fluids by means of measurements and CFD simulation / P. Csizmadia, C. Hos // *Periodica polytechnica*. — 2013. — № 57 (1-2). — pp. 79-83. DOI: 10.3311/PPch.2174.
117. DIN 52108-2010 Testing of inorganic non-metallic materials - Wear test using the grinding wheel according to Boehme - Grinding wheel method. Deutsches Institut fur Normung e. V., 2010. – 10p.
118. DIN EN 295-3 Vitriified clay pipe systems for drains and sewers - Part 3: Test methods. –Deutsches Institut fur Normung e. V., 2012. – 44p.
119. Gao, R. Research on the fluid characteristics of cemented backfill pipeline transportation of mineral processing tailings / R. Gao, K. Zhou, Y. Zhou, C. Yang // *Alexandria Engineering Journal*. — 2020. — № 59(6). — pp. 4409-4426. DOI: 10.1016/j.aej.2020.07.047.
120. Helinski, M. An effective stress approach to modelling mine backfilling / M. Helinski, M. Fahey, A.B. Fourie // *CIM Bulletin*. — 2007. — № 100 (1103). — pp. 1-8.
121. Horn, A. Paste fill delivery/distribution failures – causes, costs and mitigation/prevention / A. Horn, E.G. Thomas // *Mine Fill 2014: Proceedings of the Eleventh International Symposium on Mining with Backfill*. Australian Centre

for Geomechanics. — 2014. — pp. 243-247. DOI: 10.36487/ACG\_rep/1404\_18\_Thomas.

122. Iwai, Y. Slurry wear properties of pump lining materials / Y. Iwai, K. Nambu // *Wear*. — 1997. — № 210 (1997). — pp. 211-219.

123. Javadi, S. Paste and Thickened Tailings Transportation Design Aspects Overview / S. Javadi, B. Pirouz, P. Slatter // *Paste 2020: 23rd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*. Gecamin Publications. — 2020. — pp. 1-10. DOI: 10.36487/ACG\_repo/2052\_93.

124. Jones, L.C. Low angle scouring erosion behaviour of elastomeric materials / L.C. Jones // *Wear*. — 2011. — № 271. — pp. 1411-1417. DOI: 10.1016/j.wear.2010.12.057.

125. Kuskildin, R.B. Method of accelerated industrial testing of hydroabrasive wear of polymer coatings of steel pipes / R.B. Kuskildin, A.M. Vatlina // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2021. — № 1728. — pp. 012029. DOI: 10.1088/1742-6596/1728/1/012029.

126. Lakous, E. Modern polyethylenes for wear and scaling applications / E. Lakous // *Paste 2018: Proceedings of the 21st International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. Australian Centre for Geomechanics. — 2018. — pp. 493-504. DOI: 10.36487/ACG\_rep/1805\_41\_Lakous.

127. Lee, C. Co-disposal of waste rock with backfill / C. Lee, F. Gu // *UMT 2017: Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology*. Australian Centre for Geomechanics. — 2017. — pp. 353-362. DOI: 10.36487/ACG\_rep/1710\_27\_Lee.

128. Liu, X. Friction losses of classified tailings slurry based on loop pipe testing / X. Liu, Z. Zhao, G. Wang, M. Huang // *Paste 2017: Proceedings of the 20th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. University of Science and Technology Beijing. — 2017. — pp. 134-139. DOI: 10.36487/ACG\_rep/1752\_15\_Liu.

129. Lu, H. A new procedure for recycling waste tailings as cemented paste backfill to underground stopes and open pits / H. Lu, C. Qi, Q. Chen [et al.] //



Journal of Cleaner Production. — 2018. — № 188. — pp. 601-612. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.041.

130. Pearce, R.T. Steel wire reinforced composite polyethylene pipe: the new technology for paste reticulation / R.T. Pearce, M.B. Revell // Paste 2021: 24th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings. Australian Centre for Geomechanics. — 2021. — pp. 287-298. DOI: 10.36487/ACG\_repo/2115\_24.

131. Pullum, L. Pipelining Tailings, Pastes and Backfill / L. Pullum // Paste 2007: Proceedings of the Tenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Australian Centre for Geomechanics. — 2007. — pp. 113-127.

132. Pullum, L. The Ups and Downs of Paste Transport / L. Pullum, L.J.W. Graham, M. Rudman [et al.] // Paste 2006: Proceedings of the Ninth International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Australian Centre for Geomechanics. — 2006. — pp. 395-402. DOI: 10.36487/ACG\_repo/663\_34.

133. Qi, C. Pressure drop in pipe flow of cemented paste backfill: Experimental and modeling study / C. Qi, Q. Chen, A. Fourie [et al.] // Powder Technology. — 2018. — № 333. — pp. 9-18. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.03.070.

134. Revell, M.B. Producing paste from all materials / M.B. Revell // Mine Fill 2014: Proceedings of the Eleventh International Symposium on Mining with Backfill. Australian Centre for Geomechanics. — 2014. — pp. 217-230. DOI: 10.36487/ACG\_rep/1404\_16\_Revell.

135. Sare, I.R. Wear-resistant metallic and elastomeric materials in the mining and mineral processing industries — an overview / I.R. Sare, J.I. Mardel, A.J. Hill // Wear. — 2001. — № 250. — pp. 1-10. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00622-6.

136. Slade, N.M. Paste backfill — adding value to underground mining / N.M. Slade // Paste 2010: Proceedings of the Thirteenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Australian Centre for Geomechanics. — 2010. — pp. 99-109. DOI: 10.36487/ACG\_rep/1063\_9\_Slade.

137. Slatter, P.T. Transitional and turbulent flow of non-newtonian slurries in pipes: thesis ... PhD / Paul Thomas Slatter. — Cape Town, 1995. — 314 p.
138. Stone, D. The evolution of paste for backfill / D. Stone // Mine Fill 2014: Proceedings of the Eleventh International Symposium on Mining with Backfill. Australian Centre for Geomechanics. — 2014. — pp. 31-38. DOI: 10.36487/ACG\_rep/1404\_0.3\_Stone.
139. Tillman, K. Some practical aspects of downtime and their causes in the paste plant at Zinkgruvan mine, South-Central Sweden / K. Tillman // Paste 2006: Proceedings of the Ninth International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Australian Centre for Geomechanics. — 2006. — pp. 359-367. DOI: 10.36487/ACG\_repo/663\_31.
140. Treinen, J.M. Paste backfill design case study — Efemcukuru project / J.M. Treinen, R. Cooke, D. Sutherland // Paste 2010: Proceedings of the Thirteenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Australian Centre for Geomechanics. — 2010. — pp. 209-216. DOI: 10.36487/ACG\_rep/1063\_18\_Treinen.
141. Vasilyeva, M.A. Analysis of influence of pipeline roughness dispersion on energy consumption during fluid transportation / M.A. Vasilyeva, A.A. Volchikhina // Journal of Physics: Conference Series. — 2018. — № 1118. — pp. 012047. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012047.
142. White, A. Pipeline wear solution at Kidd Mine: energy absorbent ceramic composites / A. White, M. McGuinness, V. Newman // Paste 2013: Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Australian Centre for Geomechanics. — 2013. — pp. 559-566. DOI: 10.36487/ACG\_rep/1363\_43\_White.
143. Wu, A.X. Development and challenge of paste technology in China / A.X. Wu, H. Cheng, Y. Yang, L. Zhang // Paste 2017: Proceedings of the 20th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. University of Science and Technology Beijing. — 2017. — pp. 2-11. DOI: 10.36487/ACG\_rep/1752\_01\_Wu.

144. Wu, A.X. Friction losses of cemented unclassified iron tailings slurry based on full-scale pipe-loop test / A.X. Wu, Z.E. Ruan, Y.J. Shao [et al.] // *Paste 2019: Proceedings of the 22nd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*. Australian Centre for Geomechanics. — 2019. — pp. 571-578. DOI: 10.36487/ACG\_rep/1910\_44\_Ruan.

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. Wu, A.X. The application of the cemented thickened/paste tailings backfill with large flow capacity in Chinese iron mines / A.X. Wu, X.X. Miao, H.J. Wang [et al.] // *Mine Fill 2014: Proceedings of the Eleventh International Symposium on Mining with Backfill*. Australian Centre for Geomechanics. — 2014. — pp. 473-479. DOI: 10.36487/ACG\_rep/1404\_38\_Wu.

147. Xie, Y. Applications of elastomers in slurry transport / Y. Xie, J. Jiang, Md.A. Islam // *Wear*. — 2021. — № 477. — pp. 203773. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203773.

148. Xie, Y. Elastomers and plastics for resisting erosion attack of abrasive/erosive slurries / Y. Xie, J. Jiang, Md.A. Islam // *Wear*. — 2019. — № 426-427. — pp. 612-619. DOI: 10.1016/j.wear.2019.01.123.

149. Xie, Y. Wear resistance of materials used for slurry transport / Y. Xie, J. Jiang, K.Y. Tufa, S. Yick // *Wear*. — 2015. — № 332-333. — pp. 1104-1110. DOI: 10.1016/j.wear.2015.01.005.

150. Yabuki, A. The anti-slurry erosion properties of polyethylene for sewerage pipe use / A. Yabuki, K. Sugita, M. Matsumura [et al.] // *Wear*. — 2000. — № 240. — pp. 52-58.

151. 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. — 2020. — № 247. — pp. 119590. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119590.

152. Zhang, P. Large scale backfill technology and equipment / P. Zhang, H.Y. Li, S.H. Shi // Mine Fill 2014: Proceedings of the Eleventh International Symposium on Mining with Backfill. Australian Centre for Geomechanics. — 2014. — pp. 73-79. DOI: 10.36487/ACG\_rep/1404\_04\_Zhang.

## СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА

### ***РИСУНКИ:***

Рисунок 1.1 – Схема разработки наклонными слоями с механической закладкой с использованием ПДМ на руднике «Локербай»;

Рисунок 1.2 – Схема разработки горизонтальными слоями с гидравлической закладкой и бетонным настилом;

Рисунок 1.3 – Принципиальная технологическая схема закладочного комплекса литой смеси;

Рисунок 1.4 – Трубы, используемые для транспортировки закладочных гидросмесей;

Рисунок 1.5 – а – конструкция полиэтиленовой трубы, армированной стальной проволокой (ПЭТАС); б – процесс намотки стальной проволоки на трубу;

Рисунок 1.6 – Сравнительные потери объема материалов при истирании на барабане от базовой линии 100% - СВМПЭ ( $3,5 \times 10^6$  г/моль);

Рисунок 1.7 – Ударная прочность материалов по Изоду (ISO 180, ISTM D256);

Рисунок 1.8 – Потеря массы образцов после испытания на истирание;

Рисунок 1.9 – Весодозатор непрерывного действия СБ-71В;

Рисунок 2.1 – Схема сил, действующих на частицу твердого материала в потоке;

Рисунок 2.2 – График зависимости критической скорости гидросмеси от среднего диаметра твердых частиц;

Рисунок 2.3 – График зависимости критической скорости тонкодисперсной гидросмеси от объемной концентрации твердого;

Рисунок 2.4 – Типы профилометров;

Рисунок 2.5 – а – естественная шероховатость; б – эквивалентная шероховатость;

Рисунок 3.1 – Схема экспериментального гидротранспортного стенда;

Рисунок 3.2 – Общий вид экспериментального стенда;

Рисунок 3.3 – Контрольно-измерительные приборы экспериментального гидротранспортного стенда: а – весы AND DL-5000; б – электронное реле давлений Wika PSD-4; в – ультразвуковой расходомер Portaflow D550; г – контактный профилометр Surftest SJ-210;

Рисунок 3.4 – Чертеж экспериментального образца трубы с полиуретановой футеровкой;

Рисунок 3.5 – Общий вид экспериментальных образцов труб;

Рисунок 3.6 – Общий вид установки для оценки шероховатости образцов труб;

Рисунок 3.7 – Спектрограммы начальных шероховатостей внутренних поверхностей экспериментальных образцов труб, замеренных по условной линии А: а – образец Р1-3; б – образец Р2-3; в – образец Р3-3; г – образец Ст3-3;

Рисунок 3.8 – Состояние внутренней поверхности экспериментальных образцов труб после наработки 600 ч при массовой концентрации гидросмеси – 30%: а – образец Р1-3; б – образец Р2-3; в – образец Р3-3; г – образец Ст3-3;

Рисунок 3.9 – Спектрограммы установившихся шероховатостей внутренних поверхностей экспериментальных образцов труб после 600 ч наработки при массовой концентрации гидросмеси – 30%, замеренных по условной линии А: а – образец Р1-3; б – образец Р2-3; в – образец Р3-3; г – образец Ст3-3;

Рисунок 3.10 – Изменение шероховатости  $Ra$  исследуемых образцов труб от времени наработки  $t_{\text{раб}}$  (массовая концентрация гидросмеси  $\omega_{\text{ТВ}}=10\%$ );

Рисунок 3.11 – Изменение шероховатости  $Ra$  исследуемых образцов труб от времени наработки  $t_{\text{раб}}$  (массовая концентрация гидросмеси  $\omega_{\text{ТВ}}=20\%$ );

Рисунок 3.12 – Изменение шероховатости  $Ra$  исследуемых образцов труб от времени наработки  $t_{\text{раб}}$  (массовая концентрация гидросмеси  $\omega_{\text{ТВ}}=30\%$ );

Рисунок 3.13 – Зависимость коэффициента относительной шероховатости  $\varepsilon$  рабочей поверхности трубы от массовой концентрации гидросмеси;

Рисунок 3.14 – Коэффициент гидравлических сопротивлений  $\lambda$  стальных труб и труб с полиуретановой футеровкой при массовой концентрации гидросмеси 10%, 20% и 30%;

Рисунок 3.15 – Зависимость удельных потерь напора в трубопроводах от массовой концентрации закладочной гидросмеси;

Рисунок В.1 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца трубы  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой марки СКУ-7Л от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 10%;

Рисунок В.2 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца трубы  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой марки СКУ-7Л от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 20%;

Рисунок В.3 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца трубы  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой марки СКУ-7Л от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 30%;

Рисунок В.4 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца трубы  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой марки Е-83 от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 10%;

Рисунок В.5 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца трубы  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой марки Е-83 от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 20%;

Рисунок В.6 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца трубы  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой марки Е-83 от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 30%;

Рисунок В.7 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца трубы  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой марки N-802 от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 10%;

Рисунок В.8 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца трубы  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой марки N-802 от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 20%;

Рисунок В.9 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца трубы  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой марки N-802 от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 30%;

Рисунок В.10 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца стальной трубы  $Dy50$  Ст3 (ГОСТ 10704-91) без футеровки от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 10%;

Рисунок В.11 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца стальной трубы  $Dy50$  Ст3 (ГОСТ 10704-91) без футеровки от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 20%;

Рисунок В.12 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца стальной трубы  $Dy50$  Ст3 (ГОСТ 10704-91) без футеровки от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 30%.

### **ТАБЛИЦЫ:**

Таблица 1.1 – Соотношения гранулометрического состава шихты из дробленых пород для возведения закладочного массива с достаточной плотностью;



Таблица 1.2 – Способы возведения закладочных массивов и их характеристики в соответствии с видом;

Таблица 1.3 – Прочностные характеристики стальных труб;

Таблица 1.4 – Результаты испытаний на изнашивание образцов из полиэтилена;

Таблица 1.5 – Результаты испытаний образцов из различных материалов по стандарту EN 295;

Таблица 1.6 – Результаты акустических съемок скважины с керамической футеровкой от поверхности до глубины 487 м под землей после заполнения 3,48 млн. тонн закладочной смеси;

Таблица 3.1 – Средний гранулометрический состав гидросмеси;

Таблица 3.2 – Характеристики экспериментальных образцов труб  $Dy50$ ;

Таблица 3.3 – Средние значения параметра шероховатости  $Ra$  внутренних поверхностей исследуемых образцов в зависимости от времени наработки и массовой концентрации гидросмеси;

Таблица 3.4 – Значения параметра установившейся шероховатости  $Ra$  и значения эквивалентной шероховатости  $K_{\Sigma}$  поверхностей исследуемых образцов труб;

Таблица 3.5 – Коэффициент относительной шероховатости поверхности стальных труб и труб с полиуретановым покрытием;

Таблица 3.6 – Коэффициенты гидравлических сопротивлений внутренней поверхности стальных и труб с полиуретановой футеровкой внутренней поверхности;

Таблица 3.7 – Удельные потери напора для трубопровода  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой СКУ-7Л в зависимости от времени эксплуатации и массовой концентрации гидросмеси;

Таблица 3.8 – Удельные потери напора для трубопровода  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой Е-83 в зависимости от времени эксплуатации и массовой концентрации гидросмеси;

Таблица 3.9 – Удельные потери напора для трубопровода  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой N-802 в зависимости от времени эксплуатации и массовой концентрации гидросмеси;

Таблица 3.10 – Удельные потери напора для стального трубопровода  $Dy50$  Ст3 (ГОСТ 10704-91) без футеровки в зависимости от времени эксплуатации и массовой концентрации гидросмеси;

Таблица 4.1 – Расчетные значения коэффициента относительной шероховатости  $\epsilon$  для трубопроводов  $Dy100$  и  $Dy150$ ;

Таблица 4.2 – Расчетные значения коэффициента гидравлических сопротивлений  $\lambda$  для трубопроводов  $Dy100$  и  $Dy150$ ;

Таблица 4.3 – Расчетные значения удельных потерь напора  $I$  при гидротранспорте закладочной смеси со средней скоростью  $0,7$  м/с;

Таблица 4.4 – Капитальные затраты на закупку стальных и футерованных полиуретаном трубопроводов;

Таблица 4.5 – Эксплуатационные затраты на замену изношенных трубопроводов за срок эксплуатации 10 лет;

Таблица 4.6 – Суммарные затраты на закупку и замену трубопроводов в течение 10 лет;

Таблица А.1 – Показатели систем разработки с закладкой на рудниках;

Таблица Б.1 – Результаты замеров шероховатости  $R_a$  и массы экспериментальных образцов стальных труб с полиуретановой футеровкой  $Dy50$  марки СКУ-7Л;

Таблица Б.2 – Результаты замеров шероховатости  $R_a$  и массы экспериментальных образцов стальных труб с полиуретановой футеровкой  $Dy50$  марки Е-83;

Таблица Б.3 – Результаты замеров шероховатости  $R_a$  и массы экспериментальных образцов стальных труб с полиуретановой футеровкой  $Dy50$  марки N-802;

Таблица Б.4 – Результаты замеров шероховатости Ra и массы экспериментальных образцов стальных труб Ду50 Ст3 (ГОСТ 10704-91) без футеровки.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Показатели систем разработки с закладкой на рудниках

Таблица А.1 – Показатели систем разработки с закладкой на рудниках [11, 23].

Рудник	Система разработки	Тип закладки	Компоненты ЛТС	Потери, %	Разубоживание, %	Фактическая прочность закладки, МПа	Производительность ЗК, т/ч
Комсомольский (Норильск)	Камерно-целиковая, горизонтальные слои	Твердеющая	цемент, клинкер, ангидрид, шлак, песок, дробленая порода, вода	1,1	7,0	8,0	300
Октябрьский (Норильск)	Горизонтальные слои	Твердеющая	цемент, клинкер, ангидрид, шлак, песок, дробленая порода, вода	0,5	6,3	3,5-8,0	300
Маяк (Норильск)	Камерно-целиковая, сплошная камерная	Твердеющая	цемент, клинкер, ангидрид, шлак, песок, дробленая порода, вода	1,2-3,0	16,8	6,0-10,0	150
Гайский (Гай)	Этажно-камерная	Твердеющая	цемент, шлак, песок, вода	4,5	14,0	30,0-35,0	80
Текели (Текели, Казахстан)	Камерно-целиковая, этажно-камерная	Твердеющая	цемент, глина, песок, пластификатор, вода	4,0	10,4	2,3-7,8	175
Красногвардейский (Красноуральск)	Этажно-камерная, слюевая	Твердеющая	цемент, шлак, песок, вода	3,0-5,0	11,9	4,2-5,6	20
Восточный (Жезказган, Казахстан)	Камерно-целиковая	Твердеющая	цемент, хвосты обогащения, дробленая порода, вода	1,2-10,7	1,4-9,1	4,3	80
Яковлевский (Белгород, Курск)	Горизонтальные слои	Твердеющая	цемент, песок, щебень, хвосты, шлак, вода	3,0	1,9-12,3	2,0-10,0	-
Каула-Котсельваара (Никель)	Камерно-целиковая, горизонтальные слои	Твердеющая, сухая	цемент, хвосты обогащения, песок, вода	6,5-11,6	15,0-20,0	1,2-3,5	15-20

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Результаты замеров шероховатости и массы экспериментальных образцов труб

Таблица Б.1 – Результаты замеров шероховатости  $Ra$  и массы экспериментальных образцов стальных труб с полиуретановой футеровкой  $Dy50$  марки СКУ-7Л

Наименование изделия	Массовая концентрация гидросмеси $\omega_{ТВ}$ , %	Наработка, ч	Шероховатость поверхности на заданной линии замера						Среднее значение $Ra$ , мкм	Масса, г
			Сторона А, мкм			Сторона С, мкм				
			А1	А2	А3	С1	С2	С3		
Труба, футерованная $Dy50$ (образец Р1-1)	10	0	0,260	0,131	0,178	0,336	0,218	0,147	<b>0,212</b>	3186
		100	0,224	0,158	0,169	0,303	0,194	0,161	<b>0,202</b>	3185
		200	0,195	0,146	0,202	0,199	0,173	0,188	<b>0,184</b>	3185
		300	0,154	0,149	0,138	0,182	0,206	0,196	<b>0,171</b>	3185
		400	0,179	0,165	0,171	0,166	0,233	0,119	<b>0,172</b>	3185
		500	0,132	0,159	0,118	0,126	0,216	0,193	<b>0,157</b>	3185
		600	0,158	0,167	0,122	0,105	0,249	0,192	<b>0,166</b>	3185
Труба, футерованная $Dy50$ (образец Р1-2)	20	0	0,229	0,138	0,183	0,205	0,223	0,332	<b>0,218</b>	3171
		100	0,153	0,198	0,225	0,158	0,161	0,277	<b>0,195</b>	3170
		200	0,189	0,181	0,204	0,186	0,195	0,176	<b>0,189</b>	3170
		300	0,144	0,146	0,152	0,175	0,244	0,158	<b>0,170</b>	3169
		400	0,127	0,195	0,139	0,182	0,201	0,131	<b>0,163</b>	3169
		500	0,140	0,197	0,148	0,173	0,183	0,161	<b>0,167</b>	3169
		600	0,132	0,165	0,113	0,218	0,197	0,139	<b>0,161</b>	3169
Труба, футерованная $Dy50$ (образец Р1-3)	30	0	0,225	0,210	0,204	0,153	0,269	0,226	<b>0,215</b>	3174
		100	0,163	0,159	0,168	0,173	0,317	0,178	<b>0,193</b>	3172
		200	0,149	0,193	0,180	0,216	0,251	0,194	<b>0,197</b>	3172
		300	0,178	0,152	0,191	0,150	0,234	0,169	<b>0,179</b>	3172
		400	0,219	0,137	0,176	0,185	0,163	0,201	<b>0,180</b>	3172
		500	0,192	0,176	0,164	0,171	0,180	0,156	<b>0,173</b>	3172
		600	0,188	0,142	0,133	0,147	0,203	0,176	<b>0,165</b>	3172

Таблица Б.2 – Результаты замеров шероховатости  $Ra$  и массы экспериментальных образцов стальных труб с полиуретановой футеровкой  $Dy50$  марки Е-83

Наименование изделия	Массовая концентрация гидросмеси $\omega_{ТВ}$ , %	Наработка, ч	Шероховатость поверхности на заданной линии замера						Среднее значение $Ra$ , мкм	Масса, г
			Сторона А, мкм			Сторона С, мкм				
			А1	А2	А3	С1	С2	С3		
Труба, футерованная $Dy50$ (образец P2-1)	10	0	1,529	1,205	1,781	1,830	0,997	1,618	<b>1,493</b>	2907
		100	1,833	1,370	1,576	1,712	1,264	1,391	<b>1,524</b>	2905
		200	1,438	1,106	1,723	1,545	1,253	1,467	<b>1,422</b>	2904
		300	2,057	0,914	1,198	1,665	0,807	1,029	<b>1,278</b>	2905
		400	1,545	1,142	1,064	1,591	0,970	1,552	<b>1,311</b>	2904
		500	1,347	0,893	1,249	1,736	0,918	1,462	<b>1,268</b>	2905
		600	1,216	1,261	1,170	1,676	0,898	1,238	<b>1,243</b>	2905
Труба, футерованная $Dy50$ (образец P2-2)	20	0	1,578	1,357	1,123	2,261	1,344	1,012	<b>1,446</b>	2886
		100	1,643	1,101	1,454	1,628	1,261	1,515	<b>1,434</b>	2885
		200	2,231	1,033	1,067	1,581	1,489	0,766	<b>1,361</b>	2885
		300	1,355	1,219	1,106	1,325	1,211	1,419	<b>1,273</b>	2885
		400	1,176	1,089	1,251	1,386	1,190	1,215	<b>1,218</b>	2884
		500	2,219	0,971	1,275	1,239	0,783	1,074	<b>1,260</b>	2884
		600	1,788	0,833	1,428	1,632	0,819	0,913	<b>1,236</b>	2884
Труба, футерованная $Dy50$ (образец P2-3)	30	0	1,613	1,097	1,342	1,586	1,415	1,539	<b>1,432</b>	2949
		100	1,821	1,224	1,503	1,417	1,292	1,486	<b>1,457</b>	2948
		200	2,313	0,851	1,794	1,448	0,848	0,878	<b>1,355</b>	2947
		300	1,192	1,374	1,232	1,489	1,356	1,237	<b>1,313</b>	2947
		400	1,236	1,172	1,366	1,401	1,237	1,353	<b>1,294</b>	2947
		500	1,148	1,365	1,542	1,346	1,084	1,171	<b>1,276</b>	2947
		600	1,152	1,217	1,309	1,227	1,268	1,361	<b>1,256</b>	2947

Таблица Б.3 – Результаты замеров шероховатости  $Ra$  и массы экспериментальных образцов стальных труб с полиуретановой футеровкой  $Du50$  марки N-802

Наименование изделия	Массовая концентрация гидросмеси отв, %	Наработка, ч	Шероховатость поверхности на заданной линии замера						Среднее значение $Ra$ , мкм	Масса, г
			Сторона А, мкм			Сторона С, мкм				
			A1	A2	A3	C1	C2	C3		
Труба, футерованная $Du50$ (образец P3-1)	10	0	2,937	2,141	2,369	3,955	2,832	1,613	<b>2,641</b>	2262
		100	3,061	2,252	2,331	3,859	2,417	1,646	<b>2,594</b>	2262
		200	2,156	2,789	1,246	5,091	1,229	2,326	<b>2,473</b>	2261
		300	2,690	1,832	2,256	3,812	2,461	1,183	<b>2,372</b>	2261
		400	2,234	2,118	2,043	3,647	2,292	1,335	<b>2,278</b>	2261
		500	2,669	1,295	2,327	4,214	1,958	1,242	<b>2,284</b>	2261
		600	2,542	1,573	2,208	3,589	2,361	1,594	<b>2,311</b>	2260
Труба, футерованная $Du50$ (образец P3-2)	20	0	2,174	3,257	4,314	1,521	2,476	2,278	<b>2,670</b>	2283
		100	1,823	3,331	3,956	1,677	2,579	2,522	<b>2,648</b>	2283
		200	2,025	3,323	4,805	2,286	1,534	0,778	<b>2,459</b>	2282
		300	1,650	3,042	4,103	1,437	2,488	2,171	<b>2,482</b>	2282
		400	1,685	2,834	4,026	1,238	2,320	2,177	<b>2,380</b>	2281
		500	1,970	2,875	4,661	1,105	1,643	1,402	<b>2,276</b>	2281
		600	1,522	2,941	3,928	1,149	2,193	2,074	<b>2,301</b>	2281
Труба, футерованная $Du50$ (образец P3-3)	30	0	2,843	3,754	0,786	1,975	4,367	1,887	<b>2,602</b>	2269
		100	1,343	3,031	1,686	2,615	4,439	2,188	<b>2,550</b>	2267
		200	1,316	2,983	2,380	2,224	4,575	1,847	<b>2,554</b>	2267
		300	1,315	2,845	2,298	2,176	3,531	2,087	<b>2,375</b>	2266
		400	1,879	3,083	0,790	0,859	4,881	2,235	<b>2,288</b>	2266
		500	1,599	2,956	1,383	1,481	4,407	2,118	<b>2,324</b>	2266
		600	1,328	2,705	1,740	2,007	4,112	1,866	<b>2,293</b>	2266

Таблица Б.4 – Результаты замеров шероховатости  $Ra$  и массы экспериментальных образцов стальных труб  $Dy50$  Ст3 (ГОСТ 10704-91) без футеровки

Наименование изделия	Массовая концентрация гидросмеси $\omega_{ТВ}$ , %	Наработка, ч	Шероховатость поверхности на заданной линии замера						Среднее значение $Ra$ , мкм	Масса, г
			Сторона А, мкм			Сторона С, мкм				
			A1	A2	A3	C1	C2	C3		
Труба стальная $Dy50$ , (образец Ст3-1)	10	0	9,523	9,036	7,193	9,273	9,208	7,672	<b>8,651</b>	2394
		100	10,981	13,149	12,364	10,716	11,893	8,977	<b>11,347</b>	2378
		200	11,369	12,815	13,107	12,969	13,831	14,344	<b>13,073</b>	2369
		300	14,752	16,231	13,617	15,748	17,442	16,881	<b>15,779</b>	2355
		400	16,884	18,106	14,289	13,923	19,894	16,546	<b>16,607</b>	2341
		500	16,525	16,939	14,166	14,487	15,753	13,184	<b>15,176</b>	2326
		600	16,733	16,218	13,874	15,101	15,512	14,235	<b>15,279</b>	2308
Труба стальная $Dy50$ , (образец Ст3-2)	20	0	9,147	8,611	7,974	9,306	9,832	8,608	<b>8,913</b>	2467
		100	12,733	12,501	13,624	11,950	14,228	13,849	<b>13,148</b>	2448
		200	16,238	17,671	15,963	15,782	16,347	14,399	<b>16,067</b>	2430
		300	19,655	21,561	18,139	18,076	19,548	19,806	<b>19,464</b>	2402
		400	16,979	19,124	17,865	18,369	18,815	20,398	<b>18,592</b>	2383
		500	18,742	19,413	17,511	18,826	17,917	19,691	<b>18,683</b>	2366
		600	17,835	20,264	18,329	17,738	16,781	19,253	<b>18,367</b>	2353
Труба стальная $Dy50$ , (образец Ст3-3)	30	0	9,351	7,274	8,916	9,842	7,697	9,163	<b>8,707</b>	2341
		100	14,285	13,479	14,927	12,931	13,822	15,678	<b>14,187</b>	2316
		200	18,136	17,838	18,049	17,514	18,103	19,371	<b>18,169</b>	2294
		300	22,328	22,042	20,871	22,355	20,168	22,647	<b>21,735</b>	2279
		400	21,166	22,681	20,262	23,873	22,540	23,267	<b>22,298</b>	2251
		500	20,643	22,547	21,190	23,274	21,631	23,214	<b>22,083</b>	2232
		600	21,068	22,465	21,484	23,278	19,633	22,942	<b>21,812</b>	2216



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Зависимости изменения шероховатости $Ra$ экспериментальных образцов труб от времени наработки

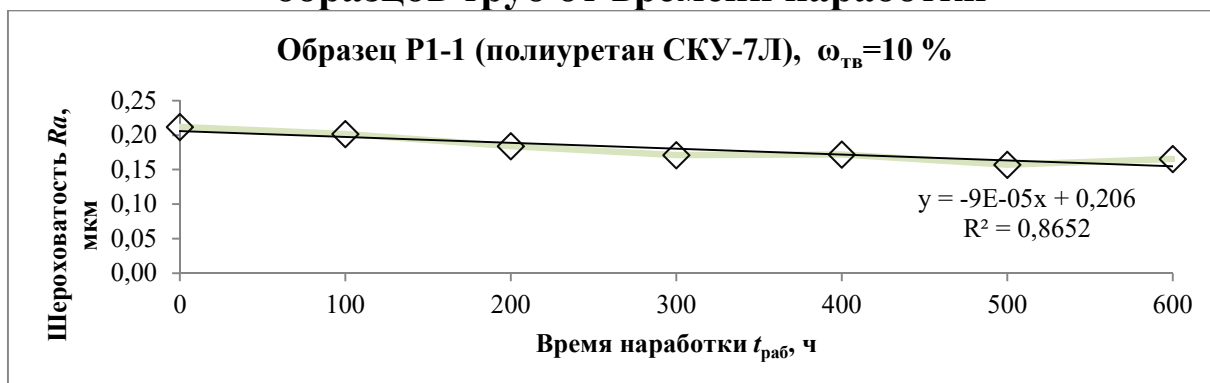


Рисунок В.1 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца трубы  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой марки СКУ-7Л от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 10%

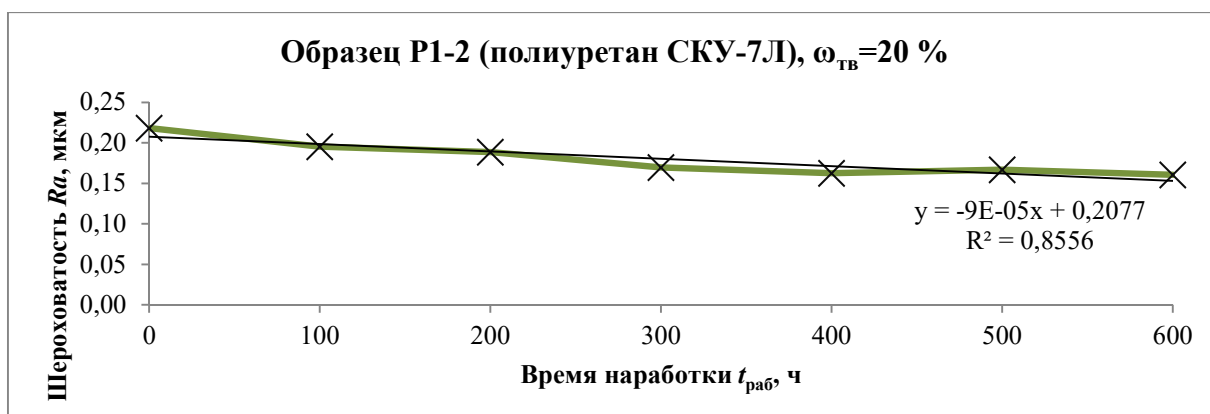


Рисунок В.2 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца трубы  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой марки СКУ-7Л от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 20%

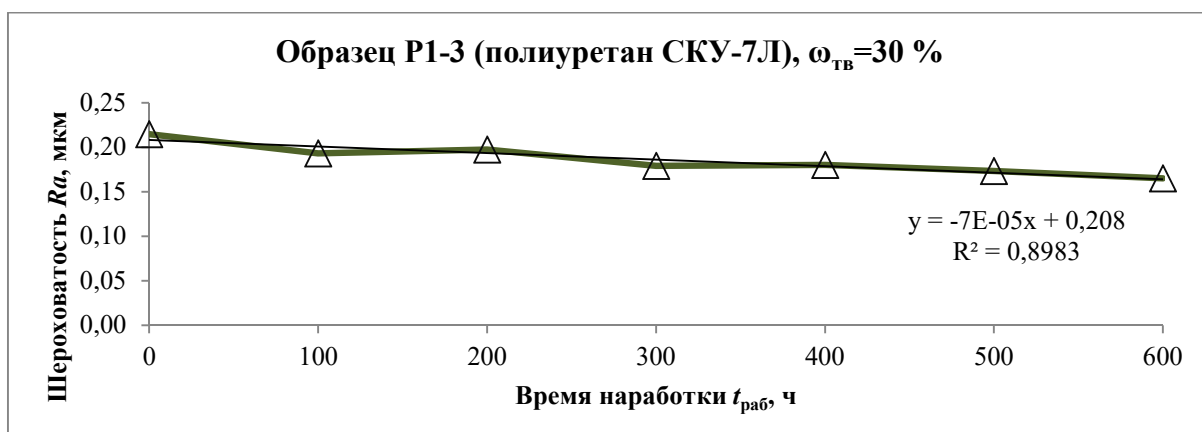


Рисунок В.3 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца трубы  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой марки СКУ-7Л от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 30%

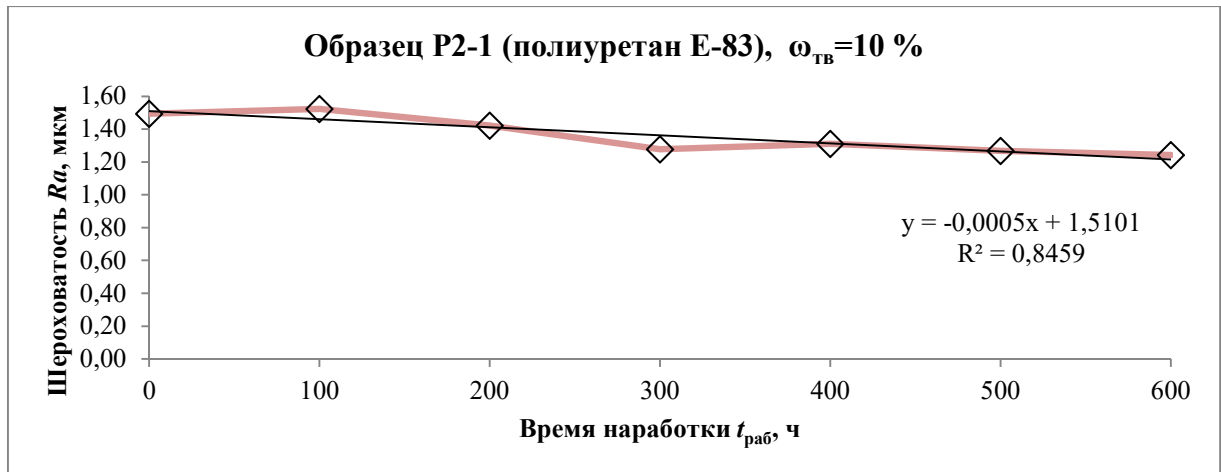


Рисунок В.4 – Зависимость изменения шероховатости  $R_a$  рабочей поверхности экспериментального образца трубы  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой марки E-83 от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 10%

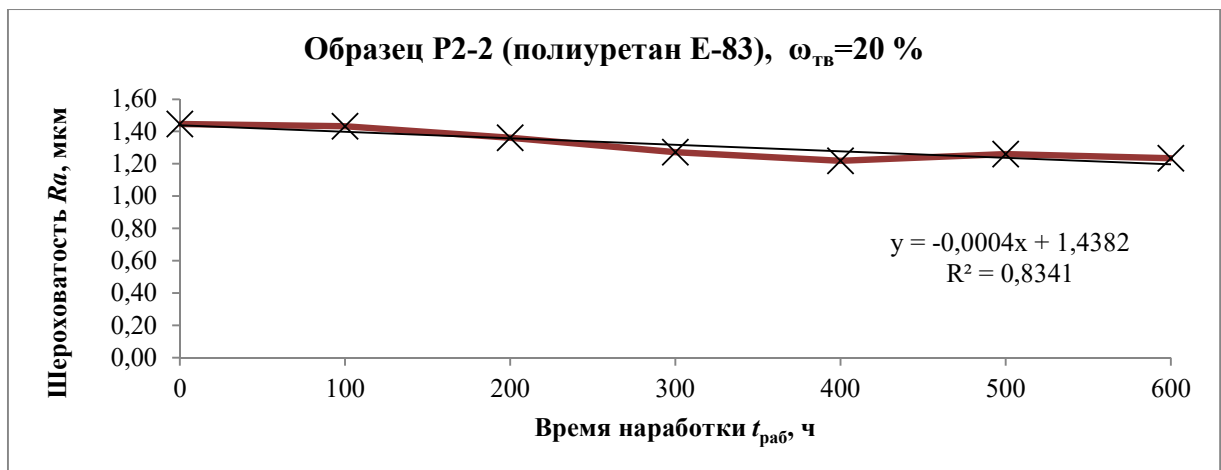


Рисунок В.5 – Зависимость изменения шероховатости  $R_a$  рабочей поверхности экспериментального образца трубы  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой марки E-83 от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 20%

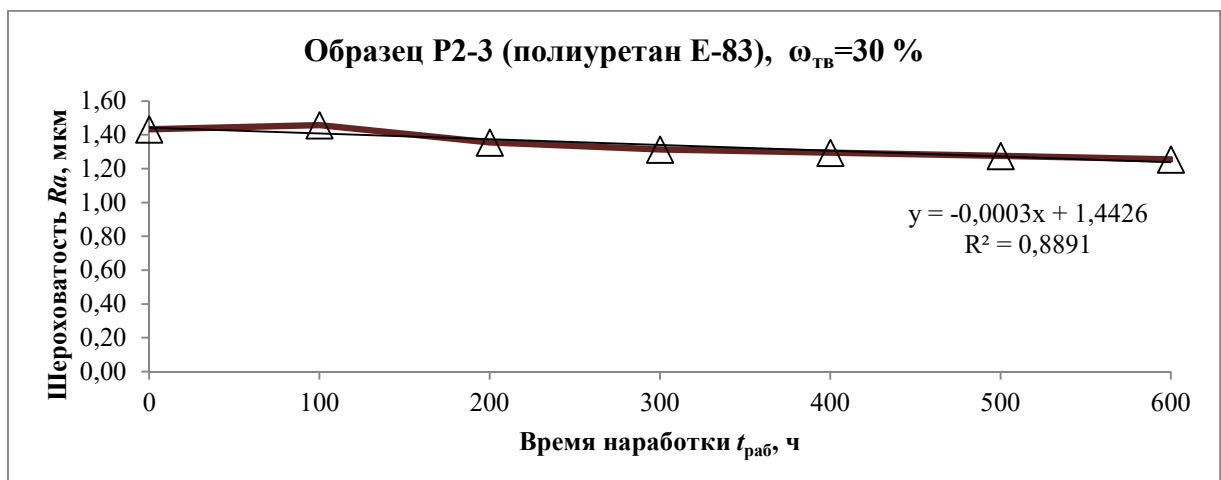


Рисунок В.6 – Зависимость изменения шероховатости  $R_a$  рабочей поверхности экспериментального образца трубы  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой марки E-83 от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 30%

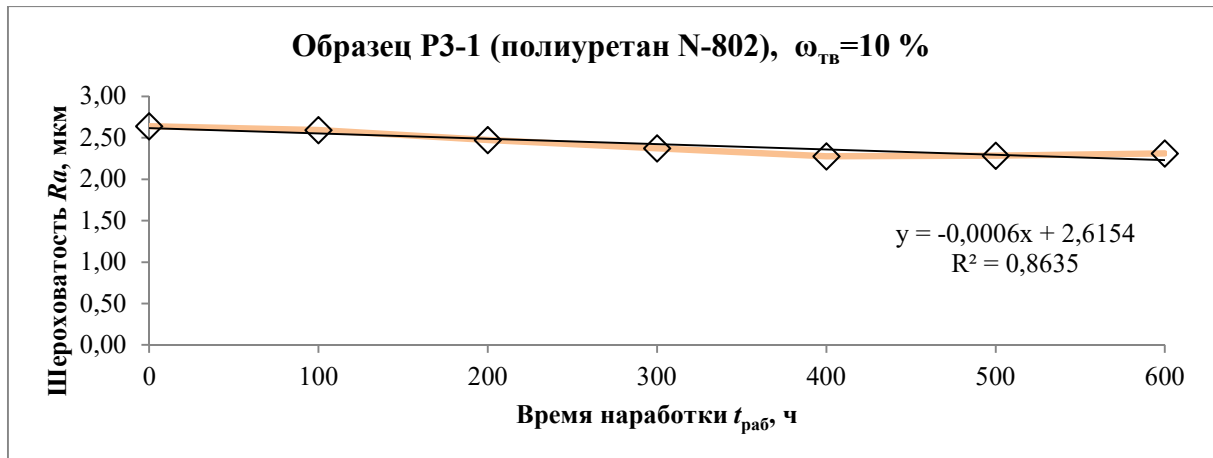


Рисунок В.7 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца трубы  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой марки N-802 от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 10%

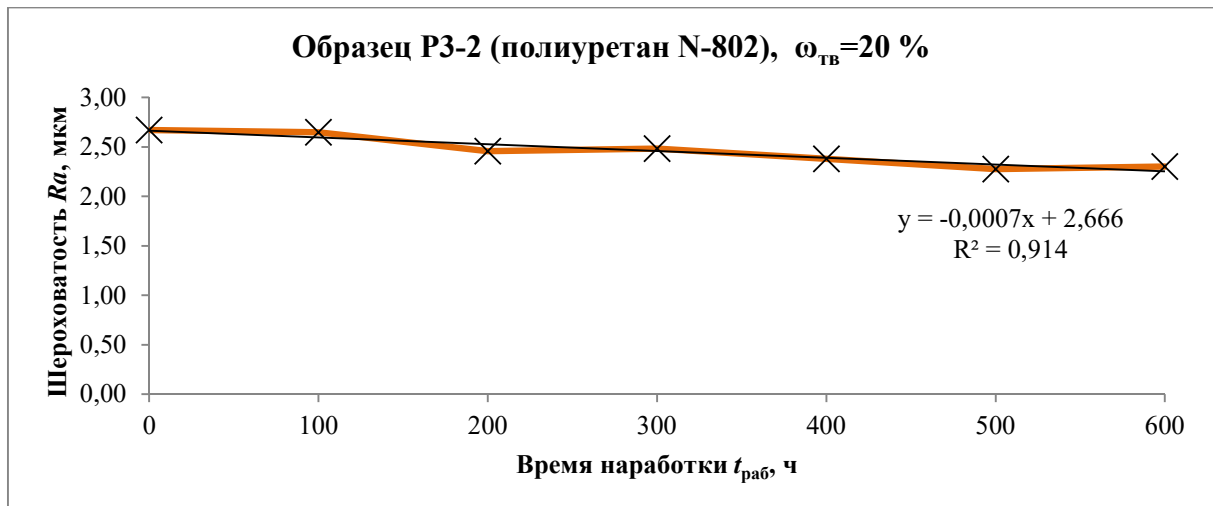


Рисунок В.8 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца трубы  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой марки N-802 от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 20%

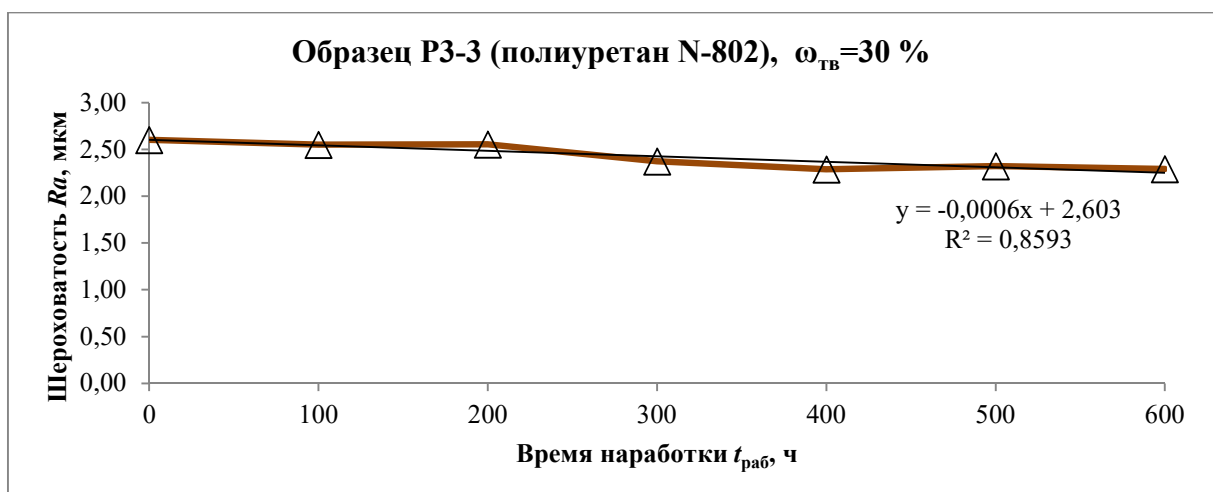


Рисунок В.9 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца трубы  $Dy50$  с полиуретановой футеровкой марки N-802 от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 30%

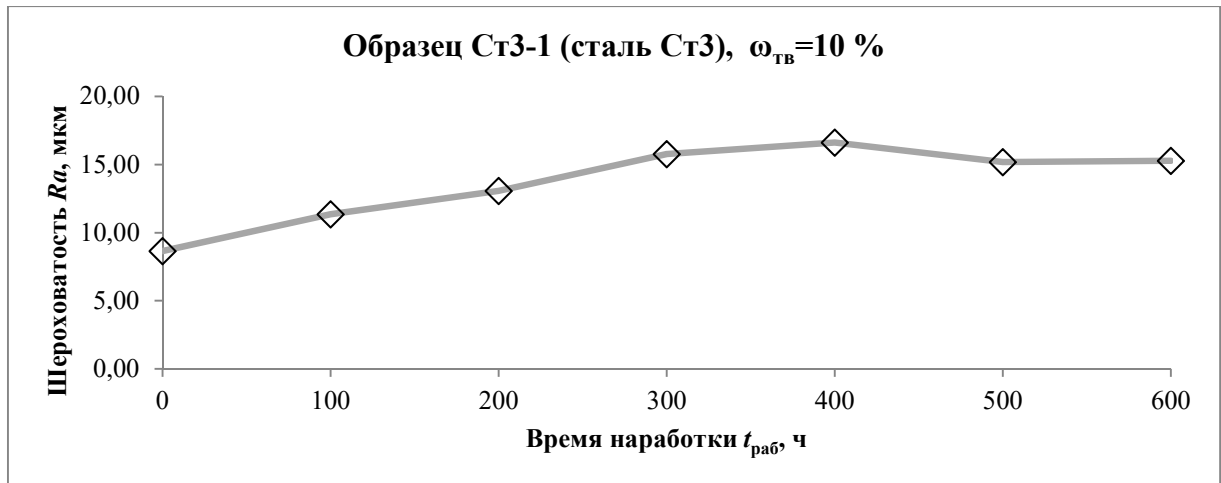


Рисунок В.10 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца стальной трубы  $Dy50$  Ст3 (ГОСТ 10704-91) без футеровки от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 10%

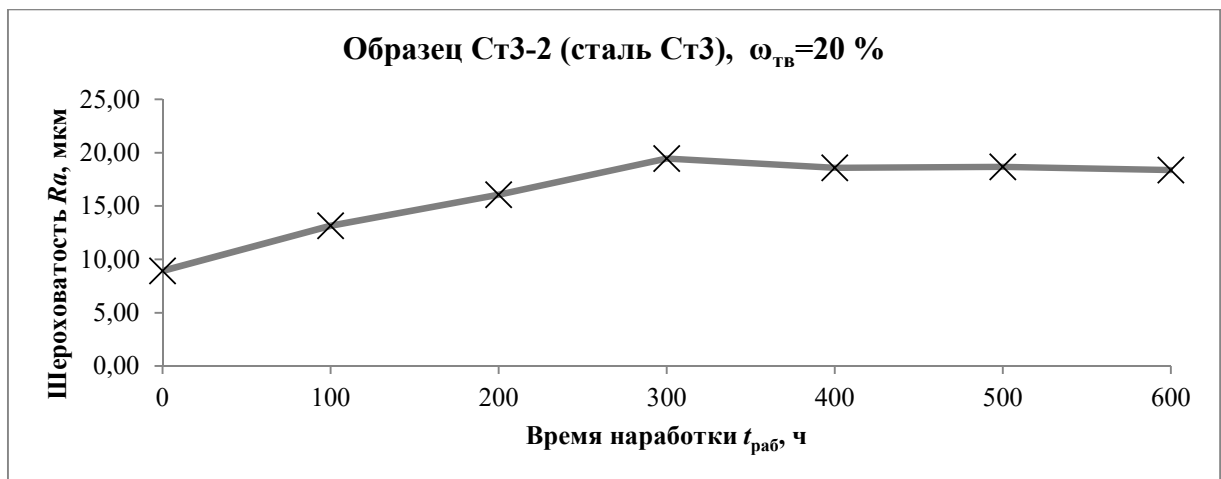


Рисунок В.11 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца стальной трубы  $Dy50$  Ст3 (ГОСТ 10704-91) без футеровки от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 20%

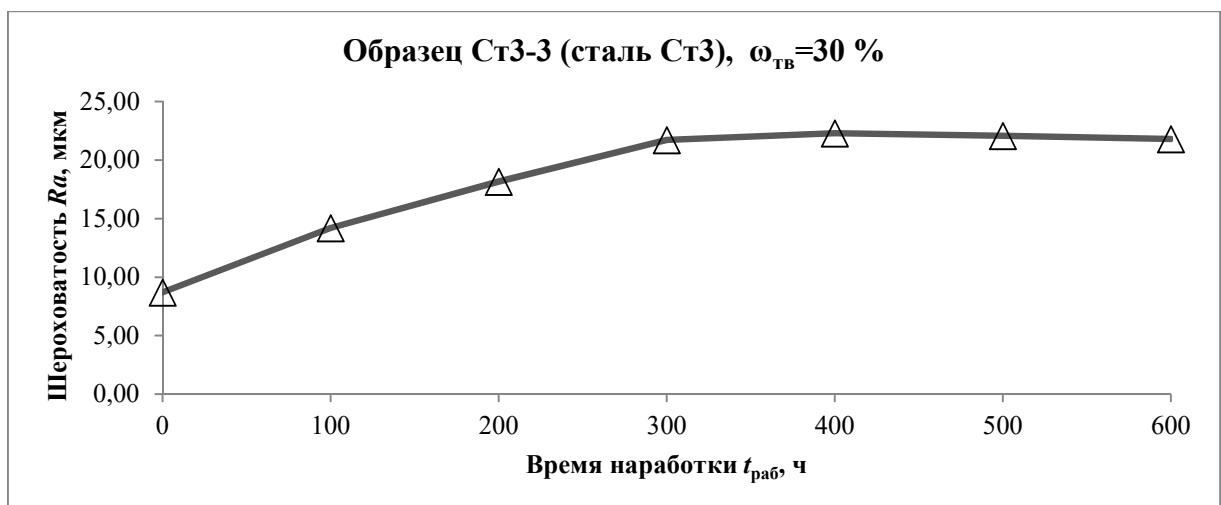


Рисунок В.12 – Зависимость изменения шероховатости  $Ra$  рабочей поверхности экспериментального образца стальной трубы  $Dy50$  Ст3 (ГОСТ 10704-91) без футеровки от времени наработки при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией 30%

**ПРИЛОЖЕНИЕ Г**  
**Акт о внедрении результатов диссертации**

**УТВЕЖДАЮ**

Генеральный директор

АО «Механобр инжиниринг»



  
\_\_\_\_\_ Терентьев А.Н.

Дата 26 » апрель 2023 г.

**АКТ**

**о внедрении результатов кандидатской диссертации**  
**Атрощенко Виктора Александровича**  
**на тему: «Повышение эффективности эксплуатации закладочного**  
**комплекса футеровкой полиуретаном транспортных трубопроводов»**  
**по научной специальности 2.8.8. – «Геотехнология, горные**  
**машины»**

Комиссия в составе:

Председатель:

Терентьев Андрей Николаевич – генеральный директор;

Члены комиссии:

1. Дедушенко Игорь Александрович – главный инженер проекта;
2. Кибирев Владимир Иванович - заместитель начальника гидротехнического отдела, к.т.н.;
3. Филиппов Р.А. – руководитель группы.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Повышение эффективности эксплуатации закладочного комплекса футеровкой полиуретаном транспортных трубопроводов», представленные на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в деятельности компании АО «Механобр инжиниринг», в том числе при разработке проектной документации по реконструкции системы гидротранспорта

хвостов АО «ЕВРАЗ Качканарский ГОК», заключающиеся в замене стальных магистральных трубопроводов на трубопроводы с полиуретановой футеровкой внутренней поверхности.

Разработка документации выполнялась с учетом, следующей информации, представленной в диссертационной работе:

– зависимости изменения шероховатости рабочих поверхностей трубопроводов с внутренним полиуретановым покрытием при долговременной работе гидротранспорта;

– величины потерь напора по длине трубопровода при гидротранспорте хвостов Качканарского ГОКа по трубам внутренним полиуретановым покрытием.

Использование, вышеперечисленных, результатов диссертационной работы, позволяет после реконструкции системы гидротранспорта:

- уменьшить расход электроэнергии, за счет снижения потерь напора по длине пульповодов при использовании трубопроводов с полиуретановой футеровкой;

– уменьшить ежегодные расходы на замену изношенных труб пульповодов, выполняемую по причине абразивного износа незащищенных полиуретановым покрытием стальных труб.

Начальник гидротехнического  
отдела, главный инженер проекта



Дедушенко И.А.

Заместитель начальника  
гидротехнического отдела, к.т.н.



Кибирев В.И.

Руководитель группы



Филиппов Р.А.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д**  
**Патент на изобретение**



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

**№ 2796635**

**МАГНИТОАКТИВНЫЙ ЭЛАСТОМЕР**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Васильева Мария Александровна (RU), Атрощенко Виктор Александрович (RU), Строчилина Полина Сергеевна (RU)*

Заявка № 2022120265

Приоритет изобретения **25 июля 2022 г.**

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации **29 мая 2023 г.**

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает **25 июля 2042 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*

