

На правах рукописи

Атрощенко Виктор Александрович



**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЗАКЛАДОЧНОГО КОМПЛЕКСА ФУТЕРОВКОЙ
ПОЛИУРЕТАНОМ ТРАНСПОРТНЫХ
ТРУБОПРОВОДОВ**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

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

Санкт-Петербург – 2023

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

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Васильева Мария Александровна

Официальные оппоненты:

Неверов Александр Алексеевич

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

Голик Владимир Иванович

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

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула.

Защита диссертации состоится **21 сентября 2023 г. в 16:00** на заседании диссертационного совета ГУ.2 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, **аудитория № 3321**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 21 июля 2023 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ
Евгений Ростиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 стае.

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 Джезказганском 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., Собоу 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 зави-

симости от времени взаимодействия и массового расхода гидросмеси, влекущие изменение удельного напора.

Соответствие паспорту специальности

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

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 геотехнологий с закладкой выработанного пространства 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 ана-

лиз 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 «Механоинжиниринг» 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.

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 науч-

но-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, 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 (далее – Перечень ВАК), 3 статьи - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен патент на изобретение.

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..

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе представлен обзор и анализ основных современных геотехнологий, реализуемых с закладкой выработанного пространства, а также оборудования и компонентов закладочных комплексов, закладочных материалов; выполнен анализ осложнений, возникающих при проведении закладочных работ выработанного пространства на горных предприятиях, выполнена оценка степени изученности темы исследования. Определены направления совершенствования применяемых в настоящее время технологий. Проанализирован опыт применения модернизированного оборудования в системе закладочных комплексов горных предприятий.

Во второй главе представлены результаты теоретических исследований процесса и факторов, влияющих на удельные потери напора потока закладочной смеси, представляющей собой дилатантное вещество, при движении в потоке с заданными физико-механическими характеристиками. Представлены результаты анализа факторов, способствующих интенсификации гидроабразивного изнашивания рабочей поверхности транспортных трубопроводов закладочного комплекса. Выполнен анализ влияния свойств гидросмеси (гранулометрический состав, концентрация) на ее транспортабельность, а также влияние шероховатости внутренней поверхности трубопровода на величину потерь напора в гидротранспортной системе закладочного комплекса. Обосновано применение в гидротранспортных системах закладочных комплексов трубопроводов с полиуретановой футеровкой внутренней поверхности взамен традиционных стальных труб.

В третьей главе представлены результаты выполненных экспериментальных исследований. Обработка результатов позволила выявить закономерности изменения потерь напора при гидротранспорте закладочной смеси в зависимости от шероховатости внутренней поверхности трубопровода. Выявлены зависимости изменения абсолютной шероховатости внутренних поверхностей стального трубопровода и трубопровода, футерованного полиуретаном, от времени наработки, а

также зависимости удельных потерь напора от шероховатости внутренней поверхности трубопровода, определяемой свойствами ее материала, при перемещении абразивной гидросмеси.

В четвертой главе представлены разработанные практические рекомендации по применению трубопроводов с полиуретановой футеровкой в системах гидротранспорта закладочных комплексов. Выполнена оценка эксплуатационных и капитальных затрат на монтаж и обслуживание трубопроводов с внутренней полиуретановой футеровкой, а также общая оценка эффективности применения полиуретановой футеровки трубопроводов.

В заключении изложены основные выводы по результатам проведенных исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

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.

По результатам проведенных теоретических исследований анализа технологии закладки выработанного пространства, особенности которой заключаются в создании искусственного закладочного массива с требуемыми прочностными характеристиками, установлено, что закладочные гидросмеси на основе хвостов обогащения железной руды при критической концентрации твердых частиц обладают свойствами неньютоновских жидкостей, у которых при возрастании скорости сдвига увеличивается эффективная вязкость. Для описания течения таких жидкостей используют модель степенного закона Оствальда-де-Ваале, основным параметром в которой выступает вязкость гидросмеси, которая представляет собой функцию концентрации твердых частиц.

Эффективность трубопроводного транспорта при закладке выработанного пространства определяется гидроабразивным изнашиванием внутренней поверхности труб, вплоть до аварийных си-

туаций. Среди факторов, влияющих на интенсивность изнашивания выделено 2 группы:

1) факторы, определяющие величину кинетической энергии потока абразивной гидросмеси (гранулометрический состав и форма частиц; скорость потока; угол атаки частиц; концентрация гидросмеси; время воздействия);

2) факторы, определяемые физико-механическими свойствами трубы, взаимодействующей с абразивным материалом.

На транспортабельность закладочной гидросмеси основное влияние оказывают размерно-массовые характеристики твердых частиц, от которых зависит пульсационный характер потока и турбулентность.

Анализ функционирования существующих закладочных комплексов показал, что транспортирование закладочной смеси в трубопроводе 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.

Исключение расслоения потока закладочной гидросмеси возможно применением трубопроводов с внутренней поверхностью, имеющей низкую шероховатость, которая не изменяется со временем эксплуатации.

Предлагаемое перспективное решение – применение в гидротранспортных системах закладочных комплексов трубопроводов с полиуретановой футеровкой.

Основные преимущества полиуретановой футеровки: высокая стойкость к гидроабразивному изнашиванию, неподверженность коррозии, низкая адгезия и низкая шероховатость поверхности, которая влияет на потери напора.

Математическая зависимость эквивалентной шероховатости полиуретановой поверхности от естественной шероховатости (1):

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

где $K_{\text{э}}$ – значение эквивалентной шероховатости, мкм; Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм

В работе 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 материалами с различными физико-механическими свойствами рабочей поверхности. Для проведения эксперимента был спроектирован, изготовлен и смонтирован гидротранспортный стенд (рисунок 1). Также 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. Испытания проводились на линейном участке трубопровода в течение 600 ч на гидросмесях с массовыми концентрациями 10%, 20% и 30% соответственно на каждом образце. Характеристики опытных образцов футеровок приведены в таблице 1.

После завершения каждого цикла испытаний продолжительностью 100 ч проводился демонтаж образцов труб. После промывки и просушки образцов измерялся параметр шероховатости Ra внутренней поверхности.

На основе полученных результатов получены зависимости изменения шероховатости, характер которых позволяет выполнить сравнительный анализ характеристик исследуемых поверхностей труб (рисунки 2, 3 и 4).

Таблица 1 – Характеристики экспериментальных образцов труб $Dy50$

Тип трубы	Футеровка	Тверд. по Шору, А	Ra начальная, мкм
Стальная, футерованная (образцы P1-1, P1-2, P1-3)	полиуретан СКУ-7Л	95	0,215
Стальная, футерованная (образцы P2-1, P2-2, P2-3)	полиуретан Е-83	83	1,457
Стальная, футерованная (образцы P3-1, P3-2, P3-3)	полиуретан N-802	90	2,638
Стальная ГОСТ 10704-91 (образцы Ст3-1, Ст3-2, Ст3-3)	без футеровки	HRC 35	8,757

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%. В 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. Т.к. 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 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 Ст3 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 $Ra_{Ст3-1}=15,71$ мкм; $Ra_{Ст3-2}=18,778$ мкм; $Ra_{Ст3-3}=21,982$ 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.

Анализируя зависимости, представленные на рисунках 2, 3 и 4 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 труб с полиуретановой футеровкой от времени эксплуатации аппроксимируются выражением (2):

$$Ra_t = Ra_0 - kt_{\text{раб}}, \quad (2)$$

где Ra_0 – среднее значение начальной шероховатости, мкм; $t_{\text{раб}}$ – время наработки, ч; k – параметр наработки, мкм/ч (для образца Р1 $k_{\text{Р1}}=9 \cdot 10^{-5}$ мкм/ч, для образца Р2 $k_{\text{Р2}}=4 \cdot 10^{-4}$ мкм/ч и для образца Р3 $k_{\text{Р3}}=6 \cdot 10^{-4}$ мкм/ч).

Зависимость изменения параметра шероховатости Ra до установившихся значений стального трубопровода от времени эксплуатации аппроксимируется выражением (3):

$$Ra_t = Ra_0 + kt_{\text{раб.уст.}}, \quad (3)$$

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 (4):

$$Ra_t = Ra_{300} - kt_{\text{раб}}, \quad (4)$$

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).

Анализ значений эквивалентной шероховатости полиуретановых футеровок K_3 выполнен по формуле (1), с учетом средних значений установившихся шероховатостей Ra поверхностей исследуемых образцов (таблица 2). Эквивалентная шероховатость поверхности сталь-

ных трубопроводов определялась согласно выражению из ГОСТ 8.586 1-2005.

Таблица 2 – Значения эквивалентных шероховатостей исследуемых рабочих поверхностей труб

Параметр	Образец Р1	Образец Р2	Образец Р3	Образец Ст3
K_s , мкм	0,187	2,745	6,162	59,134

Полученные значения эквивалентной шероховатости для стального трубопровода значительно превышают значения для трубопроводов с полиуретановыми футеровками внутренней поверхности – в среднем в 20 раз. Сообразно различаются коэффициенты гидравлических сопротивлений, а также удельные потери напора. Принимая во внимание механизм перемещения потока в пристенном слое и условия подобия гидродинамических процессов, на основе экспериментальных данных были определены коэффициенты гидравлических сопротивлений λ для трубопроводов $Dy100$ и $Dy150$, как наиболее распространенных в гидротранспортных системах закладочных комплексов. Полученные величины приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Коэффициенты гидравлических сопротивлений λ рабочих поверхностей трубопроводов с внутренними диаметрами 100 мм и 150 мм при массовой концентрации гидросмеси 30%

Материал рабочей поверхности труб	Коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda \cdot 10^{-3}$	
	Труба $Dy100$	Труба $Dy150$
Полиуретан Р1	4,0	3,6
Полиуретан Р2	6,6	6,0
Полиуретан Р3	7,6	6,9
Сталь Ст3	13,4	12,1

Анализ данных таблицы 3 позволяет сделать вывод, что значения коэффициента гидравлических сопротивлений λ у труб с полиуретановой футеровкой внутренней поверхности в среднем в 2 раза меньше, чем у стальной трубы (ГОСТ 8732-78).

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.

Удельные потери напора потока закладочной смеси I с массовыми концентрациями 10%, 20% и 30% в трубопроводе с полиуретановой футеровкой СКУ-7Л (опытные образцы Р1-1; Р1-2; Р1-3), рассчитанные на основе измеренных значений шероховатости Ra по формуле Дарси-Вейсбаха после проведения каждого цикла испытаний продолжительностью 100 ч приведены в таблице 4. Подобным образом были рассчитаны значения удельных потерь напора для образцов с полиуретановыми футеровками Р2, Р3, а также для стальных образцов без футеровки Ст3.

Таблица 4 – Удельные потери напора для трубопровода с полиуретановой футеровкой СКУ-7Л в зависимости от времени эксплуатации

Наработка, ч	Удельные потери напора $I \cdot 10^{-3}$, м/м		
	Конц. гидро-смеси 10%	Конц. гидро-смеси 20%	Конц. гидро-смеси 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

На основе проведенного анализа получены зависимости удельных потерь напора от времени эксплуатации и от массовой концентрации закладочной гидросмеси (рисунок 5).

Полученные данные позволяют сделать вывод, что величина удельных потерь напора потока в трубопроводах с полиуретановой футеровкой находится в линейной зависимости от массовой концентрации гидросмеси. 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 показала, что удельные потери напора в трубопроводах с полиуретановой футеровкой рабочих поверхностей описываются выражением (5):

$$I_{\Pi} = I_0 + 2,7 \cdot 10^{-4} \omega_{\text{ТВ}}, \quad (5)$$

где I_{Π} – 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;
 $\omega_{гв}$ – массовая концентрация гидросмеси в диапазоне 10-30, %.

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.

Обоснование целесообразности использования труб с полиуретановой футеровкой рабочей поверхности выполнено исходя из оценки капитальных затрат на закупку 1000 м трубопроводов и материалов для их монтажа, а также эксплуатационных затрат на замену изношенных трубопроводов за 10-летний период эксплуатации (таблица 5).

Таблица 5 – Суммарные затраты на закупку и замену трубопроводов в течение 10 лет

Диаметр и длина трубопровода	Стоимость млн. руб., без НДС		
	Сталь Ст3сп	Полиуретан СКУ-7Л	Полиуретан Е-83
Трубопровод Ду100, 1000 м	19,334	15,473	9,000
Трубопровод Ду150, 1000 м	27,612	22,715	11,750

Анализ эксплуатационных затрат на замену, изношенных в процессе эксплуатации трубопроводов за период 10 лет показал, что использование трубопроводов с полиуретановой футеровкой экономически оправдано. Полная окупаемость капитальных затрат обеспечивается за 4 года при использовании труб с футеровкой полиуретаном Е-83 и за 8 лет с футеровкой полиуретаном СКУ-7Л.

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 проведении 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. Срок 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК:

1. **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.

2. **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.

3. Васильева, М.А. Обоснование формы рабочей камеры магнитного перистальтического насоса / М.А. Васильева, А.А. Волчихина, **В.А. Агрошченко**, А.А. Зеленцова // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – №15. – С. 93-98.

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

4. **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. - Vol.3. - pp. 39-45. - DOI: <https://doi.org/10.17580/or.2021.03.07>.

5. Aleksandrov, 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. Aleksandrov, **V.A. Atroshchenko**, A.M. Vatlina // *Obogashchenie Rud.* - 2021. - Vol.6. - pp. 53-58. - DOI: <https://doi.org/10.17580/or.2021.06.09>.

6. **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. - Vol.10-1 - pp. 25-38. DOI: https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_101_0_25.

Патент:

7. Патент 2796635 Российская Федерация, МПК H01F 1/28, H01F 1/113, H01F 1/117. Магнитоактивный эластомер / Васильева М.А., **Агрошченко 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.

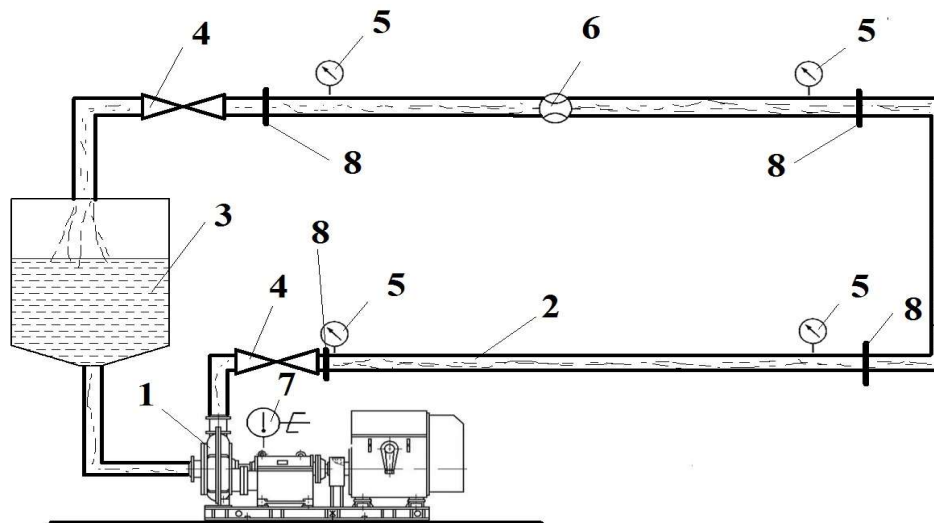


Рисунок 1 – Схема экспериментального гидротранспортного стенда: 1 - центробежный песковый насос П12,5; 2 – экспериментальные образцы труб; 3 - расходный бак; 4 - запорные клапаны; контрольно-измерительная аппаратура (5 – реле давления, 6 - расходомер, 7 - датчик температуры), 8 – фланцевые соединения

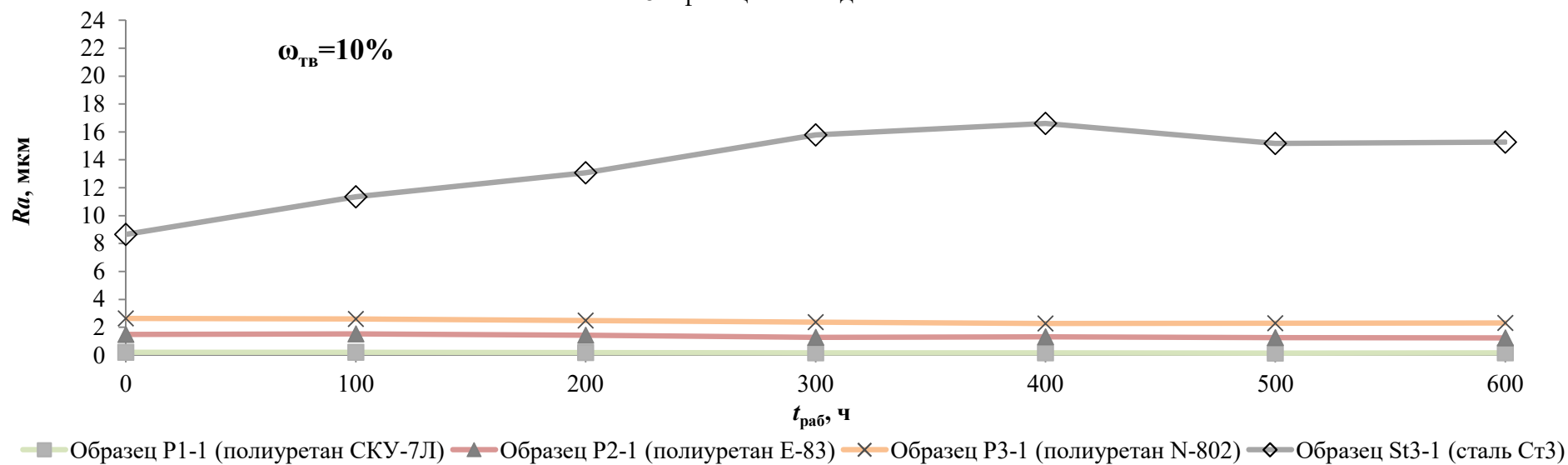


Рисунок 2 – Изменение шероховатости Ra исследуемых образцов труб от времени наработки $t_{\text{раб}}$ (массовая концентрация гидросмеси $\omega_{\text{ТВ}}=10\%$)

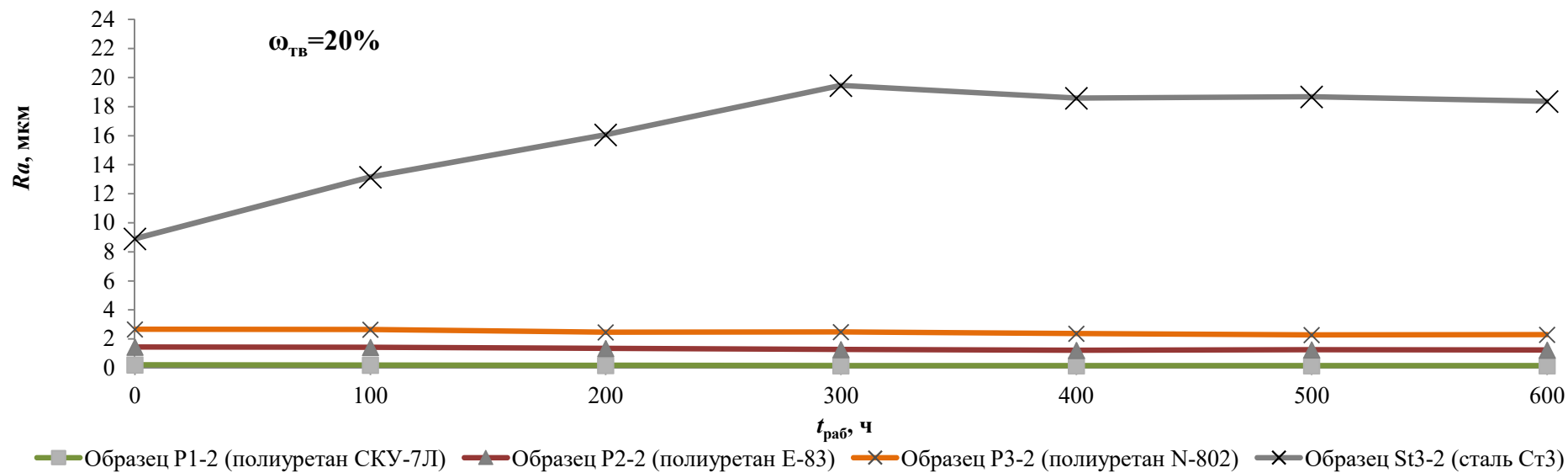


Рисунок 3 – Изменение шероховатости Ra исследуемых образцов труб от времени наработки $t_{раб}$ (массовая концентрация гидросмеси $\omega_{ТВ}=20\%$)

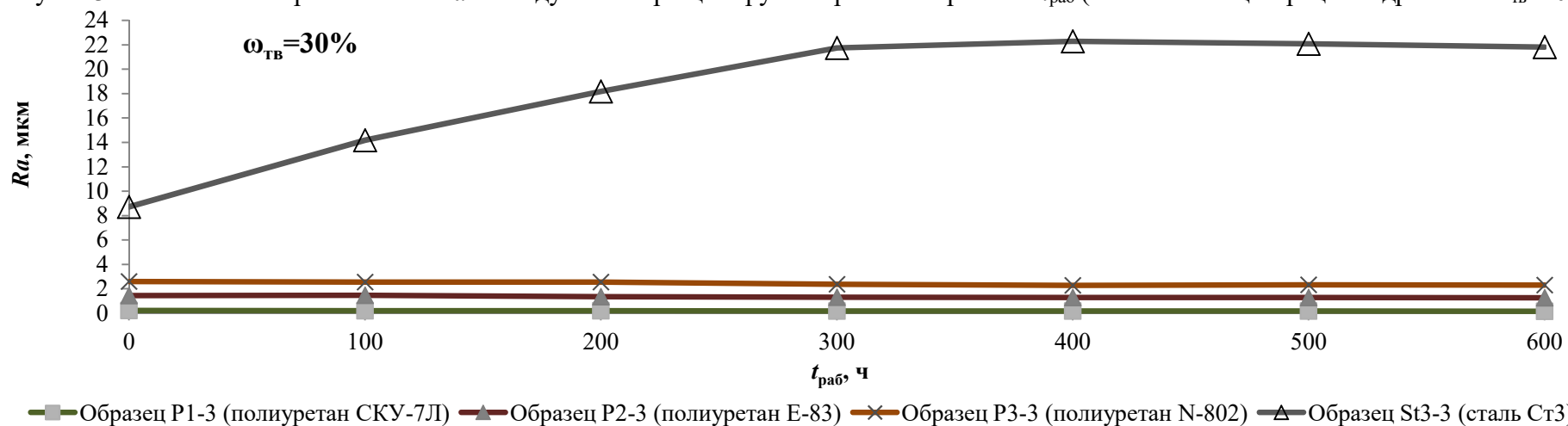


Рисунок 4 – Изменение шероховатости Ra исследуемых образцов труб от времени наработки $t_{раб}$ (массовая концентрация гидросмеси $\omega_{ТВ}=30\%$)

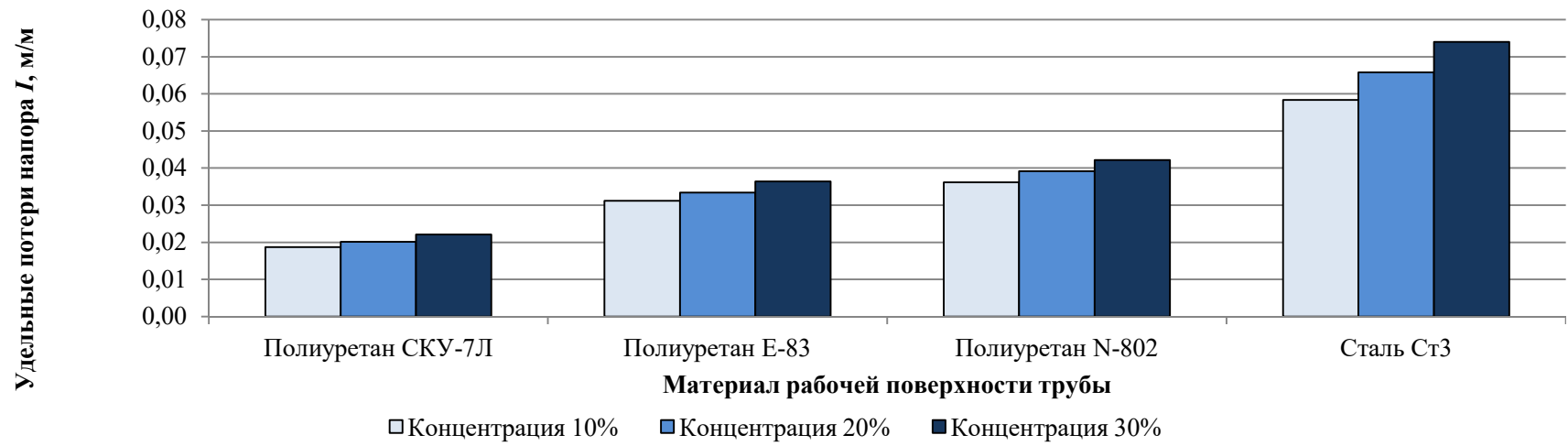


Рисунок 5 – Зависимость удельных потерь напора в трубопроводах от массовой концентрации закладочной гидросмеси