

Научно-исследовательский институт ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК»

На правах рукописи



СКРЕБНЕВ ВЛАДИМИР ИГОРЕВИЧ

**ПОЛИМЕРНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ ДЛЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор химических наук

Калугина Е.В.

Москва – 2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	13
1.1. Материалы для технологических трубопроводов. Виды и характеристики пульпопроводов	13
1.2. Абразивное и эрозионное изнашивание	22
1.2.1. Изнашивание полимерных материалов абразивными частицами. Факторы, влияющие на процесс изнашивания. Модели износа.....	23
1.2.2. Особенности эрозионного износа. Механизм гидроабразивного изнашивания полимеров.....	33
1.3. Общая характеристика термоэластопластов: номенклатура, классификация, фазовая структура, свойства и применение.....	42
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	51
2.1. Характеристики полимерных композиций.....	51
2.2. Характеристики труб	57
2.3. Методы исследования.....	58
ГЛАВА 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ	66
3.1. Исследование физико-механических свойств полимерных материалов и износостойкости	67
3.2. Термомеханические исследования полиолефинов, термоэластопластов и их смесей	74
3.3. Реологические характеристики термопластичных вулканизатов	84
3.4. Технология производства многослойных труб с внутренним слоем из термопластичного вулканизата.....	87
3.5. Исследование износостойкости и гидравлических характеристик трубы двухслойной конструкции с внутренним слоем из термопластичного вулканизата при гидротранспорте хвостовой пульпы	93
3.5.1. Исследование величины потерь напора для определения коэффициентов гидравлического сопротивления	93
3.5.2. Исследование изменения шероховатости внутренней поверхности	103

3.5.2.1. Исследование начальной шероховатости образцов	104
3.5.2.2. Исследование шероховатости приработанных образцов.....	106
3.5.3. Теоретическое определение коэффициентов гидравлического сопротивления	110
3.5.4. Исследование величины гидроабразивного износа.....	114
3.5.5. Влияние на интенсивность износа концентрации, дисперсности и скорости гидросмесей	125
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	130
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	138
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Технические условия на трубы напорные из полиэтилена с повышенной стойкостью к гидроабразивному износу	155
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Инструкция по строительно-монтажным работам ИМ.ГПП.19- 19-2 труб МУЛЬТИПАЙ ИС	156
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Акт промышленных испытаний полимерного трубопровода МУЛЬТИПАЙП ИС на опытно-промышленном участке ОАО «РИМ»	157
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Акты осмотра тестовых образцов трубопровода на Жезказганской обогатительной фабрике.....	162
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Отзыв компании ЕвроХим-ВолгаКалий по результатам эксплуатации трубопроводной системы «МУЛЬТИПАЙП ИС»	164

ВВЕДЕНИЕ

Преимущество полимерных трубопроводов доказано сроками их эксплуатации на протяжении более 50 лет при транспортировке воды и газа. Полиэтиленовые трубопроводы, в сравнении со стальными, отличаются лучшей способностью к поглощению шума и вибрации, большей гибкостью, отсутствием коррозии, зарастания стенок и отложений при эксплуатации. Трубы имеют относительно малый вес, что значительно снижает затраты на транспортировку и упрощает монтаж. Трубные полиэтиленовые композиции, как и все базовые термопластичные материалы, обладают на порядок меньшей теплопроводностью, чем сталь, что снижает вероятность замерзания жидкой среды, перемещаемой в пластиковых трубах [1, 2].

Согласно оценкам [3], в 2022 году рынок труб из полиэтилена в РБК (Россия, Белоруссия, Казахстан) вырос на 23 %, при этом рост российского рынка оказался наиболее весомым и составил 29 % с увеличением выпуска на 123 тысячи тонн относительно предыдущего года (рисунок 1). Ожидается, что после 2023 года российский рынок будет расти дальше за счет программ по замене и строительству инженерных сетей и увеличения объемов внутреннего производства сырья.



Рисунок 1 – Динамика рынка труб из РЕ в России и странах РБК, тысяч тонн [3]

Ежегодный прирост мирового рынка полимерных труб составляет около 7 % и определяется такими факторами, как развитие инфраструктуры, рост населения, увеличение объемов и темпов строительства, а также необходимостью замены

сильно изношенных труб из стали и чугуна. По прогнозам, темпы роста рынка полиэтиленовых труб будут более высокими в связи с увеличением их потребления в газовом сегменте, агросекторе и химической промышленности [3, 4].

Актуальность темы исследования. Трубы из композиций на основе сополимеров этилена с 1-гексеном или 1-бутеном (PE 100), в том числе из термостойких PE (PE-RT – сополимер этилена и 1-октена; PE-X – сшитый полиэтилен), активно эксплуатируются в химической и энергетической промышленности. Полиэтиленовые трубы могут быть как однослойными, так и иметь дополнительные слои из стойких к высокой температуре и химической деструкции составов, например, из композиций на основе полифениленсульфида или фторсодержащих полимеров. В сетях теплоснабжения могут применяться гибкие трубы с достаточно сложной многослойной конструкцией, включающей защитные оболочки, гофрированные теплоизолирующие слои, армирующие слои из волокон, барьерные слои для снижения газопроницаемости. Для предприятий химической, нефтеперерабатывающей и газовой промышленности предлагаются различные варианты решений по армированным полиэтиленовым трубам высокого давления (рисунок 2), которые могут применяться для транспортирования нефтепродуктов, растворов кислот и щелочей, пластовых вод, природных и нефтяных газов [1, 2, 5-12].

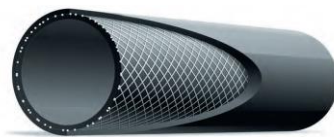


Рисунок 2 – Конструкция промышленной полиэтиленовой трубы: наружный и внутренний слои - PE 100, средний армирующий слой - из полиэфирных нитей [6].

В последние десятилетия у горнодобывающих и энергетических предприятий наблюдается растущий интерес к трубам из термопластичных материалов, в том числе и полиэтиленовым, однако их применение для транспортировки гидросмесей в России остается достаточно ограниченным в связи с недостаточной износостойкостью. Промышленные гидротранспортные системы

для перемещения смесей жидкости с минеральными частицами (пульпопроводы) применяются при транспортировании в виде гидросмесей угля, руд черных и цветных металлов, их концентратов и отходов обогащения, а также других промышленных отходов, грунтов, песчано-гравийных смесей, химического сырья, строительных и других твердых сыпучих материалов. Рабочие поверхности гидротранспортных систем, применяемых в России, традиционно выполняются из недорогих марок стали. Трубы из углеродистой стали характеризуются стойкостью к высоким рабочим давлениям, но подвержены химической коррозии и по причине быстрого изнашивания потоками взвешенных абразивных частиц достаточно быстро выходят из строя. На практике эксплуатирующие предприятия нередко вынуждены прибегать к процедуре периодического поворота прямолинейных горизонтальных и наклонных участков пульпопроводов на 90 – 120 градусов поперек оси для увеличения времени жизни трубопровода и снижения металлоемкости процесса [13-17].

Основными факторами, определяющими производительность и себестоимость эксплуатации гидротранспортных систем, являются уменьшение трудоемкости работ при техническом обслуживании трубопроводов, снижение энергоемкости процессов транспортировки и долговечность. Существующая тенденция к повышению производительности процессов на горных и других предприятиях в конечном счете приводит к тому, что одним из важнейших вопросов при проектировании трубопроводов становится долговечность, поскольку загрязнение окружающей среды и рабочей зоны, простои производства из-за внеплановых и вынужденных ремонтных работ, связанных с необходимостью капитальных вложений, демонтажа и монтажа трубопроводных систем, заметно снижают экономическую эффективность производства [15,17-20].

Исходя из вышеизложенного, разработка и исследование полимерных трубопроводных систем с повышенной стойкостью к гидроабразивному износу является весьма актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы. Чтобы продлить срок службы пульпопроводов, как правило, применяются армированные резиновые рукава

(рисунок 3) или металлические трубы, футерованные термопластичными полиуретанами (TPU) либо резинами. Однако изготовление резинотехнических изделий является энергозатратным и низкопроизводительным процессом. Определенный дефицит полиуретанов связан с отсутствием компонентной базы, особенно для термопластов. Следует также учитывать, что TPU значительно дороже РТИ [15, 16, 21-28].

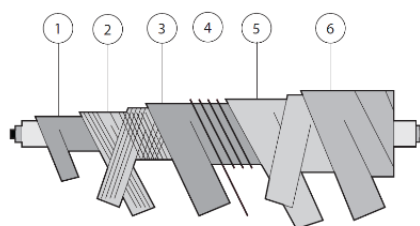


Рисунок 3 – Конструкция армированного резинового рукава: 1 – резиновый шланг, 2,5 – корд из полиэфирного волокна, 3 – адгезионный резиновый слой, 4 – армирование стальной спиралью, 6 – покрывной слой из резины [21]

Возникает вопрос о разработке полимерных труб, которые будут сочетать в себе технологические и эксплуатационные преимущества напорных полиэтиленовых труб с износостойкостью и гидравлическими характеристиками эластомерных материалов, применяемых для гуммирования изделий, работающих в условиях гидроабразивного воздействия турбулентного потока.

Одним из направлений повышения общей эффективности пульпопроводов может стать использование полиэтиленовых труб с внутренним соэкструдированным слоем из термопластичных эластомеров. Уникальность таких труб будет определяться возможностью получения непрерывным методом соэкструзии; невысокой трудоемкостью и энергоемкостью производственного процесса; доступностью вторичной переработки; малым весом; простотой соединения по технологии сварки встык или сварки электрофузионными муфтами. При этом сохраняются другие отличительные особенности, характерные для полиэтиленовых труб и армированных резиновых рукавов: химическая стойкость; отсутствие зарастания стенок при эксплуатации; гибкость; способность к

поглощению шума и вибрации, низкая шероховатость. Кроме того, возможность поставки полиэтиленовых труб большой длины (наружным диаметром до 160 мм) на катушках и барабанах является значимым преимуществом перед футерованными стальными и армированными металлом резиновыми трубопроводами [1, 2, 16, 21, 29, 30].

Цель работы:

Разработка дизайна и технологии производства стойких к гидроабразивному износу полимерных труб специальной конструкции для применения в системах гидротранспорта.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе сформулированы и решены следующие **основные задачи:**

- комплексное сравнительное исследование стойкости к гидроабразивному износу полиолефинов; термоэластопластов различного химического строения, в том числе термопластичных полиуретанов, применяемых для футеровки внутренней поверхности гидротранспортных систем; смесей на основе полиолефинов и термоэластопластов; стали;
- изучение динамических механических свойств и влияния жесткости (по показателям модуль упругости, твердость по Шору) на стойкость к гидроабразивному износу полиолефинов и термоэластопластов различного химического строения;
- сравнительное исследование реологических свойств трубных марок полиэтилена и термоэластопластов, стойких к гидроабразивному износу;
- разработка технологии производства полиэтиленовых труб с внутренним слоем из термоэластопласта с повышенной стойкостью к гидроабразивному износу;
- исследование гидравлических характеристик при гидротранспорте хвостов обогащения железной руды в трубопроводах, изготовленных из углеродистой стали, полиэтилена высокой плотности и термоэластопласта с повышенной стойкостью к гидроабразивному износу;

- оценка влияния скорости, концентрации и дисперсности пульпы на интенсивность износа полимерных и стальных трубопроводов.

Научная новизна:

- проведенные исследования смесей полиолефинов и термоэластопластов позволили выявить зависимость стойкости к гидроабразивному износу от жесткости полимерных композиций;

- впервые установлена взаимосвязь между модулем механических потерь в динамическом режиме нагружения и гидроабразивным износом для полиолефинов, термоэластопластов различного химического строения и их смесей;

- впервые экспериментально доказано наличие инкубационного периода процесса разрушения термопластичных вулканизатов при гидроабразивном воздействии пульпой.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработана технология производства трубопроводных систем с повышенной стойкостью к гидроабразивному износу. Трубы представляют собой двухслойную конструкцию с наружным слоем из полиэтилена высокой плотности, который принимает на себя внутреннее кольцевое напряжение, и внутренним соэкструдированным износостойким слоем из термопластичного вулканизата Армлен ПП ТЭП 12-55А. Соединительные детали (фитинги) изготавливаются из отрезков трубы методом сварки встык с использованием нагретого инструмента. Отводы изготавливаются в том числе и методом горячей гибки отрезков труб. Втулки под фланец изготавливаются методом обточки путем удаления части материала с наружной поверхности отрезка трубы с соответствующим внутренним диаметром и увеличенной толщиной стенки. Фланцевая часть также может быть изготовлена методом намотки на отрезок трубы полиэтиленовой ленты с последующей обточкой до заданных размеров.

По результатам натурных испытаний на участке перекачки пульпы Жезказганской обогатительной фабрики, входящей в состав холдинга «Казахмыс», и на опытно-промышленном участке золотоизвлекательной фабрики ОАО «Рудник

имени Матросова» (ПАО «Полнос») трубопроводные системы рекомендованы к использованию в качестве альтернативы армированным резиновым и металлическим трубопроводам, в том числе футерованным.

Разработаны технические условия ТУ 22.21.21-049-73011750-2022 «Трубы напорные из полиэтилена с повышенной стойкостью к гидроабразивному износу» и инструкция по строительно-монтажным работам ИМ.ГПП.19-19-2 «Монтаж полиэтиленовых труб «МУЛЬТИПАЙП ИС» и «МУЛЬТИПАЙП ИС ПРОТЕКТ» с повышенной стойкостью к гидроабразивному износу», включающая рекомендации по стыковой сварке.

Трубопроводные конструкции сертифицированы на соответствие ТУ (СС № РОСС RU.НВ24.АПТС Н00139/23) и требованиям промышленной безопасности (СС № С-РТЭ.002.Т.У.01194) и серийно производятся на предприятиях ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК» под торговым наименованием МУЛЬТИПАЙП ИС в стандартном исполнении, а также со специальными защитными покрытиями: МУЛЬТИПАЙП ОС ИС в трудногорючем исполнении и МУЛЬТИПАЙП УФ ИС со специальным покрытием, стойким к УФ-излучению для открытой прокладки.

В настоящее время трубы надежно эксплуатируются на Гремячинском месторождении проекта «ЕвроХим-ВолгаКалий» и Наталкинском горно-обогатительном комбинате.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты сравнительного исследования комплекса физико-механических характеристик полиолефинов и термоэластопластов различной химической структуры;
- результаты сравнительного исследования динамических механических характеристик в диапазоне температур от минус 100 до плюс 100 °С на примере полиолефинов, термоэластопластов и их смесей;
- зависимость стойкости к гидроабразивному износу от величины модуля механических потерь полиолефинов и термоэластопластов различного химического строения;

- результаты модельного эксперимента по изучению влияния состава пульпы на износостойкость и коэффициент гидравлического сопротивления трубопроводов с внутренней поверхностью из стали, полиэтилена высокой плотности, термопластичного вулканизата и термопластичных полиуретанов;
- технология производства многослойных труб с внутренним износостойким слоем из термопластичного вулканизата.

Методология и методы исследования. В работе использованы современные аппаратные методы физико-химического анализа, а также физико-механических испытаний согласно стандартным методикам и ГОСТ с применением статистической обработки результатов.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов подтверждена воспроизводимостью результатов и апробацией в рамках докладов на российских и международных научных конференциях, отсутствием противоречий с научно-технической информацией, высокой точностью оборудования для снятия показаний при оценке износостойкости и надежностью методов оценки физико-химических свойств полимерных материалов, использованных в работе.

Личный вклад автора состоит в постановке задачи и проведении экспериментов, обсуждении целей и задач исследования; разработке дизайна и отработке технологических режимов изготовления труб; обобщении, анализе и трактовке экспериментальных данных; формулировке положений и выводов работы, их оформлении в виде научных публикаций и докладов на конференциях.

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены на V Международной Российско-Казахстанской научно-практической конференции «Химические технологии функциональных материалов» (16-18 мая 2019 г., г. Новосибирск); XIV Всероссийской научной конференции «Технологии и материалы для экстремальных условий» (16-20 сентября 2019 г., г. Агой); VIII Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (19-22 ноября 2019 г., г. Москва); VII International scientific

conference «Science, Technology and Life 2020» (December 24-25, 2020, Czech Republic, Karlovy Vary - Russia, Moscow); XXVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (12-23 апреля 2021 г., г. Москва).

Публикации. По теме работы опубликовано 10 научных трудов, в том числе 1 статья, индексируемая в международной базе Scopus, 3 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ и 1 статья, индексируемая в системе РИНЦ. Результаты научного исследования подтверждены участием на научных мероприятиях всероссийского и международного уровня: опубликовано 5 работ в материалах международных и всероссийских конференций.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения; литературного обзора; экспериментальной части; обсуждения результатов; заключения; списка сокращений и условных обозначений; списка использованной литературы из 141 наименования; приложений, в которых представлены технические условия на разработанные трубы, инструкция по строительно-монтажным работам, акты опытно-промышленных испытаний и отзывы. Работа изложена на 164 страницах, содержит 77 рисунков, 48 таблиц и 5 приложений.

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры химии и технологии переработки пластмасс и полимерных композитов РТУ МИРЭА (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Научно-технического центра НПП «ПОЛИПЛАСТИК», НИИ ООО «Группа «ПОЛИПЛАСТИК», Климовского трубного завода и кафедры транспортно-технологических процессов и машин Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за помощь в организации экспериментальных работ, проведении исследований, анализе и интерпретации результатов.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1. Материалы для технологических трубопроводов. Виды и характеристики пульпопроводов

Технологии меняются и развиваются, а регламентирующая документация непрерывно обновляется, в связи с чем уже сейчас существует огромное разнообразие материалов, которые можно применять в трубопроводных системах. К примерам реактопластов, которые используются в трубопроводных системах, относятся усиленные волокнами полимерные композиции. Полимерная составляющая может быть на основе полиэфирных, эпоксидных или фурановых реакционно-способных олигомеров. Для производства стеклопластиковых труб обычно используются винилэфирные термореактивные пластмассы, характеризующиеся высокой химической стойкостью и теплостойкостью. Термореактивные смолы все чаще применяются при изготовлении гибких рукавов для санации трубопроводов. Эластомерные материалы находят применение как в металлических, так и в неметаллических трубопроводных системах. В связи с высокой гибкостью, абразивной стойкостью, химической и температурной стойкостью многие эластомеры нашли свою нишу в промышленности в виде резиновых армированных шлангов, а также как защитные покрытия технологических трубопроводов, которые могут наноситься гуммированием «сырой резины» с последующей стадией вулканизации или посредством оклейки вкладышами из вулканизированной резины (рисунок 4). К крупнотоннажным трубным термопластам относятся композиции на основе поливинилхлорида (PVC), полиэтилена высокой плотности (HDPE) и полипропилена (PP), которые применяются в бытовых, технологических и магистральных системах трубопроводов. Из полипропиленовых композиций производят трубы и комплектующие большей частью для бытовых систем отопления. Полиэтиленовые трубы также находят применение в промышленности, но в основном используются для строительства магистральных и бытовых систем водоснабжения и стоков. Термоэластопласты (TPE), сочетающие в себе эксплуатационные свойства резин и

технологичность термопластов, применяют для изготовления трубок и шлангов, стойких к высокой температуре и агрессивным средам, и в качестве дополнительного функционального слоя внутренней поверхности элементов технологических трубопроводов [1, 3, 15, 16, 18, 21, 24, 25, 27, 29-38].

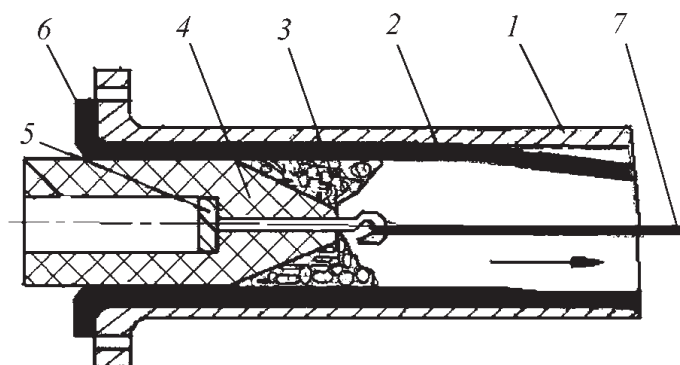


Рисунок 4 – Схема гуммирования трубы методом горячей вулканизации: 1 - металлическая труба, 2 - викаль, 3 – паста, 4 – резиновый снаряд, 5 – полая хвостовая часть резинового снаряда, 6 – разбортованная часть викаля, 7 – трос [16]

В целях улучшения эксплуатационных характеристики металлических и полимерных трубопроводов в промышленности зачастую используется модификация их наружной или внутренней поверхности путем установки или нанесения специальных защитных покрытий. Например, для повышения износостойкости металлических труб применяются самые разнообразные способы, к числу которых относятся нанесение алюмотермических покрытий и футеровка каменным литьем. Для уменьшения негативного воздействия от контактируемой среды или улучшения гидромеханических показателей металлических трубопроводов наибольшее распространение получили полимерные покрытия на основе эпоксидных смол, полиэфиров, полиолефинов, полимочевины или полиуретанов. Полипропиленовые и полиэтиленовые композиции, как правило, используются для защиты наружной поверхности от окислительной деструкции, а внутренней - от химического воздействия и налипания. Известны способы, где для изготовления металлических и полимерных труб, более стойких к воздействию минеральных частиц, футеровку предлагается производить композициями

полиэтилена с твердостью по Шоу А не более 96 и плотностью не более 0,92 г/см³. В качестве мономеров рассматриваются сополимеры альфа-олефинов (5 – 50%) с атомами углерода в количестве от 3 до 20, содержащие функциональные звенья α,β -этилен-ненасыщенных карбоновых кислот или ангидридов. Облицовку внутренней поверхности проводят различными способами: затягиванием или вставкой полиолефиновой трубы; укладкой предварительно сформованной полиолефиновой пленки или листа. Для повышения стойкости к износу стальных трубопроводов в минеральной промышленности при транспортировке абразивных сред, в том числе и гидросмесей, применяется футеровка из резины и ТПУ (рисунок 5) [9-12, 16, 18, 21, 28, 31, 39-45].



Рисунок 5 – Стальные трубы, футерованные изнутри полиуретаном [28]

Термопластичные полиуретаны представляют собой блок-сополимеры, свойства которых определяются химической структурой, длиной и количественным соотношением жестких и гибких сегментов. Возможность переработки на разнообразном стандартном оборудовании, высокая стойкость к истиранию, динамическим нагрузкам и многим агрессивным средам в диапазоне рабочих температур полиуретанов (PUR) определили интерес горнорудной промышленности к полиуретановым эластомерам. Нанесение полиуретанового покрытия напылением является наиболее целесообразным, когда речь идет о небольших толщинах, либо о футеровке металлических трубопроводов непосредственно на объектах. Для производства абразивостойких напорных труб применяется метод центробежного литья, который позволяет получать футеровочные покрытия большой толщины и с низкой шероховатостью.

Футеровка промышленных трубопроводов полиуретаном – отдельная отрасль мирового бизнеса. Среди российских производителей, специализирующихся на изготовлении напорных трубопроводных систем с внутренним полиуретановым покрытием, наиболее известны НПО «СОМЕКС», ПФК «УретанТех-М», НПП «Уником-Сервис». Также известны способы футеровки самотечных труб листовым PUR или вкладышами, представляющими собой цельные полиуретановые трубы (рисунок 6). В качестве примера организации, изготавливающей подобные трубные вкладыши, в том числе и осуществляющей их монтаж на объектах, можно привести российское предприятие ООО "Еврогомма" [16, 28, 41,44-52].



Рисунок 6 – PUR вкладыши для облицовки внутренней поверхности самотеков [28]

Кроме полиуретановых покрытий для повышения износостойкости труб применяют футеровку резиной либо используют резиноармированные рукава. В рецептурах резин используют изопреновые (NR, IR), бутадиеновые (BR), стирол-бутадиеновые (SBR) и другие каучуки. Мировыми лидерами в предоставлении комплексных решений для различных отраслей промышленности, в том числе и для горнодобывающей, являются финский машиностроительный концерн Metso и британская компания Weir Group PLC, основанная еще в 1871 году. Для гидротранспортных трубопроводов компанией Weir Group PLC выпускаются износостойкие армированные резиновые шланги и отводы различной конструкции с заявленной рабочей температурой в интервале от минус 35 до плюс 75 °С, при этом также имеются решения для случаев применения при более высоких температурах и в химически агрессивных средах (рисунок 7). Компания Metso в

направлении напорных трубопроводных систем фокусируется на изготовлении гибких резиновых трубопроводов и гуммированных стальных труб. Для изготовления внутреннего слоя металлических труб используют натуральный каучук с твердостью 50 единиц по Шору А. В качестве армирующего слоя шлангов компании Metso применяется оцинкованная стальная спираль и корд из полиэфирных волокон. В свою очередь, резиновые слои могут быть изготовлены из NR или SBR различной твердости в зависимости от размера транспортируемых минеральных частиц и рабочей температуры. К примеру, SBR – при размере частиц более 10 мм и рабочих температурах до плюс 80 °С. В связи с невысокой химической стойкостью шлангов из композиций на основе NR и SBR, срок службы таких шлангов будет сильно варьироваться в зависимости от типа химического вещества, его концентрации, рабочего давления и температуры среды. Среди ведущих российских производителей износостойких пульпопроводов на основе резины известны компании НПО «Сомекс»; НПО «Композит», выпускающая гибкие резинотканевые и обрезиненные стальные трубопроводы; ООО «Рассвет-К», которая также занимается изготовлением плоскостворачиваемых пульпопроводов для оперативного или временного применения [16, 21, 25, 27, 53].



Рисунок 7 – Армированный стальной спиралью резиновый рукав производства Weir Group PLC для перемещения абразивных суспензий под давлением или в вакууме [27]

Применение резиновых пульпопроводов обычно ограничивается температурой +80 °С, а тип каучуков определяется исходя из размера транспортируемых частиц, характеристик несущей и внешней среды, температуры.

Например, австрийский разработчик и производитель гидравлических и промышленных гибких резинотканевых рукавов компания Semperit предлагает широкий спектр решений в зависимости от конкретных условий применения. Для пневмо- и гидротранспорта абразивных минеральных веществ (например, песок, цемент, гипс, бетон, щебень, гравий, стекло и т.д.) внутренний слой напорных трубопроводов может быть изготовлен из композиций на основе SBR, NR и BR. Для перемещения химических удобрений, минералов в концентрированных кислотных/щелочных средах предлагается использовать PE-X, а при контакте с продуктами на основе минеральных масел – акрилонитрил-бутадиеновые каучуки (NBR), маслостойкость и стойкость к растворителям которых растет с увеличением содержания нитрильных групп в сополимере. Однако с увеличением количества NBR в составе композиции интервал стеклования заметно смещается в область более высоких температур, что приводит к большему тепловыделению при деформировании и снижению износостойкости. NBR, как и TPU, можно применять при контакте с пищевыми продуктами (транспортировка зерна и т.п.). При изготовлении стойких к повышенным рабочим температурам (+95 °С) промышленных рукавов Semperit использует этиленпропилендиеновые каучуки (EPDM), известные своей стойкостью к нагреву и окислению, а также химической стойкостью к действию полярных растворителей. Внутренний слой резиновых трубопроводных систем может быть также в антистатическом исполнении. Для значительного улучшения долговременной стойкости резиновых изделий, контактирующих с очень горячими агрессивными жидкостями, например, маслами и неполярными углеводородами, взамен NBR обычно используются гидрированные акрилонитрил-бутадиеновые каучуки (HNBR) или более дешевые этилен-акрилатные эластомеры (АЕМ) [21, 27, 37, 54-58].

В [55] описаны технологические шланги из этилен-акриловых каучуков (оптимальное содержание от 40 до 60 м.ч. в полимерной смеси) для транспортировки битума, асфальта и гудрона при рабочих температурах вплоть до 230 °С. Для лучшей адгезии между слоями шланг усиливается предпочтительно оплеткой из полиамидных нитей с большим шагом армировки (открытые ячейки),

а в состав эластомерной смеси добавляется диоксид кремния. Помимо типа каучука, стабилизирующих и технологических добавок, определяющих конечные характеристики вулканизата, известны способы [54] улучшения стойкости к механической эрозии посредством обработки рабочей поверхности растворимыми в эластомере набухающими агентами, например, сложными эфирами дикарбоновых кислот, триалкилфосфатами, минеральными маслами. Результирующий эффект проявляется в том, что молекулы агента распределяются в слоях сшитой матрицы, тем самым увеличивая расстояние между узлами сшивки (рисунок 8), причем количество агента будет уменьшаться по мере продвижения от поверхности в глубь по толщине стенки шланга. Допускается также пропитка эластомера набухающими агентами в напряженном состоянии. Увеличенное расстояние между узлами сшивки уменьшает напряжения в изделии и наделяет его лучшей эластичностью по отскоку и, соответственно, более низким тепловым гистерезисом.



Рисунок 8 – Расстояние между узлами сшивки эластомера до (4, 5) и после пропитки набухающими агентами (4', 5') [54]

Таким образом, существует большое количество возможных модификаций промышленных резиновых шлангов, однако технология изготовления включает в обязательном порядке стадии приготовления резиновой смеси, армирования (может быть до нескольких совершенно разных усиливающих слоев) и вулканизации. Это делает процесс получения напорных шлангов низкопроизводительным и энергозатратным, что, безусловно, отражается и на стоимости конечного продукта. Вулканизованные смеси нельзя вторично переработать как термопласты: отходы производства и отработавших

трубопроводов, как правило, утилизируются. Хотя благодаря высокой гибкости армированные резиновые шланги зачастую позволяют заметно уменьшать количество отводов при их монтаже, но при этом имеют много других ограничений при обустройстве систем технологических трубопроводов. Например, во избежание деформирования жесткого каркаса, которое может возникнуть при провисании армированных металлической спиралью шлангов, фирма METSO указывает на необходимость равномерного распределения тянущей силы при их подъеме (рисунок 9). На протяжении всей длины резиновых трубопроводов рекомендуется крепить их к опорным металлическим балкам для компенсации нагрузок, возникающих в рабочем режиме [21, 22, 27, 52, 56, 58].

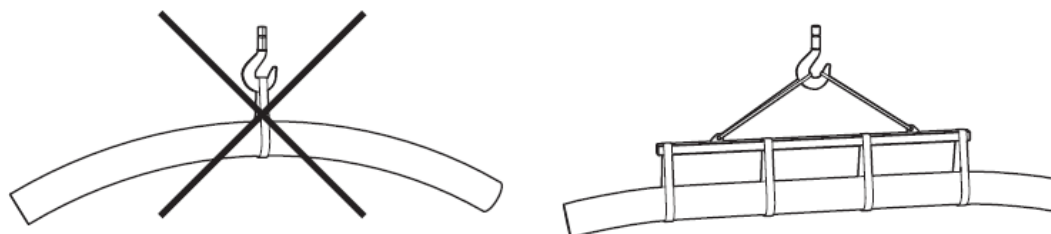


Рисунок 9 – Способ крепления армированных стальной спиралью шлангов при погрузочно-разгрузочных работах [21]

В последние годы эффективно развивается потребление труб из композиций сверхвысокомолекулярного полиэтилена (УНМВПЕ), известные преимущества которого заключаются в более высокой ударной прочности, а также химической и абразивной стойкости в сравнении с другими типами полиэтилена и сталью. Сверхвысокомолекулярными принято считать марки полиэтилена с массами свыше $1,0 \times 10^6$; современные крупнотоннажные сорта УНМВПЕ имеют средние молекулярные массы от 3×10^6 до 10×10^6 . Однако увеличение длины макромолекул и количества проходных цепей, которые приводят к улучшению многих эксплуатационных характеристик УНМВПЕ, одновременно сказывается и на его технологических свойствах. К одному из главных недостатков УНМВПЕ относится чрезмерно высокая упругая составляющая расплава, который по своим характеристикам становится ближе к упругому твердому телу при переработке,

поскольку в процессе плавления кристаллитов высокомолекулярный полиэтилен переходит в высокоэластическое, а не в вязкотекучее состояние. В итоге, значения вязкости UHMWPE будут на несколько порядков выше, чем у трубных марок HDPE. Полиэтилены с молекулярными массами больше 7×10^5 не перерабатываются с применением классических одношнековых экструдеров из-за необходимости реализации в переработочном оборудовании больших механических и тепловых нагрузок. Для формования погонажных изделий из UHMWPE необходимо прибегать к проталкиванию расплава в цилиндре в режиме пристенного скольжения, что осуществимо при двухшнековой экструзии с однонаправленными шнеками или в процессе плунжерной экструзии (ram extrusion), на долю которой и приходится основной объем перерабатываемого в трубы порошкообразного UHMWPE. Возвратно-поступательным движением поршень уплотняет и продавливает дозированную порошкообразную массу в формообразующую камеру спекания, а при каждом подъеме поршня подается новая порция материала для последующего спекания и сваривания с уже предшествующей порцией. Но и в случае изготовления труб методом плунжерной экструзии производительность поддерживается на очень низком уровне в связи с малыми значениями критической скорости сдвига и для исключения значительного изменения структуры UHMWPE в результате деструкции. Вследствие напряжений, возникающих в результате сдвиговых деформаций при переработке, происходит механохимическая деструкция полимера и уменьшение длины его макромолекул. Поэтому применение труб из UHMWPE связано с невозможностью переработки методом одношнековой экструзии и сложностью технологии получения многослойных конструкций: для обеспечения приемлемых скоростей взаимной диффузии полимерных цепей требуется подавать давления со значениями не менее предела текучести, то есть производить спекание слоев. Способ сварки расплавленных слоев под давлением используется при получении листов, плит и пленок из UHMWPE [46, 48, 50, 51, 59-63].

1.2. Абразивное и эрозионное изнашивание

Любое изделие, независимо от его назначения, претерпевает определенные изменения в процессе хранения и эксплуатации, что в конечном итоге приводит к потере работоспособности. В частности, многие виды изделий изнашиваются и с течением времени приходят в неработоспособное состояние. Изнашивание характеризуется двумя параметрами: интенсивностью, которая является функцией совершенной работы, и скоростью – функцией затраченного времени. Однако использование изделия может быть прекращено не только в связи с его отказом, но и по причине того, что дальнейшая эксплуатация становится нежелательной из-за негативного влияния на технологические процессы или из-за снижения надежности с вытекающими из этого рисками самого разнообразного характера. Ограничение на применение нередко накладывается в связи с социальными и техногенными аспектами в целях экономической целесообразности или в результате морального устаревания [64,65].

В машиностроении под износом обычно понимается изменение геометрических параметров твердых тел под действием других тел или среды, которое выражается через линейные размеры, массу или объем. В то же время под воздействием механических усилий происходят не только преобразования формы и размеров деталей или конструкций, но и изменения свойств и структуры самих материалов, что является как следствием статических и динамических нагрузок, так и влияния условий окружающей среды (окисление, температурное воздействие, ультрафиолет, химически агрессивные среды и т.д.). Происходящие в результате длительных повторных нагрузок или многократных деформаций изменения свойств и структуры материалов в полимерной индустрии принято называть динамической усталостью или утомлением, а сохранение работоспособности в течение промежутка времени – динамической долговечностью. К основным причинам снижения прочности при динамическом нагружении можно отнести накопление и развитие микродефектов в виде трещин и пустот; механохимическую деструкцию макромолекул вследствие присутствия в полимере таких

микронеоднородностей структуры, как трещины, механические включения и переплетения макромолекул; процессы перегруппировки надмолекулярных структур, рекристаллизации, ориентации, саморазогрева и окисления [63, 64 – 67].

1.2.1. Изнашивание полимерных материалов абразивными частицами.

Факторы, влияющие на процесс изнашивания. Модели износа

В качестве абразивных частиц могут выступать незакрепленные частицы или неподвижно закрепленные частицы, например, шлифовальная шкурка. К примерам незакрепленных частиц относятся насыпные грузы, транспортируемые на конвейерных лентах, ускоряемые гравитационными силами потоки частиц, частицы в зазорах сопряженных деталей, а также свободные частицы, движущиеся в потоке газа или жидкости. К абразивным частицам относятся минеральные зерна и крупички естественного или искусственного происхождения различной формы. Абразивное изнашивание следует рассматривать как результат перемещения частицы с достаточной твердостью вдоль поверхности материала. Внешне абразивный износ полимеров проявляется в виде характерных следов (царапины, резы, задиры), расположенных на истертой поверхности по направлению движения. В тоже время известно, что трение полимерных материалов по твердым телам с грубой поверхностью без изменения направления может сопровождаться образованием чередующихся поперечных гребней (рисунок 10). Данную картину истирания впоследствии стали называть в честь первооткрывателя «рисунок Шалламаха» [64-66, 68].

Объяснение подобных рисунков истирания, характеризующихся наличием перпендикулярных полос, было дано А. Шалламахом [69] после проведения ряда модельных экспериментов на примере скольжения контртела в виде тупой иглы по поверхности резины. Было установлено, что разрушение проявляется в виде раздира, который происходит перпендикулярно прикладываемому усилию сразу после отрывания резины от иглы, а расстояния между поперечными канавками, как и их глубина, уменьшаются с увеличением твердости материала. Разрушение

резины объясняется перенапряжениями, которые возникают за иглой в процессе её продвижения по поверхности (рисунок 11). Однако, если возникающие силы трения будут меньше прочности резины, произойдет перескок иглы в следующее положение без надрыва поверхностного слоя материала. В таком случае разрыв резины происходит после ряда последующих проходов иглы. Поставленные модельные опыты и полученные картины истирания показали, что чем более острые зерна абразива воздействуют на полимерный материал и чем большей твердостью обладает материал, тем ближе друг к другу находятся области разрыва, вплоть до появления явно-выраженных продольных борозд, являющихся признаком перехода к абразивному механизму изнашивания.

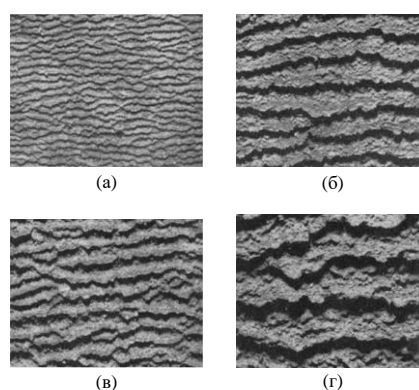


Рисунок 10 – Микрофотографии поверхности резины на основе натурального каучука с содержанием 45 м.ч. сажи (а, в) и 25 м.ч сажи (б, г). (а) и (б) – гладкий асфальт; (в) и (г) – бетон с грубой поверхностью. Направление движения – вверх

На основе представлений о том, что разрушение эластомерных материалов происходит под действием сил трения, Шалламахом [69] была также выведена формула (1), показывающая, что интенсивность абразивного изнашивания (W) прямо пропорциональна давлению контртела:

$$W = \text{const } r \frac{P}{E}, \quad (1)$$

где P – давление, E – модуль упругости истираемого материала, r – радиус индентора (радиус кривизны абразивной частицы).

Постоянная ($const$) характеризует количество проходов контртела до момента отрыва от поверхности надорванной части материала.

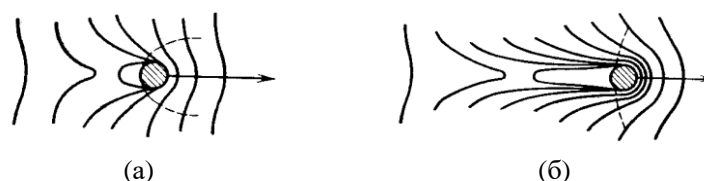


Рисунок 11 – Схематичное изображение двух стадий («а» и «б») деформирования резиновой поверхности иглой. Заштрихованная область – игла в поперечном сечении. Пунктиром показано направление раздира резины [69]

Полученная Шалламахом зависимость (1) дополнительно подтверждается в трудах И.В. Крагельского [70] и С.Б. Ратнера с соавторами (в части давления) [71]. Для металлических материалов степень износа описывается аналогичным уравнением. Прямая зависимость между степенью изнашивания и давлением считается справедливой практически для любых материалов (кроме мягких сортов резин) независимо от механизмов абразивного износа, причем на изнашивание пластмасс величина давления влияет значительно больше, чем на резины [68]. Считается, что уменьшение модуля упругости и твердости материала вызывает повышенную истираемость при абразивном износе и приводит к обратному эффекту при усталостном износе и износе незакрепленным абразивом. Влияние жесткости на величину абразивного износа связывается со значениями сдвиговых напряжений, обусловленных коэффициентом трения и глубиной внедрения частиц. При усталостном износе интенсивность изнашивания связывается с контактными напряжениями, которые изменяются симбатно модулю упругости. Например, для работы в условиях изнашивания абразивным потоком, рекомендуется применять резины с низкой твердостью, а для уплотнителей быстроподвижных соединений, эксплуатация которых характеризуется отсутствием нормальных нагрузок и высоким коэффициентом трения, больше подойдет резина с повышенной твердостью [65, 68, 72-80]. Следует отметить, что некоторые экспериментальные данные не позволяют сделать заключение о непосредственной связи между

жесткостью полимерных материалов и их износостойкостью. В работе [71] было установлено, что при небольших нагрузках повышение жесткости резины приводит к уменьшению интенсивности истирания по металлической сетке, а с увеличением нагрузки соотношение степени износа резин с разной жесткостью может смещаться в обратную сторону. Аналогичные наблюдения об отсутствии корреляции между твердостью и степенью износа для различных полимеров описаны в [81-83]. Модификация рецептуры полимерного материала с целью изменения жесткости одновременно приводит к изменению всего комплекса физико-механических и усталостных характеристик. Критерием абразивной износостойкости является совокупность взаимосвязанных параметров, которые учитывают свойства материала и характер взаимодействия контактирующих тел, как предложено С.Б. Ратнером [84]:

$$V \sim \frac{f}{H\sigma\delta}, \quad (2)$$

где V – износ, f – коэффициент трения, H – твердость, σ – прочность на разрыв, δ – относительное удлинение при разрыве.

Согласно данным, приведенным на рисунке 12, в области между проявлением хрупкости и стеклообразным состоянием твердость и коэффициент трения практически не меняются, а кривая изнашивания материалов проходит через максимум в связи с конкурирующим влиянием прочности и эластичности (величиной относительного удлинения). Снижение износостойкости происходит симбатно прочности до момента достижения температуры, при которой материал начинает проявлять заметное удлинение, приводящее к уменьшению степени его истирания. Максимальное сопротивление износу наблюдается в диапазоне стеклования. Дальнейший рост температуры приводит к переходу полимера в высокоэластическое состояние и увеличению износа в силу возрастающего коэффициента трения и снижения твердости [68, 84].

Для кристаллизующихся полимеров наблюдается несколько иная картина температурной зависимости свойств (рисунок 12). Увеличение износостойкости и последующий выход на плато в первую очередь обуславливается понижением

предела вынужденной эластичности под воздействием приложенных нагрузок при почти неизменных твердости и коэффициенте трения. Сильный рост уровня истирания при нагреве выше температуры плавления объясняется резким падением прочностных свойств и значительным размягчением, приводящим к сильному увеличению площади контакта [68, 84].

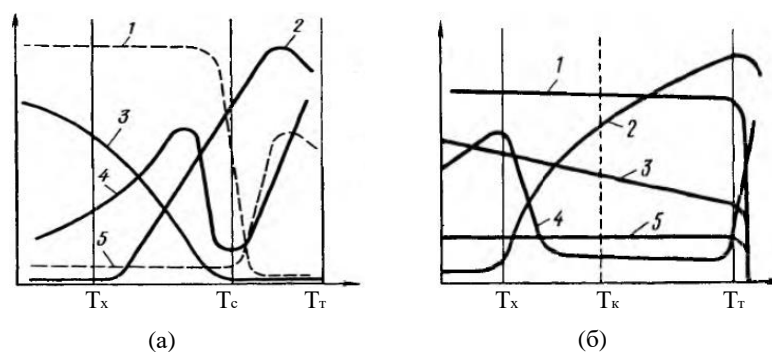


Рисунок 12 – Взаимосвязь между износом и механическими свойствами пластмасс под влиянием температуры: (а) – аморфные полимеры; (б) – кристаллизующиеся полимеры; 1 – твердость; 2 – относительное удлинение при разрыве; 3 – прочность при разрыве; 4 – износ, 5 – коэффициент трения; T_x – температура хрупкости; T_c – температура стеклования; T_r – температура текучести; T_k – комнатная температура

Модель абразивного износа по Ратнеру получила широкое распространение и по настоящее время является одной из самых часто упоминаемых. В последующем было предпринято немало попыток по выявлению взаимосвязи между износом и свойствами материалов, в том числе и с учетом представлений С.Б. Ратнера. Анализ результатов, полученных различными исследователями, показал, что сочетание механических свойств (коэффициент трения, прочность на разрыв, относительное удлинение при разрыве, твердость, модуль упругости) действительно показывает заметно лучшую корреляцию со степенью абразивного изнашивания. Многими авторами были предложены свои модели износа, некоторые из которых будут приведены ниже. Предварительно следует отметить, что ни одна из существующих моделей не позволяет провести полноценную сравнительную оценку потенциального износа различных материалов, поскольку процесс изнашивания имеет сложную природу и обусловлен как соотношением

свойств контактируемых тел, так и конкретными условиями их взаимодействия. В дополнение ко всему износостойкость отдельного материала в реальных условиях зависит и от множества внешних факторов, что также необходимо учитывать при оценке его эксплуатационных характеристик [72, 73, 76, 81-83, 85-96].

Хорст Чихос [90] для пар трения полимер-сталь предложил уравнение, связывающее интенсивность изнашивания (W) с такими свойствами термопластичных полимеров, как нормальная нагрузка (F_n), путь трения (S), коэффициент трения (f) и предел прочности на разрыв (σ_y):

$$W = \frac{F_n S (1 + 4f^2)^{0,5}}{\sigma_y}, \quad (3)$$

Обобщив данные по истиранию шлифовальной шкуркой высоконаполненных композиций на основе полиэтилентерефталата с различным содержанием стекловолокна и стеклошариков, К. Фридрих привел следующую зависимость [85]:

$$W = \Omega \frac{H^{0,5}}{G_{ic}}, \quad (4)$$

где W – интенсивность изнашивания, H – твердость изнашиваемого материала, G_{ic} – энергия разрушения наполненного термопласта, Ω – фактор, выражающий вероятность образования трещин.

К. Фридрихом было установлено, что увеличение массового содержания наполнителя от 30% до 45% вызывает возрастание износа, а лучшая износостойкость оказалась у ненаполненного полимера. При этом увеличение соотношения «длина/диаметр наполнителя» также приводит к увеличению износа. Автор подчеркивает, что под воздействием частиц с большей твердостью у жестких наполненных композиций происходит более активное распространение трещин. К основным параметрам, которые использовались Фридрихом при вычислении вероятности трещинообразования (Ω), можно причислить размер и твердость абразивных частиц, их концентрацию относительно площади контакта и количество наполнителя в полимере [85].

Кеннет Будински [83] провел сравнительные исследования по оценке износостойкости различных термопластов и эластомеров при воздействии незакрепленного абразива (сухого песка) в контакте двух поверхностей – образца испытываемого материала и вращающегося резинового колеса – и сопоставил полученные данные с рядом известных уравнений абразивного износа. По его мнению, модель износа по Ратнеру (2) является наиболее убедительной, однако и в данном случае корреляция находится на низком уровне. Он установил, что наилучшей стойкостью при изнашивании незакрепленным абразивом обладают эластичные полимеры, а также полимеры с низкими значениями коэффициента трения по отношению к песку. В связи с чем Кеннетом Будински было предложено уравнение:

$$W \sim \mu (Se), \quad (5)$$

где W – интенсивность изнашивания, μ – коэффициент трения песка по материалу, Se – деформационный фактор (площадь под кривой «нагрузка – деформация» как мера энергии, необходимой для вдавливания металлического шарика в поверхность материала).

Интересным является и другой энергетический подход относительно изнашивания материалов в режиме контактно-динамического нагружения [16, 97]. Согласно законам термодинамики, всякая физическая система стремится к состоянию равновесия. Процессы, в которых вследствие теплового движения атомов и молекул происходит переход во времени из неравновесного состояния в равновесное, называются релаксационными. Развитие высокоэластической деформации полимера также имеет релаксационную природу, и именно поэтому при приложении высокочастотных синусоидальных нагрузок можно наблюдать эффект запаздывания деформационных изменений полимера относительно соответствующего напряжения. При этом возникает явление гистерезиса, которое проявляется в несовпадении кривых «напряжение – деформация» в каждый промежуток времени. Увеличение значений деформации происходит в результате того, что в момент снятия нагрузки деформация полимера еще не достигла равновесных значений, а к моменту последующего приложения силы полимер не

успел вернуться в исходное состояние. При этом площадь петли гистерезиса на графике таких зависимостей отражает ту часть механической энергии, которая в каждом цикле трансформируется в тепло и в определенной степени активизирует химические процессы в материале [63, 98-100]. На основе представлений о том, что изнашивание под воздействием потока абразивных частиц носит релаксационный характер и сопровождается непрерывным разрушением связей между элементами структуры полимера вследствие его утомления, Н.С. Пенкиным и др. [16, 97] для количественной оценки износостойкости предложен критерий, связывающий величину поглощенной энергии с деформированным объемом материала:

$$e_n = \frac{\chi W_k}{V_d}, \quad (6)$$

где e_n – плотность поглощенной энергии, W_k – кинетическая энергия частиц, V_d – деформированный объем, χ – коэффициент механических потерь.

Авторы [16, 97] отмечают, что если рассматривать износ материала как величину, пропорциональную поглощенной энергии, то резина должна изнашиваться сильнее стали, но на практике это не так. Резины обладают низкими значениями динамического модуля упругости, благодаря чему при ударном воздействии минеральных частиц возникают небольшие контактные напряжения. Причем способность к высоким обратимым деформациям приводит к тому, что кинетическая энергия при каждом ударе распределяется по относительно большому объему материала. Коэффициент механических потерь определяется авторами как количественный показатель, который показывает величину кинетической энергии, израсходованной на осуществление процессов внутреннего и внешнего трения. При нормальных ударах механические потери преимущественно определяются эластичностью материала, в то время как при косом ударе уровень потерь энергии рекомендуется рассчитывать также с учетом коэффициента трения. Приведенное авторами уравнение (6) справедливо при наличии инкубационного периода процесса разрушения, что проявляется при скоростях удара, не превышающих критических значений.

Картина истирания определяется характером взаимодействия на границе раздела контактируемых тел и свойствами изнашиваемого материала. Абразивное изнашивание мягких резин острыми частицами происходит в основном из-за фрикционных взаимодействий. Для термопластов с жесткой поверхностью абразивный износ по большей части будет сопровождаться процессами резания или пластического оттеснения, приводящего к образованию продольных гребней и желобов. Микрорезание имеет место при величинах контактных напряжений, сопоставимых с разрушающими значениями, и определяется как одноактное взаимодействие тел, сопровождаемое удалением материала в виде стружки. Пластическое деформирование наблюдается при контактных напряжениях ниже прочности на разрыв, но превышающих предел текучести, а также связывается с малоцикловой фрикционной усталостью (рисунок 13). В тех случаях, когда поверхность твердых минеральных частиц окатанная, изнашивание протекает менее интенсивно, и механизм износа резины и полимеров с развитой способностью к вынужденно-эластической деформации преимущественно определяется появлением и разрастанием трещин в поверхностных слоях в связи с протеканием процессов накопления остаточной деформации и усталостью, обусловленной дискретностью фрикционного взаимодействия. Жесткие и хрупкие полимеры при трении по любым поверхностям претерпевают в основном абразивное истирание. [44, 64-66, 68, 101-103].



Рисунок 13 – Схема абразивного износа при скольжении частицы по поверхности пластичного материала: (а) – микросрез острой частицей; (б) –отделение материала окатанной частицей в результате пластического деформирования и усталости [44]

Усталостный фактор имеет решающее значение при трибоконтакте, протекающем в условиях контактно-динамического взаимодействия материала с потоком абразивных частиц. Отличительными признаками такого взаимодействия являются отсутствие значительного трения, кратковременность и дискретность. Чем более податливый материал, тем меньше сила удара и возникающие контактные напряжения и тем большее количество циклов требуется для разрушения поверхностного слоя и отделения материала. Исследование процессов износа высокоэластичных материалов под ударным воздействием абразивных частиц привело к выводам о том, что при напряжениях, не превышающих критических значений, отделение фрагментов материала в большей степени сопровождается образованием зон предразрушения с пониженной прочностью после ряда повторных приложений силы (рисунок 14) [16, 76].



Рисунок 14 – Износ материала под ударным воздействием частиц по усталостному механизму (а) и вследствие хрупкого разрушения (б) при напряжениях, превышающих критические значения [76]

Усталостный износ присутствует и при истирании абразивной шкуркой мягких эластомеров. Повышение жесткости полимера и увеличение шероховатости твердой поверхности контртела приводит к уменьшению доли изнашивания по усталостному механизму при трении скольжения и способствует проявлению картины истирания, характерной для абразивного износа. Необходимо отметить, что трение высокоэластичных материалов по относительно гладким поверхностям характеризуется существованием критических значений силы трения, при достижении которых происходит переход от усталостного износа к износу

посредством «скатывания», вследствие чего истирание начинает протекать с чрезмерно высокой интенсивностью. Такой механизм износа реализуется в результате смещения твердым контртелом отдельных выступов на резиновой поверхности и последующим сворачиванием этих выступов в «скатки» (рулоны), что происходит при отдирании слоя резины без относительного скольжения. Считается, что вероятность протекания истирания по подобному механизму возрастает с уменьшением прочности на разрыв материала и с повышением температуры. При температурах, соответствующих стеклообразному физическому состоянию, износ резины при сильном трении также заметно возрастает в связи с сильным доминированием абразивных процессов удаления материала. На сегодняшний день строгая классификации видов изнашивания всё еще отсутствует, что связано с большой сложностью систематизации описанных в литературе многочисленных видов и подвидов изнашивания и разнообразного характера сопровождающих их элементарных механизмов. Границы перехода от одного вида изнашивания к другому зачастую довольно условны, и в реальных обстоятельствах трудно представить протекание одновременно только одного из возможных механизмов. Характер взаимодействия на границе раздела контактируемых тел зависит от множества факторов, к которым относятся свойства абразивных частиц (твердость, форма, размер), физико-механические и химические свойства изнашиваемого материала, вид несущей среды, давление, скорость движения частиц, угол атаки, температура и т.д. [44, 48, 65, 66, 68, 76-78, 104].

1.2.2. Особенности эрозионного износа. Механизм гидроабразивного изнашивания полимеров

В трибологии под эрозией понимается процесс разрушения поверхностных слоев материала в результате механического воздействия потока жидкости, газа или твердых частиц. Разрушение материала, обусловленное воздействием частиц конденсированной фазы, определяется как механическая эрозия. Одной из разновидностей механической эрозии является кавитационная эрозия. Если

твердые частицы движутся в потоке газа или жидкости, то изнашивание принято называть газо- или гидроабразивным [64-66, 105].

Влияние характеристик абразивных частиц на интенсивность эрозионного изнашивания имеет много общего с изнашиванием при трении скольжения. Увеличение степени сглаженности абразивных зерен приводит к меньшему износу полимерного материала вследствие менее агрессивного воздействия посредством микрорезания. В зависимости от типа истираемой поверхности твердость частиц может по-разному влиять на уровень износа, что связывается с соотношением твердости тел, находящихся в контакте. При условии, что твердость абразивных частиц значительно превосходит твердость материала, разница их твердостей не оказывает влияния на величину износа материала. При сопоставимых значениях твердости материала и эродирующей частицы увеличение этой разницы приводит к увеличению износа. Если материал тверже абразивного зерна, то увеличение разницы способствует уменьшению интенсивности изнашивания. В [106] отмечается, что заметное улучшение в стойкости к износу достигается, когда твердость изнашиваемого материала на 80% выше твердости абразивных частиц. Влияние размера частиц при эрозионном износе также является неоднозначным, как и при трении скольжения. С увеличением размера абразивных частиц наблюдается рост интенсивности изнашивания до тех пор, пока не достигнуто пороговое значение, при котором скорость износа замедляется. Такая противоположная тенденция объясняется тем, что с увеличением размера частиц уменьшается их количество при неизменной концентрации, вследствие чего становится меньше удельный вес частиц, сталкивающихся с поверхностью материала, и суммарный эффект от их воздействия снижается. Другая возможная причина связывается с повышением вероятности столкновения частиц друг с другом. Увеличение концентрации частиц, как правило, приводит к увеличению интенсивности изнашивания, но при относительно высоких концентрациях скорость износа может и падать. Уменьшение скорости износа может быть связано с ростом числа соударений частиц между собой, в результате чего меньшее количество частиц достигает поверхности материала. В реальных условиях

эксплуатации уменьшение износа при увеличении количества частиц в единице объема может происходить также вследствие экранирующего эффекта, например, в результате осаждения крупных частиц на нижней части пульпопровода [49, 48, 65, 66, 76, 87, 106-110].

Влияние температуры на износ во многом связано со свойствами контактируемых материалов, углом атаки, а также с наличием и агрессивностью несущей среды. Ю.С. Зуев и соавторы [110] оценивали влияние температуры и агрессивности среды на эрозионный износ резин. Результаты испытаний показали, что при повышении температуры происходит снижение интенсивности изнашивания химически стойких резин, в то время как износ относительно стойких резин увеличивается. Было установлено, что увеличение концентрации агрессивного компонента приводило к снижению скорости изнашивания относительно нестойких к химической среде материалов. На основе полученных данных были сделаны выводы о связи стойкости к воздействию гидроабразивного потока с эластичностью по отскоку резины. Повышение температуры приводит к увеличению эластичности, и износостойкость возрастает. Увеличение эластичности при повышенных концентрациях агрессивной среды объясняется степенью набухания материалов. Считается [95, 98], что чем больше разница между температурой стеклования резины и температурой испытания, тем ниже интенсивность изнашивания.

Авторы [95] сравнивали эрозионную стойкость полиуретановых эластомеров с различной твердостью при контролируемых температурах. В качестве эродента применялся острокромочный гранатовый песок, а угол атаки составлял 30° . Воздействие абразива в воздушной среде при температуре 100°C приводило к снижению износостойкости у всех полиуретановых образцов, а при температуре 60°C для разных образцов наблюдалось как увеличение, так и уменьшение скорости износа. В качестве основного параметра, объясняющего различное поведение исследуемых материалов, была предложена остаточная деформация. Лучшую стойкость к износу при комнатной температуре показал материал, обладающий минимальной остаточной деформацией при циклическом деформировании и

высоким значением удлинения при разрыве. Было обнаружено, что повышенной износостойкостью при температуре 60 °С обладали материалы, чья остаточная деформация заметно уменьшалась при повышении температуры, в связи с чем для создания разрушающих контактных напряжений в их поверхностных слоях требовалось большее число ударов. При 100 °С увеличение износа обусловлено сильным размягчением и значительным снижением прочности материалов, причем наиболее сильно изнашиваются материалы с более низкими значениями удлинения и с большей остаточной деформацией при данной температуре.

В работе [111] оценивали стойкость к эрозионному износу полиэтилена в диапазоне температур от плюс 35 до плюс 65 °С. Изнашивание осуществлялось путем вращения образцов в гидросмеси на основе острокромочного кварцевого песка и воды. Согласно полученным результатам, скорость износа всех полиэтиленовых образцов возрастала при угле атаки 45° и оставалась практически неизменной при угле 90°. Снижение износостойкости при косом ударе объясняется облегчением микрорезания и пропахивания поверхности термопластов вследствие снижения их твердости. По всей видимости, увеличение скорости релаксационных процессов в полиэтилене с ростом температуры не столь значительно и не оказывает даже нивелирующего эффекта при косых ударах острых частиц. В [48] отмечается, что износостойкость как эластомеров, так и термопластов возрастает с повышением температуры. Однако необходимо отметить, что оценка температурного влияния проводилась с применением относительно окатанного песка и по методу Кориолиса, моделирующего очень малые углы атаки, а термопласты представляли собой UHMWPE и PE-X, известные низкими значениями коэффициента трения и низкой степенью налипания к их поверхности минеральных частиц.

При изменении угла атаки меняется интенсивность изнашивания материалов. На рисунке 15 показаны характеристические зависимости интенсивности изнашивания хрупких и пластичных материалов при разных углах атаки. Так, для пластичных материалов максимальный износ наблюдается при малых или средних углах атаки, в то время как для хрупких материалов интенсивность изнашивания

монотонно возрастает и имеет максимальное значение при углах, близких к 90° [75, 76, 78, 98, 109, 111-113].

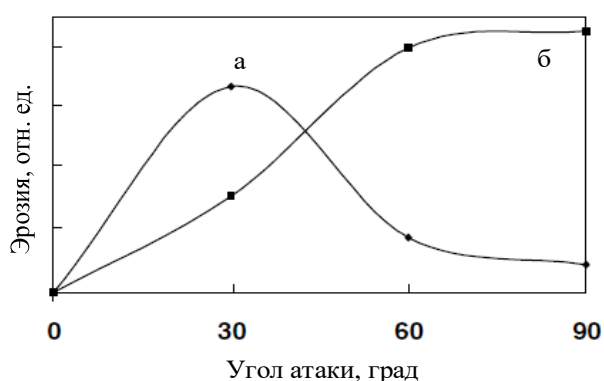


Рисунок 15 – Характерное влияние угла атаки на эрозионный износ пластичных (а) и хрупких (б) материалов [76]

Увеличение пластичности материала приводит к уменьшению критического угла атаки, вплоть до значений, близких к 20° [107]. В литературе сообщается, что на характер кривых (рисунок 15) может оказывать влияние также размер и форма атакующих частиц. В [16] подчеркивается, что замена колотой чугунной дроби на окатанную не только приводит к снижению интенсивности изнашивания углеродистой стали марки СтЗсп при газоабразивном изнашивании, но и наблюдается вырождение максимума и слабая зависимость износа от угла. Согласно [112], результаты некоторых исследований показывают, что при значительном уменьшении размера частиц может происходить хрупко-пластический переход и смещение максимума износа хрупких материалов в сторону меньших углов.

Эрозионное изнашивание пластичных материалов может характеризоваться наличием инкубационного периода, в течение которого не происходит удаления фрагментов материала с поверхностного слоя. В соответствии с данными, представленными в [87], у таких материалов, как полиэтилен и полибутен-1, массовые потери проявлялись только через $10 \div 15$ минут в процессе эрозионного воздействия, а для более хрупкого полистирола с самого начала наблюдалось линейное уменьшение массы. Ударное воздействие производилось стальными

шариками диаметром 500 мкм под прямым углом. Автором [87] было зафиксировано, что инкубационный период для более пластичных термопластов сопровождался увеличением веса образцов, что обуславливалось внедрением частиц. Однако при дальнейшей бомбардировке поверхности податливых пластмасс устанавливался линейный режим массовых потерь, но из-за большей стойкости к образованию микротрещин уровень износа был ниже, чем у хрупких пластмасс.

Аналогично пластичным материалам интенсивность газо- или гидроабразивного изнашивания высокоэластичных полимеров, как правило, характеризуется наличием максимума. Согласно [114], характер влияния угла атаки на интенсивность гидроабразивного изнашивания может определяться физико-механическими свойствами резин: на уровень износа одних материалов угол атаки не влияет, а на другие влияет либо незначительно, либо слишком сильно. Автор [114] утверждает, что меньше всего угол атаки сказывается на эластомерах, которые характеризуются высокой усталостной прочностью. В [16] сообщается, что уменьшение упругости и увеличение эластичности по отскоку может приводить к смещению максимума износа эластомерных материалов в сторону меньших углов при гидроабразивном изнашивании. В целом, эрозионный износ потоком частиц в газовой и жидкой средах объединяет схожий характер зависимости от скорости потока, угла атаки, физико-механических и усталостных свойств эластомеров, однако сопровождающие удаление фрагментов материала процессы во многом отличаются. Изнашивание газоабразивным потоком при прямом ударе сопровождается отслаиванием тонких фрагментов (чешуек) или выкрашиванием (при слабых ударах) по кольцевым трещинам в результате механодеструкции и разрыхления поверхностного слоя эластомера. При косых ударах отделение фрагмента материала происходит в результате фрикционного раздира микротрещин и их последующего задира. При гидроабразивном изнашивании происходит расслоение и отслаивание тонких микрофрагментов материала посредством размывания образовавшихся трещин потоком жидкости [16, 114].

Зависимость скорости износа полимерных материалов от угла атаки минеральных частиц находится во взаимосвязи с силой трения при соответствующих углах атаки [75, 114]. На рисунке 16 представлена зависимость силы трения от угла атаки и среды. В воздушной среде наблюдается заметное увеличение силы трения с уменьшением угла атаки, а при наличии смазочного материала сила трения, наоборот, уменьшается. При этом отмечается [114], что газоабразивное изнашивание при косых ударах протекает значительно интенсивнее, чем при прямых. Несмотря на то, что в глицерине сила трения самая низкая, долговечность резины в этой среде меньше, чем в водной, что объясняется высокой вязкостью глицерина и вытекающим из этого снижением эффекта гидродинамической смазки.

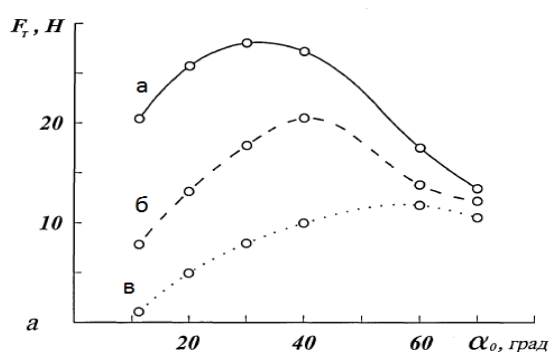


Рисунок 16 – Взаимосвязь угла атаки минеральных частиц и силы трения на воздухе (а), в водной среде (б), в глицерине (в) [114]

При небольших углах атаки износостойкость возрастает с увеличением прочностных свойств полимеров, а при больших углах – с увеличением эластичности и сопротивления утомлению. В [114] сообщается, что при угле атаки 30° наблюдается малоцикловое утомление резины, поскольку значительное фрикционное взаимодействие определяет скорость раздира, а при угле атаки 70° стойкость материала к раздиру оказывает намного меньшее влияние в связи с заметным снижением силы трения и отсутствием относительного скольжения. Коэффициент трения в водной среде меньше, чем при сухом трении, и эта разница возрастает с уменьшением угла атаки (рисунок 19), поэтому прочностные свойства эластомеров при воздействии гидроабразивного потока оказывают меньшее

влияние на износ. Присутствие жидкой среды приводит к увеличению инкубационного периода и препятствует раздиру образовавшихся усталостных трещин. Таким образом, износ в гидроабразивном потоке имеет ярко-выраженную усталостную природу, и разрушение начинается только после достижения достаточного уровня утомленности поверхностного слоя материала. К моменту отделения фрагмента материала в поверхности под сошедшим слоем уже накоплено некоторое количество микроповреждений, в связи с чем инкубационный период становится в несколько раз меньше, и образование трещин происходит быстрее. В некоторых случаях изнашивание может протекать по одноактному абразивному механизму. Например, при малом радиусе внедрения острокромочной частицы возможен локальный рост плотности поглощенной энергии до критических значений, соответствующих энергии разрыва связей, в результате чего разрушение резины будет происходить не по усталостному, а по абразивному механизму изнашивания посредством микрорезания [16, 97, 114].

Особенности механизма гидроабразивного износа высокоэластичных полимеров достаточно подробно изучены В.Г. Копченковым [114, 115]. Гидроабразивный поток характеризуется в десятки раз большей вязкостью несущей среды в сравнении с воздухом, значительно меньшей плотностью абразива относительно жидкой среды, обычно большими размерами частиц и более низкой скоростью. Таким образом, чем меньше размеры частиц и их плотность, тем больше они будут подчиняться законам движения жидкости, причем и сама жидкость, обладающая высокой энергоемкостью, также будет оказывать сильное влияние на процесс изнашивания материала.

Согласно экспериментальным данным, соотношение плотностей кристаллического и аморфного полимеров составляет $1,06 \div 1,17$, что говорит о высокой степени параллельной укладки сегментов в аморфных полимерах и, соответственно, о высоком уровне упорядоченности их структуры. Надмолекулярная структура стеклообразных полимеров характеризуется упорядочением ближнего порядка [63, 99]. Основываясь на топографии поверхности резин, автор [114, 115] предполагает, что отделенные фрагменты

представляют собой микрослои надмолекулярных образований, между которыми связи слабее, чем внутри них, а механизм изнашивания представляется в следующем виде: (рисунок 17).

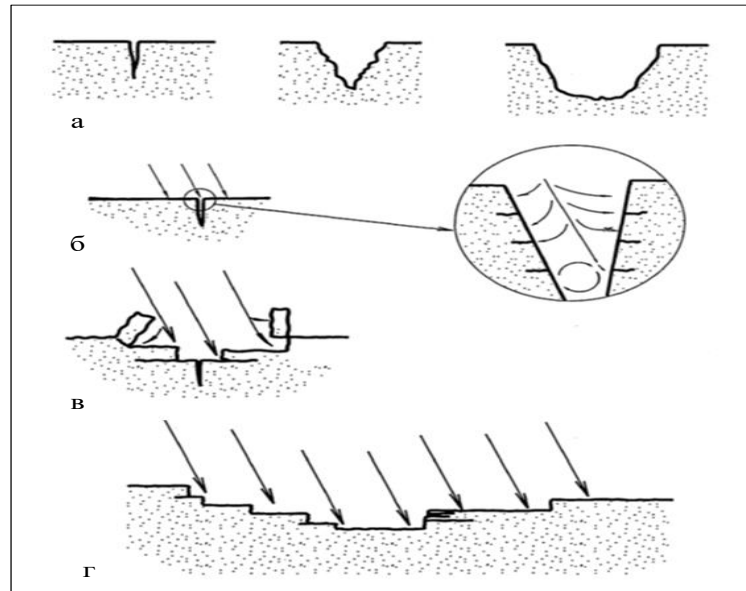


Рисунок 17 – Схематическое изображение процесса гидроабразивного износа эластомера: (а) – образование трещины, пореза, выбоины; (б) – схема размывания материала струями жидкости; (в) – отслаивание микрофрагментов материала; (г) – формирование микрорельефа износа

При воздействии абразивных частиц, микроструй жидкости и кавитационных пузырей на поверхности эластомера появляются усталостные трещины, микропорезы острыми гранями частиц и относительно большие каверны, возникающие вследствие внедрения и последующего вымывания частиц. Отмечается, что поверхностные повреждения при гидроабразивном износе характеризуются намного меньшими размерами в отличие от повреждений, вызванных газоабразивным потоком. Следующий этап разрушения происходит в результате разнонаправленного проникания микроструй жидкости в образовавшиеся повреждения, что вызывает расклинивающий эффект с последующим отделением микрофрагмента материала. [16, 114, 115].

1.3. Общая характеристика термоэластопластов: номенклатура, классификация, фазовая структура, свойства и применение

Термопластичные эластомеры или термоэластопласты представляют собой полимерные материалы, сочетающие в себе одновременно свойства эластомеров и термопластов. В условиях эксплуатации ТРЕ обладают физическими свойствами, характерными для эластомерных материалов, а при повышенных температурах (температуры переработки) ТРЕ обратимо переходят в вязко-текучее состояние, благодаря чему их можно перерабатывать как термопластичные материалы. Из вышесказанного следует, что главным преимуществом ТРЕ является возможность изготовления мягких (гибких) резиноподобных изделий на оборудовании, изначально сконструированном для переработки термопластов (экструдеры, машины для литья под давлением, раздувные агрегаты), без включения в технологический процесс трудоемких стадий смешения и вулканизации. При остывании (в редких случаях требуется введение и последующее удаление растворителя) расплав ТРЕ вновь переходит в твердое эластомерное состояние [30, 52, 116-118].

Почти все известные и коммерчески доступные термопластичные эластомеры, по существу, можно описать как системы с разделенными фазами, где при комнатной температуре одна фаза – жесткая и твердая, а вторая находится в эластомерном состоянии. Единственными известными в настоящее время исключениями являются однофазные перерабатываемые в расплаве каучуки (MPR) и материалы на основе иономеров. Поскольку большинство термоэластопластов являются сополимерами (как правило речь идет о блок-сополимерах и привитых сополимерах), то часто можно наблюдать фазы, которые химически связаны между собой. Несовместимость фаз в таких структурах приводит к расслоению между ними, однако химические связи между ними не дают ход процессу микрорасслаивания, что приводит к образованию коллоидной структуры, которую можно представить как непрерывную эластичную матрицу с диспергированными в ней блоками жесткой фазы. Жесткая фаза придает материалу прочность и

жесткость, а эластомерная фаза обеспечивает гибкость и эластичность системы в матрице жесткого полимера при использовании вулканизирующих систем [30, 52, 117-121].

Свойства термоэластопластов будут нести в себе только блок-сополимеры с определенным соотношением мономерных звеньев. Стирольный блок-сополимер не будет проявлять свойства ТРЕ, если количество звеньев стирола в макромолекуле составляет менее 15%, так как в этом случае не происходит фазового расслоения. Для проявления эластомерных свойств оптимальным количеством жестких звеньев считается около 30% в связи с тем, что примерно при таком содержании за счет Ван-дер-ваальсовых сил происходит ассоциация полистирольных блоков в стеклообразные домены, по сути, представляющие собой частицы мелкодисперсного наполнителя, что в итоге приводит к образованию трехмерной пространственной сетки, где домены выступают в роли её узлов (физических поперечных связей), а эластомерные блоки являются её цепями (рисунок 18).

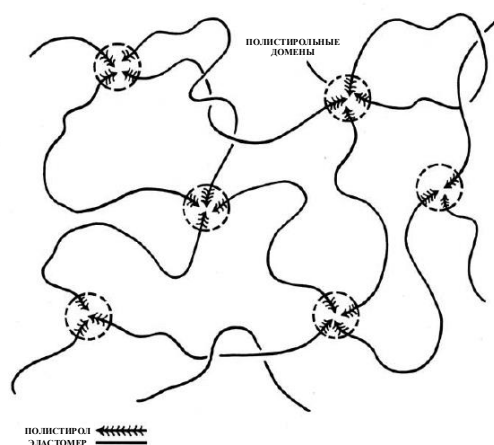


Рисунок 18 – Эскиз структуры SBS, который представляет собой блок-сополимер твердого стеклообразного полистирола и мягкого гибкого полибутадиенстирола [122].

Вследствие ослабления межмолекулярного взаимодействия при нагреве происходит размягчение и разъединение жестких доменов, и их функционал в

качестве узлов пространственной сетки постепенно сходит на нет. В результате резиноподобные свойства ТРЕ утрачиваются, а фазы смешиваются, и термоэластопласт переходит в вязко-текучее состояние. При дальнейшем увеличении содержания стирольных звеньев всё более явно будет проявляться вынужденная эластичность, и по механическим характеристикам стирольный блок-сополимер будет всё больше приближаться к полистиролу, что, как считается, связано с морфологическими изменениями в ТРЕ и переходом от структуры с полистирольными доменами, диспергированными в непрерывной мягкой фазе, к образованию непрерывной полистирольной фазе [30, 116-118, 122, 123].

Поскольку существует множество типов термопластичных эластомеров, они охватывают широкий спектр применений: от замены обычной вулканизированной резины до специальных клеев и герметиков. Некоторые из ТРЕ, в сравнении с традиционными резинами, биологически инертные и поэтому подходят для использования в медицине и для изделий, контактирующих с пищевыми продуктами. Наибольшее распространение ТРЕ получили в автомобильной и обувной промышленности. ТРЕ также активно применяются в производстве различных спортивных товаров, кровельных материалов, прокладок, уплотнителей, подшипников, волокон, мембран, промышленных трубок и шлангов, изоляции проводов и кабелей, упаковки, пленки и т.д. Термоэластопласты могут использоваться в смесях с различными термопластами и эластомерами, а также в качестве модифицирующих добавок к пластмассам и асфальтовым дорожным покрытиям. Следует отметить, что промышленные марки ТРЕ уступают традиционным вулканизированным каучукам по таким параметрам, как остаточная деформация при сжатии при высоких температурах, стойкость к действию агрессивных сред и возможность сильного разбавления техническим углеродом, что значительно ограничивает их применение при производстве автомобильных шин и уменьшает общий объем потребления [30, 116-118, 124, 125].

По прогнозам, в период с 2023 по 2028 годы среднегодовой рост мирового рынка ТРЕ может превысить 5%, что определяет ТРЕ в качестве важного сегмента индустрии пластмасс, на развитие которого направлены значительные ресурсы.

Наибольшим спросом традиционно пользуются стирольные блок-сополимеры, большие объемы потребления также приходится на полиолефиновые термоэластопласты. При этом ожидается, что рост спроса в производстве автомобильных компонентов будет одним из основных фактором роста мировой индустрии ТРЕ. В связи с регулирующим вмешательством природоохранных агентств и ужесточением требований по топливной эффективности основные производители автомобильных компонентов и оборудования вынуждены использовать полимеры, обладающие меньшей массой, в качестве замены металлам и сплавам, что, в свою очередь, способствует инновациям в области термопластичных материалов. Из большой номенклатуры термоэластопластов с высокими эксплуатационными характеристиками, представленных в научно-технической литературе, лишь немногие композиции присутствуют на рынке из-за высокой стоимости, конкуренции или маркетинговой стратегии. В связи с чем повышенное внимание исследователей на сегодняшний день уделяется дальнейшему развитию и разработке смесевых термоэластопластов, устойчивых к воздействию повышенных температур, стойких к агрессивным средам (преимущественно к горячим маслам), а также сочетающих в себе одновременно работоспособность при повышенных температурах и стойкость к маслам. [30, 117, 118, 123-128].

Стремясь предотвратить появление более чем одного сокращенного термина для ТРЕ определенной категории и исключить возможность разных интерпретаций данного сокращенного термина, Международной организацией по стандартизации (ISO) был разработан международный стандарт ISO 18064 «Эластомеры термопластичные - Номенклатура и сокращенные термины». Установленная номенклатура основана на химическом составе полимера или используемых полимеров. В данном стандарте представлены символы и сокращенные термины для обозначения ТРЕ в промышленности и торговле, а также приведены категории наиболее доступных на рынке ТРЕ. В настоящее время коммерчески значимые ТРЕ можно условно разделить на три основные группы (рисунок 19) в зависимости от их химического состава и морфологии:

- Стирольные блок-сополимеры и компаунды на их основе;
- Мультиблочные сополимеры и их смеси с другими полимерами;
- Смеси термопластов и эластомеров.

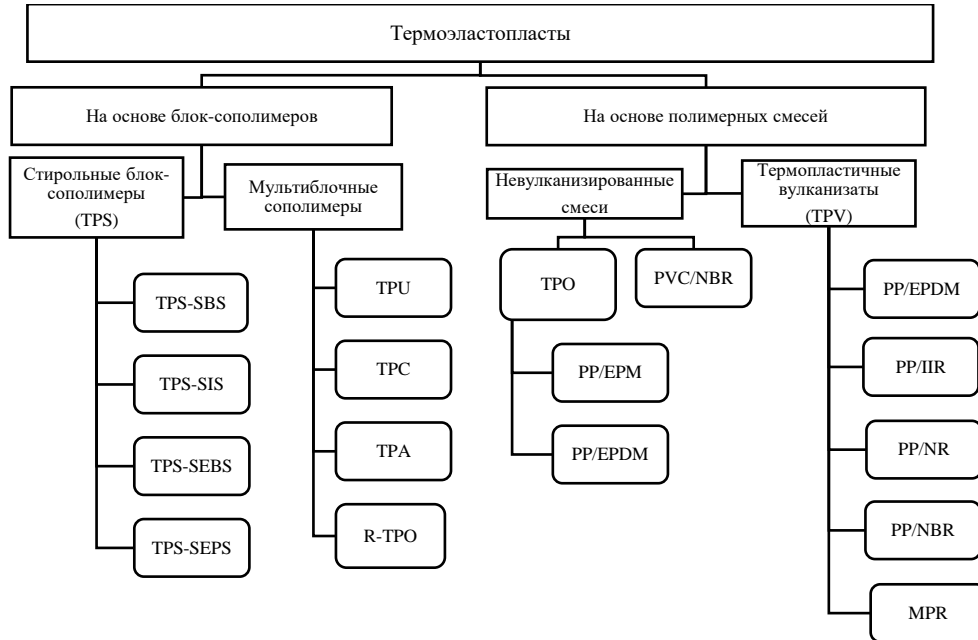


Рисунок 19 – Примеры основных типов промышленных TPE

Одними из самых распространенных в промышленности стирольных термоэластопластов (TPE) являются компаунды на основе триблок-сополимеров: стирол-бутадиеновый каучук-стирол (TPS-SBS), стирол-изопреновый каучук-стирол (TPS-SIS), стирол-этилен-бутиленовый каучук-стирол (TPS-SEBS) и стирол-этилен-пропиленовый каучук-стирол (TPS-SEPS). К мультиблочным сополимерам относятся уретановые термопластичные эластомеры (TPU), сополиэфирные термопластичные эластомеры (TPC), полиамидные термопластичные эластомеры (TPA). Относительно недавно синтезированы реакторные термопластичные полиолефиновые эластомеры (R-TPO), в которых жесткими сегментами являются полиэтилен (PE) или полипропилен (PP), а мягкие сегменты представляют собой α -олефины, такие как пропилен, 1-бутен, 1-гексен или 1-октен [30, 117, 118, 124].

Мультиблочные термоэластопласты представляют собой блок-сополимеры, то есть состоят из чередующихся блоков, где блоки первого типа формируют

жесткую фазу, в качестве которой, как правило, выступают гомополимеры с кристаллической структурой, а другие гомополимерные блоки (аморфные или кристаллические) несут в себе эластомерные свойства [30, 117, 118, 124, 129].

Однако, в отличие от тех же двухблочных (А-В) и трехблочных сополимеров (А-В-С или А-В-А), в блоках мультиблочных ТРЕ имеет место низкомолекулярная последовательность мономерных звеньев (молекулярная масса блоков зачастую не превышает 4000). В результате чего происходит многократное чередование таких небольших блоков (сегментов), и поэтому подобные материалы нередко называют сегментированными блок-сополимерами и обычно обозначают как (А-В)_n (рисунок 20). Поскольку в полиуретановых, полиамидных и полиэфирных термоэластопластах гибким сегментам на основе простых полиэфиров или сложных аморфных полиэфиров свойственна низкая стойкость ко многим известным органическим растворителям, общая химическая стойкость таких ТРЕ определяется именно жесткой фазой, домены которой не позволяют разрушиться набухшему материалу, и степень набухания будет изменяться симбатно содержанию жестких сегментов [30, 117, 118, 124, 129].



Рисунок 20 – Схематическое изображение структуры ТРЕ на основе диизоцианата, удлинителя цепей и диола [117]

В настоящее время широкое распространение в промышленности приобрели ТРЕ, получаемые в результате высокотемпературного интенсивного смешения жесткого и эластичного компонентов. Механическое смешение может приводить к образованию непрерывной взаимопроникающей сетки из двух фаз либо к образованию тонкой дисперсии сшитого эластомерного компонента. ТРЕ, получаемые по экструзионной технологии при смешении компонентов в

экструдере, можно поделить на невулканизированные смеси (рисунок 21) и термопластичные вулканизаты (TPV). TPV производится по специальной технологии, известной как динамическая вулканизация, где селективное сшивание эластомерной фазы осуществляется в процессе смешения в расплаве с термопластичным материалом (рисунок 22). Среди TPE на основе невулканизированных полимерных смесей отдельно выделяют полиолефиновые термопластичные эластомеры, именуемые также термопластичными полиолефинами (TPO), которые представляют собой смеси традиционных резин и полиолефинов, например, таких как изотактический полипропилен, сополимеры пропилена, полиэтилен высокой или низкой плотности, линейный полиэтилен низкой плотности. К другим коммерчески доступным смесевым термоэластопластам относятся композиции на основе галогенированных полиолефинов, например, сочетания PVC с NBR, а также хлорированных полиолефинов с сополимерами этилена с промежуточной степенью сшивки (MPR). Учитывая такое большое разнообразие TPE, ясно, что их свойства будут варьироваться в широком диапазоне: от очень мягких резиноподобных до твердых и прочных, находящихся на плохо определенной границе между эластомерами и гибкими термопластами [30, 117, 118, 124, 129-131].

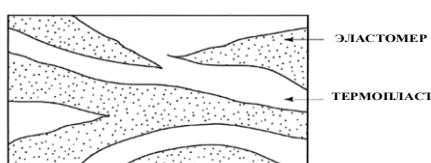


Рисунок 21 – Взаимопроникающая сетка из фаз [117]

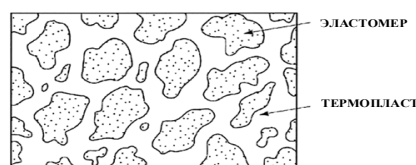


Рисунок 22 – Фазовая структура смеси эластомера и термопласта, в которой в результате динамической вулканизации образовались микронные домены сшитой эластомерной фазы [118]

Термопластичным эластомерам с разделенными фазами присущи многие свойства полимеров, образующих их фазы. Для каждой фазы характерен свой диапазон стеклования либо диапазон плавления, когда речь идет о полимерах с дальним порядком в расположении цепей и звеньев, то есть находящихся в кристаллическом фазовом состоянии. Соответственно диапазон эксплуатации ТРЕ будет определяться с учетом значений T_c эластомерной фазы и $T_c/T_{пл}$ жесткой фазы. В случае TPS-SIS диапазон температуры эксплуатации должен находиться в пределах от минус 60 до плюс 95 °С, где первое значение – это T_c изопренового каучука, а второе положительное значение является температурой стеклования полистирола, а для ТРО на основе полипропилена и натурального каучука (1,4-цис-структура изопрена) или этилен-пропиленового каучука – в интервале от минус 60 до плюс 165 °С. У ТРЕ температура стеклования эластомерной фазы должна быть значительно ниже T_c или $T_{пл}$ жесткой фазы и обычно находится в области отрицательных температур, а верхняя температура эксплуатации обычно ниже $T_c/T_{пл}$ жесткой фазы в связи с необходимостью учитывать температурное размягчение и воздействие нагрузок при практическом применении. На рисунке 23 представлена взаимосвязь между температурой и работоспособностью ТРЕ, которая хорошо прослеживается через изменение величины модуля упругости при динамическом механическом анализе в широком диапазоне температур и выявляет три отчетливых области. Когда рабочая температура ниже, чем T_c эластомерной фазы, ТРЕ действуют как жесткие хрупкие пластмассы и демонстрируют высокие значения динамического модуля упругости (G'). Когда рабочая температура выше, чем температура стеклования или температура плавления твердой фазы, ТРЕ становятся низковязкими текучими материалами. Между этими температурными переходами лежит допустимый диапазон рабочих температур термоэластопластов, где G' достигает относительно постоянного значения (эластомерное плато), а материалы демонстрируют обратимое удлинение при приложении умеренных напряжений, свойственное традиционным вулканизатам [30, 117, 118, 122, 129, 132].

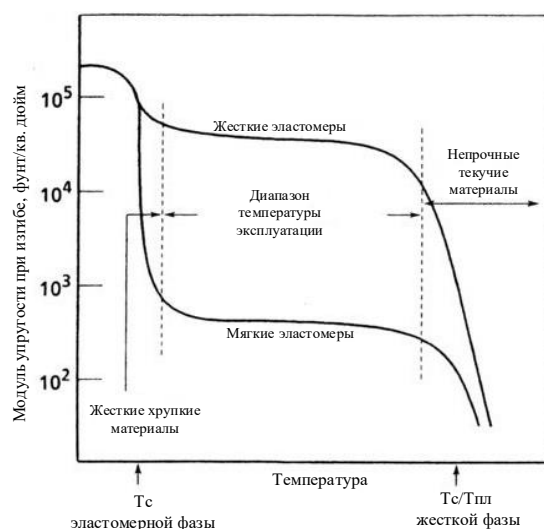


Рисунок 23 – Жесткость типичных ТРЕ в зависимости от температуры [117]

Работоспособность ТРЕ в агрессивных средах определяется химической стойкостью всех фаз одновременно. Если полимер жесткой фазы не проявляет высокую стойкость к какой-либо среде, к которой эластомер стоек, то для термоэластопласта, в общем, не будет свойственна та же стойкость, что и у образующего его эластичную фазу полимера. Таким образом, жесткая фаза во многих случаях может оказывать решающее значение на химическую стойкость термоэластопласта. Стойкость под воздействием масел и растворителей, как правило, проявляют ТРЕ, содержащие в своей структуре полимеры, способные к кристаллизации. К таким материалам можно отнести многие мультиблочные сополимеры (TPU; TRA, TRC; блок-сополимеры полиэтилен-поли(α -олефин)), а также смесевые ТРЕ с жесткой полипропиленовой, полиэтиленовой или поливинилхлоридной фазой [30, 116-118].

Анализ научно-технической информации позволил выбрать для дальнейшего исследования в рамках данной работы ТРО на основе экструдированных смесей EPDM с PP-B и TPV, полученные динамической вулканизацией на основе смесей PP-B и EPDM. Также исследовали TPU, резину на основе EPDM, TPS, R-ТРО, HDPE, LLDPE (в том числе стеклонаполненные) и PP-B.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Характеристики полимерных композиций

Анализ научно-технической информации показал, что в условиях воздействия потоками гидросмесей срок службы конструкций и изделий можно повысить различными способами, в том числе за счет применения более эластичных материалов, таких как вулканизированные эластомеры или термоэластопласты - что является особенно актуальным в рамках разработки полимерных труб с высокой стойкостью к гидроабразивному износу [15-17, 24, 54, 65, 68, 83, 97, 110, 114, 115].

Важнейшей общегосударственной задачей является программа импортозамещения, поэтому в работе наряду с изучением импортных продуктов исследовали отечественные крупнотоннажные промышленные материалы. В качестве объектов исследования были выбраны различные типы термоэластопластов; полиолефинов, в том числе стеклонеполненных марок; и различные сочетания смесей на основе этих материалов.

Смешение композиций осуществляли на двухшнековом экструдере с отношением длины к диаметру шнека (L/D) равным 40. Стандартные образцы для испытаний получали на ТПА ARBURG 320 M/850-210.

К базовым термопластам, которые рассматривались в качестве объектов исследования, относятся трубные марки HDPE (таблицы 1 и 2) – ПЭ 273-83 (ООО «Ставролен») и ПЭ2НТ11-9 (ПАО Казаньоргсинтез»), PEX-a Lupolen 5261Z Q456; LLDPE и трубные марки PP-B. Характеристики линейных полиэтиленов марок SABIC LLDPE 318BJ (Saudi Basic Industries Corporation, Саудовская Аравия), LLDPE UT404 (LOTTE Chemical Corporation, Южная Корея) представлены в таблице 3. Характеристики PP-B марок SABIC PP RELY 61EK61PS, SABIC PP RELY 71EK671PS и Eltex TUB 350-NM00 (Ineos Group Ltd) представлены в таблице 4.

Таблица 1 – Характеристики трубных марок HDPE

Наименование показателя	ПЭ 273-83	ПЭ2НТ11-9	Метод
ПТР, г/10мин (190 °С, 5 кг)	0,47-0,52	0,14-0,17	ГОСТ 11645
Плотность, г/см ³	0,950	0,959	ГОСТ 15139
Предел текучести при растяжении, МПа	26,0 (CV – 2,2)*	24,4 (CV – 0,26)*	ГОСТ 11262
Относительное удлинение при разрыве, %	722 (CV – 4,74)*	578 (CV – 7,04 *)	ГОСТ 11262
Прочность при разрыве, МПа	33,4 (CV – 1,11)*	30,7 (CV – 8,14)*	ГОСТ 11262
Массовая доля технического углерода (сажи), %	0,0	2,3	ГОСТ 26311
CV – коэффициент вариации, %			

Таблица 2 – Характеристики РЕХ-а

Наименование показателя	РЕХ-а Lupolen 5261Z Q456	Метод
ПТР, г/10мин (190 °С, 21,6 кг)	2,7-,2,9	ГОСТ 11645
ПТР, г/10мин (190 °С, 5 кг)	0,13-0,14	ГОСТ 11645
Плотность, г/см ³	0,954	ГОСТ 15139
Предел текучести при растяжении, МПа	28,7 (CV – 2,04)*	ГОСТ 11262
Прочность при разрыве, МПа	33,5 (CV – 8,63)*	ГОСТ 11262
Относительное удлинение при разрыве, %	495 (CV – 8,85)*	ГОСТ 11262
CV – коэффициент вариации, %		

Таблица 3 – Характеристики LLDPE

Наименование показателя	LLDPE 318BJ	LLDPE UT404	Метод
ПТР, г/10мин (190 °С, 2,16 кг)	2,6-2,7	2,7-2,8	ГОСТ 11645
Плотность, г/см ³	0,918	0,919	ГОСТ 15139
Предел текучести при растяжении, МПа	9,74 (CV – 2,25)*	9,40 (CV – 1,32)*	ГОСТ 11262
Относительное удлинение при разрыве, %	929 (CV – 1,87)*	930 (CV – 1,65)*	ГОСТ 11262
Прочность при разрыве, МПа	23,0 (CV – 3,05)*	23,4 (CV – 2,32)*	ГОСТ 11262
CV – коэффициент вариации, %			

Таблица 4 – Характеристики PP-B

Наименование показателя	TUB 350- HM00	PP RELY 61EK61PS	PP RELY 71EK71PS	Метод
ПТР, г/10мин (230 °С, 2,16 кг)	0,28-0,30	0,30-0,31	0,26-0,27	ГОСТ 11645
Плотность, г/см ³	0,908	0,905	0,905	ГОСТ 15139
Предел текучести при растяжении, МПа	33,9 (CV– 0,24)*	28,3 (CV–0,78)*	23,7 (CV–0,69)*	ГОСТ 11262
Относительное удлинение при растяжении, %	530 (CV– 4,32)*	557 (CV– 7,88)*	612 (CV– 3,40)*	ГОСТ 11262
Прочность при разрыве, МПа	42,3 (CV– 3,01)*	40,6 (CV–5,38)*	39,2 (CV–2,22)*	ГОСТ 11262
CV – коэффициент вариации, %				

Кроме полимеров, указанных выше, протестировали на стойкость к гидроабразивному износу полиолефиновые композиции, наполненные стеклошариками, производства НПП «ПОЛИПЛАСТИК»: Армлен ПЭ СШ-40-1К на основе линейного полиэтилена низкой плотности и полипропиленовый концентрат Армлен ПП СШ-45-1К. Основные свойства композиций представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Основные свойства стеклонаполненных полиолефиновых композиций

Наименование показателя	Армлен ПЭ СШ-40-1К	Армлен ПП СШ-45-1К	Метод
ПТР, г/10мин (190 °С, 2,16 кг)	0,6	-	ГОСТ 11645
ПТР, г/10мин (230 °С, 2,16 кг)	-	2,3	ГОСТ 11645
Плотность, г/см ³	1,20	1,26	ГОСТ 15139
Массовая доля наполнителя, %	41	46	ГОСТ 15973
Предел текучести при растяжении, МПа	10	-	ГОСТ 11262
Прочность при растяжении, МПа	-	18	ГОСТ 11262
Относительное удлинение при разрыве, %	390	130	ГОСТ 15139
Примечание – в таблице представлены паспортные данные			

В качестве аналогов традиционных вулканизатов в работе рассматривались отечественные и зарубежные ТРЕ на основе полиолефинов; блок-сополимеров стирола и этилен-бутиленового каучука, стирола и бутадиенового каучука; термопластичные полиуретаны (таблица 6).

Таблица 6 – Марки и типы исследованных TPE

№	Тип TPE		Марка и производитель
1	TPS-SEBS	Блок-сополимер стирола и этилен-бутиленового каучука	Dryflex PS 60R201B (HEXPOL Group, Швеция)
			TO 623 60A2155 (Mitsubishi Chemical Corp., Япония)
			TO S1 631 60A2155 (Mitsubishi Chemical Corp., Япония)
			Thermolast K TC6CSZ (KRAIBURG TPE, Германия)
			Thermolast K TC5CSZ (KRAIBURG TPE, Германия)
2	TPS-SBS	Блок-сополимер стирола и бутадиенового каучука	Армлен ПП ТЭП-20-60А-9010 (НПП «ПОЛИПЛАСТИК», Россия)
			Армлен ПП ТЭП-20-45Д (НПП «ПОЛИПЛАСТИК», Россия)
			Армлен ПП ТЭП-10-75А-819 (НПП «ПОЛИПЛАСТИК», Россия)
			Армлен ПП ТЭП-11-80А-9010 (НПП «ПОЛИПЛАСТИК», Россия)
3	TPV	Термопластичный вулканизат, состоящий из полипропиленовой матрицы с распределенной в ней сшитой фазой из EPDM	Dryflex VE 55A101 (HEXPOL Group, Швеция)
			Santoprene 101-55 (ExxonMobil Chemical, США)
			Армлен ПП ТЭП 12-55А-901 (НПП «ПОЛИПЛАСТИК», Россия)
			Армлен ПП ТЭП 15-60А-901 (НПП «ПОЛИПЛАСТИК», Россия)
4	TPU	Термопластичный полиуретан (блок-сополимер)	Elastollan C85A 10 000 (BASF, Германия)
5	TPO	Полиолефиновый термопластичный эластомер на основе экструдированной смеси PP-B и EPDM	БСК-50 (НПП «ПОЛИПЛАСТИК», Россия)
6	R-TPO	Стат-сополимер этилена и пропилена	Vistamaxx 6202 (ExxonMobil Chemical, США)

Основные характеристики исследованных термоэластопластов представлены в таблицах 7-11. В качестве объектов сравнения применяли резину на основе EPDM с твердостью 65 по Шору А и рабочей температурой от минус 50 до плюс 125 °С и углеродистую сталь марки Ст20.

Таблица 7 – Свойства TPS-SEBS разных производителей

Наименование показателя	Dryflex PS 60R201B	Tefabloc TO 623 60A2155	Tefabloc TO S1 631 60A2155	Thermolast K TC6CSZ	Thermolast K TC5CSZ	Метод
Плотность, г/см ³	1,05	1,18	1,06	1,10	1,10	ГОСТ 15139
ПТР, г/10мин (230 °С, 10 кг)	32-40	57-63	38-44	62-71	29-35	ГОСТ 11645
Условная прочность, МПа	8,06 (CV-5,77)*	8,06 (CV-2,28)*	8,24 (CV-3,12)*	7,63 (CV-5,26)*	6,62 (CV-7,80)*	ГОСТ 270
Относительное удлинение при разрыве, %	867 (CV-3,19)*	634 (CV-0,48)*	734 (CV-2,59)*	577 (CV-3,08)*	548 (CV-4,58)*	ГОСТ 270
Твердость по Шору А	52	63	53	61	54	ГОСТ 263
CV – коэффициент вариации, %						

Таблица 8 – Свойства TPV разных производителей

Наименование показателя	Армлен III ТЭП 12-55А-901	Армлен III ТЭП 15-60А-901	Dryflex VE 55A101	Santoprene 101-55	Метод
Плотность, г/см ³	0,889	0,893	0,970	0,960	ГОСТ 15139
ПТР, г/10мин (230 °С, 10 кг)	28-29	15-19	29-32	14-17	ГОСТ 11645
Условная прочность, МПа	4,78 (CV-6,68)*	6,70 (CV-4,53)*	4,69 (CV-5,52)*	4,60 (CV-2,11)*	ГОСТ 270
Относительное удлинение при разрыве, %	641 (CV-8,58)*	727 (CV-7,65)*	482 (CV-7,15)*	284 (CV-3,54)*	ГОСТ 270
Твердость по Шору А	55	61	54	58	ГОСТ 263
CV – коэффициент вариации, %					

Таблица 9 – Свойства TPS-SBS

Наименование показателя	Армлен ПП ТЭП-20-60А-9010	Армлен ПП ТЭП-20-45Д	Армлен ПП ТЭП-10-75А-819	Армлен ПП ТЭП-11-80А-9010	Метод
Плотность, г/см ³	1,20	1,17	1,16	1,17	ГОСТ 15139
ПТР, г/10мин (190 °С, 5 кг)	4-5	5-6	17-19	64-71	ГОСТ 11645
Условная прочность при растяжении, МПа	6,50 (CV-5,57)*	16,8 (CV-3,89)*	9,90 (CV-4,19)*	5,40 (CV-5,20 %)*	ГОСТ 270
Относительное удлинение при разрыве, %	816 (CV-7,20)*	654 (CV-3,32)*	908 (CV-4,07)*	411 (CV-3,79)*	ГОСТ 270
Твердость по Шору А	63	95	76	77	ГОСТ 263
CV – коэффициент вариации, %					

Таблица 10 – Характеристики TPU

Наименование показателя	Elastollan C85A 10 000	Метод
Твердость по Шору А	85	ASTM D 2240
Плотность, г/см ³	1, 19	ASTM D 792
Условная прочность, МПа	41,4	ASTM D 412
Относительное удлинение при разрыве, %	590	ASTM D 412
Примечание – в таблице представлены паспортные данные		

Таблица 11 – Характеристики TPO и R-TPO

Наименование показателя	БСК-50	Vistamaxx 6202	Метод
Плотность, г/см ³	0,900	0,862	ГОСТ 15139
ПТР, г/10мин (190 °С, 2,16 кг)	0,49-0,50	8,3-8,4	ГОСТ 11645
ПТР, г/10мин (230 °С, 2,16 кг)	1,1-1,2	20-21	ГОСТ 11645
Относительное удлинение при разрыве, %	440 (CV-8,0)*	889 (CV-6,14)*	ГОСТ 270
Условная прочность, МПа	8 (CV-1,0)*	5,68 (CV-7,95)*	ГОСТ 270
Твердость по Шору А	91	63	ГОСТ 263
CV – коэффициент вариации, %			

2.2. Характеристики труб

Для изготовления полимерных труб (или слоя труб, несущего давление) использовали полиэтилены марок ПЭ 273-83 и ПЭ2НТ11-9. Изготовление труб осуществлялось методом непрерывной шнековой экструзии с использованием двухслойной экструзионной головки Helix 63-3 WPO на производственной линии Battenfeld-cincinnati Климовского трубного завода (ООО «КТЗ»).

При изучении гидроабразивных свойств использовали образцы в виде труб однослойной или двухслойной конструкции, описание которых представлено в таблице 12.

Таблица 12 – Характеристики исследованных образцов в виде труб

Количество слоев	Номинальный внутренний диаметр, мм	Номинальная толщина стенки/внутреннего слоя трубы, мм	Материалы
1	90	10	ПЭ 273-83
2	90	5	Наружный слой: ПЭ 273-83; Внутренний слой: LLDPE UT 404
2	90	5	Наружный слой: ПЭ2НТ11-9; Внутренний слой: ПЭ 273-83 / LLDPE UT 404 в соотношении 70 / 30
2	90	5	Наружный слой: ПЭ2НТ11-9; Внутренний слой: Армлен ПП ТЭП-12- 55А-901
2	90	5	Наружный слой: ПЭ2НТ11-9; Внутренний слой: ПЭ 273-83 / Армлен ПП ТЭП-12-55А-901 в соотношении 70 / 30
2	90	5	Наружный слой: ПЭ 273-83 Внутренний слой: Армлен ПЭ СШ-40- 1К
1	50	12	ПЭ2НТ11-9
2	50	5	Наружный слой: ПЭ2НТ11-9; Внутренний слой: Армлен ПП ТЭП-12- 55А-901

Продолжение таблицы 12

Количество слоев	Номинальный внутренний диаметр, мм	Номинальная толщина стенки/внутреннего слоя трубы, мм	Материалы
1	50	12	Сталь СтЗсп
2	50	5	Наружный слой: Сталь СтЗсп; Внутренний слой: TPU с твердостью по Шору А - 90
2	50	5	Наружный слой: Сталь СтЗсп; Внутренний слой: TPU с твердостью по Шору А - 95
1	25	7	ПЭ2НТ11-9
2	25	3	Наружный слой: ПЭ2НТ11-9; Внутренний слой: Армлен ПП ТЭП-12-55А-901
1	25	7	Сталь СтЗсп
1	25	7	TPU с твердостью по Шору А - 85
1	25	7	TPU с твердостью по Шору А - 89
1	25	7	TPU с твердостью по Шору А - 97

2.3. Методы исследования

Для получения информации об основных технологических и эксплуатационных характеристиках полимерных материалов применяли современные физико-химические инструментальные методы исследования.

Определение физико-механических характеристик при растяжении проводили на универсальной машине Zwick/Roell Z050 фирмы Zwick (Германия) на образцах типа 1 согласно ГОСТ 11262 для термопластов и их смесей с термоэластопластами, по ГОСТ 270 для термоэластопластов. Температура испытания составляла плюс 23 °С. Считывание деформации для точного измерения модуля упругости производили автоматическим цифровым датчиком продольной деформации MultiXtens.

Твердость по Шору оценивали на ручных твердомерах при температуре 23 °С согласно ГОСТ 263-75 (Шор А) и ГОСТ 24621-2015 (Шор Д).

Плотность определяли по ГОСТ 15139 гидростатическим взвешиванием.

Остаточную деформацию при сжатии определяли согласно ГОСТ 9.029-74 на образцах типа А.

Динамический механический анализ проводили на приборе AR 2000EX фирмы TA Instruments (США) в режиме кручения с частотой 1 Гц в диапазоне температур от минус 100 °С до плюс 100 °С. Образцы – бруски сечением 4x10 мм, высотой 80 мм. Величина деформация выбиралась предварительным экспериментом. Деформация должна находиться в области линейной вязкоупругости.

Определение реологических характеристик проводили на ручном пластометре Davenport MFI - 9 фирмы Lloyd Instruments (Великобритания) и капиллярном вискозиметре Ceast Smart Rheo SR50:

– показатель текучести расплава согласно ГОСТ 11645;

– кривые течения при следующих параметрах эксперимента: температуры – плюс 190 °С и плюс 230 °С, капилляр с соотношением длины к диаметру $L/D=30$, интервал скоростей сдвига от 0,1 до 1500 1/с.

Гранулы предварительно сушили при температуре 105 °С до содержания влаги не более 0,2 %. Влажность оценивали с помощью анализатора влажности HR83 фирмы Mettler Toledo (Швейцария) при температуре 105 °С.

Определение времени окислительной индукции проводили по ГОСТ Р 56756 на дифференциальном сканирующем калориметре DSC Q100 фирмы TA Instruments (США) при температуре 200 °С в токе O_2 .

Тестирование материалов и труб на стойкость к истиранию проводили в условиях гидроабразивного воздействия. Применяли два наиболее распространенных способа:

1. Метод определения износа материалов при высокоскоростном воздействии абразивных суспензий на основе требований ISO 15527;

2. Метод определения износа труб под действием водо-песчаных суспензий, известный как «Дармштадтский метод» (EN 295-3:2012).

Дополнительно оценили истирание полиэтиленов разных типов шлифовальной шкуркой (Н12 ГОСТ 13344) по ГОСТ 11012.

Сущность испытания при высокоскоростном воздействии абразивной суспензии заключается в измерении величины потери массы образца за единицу времени. Образец установленной формы помещают в емкость со смесью песка и воды (рисунки 24 и 25).

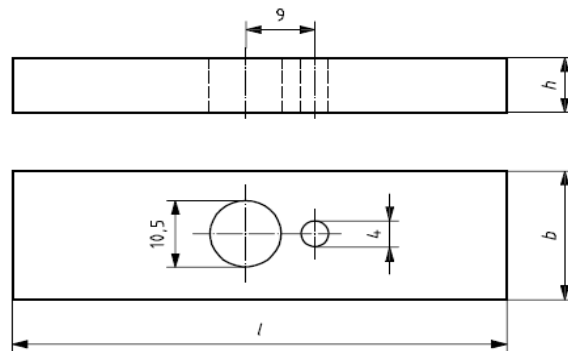


Рисунок 24 – Образец для оценки степени истирания на приборе для определения износа по методу ISO 15527:2010: 1: толщина (h) $6,35 \text{ мм} \pm 0,10 \text{ мм}$, ширина (b) $25,4 \text{ мм} \pm 0,20 \text{ мм}$, длина (l) $76,20 \text{ мм} \pm 0,20 \text{ мм}$

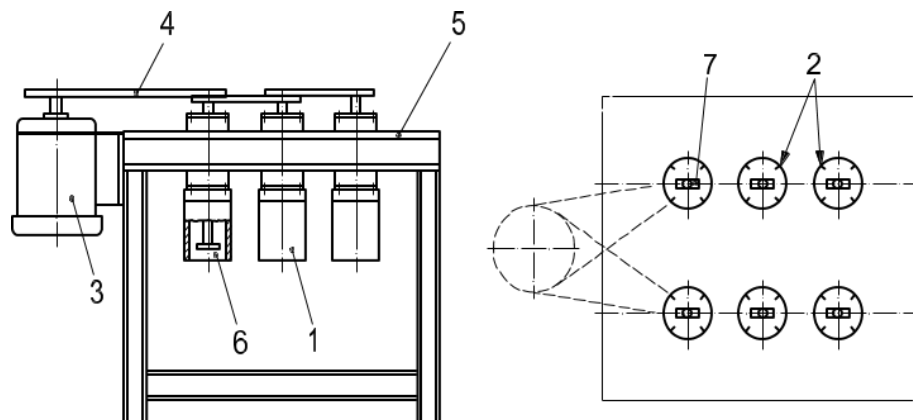


Рисунок 25 – Схема прибора для определения износа по методу ISO 15527:2010: 1 – емкость из нержавеющей стали с рубашкой охлаждения; 2 – разделительные перегородки; 3 – электромотор; 4 – ременной привод; 5 – рамная несущая конструкция; 6 – рубашка охлаждения; 7 – вал с закрепленным образцом

В качестве абразивного материала применяется смесь кварцевого песка и воды в соотношении 3/2 соответственно. Размер зерна – 0,2÷1 мм. Вал с образцом приводится во вращение со скоростью не менее 1200 об/мин (рисунок 25). Температура поддерживается на уровне 23 ± 2 °С. Износ определяют по отношению к эталонному образцу, в качестве которого применяли HDPE марки ПЭ 273-83. Показатель степень истирания рассчитывается как отношение потери массы/объема образца к потере массы/объема эталона.

В Дармштадтском методе измеряются потери толщины стенки трубы. Образец в виде половины трубы длиной 1000 мм, разрезанной пополам вдоль оси, закрывается по торцам заглушками, заполняется водной суспензией с абразивными частицами, закрывается герметичной крышкой и устанавливается на испытательный стенд (рисунок 26).

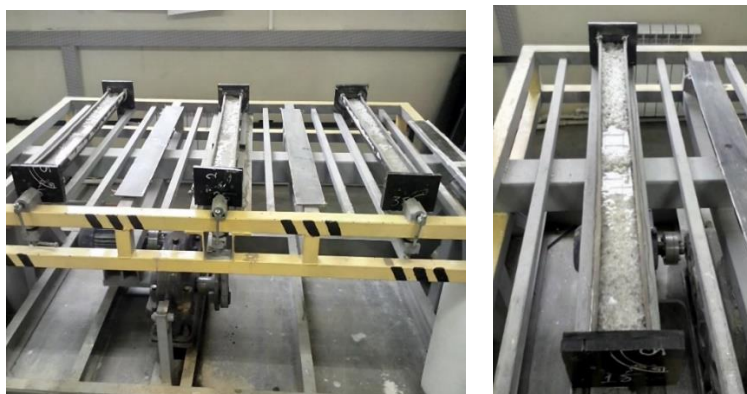


Рисунок 26 – Образцы, установленные на стенд для оценки износостойкости по Дармштадтскому методу

В качестве абразивного материала применяется натуральный кварцевый песок (средний размер зерна 6 мм). Движение абразивного материала обеспечивается за счет изменения наклона образца от горизонтали на $\pm 22,5$ градуса с частотой колебаний 20 циклов в минуту (рисунок 27). Одно колебание состоит из двух наклонов. Наклон производится от нуля до минус $22,5^\circ$ затем до плюс $22,5^\circ$ и обратно до нуля, соответственно, движение от нуля до плюс $22,5^\circ$, затем до минус $22,5^\circ$ и обратно. Испытание проводится на трех образцах до достижения 100 тысяч циклов. Износ измеряется на рабочей длине образца 700 мм,

участки с длиной в 150 мм с двух концов остаются неучтенными. Измерения снимаются не более чем каждые 10 мм, и рассчитывается средняя глубина истирания в мм. Цена деления индикатора 0,01 мм.

DIN EN 295-3:2012-03
EN 295-3:2012 (D)

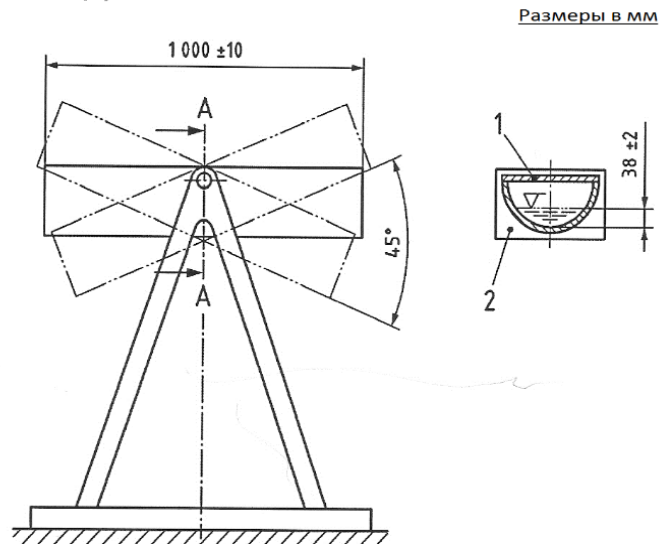


Рисунок 27 – Схема установки для определения износа по Дармштадтскому методу: 1 – крышка; 2 – заглушка

Исследование потерь напора и гидроабразивных свойств трубных образцов в трубопроводной системе путем непрерывной перегонки хвостов обогащения железных руд по замкнутому гидравлическому контуру проводилось на лабораторном стенде, разработанном в Санкт-Петербургском горном университете (рисунок 28). Стенд состоит из расходного бака, заполняемого исследуемой гидросмесью; двух центробежных (песковых) насосов типа П12,5/12,5СП, приводимых в движение асинхронными двигателями; секций трубопроводов; запорной арматуры и измерительных приборов. Исследуемая гидросмесь из расходного бака подается в насосы по всасывающему трубопроводу через шаровые краны, и по напорному трубопроводу, состоящему из секций трубопроводов, попадает обратно в бак. Наличие в системе двух насосов позволяет реализовать параллельную схему подключения.

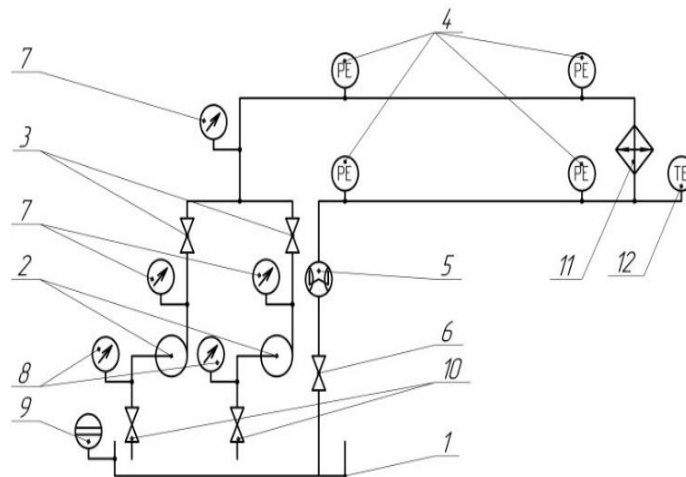


Рисунок 28 - Принципиальная гидравлическая схема лабораторного стенда: 1 – расходный бак; 2 – песковые насосы центробежного типа; 3, 6, 10 – шаровые краны; 4 – реле давления; 5 – расходомер; 7 – манометры с разделителями сред; 8 – вакуумметры с разделителями сред; 9 – указатель уровня; 11 – теплообменник; 12 – датчик температуры

Для измерения и контроля давления за насосами в системе установлены манометры с разделителями сред. Для измерения давления перед насосами в системе предусмотрены вакуумметры с разделителями сред.

Расходный бак оборудован указателем уровня для контроля объема перекачиваемой гидросмеси. Объем расходного бака составляет 100 литров.

Регулирование подачи центробежных насосов 2 может осуществляться дросселированием потока при помощи установленного в напорном трубопроводе шарового крана или частотного регулирования асинхронного электродвигателя частотным преобразователем.

Для возможности работы центробежных насосов по отдельности в системе предусмотрены шаровые краны, перекрывающие соответственно напорный и всасывающий трубопровод неработающего насоса.

Для компенсации радиальных сил, возникающих при работе центробежных насосов, а также охлаждения сальникового уплотнения в системе предусмотрен рукав с шаровым краном, подающий воду из бака или из водопроводной сети к насосам.

Измерение расхода жидкости в системе осуществлялось доплеровским расходомером PortoFlow D550.

Для измерения потребляемой мощности и времени наработки приводных электродвигателей в системе предусмотрены ваттметры и счетчики времени наработки оборудования.

Для исследования потерь напора по длине трубопроводов, изготовленных из различных материалов, в напорном трубопроводе предусмотрены специальные места для подсоединения исследуемых образцов. Тип соединения – фланцевый. Для измерения перепадов давления установлены электронные реле давления с индикатором, функцией демпфирования выходного сигнала и фронтальной мембраной.

Для температурного контроля параметров гидросмеси в установке предусмотрена система водяного охлаждения (теплообменник) и датчик температуры.

Перечень основного оборудования и приборов лабораторного стенда (рисунок 28) приведен в таблице 13.

Таблица 13 - Перечень основного оборудования лабораторного стенда

Наименование оборудование	Количество, шт.
Манометр ТМ-510 (0-0,1 МПа) G1/2 1,0	3
Мановакуумметр ТМВ510 (-0,1-1,5 МПа) G1/2 1,0	2
Делитель сред (мембранный) РМ-Н11-G1/2'	5
Насос песковый П12,5/12,5СП	2
Расходомер доплеровский PortoFlow D550	1
Реле давления Wika PSD-4	4

Для измерения величины гидроабразивного износа использовались высокоточные весы A&D DL5000 с дискретностью 0,01 грамма. Масса образцов фиксировалась до начала эксперимента, после чего образцы монтировались в напорный трубопровод, подвергаясь воздействию гидросмеси. Образцы труб с внутренним диаметром 25 мм вставлялись в подготовленные стальные секции трубопровода, которые вместе с образцами, имеющими внутренний диаметр 50 мм, посредством фланцевых соединений монтировались в трубопроводную систему,

образующую замкнутый гидравлический контур между насосом и расходным баком.

Для измерения шероховатости внутренней поверхности труб использовался контактный профилометр Surftest SJ-210 и специально сконструированное приспособление (рисунок 29), предназначенное для фиксации образца трубы измерительного устройства. Профилометр представлял собой индуктивный датчик (детектор в виде измерительного щупа) с алмазной иглой и опорой на измеряемую площадь. Игла движется перпендикулярно относительно проверяемой поверхности. Датчик генерирует импульсы, проходящие через электронный усилитель. Возникающие при этом механические колебания щупа преобразуются в цифровой сигнал. Обработка нескольких таких сигналов позволяет вычислить усредненное значение параметра – количественную характеристику неровности участка из расчета на определенную длину.



Рисунок 29 – Профилометр (слева); приспособление для измерения шероховатости (справа)

Анализ топографии внутренней поверхности труб до и после взаимодействия с гидросмесью проводили с помощью инвентированного светового микроскопа **Leica DMILM**.

ГЛАВА 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Энергоемкость процесса гидротранспортировки обуславливается удельными потерями напора и концентрацией твердой абразивной составляющей (рисунок 30), а время жизни технологических трубопроводов зависит от их химической стойкости и износостойкости при турбулентном режиме течения гидросмеси. При расчете потерь напора в гидротранспортных системах учитываются две составляющие: потери при транспорте оборотной жидкости, зависящие от материала трубопровода, и дополнительные потери на перемещение твердого компонента гидросмеси, которые будут зависеть от размеров, разнородности и содержания минеральных частиц. При равных условиях потери предопределяются коэффициентом гидравлического сопротивления (трения), который, в свою очередь, связан с шероховатостью внутренней поверхности трубопроводов [15, 17-20].

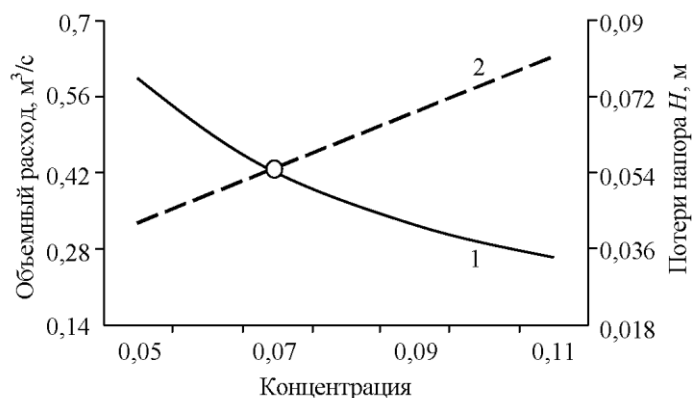


Рисунок 30 – Зависимость объемного расхода (1) и потерь напора (2) от концентрации твердой фазы при транспортировании гидросмеси [19]

Тенденция к повышению производительности процессов на горно-обогатительных фабриках приводит к тому, что долговечность становится одним из главных вопросов при проектировании систем трубопроводного гидротранспорта пульпы. Загрязнение окружающей среды и рабочей зоны, простои производства из-за внеплановых ремонтных работ, связанных с необходимостью

капитальных вложений, демонтажа и монтажа трубопроводных систем, снижают общую эффективность производства [15, 17, 18, 44]. Поэтому важнейшей задачей было определиться с выбором полимерного материала для внутреннего слоя трубопровода.

3.1. Исследование физико-механических свойств полимерных материалов и износостойкости

В качестве объектов исследования были выбраны различные типы термоэластопластов; полиолефинов, в том числе стеклонаполненных марок; и различные сочетания смесей этих материалов.

Полиолефины, в частности полиэтилен, давно рассматриваются в качестве альтернативы углеродистой стали, изделия из которой характеризуются небольшим сроком службы в связи с плохой износостойкостью при воздействии гидросмесей. Полиэтиленовые трубы изготавливаются из HDPE. Для получения дополнительного внутреннего покрытия металлических труб могут использоваться как полиэтилены высокой, так и низкой плотности [2, 13-17, 24, 42, 111].

В связи с этим представляется целесообразным исследование промышленно выпускаемых марок HDPE, LLDPE и PP-B с целью определения их свойств и возможности применения для изготовления труб, работающих в условиях гидроабразивного изнашивания. Одним из свойств, определяющих работоспособность изделий в условиях ударного нагружения, является эластичность материала [16, 54, 65, 68, 78, 83, 97, 110, 114, 115]. Для РТИ типичной характеристикой эластичности является высота отскока бойка маятника на приборе типа Шоба, для термопластов часто имеют в виду относительное удлинение при разрыве. Традиционно жесткость TPE оценивают по твердости по Шору А/Д и модулю упругости. Известно, что введение в полиолефины эластифицирующего компонента типа каучуков и/или TPE приводит к снижению жесткости ПКМ. Поэтому дополнительно исследовали износостойкость и другие свойства смесей полиолефинов с более мягким компонентом.

С целью обеспечения хорошей совместимости в качестве эластичного компонента смесей с HDPE или LLDPE использовали TPE на основе полиолефинов: термопластичный вулканизат Армлен ПП ТЭП 12-55А-901, разработанный НПП «Полипластик» непосредственно под данное применение (далее по тексту - TPV), состоящий из полипропиленовой матрицы с распределенной в ней сшитой фазой из EPDM; и термоэластопласт БСК-50, представляющий собой экструдированную смесь PP-B и EPDM в соотношении 50/50 (далее по тексту - TPO). PP-B смешивали с R-TPO марки Vistamaxx 6202, который рекомендован для повышения стойкости к знакопеременным нагрузкам полиолефинов, в частности полипропилена.

Результаты оценки модуля упругости при растяжении и твердости по Шору образцов HDPE марки ПЭ-273-83, LLDPE марки UT404 и их смесей с TPE представлены на рисунках 31-33.

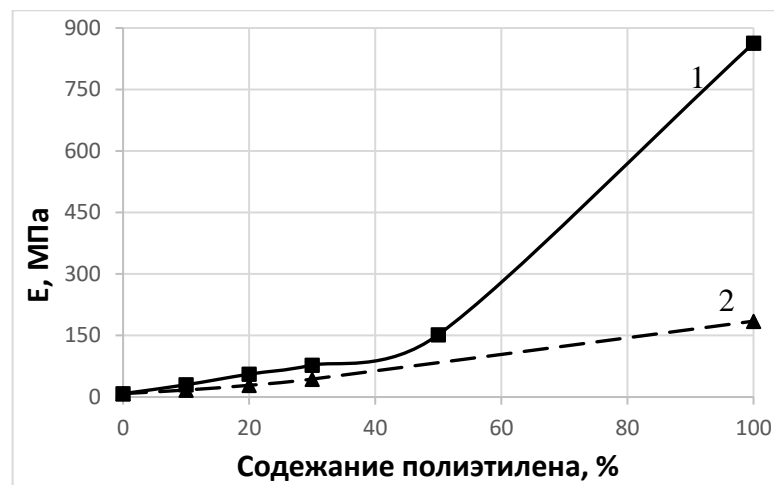


Рисунок 31 – Модуль упругости при растяжении в зависимости от типа полиэтилена и его количества в смеси с TPV: 1 – HDPE + TPV; 2 – LLDPE + TPV

HDPE ПЭ 273-83 характеризуется более высокими значениями модуля упругости (863 МПа) и твердости (60D) в сравнении с LLDPE. При этом величина модуля упругости и твердости LLDPE UT404 составляет 185 МПа и 46D соответственно, а твердость TPO (91A и 26D) заметно выше твердости TPV. С уменьшением количества полиэтилена в смеси и, соответственно, с увеличением

содержания эластичного компонента модуль упругости и твердость исследуемых композиций ожидаемо уменьшаются.

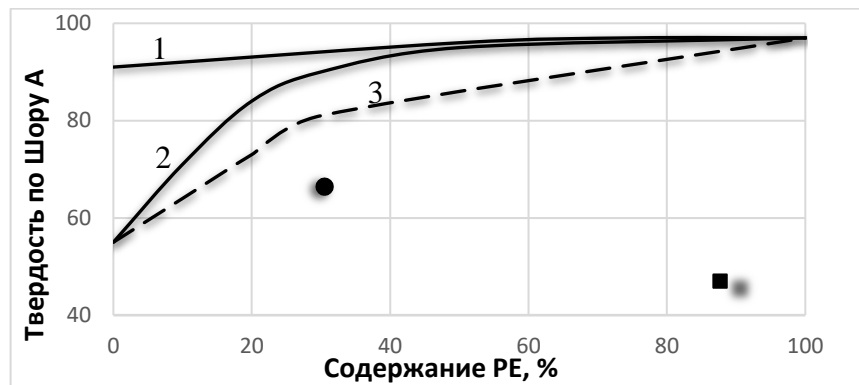


Рисунок 32 – Твердость по Шору А в зависимости от типа полиэтилена и его количества в смеси с ТРЕ: 1 - HDPE + TPO; 2 – HDPE + TPV, 3 – LLDPE + TPV

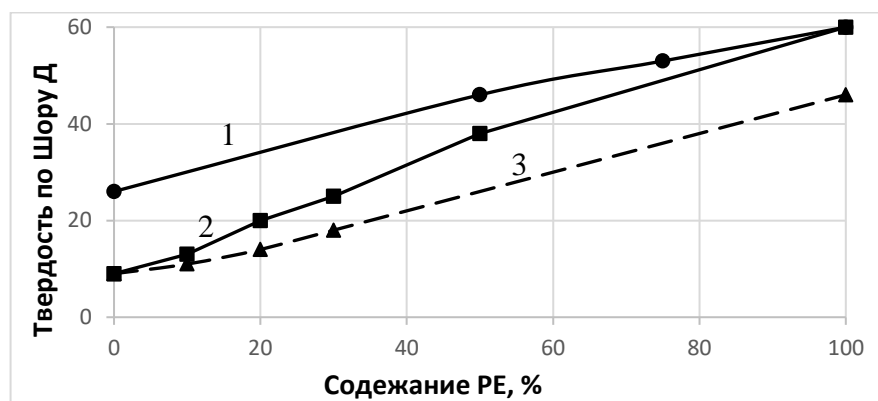


Рисунок 33 – Твердость по Шору Д в зависимости от типа полиэтилена и его количества в смеси с ТРЕ: 1 - HDPE + TPO; 2 – HDPE + TPV, 3 – LLDPE + TPV

По результатам оценки износостойкости при высокоскоростном воздействии абразивных суспензий (кварцевый песок + вода) построены зависимости стойкости к истиранию разных типов РЕ от содержания ТРЕ (рисунок 34). Как было описано в экспериментальной части диссертации, при оценке степени истирания в качестве эталона применяли образцы из HDPE марки ПЭ 273-83, степень истирания которого принята за 100 %. В качестве объекта сравнения также оценили износостойкость углеродистой стали марки Ст20, степень истирания образцов из которой составила 43 % (расчёт произведен через объемные потери). Фотографии некоторых образцов до и после испытания представлены на рисунке 35.

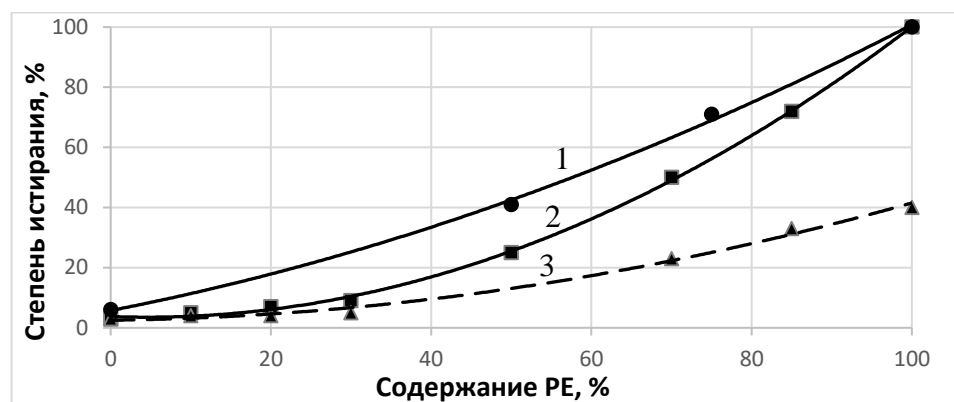


Рисунок 34 – Степень истирания в зависимости от типа полиэтилена и его количества в смеси с TPE: 1 – HDPE + TPO; 2 – HDPE + TPV, 3 – LLDPE + TPV



Рисунок 35 – Образцы материалов для оценки степени истирания (слева – до испытания, справа – после испытания): 1 – Ст20; 2 – TPV; 3 – HDPE

Согласно полученным данным (рисунок 34), степень истирания LLDPE марки UT404 ниже, чем у ПЭ 273-83, и составляет 40 %. В рамках работы дополнительно определили степень истирания LLDPE марки 318BJ, который также проявил немного большую стойкость к изнашиванию (степень истирания 32 %) в сравнении с HDPE, однако износ исследованных марок линейных полиэтиленов находится примерно на одном уровне со сталью.

TPV характеризуются в 2 раза лучшей стойкостью к гидроабразивному износу, чем у более твердого TPO: степень истирания составила 3 % против 6 %. Можно отметить, что с увеличением содержания эластичного компонента в смесях со всеми типами полиэтиленов износостойкость композиций возрастает.

Зависимость степени истирания и модуля упругости от соотношения PP-B/R-TPO показана на примере блок-сополимеров полипропилена марок PP RELY 61EK61PS и PP RELY 71EK71PS и их смесей с Vistamaxx 6202 (рисунки 36 и 37).

Полученные результаты согласуются с данными, представленными на рисунках 31 и 34.

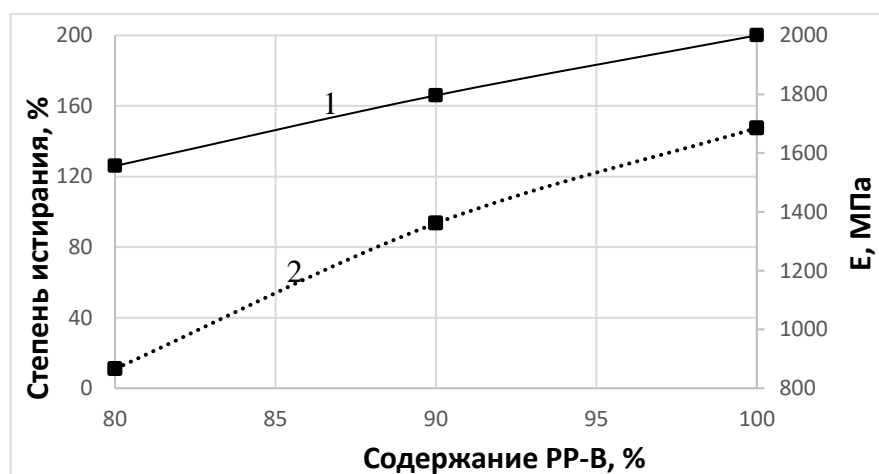


Рисунок 36 – Степень истирания (1) и модуль упругости при растяжении (2) в зависимости содержания PP RELY 61EK61PS в смеси с R-TPO

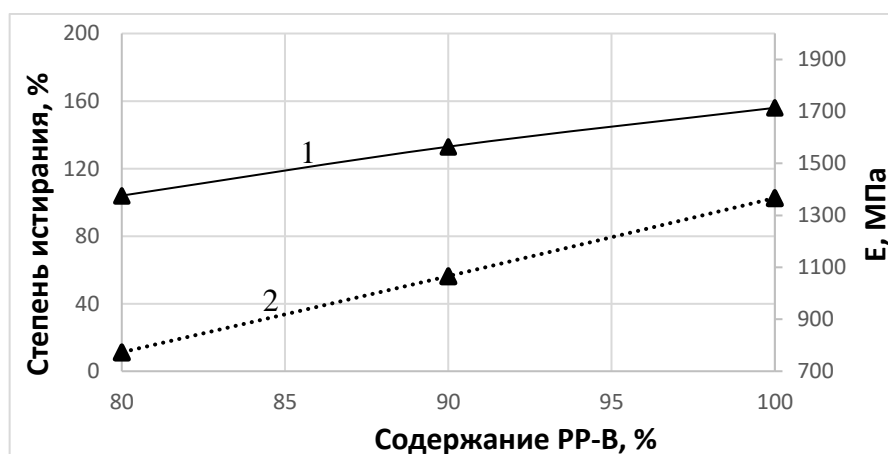


Рисунок 37 – Степень истирания (1) и модуль упругости при растяжении (2) в зависимости содержания PP RELY 71EK71PS в смеси с R-TPO

Износостойкость PP RELY 71EK71PS с модулем упругости 1367 МПа выше, чем у более жесткого PP RELY 61EK61PS, модуль упругости которого составляет 1685 МПа. Увеличение содержания R-TPO в смесях с вышеуказанными PP-B приводит к уменьшению модуля упругости композиций и повышению стойкости к износу. В рамках исследования также протестировали на стойкость к износу блок-сополимер полипропилена TUB 350-NM00, степень истирания которого составила 200 %. Степень истирания исследованных марок полипропилена и их смесей с 20

% R-TPO выше, чем у исследованных HDPE и LLDPE, и варьируется от 104 до 200 %, что на данном этапе исследования можно связать с более высокими значениями модуля упругости композиций.

Материалы Армлен ПЭ СШ-40-1К на основе LLDPE с 40 % стеклошариков в составе и полипропиленовый концентрат Армлен ПП СШ-45-1К, содержащий 45 % стеклошариков, проявили низкую стойкость к гидроабразивному износу. Степень истирания Армлен ПЭ СШ-40-1К составила 82 %, а степень истирания Армлен ПП СШ-45-1К – 300 %. Исходя из полученных значений, можно сделать вывод, что введение стеклонаполнителей в состав полиолефинов не приводит к улучшению гидроабразивной износостойкости, что согласуется с результатами, описанными в работе [85], авторы которой отмечают снижение износостойкости термопластов при увеличении концентрации стеклошариков и стекловолокна.

Результаты проведенных исследований показали: стойкость к гидроабразивному износу коррелирует с жесткостью материалов, что определяется величиной модуля упругости и твердостью (рисунки 31-39).

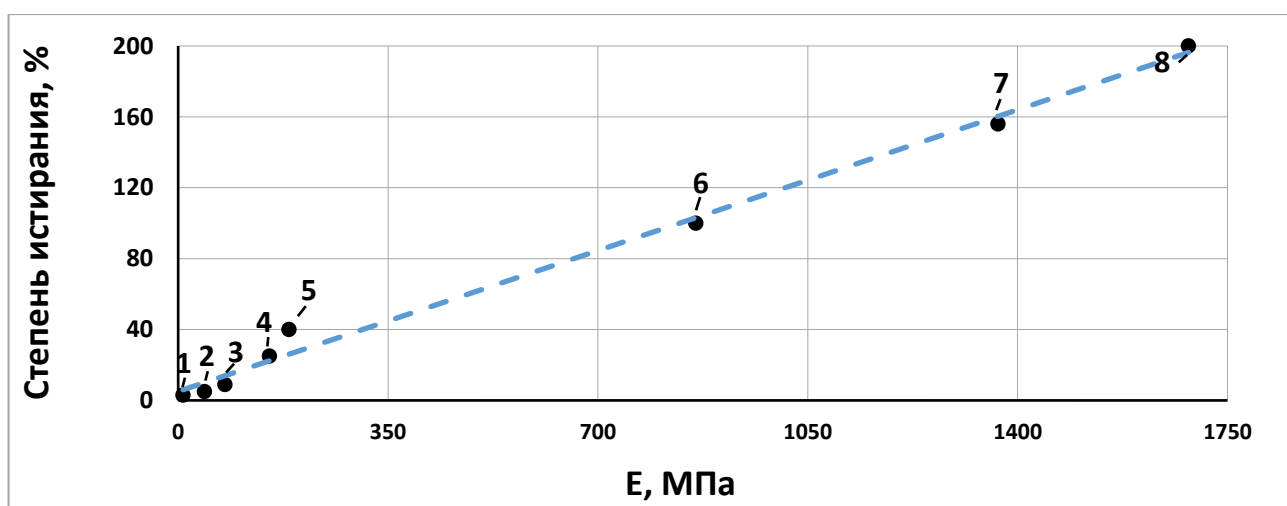


Рисунок 38 – Зависимость степени истирания от модуля упругости: 1 – TPV; 2 – TPV (70 %) + LLDPE (30 %); 3 – TPV (70 %) + HDPE (30 %); 4 – TPV (50 %) + HDPE (50 %); 5 – LLDPE; 6 – HDPE; 7 – PP RELY 71EK71PS; 8 – PP RELY 61EK61PS

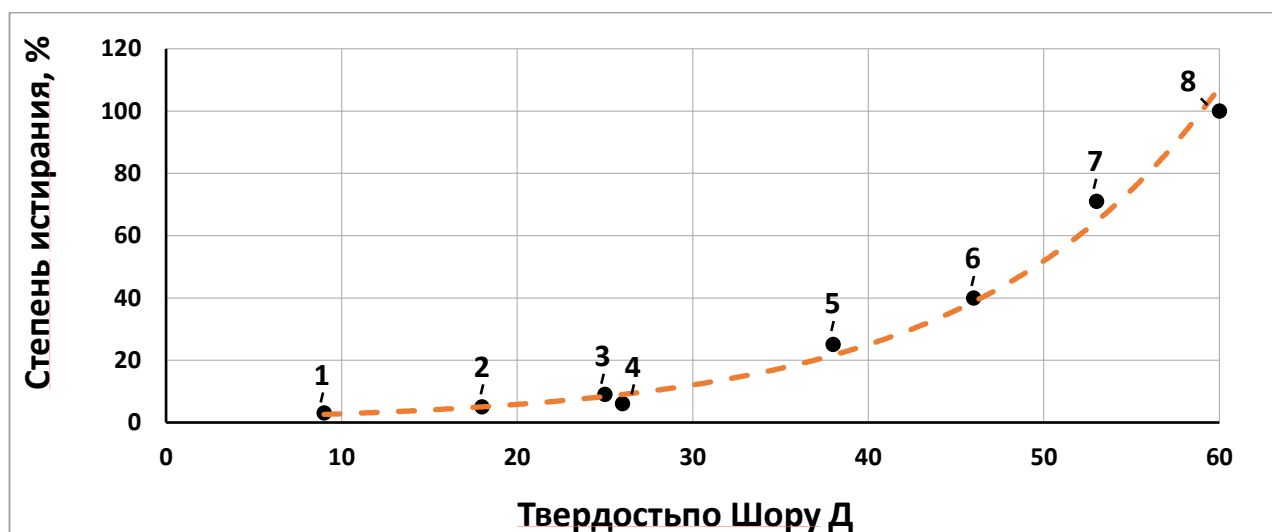


Рисунок 39 – Зависимость степени истирания от твердости: 1 – TPV; 2 – TPV (70 %) + LLDPE (30 %); 3 – TPO; 4 – TPV (70 %) + HDPE (30 %); 5 – TPV (50 %) + HDPE (50 %); 6 – LLDPE; 7 – TPO (25 %) + HDPE (75 %); 8 – HDPE

Одним из наиболее распространенных в мире методов тестирования труб на стойкость к гидроабразивному износу является Дармштадтский метод. Результаты оценки износостойкости трубных образцов по Дармштадтскому методу представлены в таблице 14.

Таблица 14 - Средний гидроабразивный износ трубных образцов за 100 000 циклов

Материал внутренней поверхности трубы	Изменение толщины стенки, мм	Состав
Армлен ПП ТЭП 12-55А-901	0,03	TPV на основе EPDM и PP-B
Армлен ПП ТЭП 12-55А-901 + ПЭ 273-83	0,03	Смесь HDPE/TPV в соотношении 70/30
ПЭ 273-83 + UT 404	0,06	Смесь HDPE/LLDPE в соотношении 70/30
UT404	0,07	LLDPE
Армлен ПЭ СШ 40-1	0,07	Композиция на основе LLDPE и стеклошариков (40 %)
ПЭ 273-83	0,13	Трубный HDPE класса PE 63

Данные испытаний по Дармштадскому методу согласуются с результатами оценки стойкости к износу при высокоскоростном воздействии песчаных суспензий: наименьшее изменение толщины стенки у трубы с внутренним слоем из термопластичного вулканизата, более жесткие LLDPE и стеклонаполненный LLDPE проявили меньшую стойкость к износу, а наибольшие потери толщины стенки среди исследованных по Дармштадтскому методу материалов продемонстрировали полиэтилены высокой плотности. Полученные результаты также демонстрируют повышение износостойкости с увеличением содержания эластичного компонента в смеси с полиолефином. Добавление к HDPE линейного полиэтилена низкой плотности в количестве 30 % привело к улучшению износостойкости: потери толщины стенки примерно в 2 раза ниже, чем у HDPE, а при введении 30% TPV в композицию с HDPE износостойкость возрастает почти в 4 раза. Следует отметить, что Дармштадтский метод был разработан для оценки стойкости к истиранию керамических труб для дренажа и канализации, соответственно скорость перемещения и условия воздействия на материал абразивных частиц моделируют условия эксплуатации самотечных трубопроводных систем, по причине чего работоспособность материалов при транспортировании гидросмесей в турбулентном режиме течения таким образом не может быть установлена.

В результате проведенных исследований была установлена взаимосвязь степени истирания под воздействием гидроабразивных суспензий с модулем упругости и твердостью полиолефинов, термоэластопластов на базе полиолефинов и их смесей.

3.2. Термомеханические исследования полиолефинов, термоэластопластов и их смесей

В процессе эрозионного износа происходит изменение геометрических характеристик изделия, а также изменение свойств и структуры материала, что непосредственно сказывается на интенсивности изнашивания, которая, в свою очередь, будет зависеть от характера воздействия внешних сил. Соответственно, при выборе

методов оценки износостойкости следует исходить из конкретных механизмов изнашивания полимера. Согласно литературным данным, при воздействии гидроабразивного потока в турбулентном режиме течения изнашивание материала обусловлено контактно-динамическим взаимодействием между материалом и минеральными частицами в жидкой среде, при этом отделение фрагментов материала происходит вследствие размывания струями жидкости микроповреждений усталостного происхождения [16, 63, 65 – 67, 97, 115, 115].

Модификация рецептуры полимерного материала с целью изменения жесткости одновременно приводит к изменению всего комплекса физико-механических характеристик. Процесс изнашивания имеет сложную природу, критерием абразивной износостойкости является совокупность взаимосвязанных параметров, которые учитывают различные свойства материала и характер взаимодействия контактирующих тел [16, 68, 83-85, 90, 97].

Поскольку под действием гидроабразивного потока материал подвергается многократным кратковременным деформациям, приводящим впоследствии к снижению его усталостной прочности, то для понимания проблемы гидроабразивного износа важно также знать динамические механические свойства. Мерой энергии, которая запасается и возвращается полимером в каждом цикле, служит динамический модуль упругости G' . Часть энергии, затрачиваемая на преодоление сопротивления материала деформированию, характеризуется модулем механических потерь G'' [99].

На рисунке 40 представлена зависимость модуля механических потерь полиэтиленов и термоэластопластов от температуры в диапазоне от 0 до плюс 100 °С. Рабочая температура пульпопроводов, как правило, не превышает 60 °С. На основании данных, полученных при ДМА, установлено, что наибольшие значения модуля потерь в диапазоне рабочих температур пульпопроводов у HDPE ПЭ 273-83, а наименьшие – у TPV Армлен ПП ТЭП 12-55А-901, причем значение G'' у HDPE на 2 порядка выше.

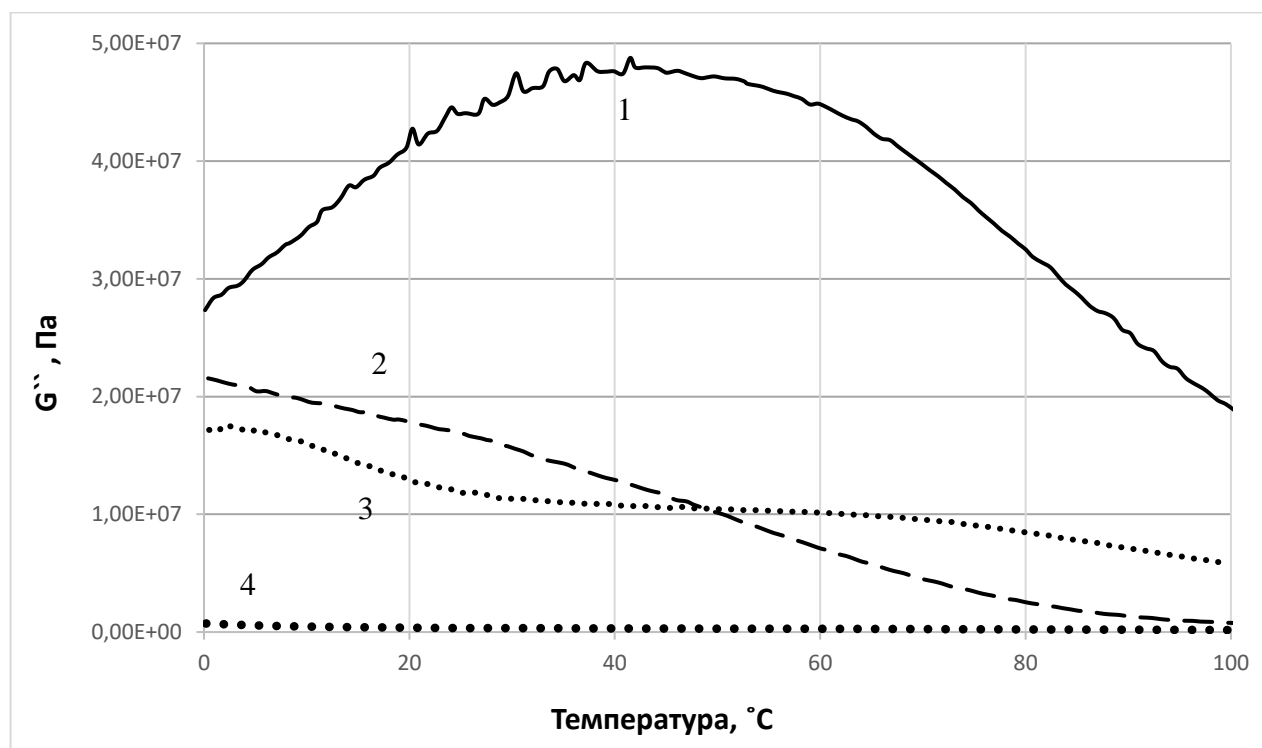


Рисунок 40 – Модуль механических потерь в зависимости от температуры: 1 – HDPE; 2 – LLDPE, 3 – TPO; 4 – TPV

Из рисунка 40 следует, что значения G'' линейного полиэтилена низкой плотности и термоэластопластов с повышением температуры падают, причем если для LLDPE отмечается практически линейное снижение, то для TPO (БСК-50), в состав которого входит полипропилен, в интервале температур от 0 до плюс 30 °C наблюдается резкое падение модуля потерь TPO, что, вероятно, связано с альфа-переходом и повышением сегментальной подвижности. При дальнейшем повышении температуры до плюс 80 °C модуль динамических потерь у TPO меняется слабо. Для HDPE при температуре около 40 °C наблюдается пик, связанный с температурным переходом. Поскольку диапазон стеклования полиэтилена находится в области отрицательных температур [52], наличие максимума в области положительных температур можно объяснить только изменением подвижности метиленовых групп на границах участков аморфной и кристаллической фазы полиэтилена [52, 63, 99].

Изменение величины G'' и степени истирания от соотношения компонентов в смесях полиэтиленов с термоэластопластами представлено на рисунках 41-43.

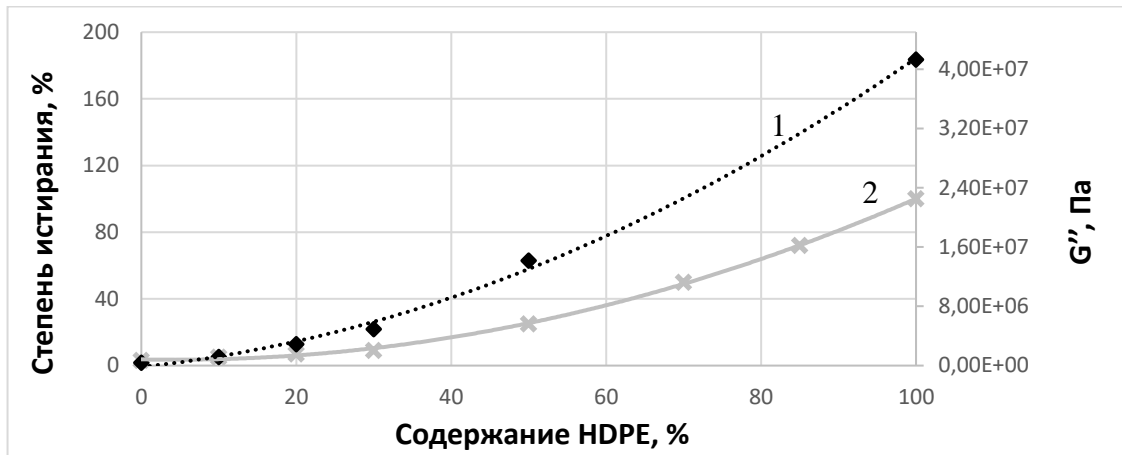


Рисунок 41 – Модуль механических потерь при 23 ± 2 °C (1) и степень истирания (2) в зависимости от соотношения компонентов в смеси HDPE и TPV

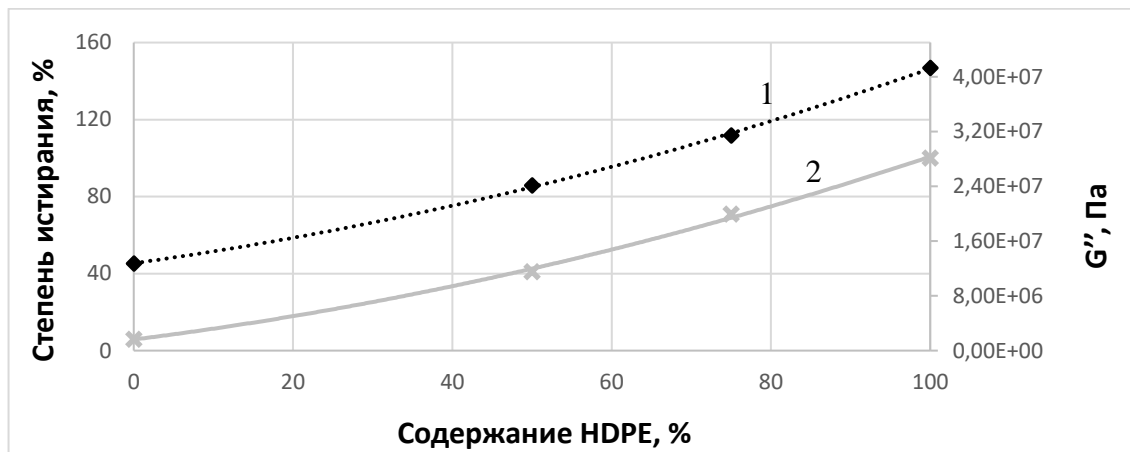


Рисунок 42 – Модуль механических потерь при 23 ± 2 °C (1) и степень истирания (2) в зависимости от соотношения компонентов в смеси HDPE и TPO

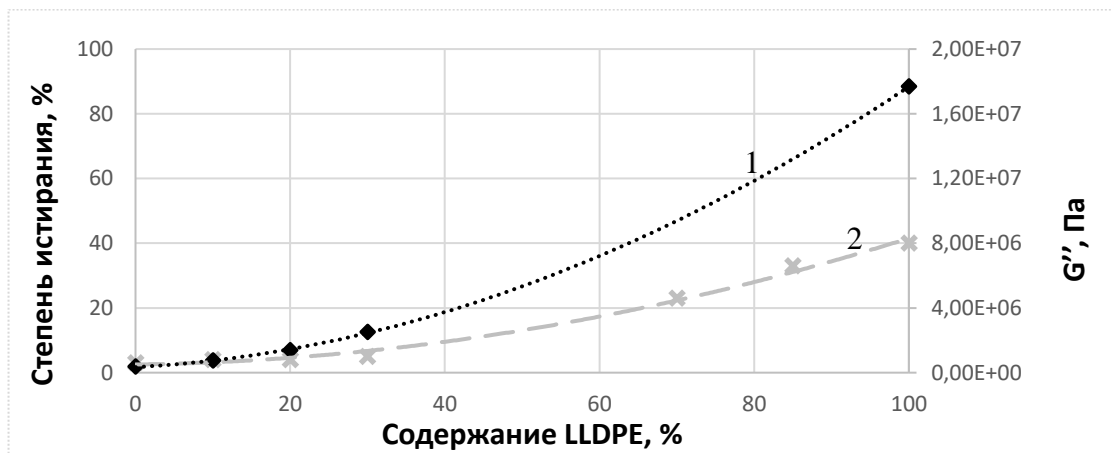


Рисунок 43 – Модуль механических потерь при 23 ± 2 °C (1) и степень истирания (2) в зависимости от соотношения компонентов в смеси LLDPE и TPV

В литературном обзоре отмечено, что развитие высокоэластической деформации имеет релаксационную природу, в связи с чем при приложении высокочастотных синусоидальных нагрузок возникает явление гистерезиса. При этом площадь петли гистерезиса отражает ту часть механической энергии, которая в каждом цикле трансформируется в тепло и в определенной степени активизирует химические процессы в материале вследствие его утомления. Согласно результатам ДМА (рисунки 41-43), с увеличением количества эластичного компонента величина G'' уменьшается, что согласуется с литературными данными [63, 98-100]: чем выше упругость полимера, тем медленнее скорость его перехода в равновесное состояние, больше гистерезис и выше уровень механических потерь соответственно.

Установлено, что стойкость к гидроабразивному износу смесей полиолефинов с ТРЕ на основе полиолефинов находится во взаимосвязи с жесткостью и величиной модуля механических потерь композиций. При этом наилучшей износостойкостью характеризуются полимеры, проявляющие физические свойства резин при температурах эксплуатации, что можно объяснить [16, 97] распределением энергии удара абразивных частиц по относительно большому объему материала и, соответственно, меньшей величиной возникающих по итогу контактных напряжений. Поэтому в рамках исследования изучили динамические механические свойства и оценили степень истирания различных типов ТРЕ (рисунки 44-49).

В таблице 15 представлены значения стойкости к гидроабразивному износу ТРЕ на основе блок-сополимеров стирола и этилен-бутиленового каучука.

Таблица 15 – Степень истирания термоэластопластов на основе SEBS

TPS-SEBS	Степень истирания, %
Dryflex PS 60R201B	6
TO 623 60A2155	14
TO S1 631 60A2155	7
Thermolast K TC6CSZ	8
Thermolast K TC5CSZ	9

Все TPS-SEBS, за исключением ТО 623 60A2155, продемонстрировали хорошую стойкость к истиранию. Однако следует отметить, что степень истирания материала ТО 623 60A2155 примерно в семь раз ниже, чем у HDPE. Полученные результаты согласуются с данными динамического механического анализа (рисунок 44): материалы характеризуются низкими значениями G'' в диапазоне положительных температур.

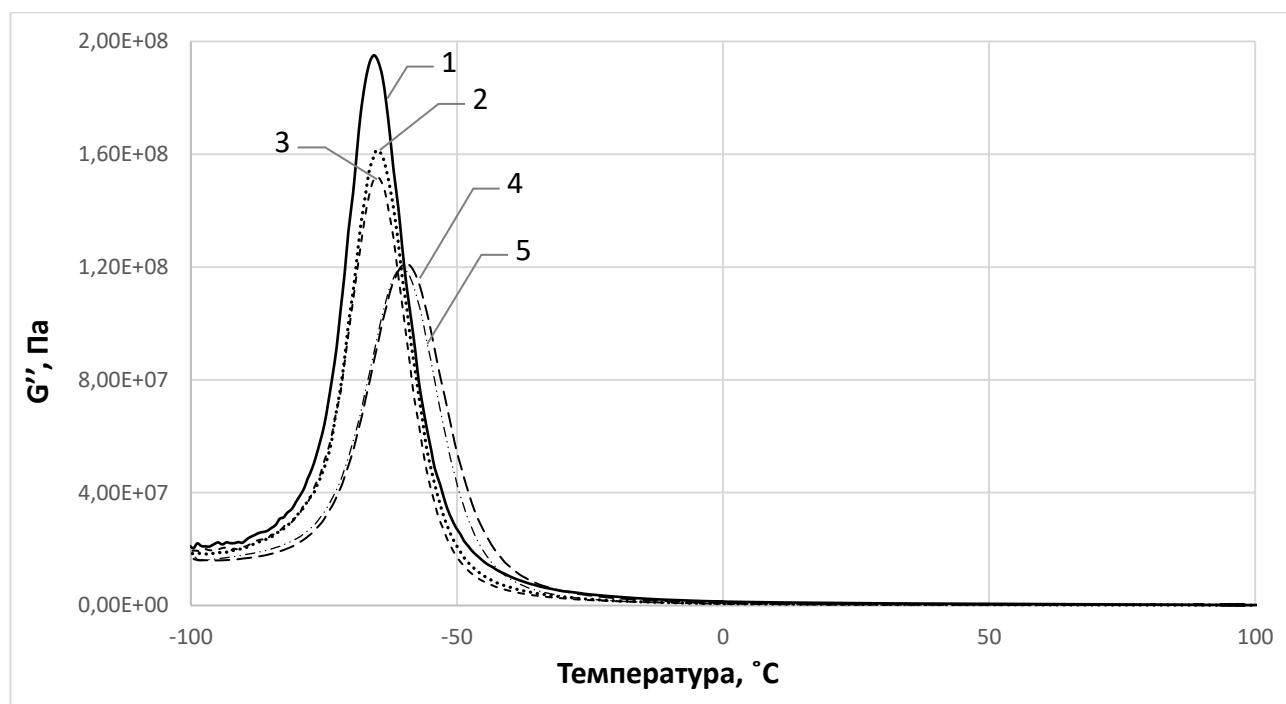


Рисунок 44 – Модуль механических потерь в зависимости от температуры: 1 – ТО 623 60A2155; 2 – ТО S1 631 60A2155; 3 – Dryflex PS 60R201B; 4 – Thermolast K TC6CSZ; 5 – Thermolast K TC5CSZ

В рамках данного исследования также протестировали серию маслонаполненных ТРЕ на основе блок-сополимеров стирола и бутадиенового каучука - серийные продукты НПП «Полипластик». Эти материалы различаются содержанием минерального наполнителя и вазелинового масла в рецептуре и разработаны для уплотнительных элементов бытовых приборов на рабочие температуры от минус 20 до плюс 20 °С. Для этой серии образцов зависимость между величиной модуля механических потерь в интервале температур от 0 до плюс 100 °С и степенью истирания не выявлена (рисунок 45 и таблица 16).

Таблица 16 – Степень истирания термоэластопластов на основе SBS

TPS-SBS	Степень истирания, %
Армлен ПП ТЭП-20-60А-9010	28
Армлен ПП ТЭП-20-45Д	36
Армлен ПП ТЭП-10-75А-819	41
Армлен ПП ТЭП-11-80А-9010	270

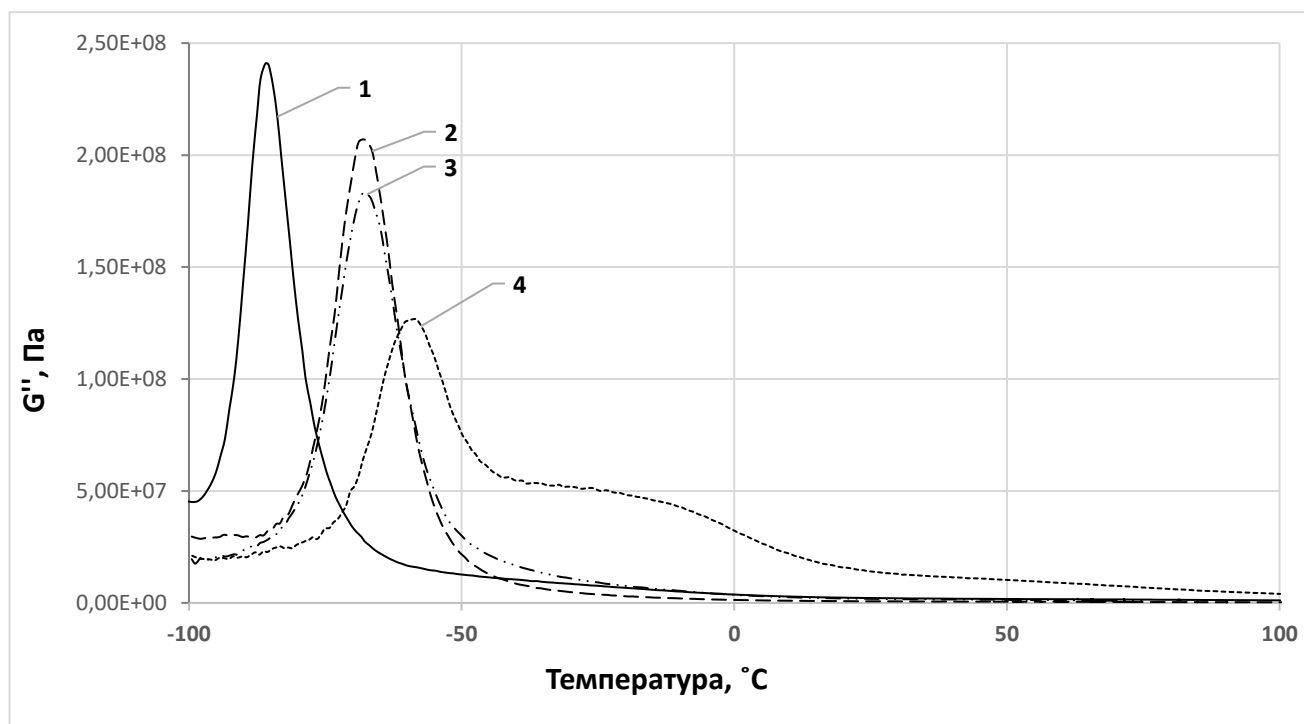


Рисунок 45 – Модуль механических потерь в зависимости от температуры: 1 – Армлен ПП ТЭП-11-80А-9010; 2 – Армлен ПП ТЭП-20-60А-9010; 3 – Армлен ПП ТЭП-10-75А-819; 4 – Армлен ПП ТЭП-20-45Д

Материал Армлен ПП ТЭП 12-55А-901 проявил наилучшую стойкость к гидроабразивному износу среди всех исследованных термопластичных вулканизатов, причем степень истирания данного материала оказалась в 2 раза ниже, чем у Армлен ПП ТЭП 15-60А-901, который отличается большим содержанием минерального наполнителя в составе и характеризуется твердостью по Шору А - 60, против 55 у первого (таблица 17). В рамках исследования также протестировали на стойкость к истиранию термопластичный полиуретановый эластомер Elastollan С85А 10 000, предназначенный для изготовления шлангов, покрытий и сит грохота для горнодобывающей промышленности.

Таблица 17 – Степень истирания термопластичных вулканизатов и термопластичных полиуретанов

ТРЕ	Степень истирания, %
Армлен ПП ТЭП 12-55А-901 (TPV)	3
Армлен ПП ТЭП 15-60А-901 (TPV)	6
Dryflex VE 55A101 (TPV)	14
Santoprene 101-55 (TPV)	4
Elastollan C85A 10 000 (TPU)	4

При температурах выше нуля все марки TPV характеризуются низким сопротивлением деформированию (рисунок 46), прослеживается характер поведения, схожий с резиной.

Близкие по своим характеристикам к резине материалы, такие как термопластичные вулканизаты, проявили высокую стойкость к гидроабразивному износу, свойственную для износостойких марок TPU и значительно превосходящую стойкость полиолефинов и стали.

Влияние температуры на величину модуля потерь HDPE, LLDPE, PP-B, TPV на основе EPDM, резины на основе EPDM, TPU представлены на рисунке 47.

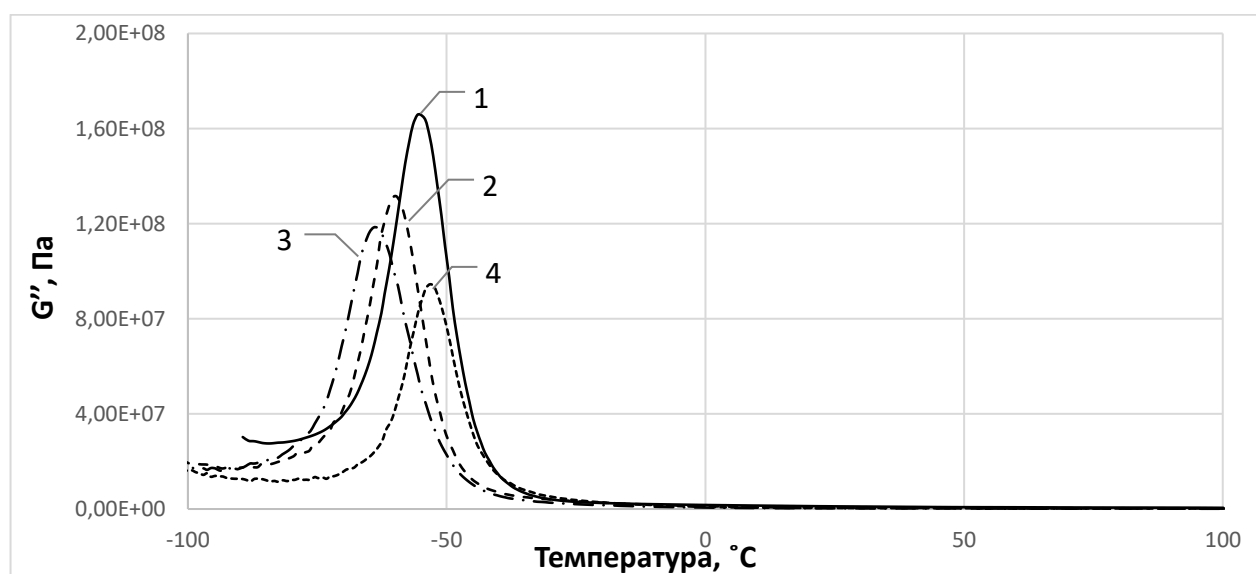


Рисунок 46 – Модуль механических потерь в зависимости от температуры: 1 – EPDM; 2 – Santoprene 101-55; 3 – Dryflex VE 55A101; 4 – Армлен ПП ТЭП 12-55А

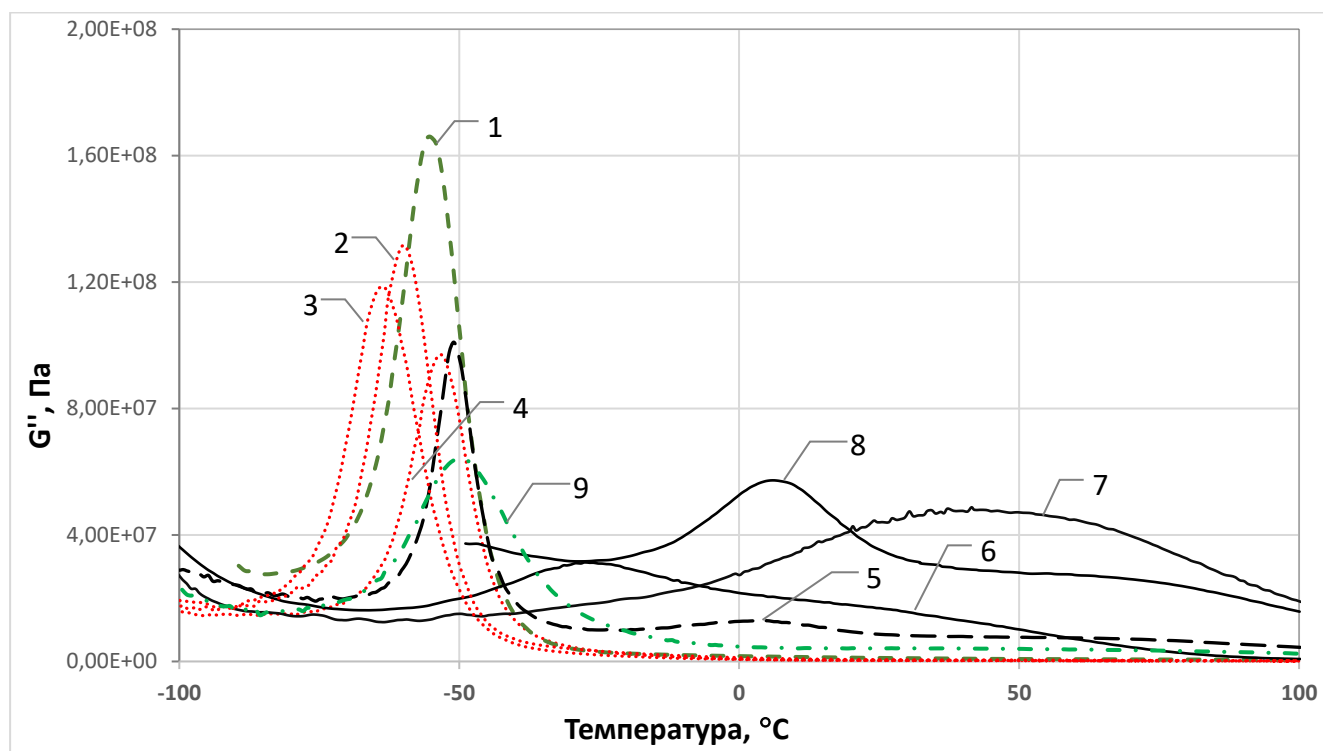


Рисунок 47 – Модуль механических потерь в зависимости от температуры: 1 – EPDM; 2 – Santoprene 101-55; 3 – Dryflex VE 55A101; 4 – Армлэн ПП ТЭП 12-55А-901; 5 – БСК-50; 6 – LLDPE UT404; 7 –HDPE ПЭ 273-83; 8 – PP-B TUB 350-НМ00; 9 – Elastollan C 85 A 10 000

В области температур от 0 до плюс 100 °С на графике температурной зависимости модуля динамических потерь PP-B, HDPE наблюдается пик (температурный переход) – отклик материала на механическое воздействие (рисунок 47). Данные материалы характеризуются низкой стойкостью к гидроабразивному износу. Значение G'' у резины (EPDM) и термоэластопластов, в состав которых входит EPDM, в данном диапазоне температур приближается к нулю. А в диапазоне температур от минус 70 до минус 50 °С на термограмме резины, ТРО и термопластичных вулканизатов обнаруживается интенсивный пик.

С увеличением содержания HDPE в смеси с термоэластопластами, в диапазоне отрицательных температур интенсивность пика снижается симбатно изменению концентрации. При этом интенсивность пика увеличивается в диапазоне положительных температур, а величины этих пиков коррелируют с составом композиции – содержанием HDPE (рисунок 48, таблицы 18 и 19).

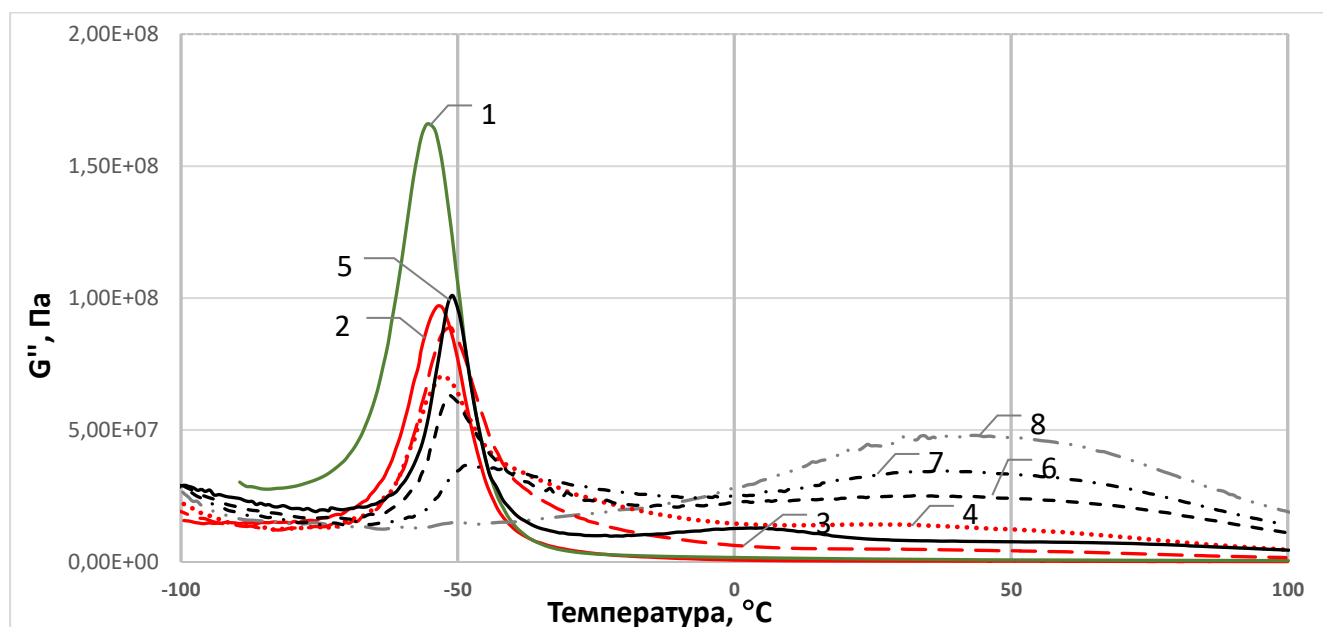


Рисунок 48 – Модуль механических потерь в зависимости от температуры: 1 – EPDM; 2 – TPV; 3 – TPV (50 %) + HDPE (50 %); 4 – TPV (30 %) + HDPE (70 %); 5 – TPO; 6 – TPO (50 %) + HDPE (50 %); 7 – TPO (25 %) + HDPE (75 %); 8 – HDPE

Таблица 18 – Степень истирания композиций на основе HDPE и TPO

Композиция	Степень истирания, %
TPO	6
TPO (50 %) + HDPE (50 %)	41
TPO (25 %) + HDPE (75 %)	71
HDPE	100

Таблица 19 – Степень истирания композиций на основе HDPE и TPV Армлен ПП ТЭП 12-55А-901

Композиция	Степень истирания, %
TPV	3
TPV (90 %) + HDPE (10 %)	4
TPV (80 %) + HDPE (20 %)	7
TPV (70 %) + HDPE (30 %)	9
TPV (50 %) + HDPE (50 %)	25
TPV (30 %) + HDPE (70 %)	50
TPV (15 %) + HDPE (85 %)	72
HDPE	100

Проведенные исследования показали, что сшитые структуры, такие как термопластичные вулканизаты, термопластичные полиуретаны и резины, характеризуются максимальной стабильностью к динамическим нагрузкам.

3.3. Реологические характеристики термопластичных вулканизатов

При разработке конструкции трубы для пульпопровода рассматривали двухслойную конструкцию с несущим давлением слоем из HDPE и внутренним соэкструдированным слоем из TPE. На основании данных, полученных при исследовании взаимосвязи свойств полимеров со стойкостью к гидроабразивному истиранию, предполагается использование TPV марки Армлен ПП ТЭП 12-55А-901 в качестве износостойкого слоя, в связи с чем исследовали реологические свойства термопластичных вулканизатов, трубных марок полиэтилена ПЭНТ11-9 (РЕ 100) и ПЭ 273-83 (РЕ 63), а также оценили время окислительной индукции (ВОИ) данных полимеров. Следует отметить, что ВОИ является характеристикой термостабильности и крайне важно при производстве, особенно толстостенных труб большого диаметра, когда нахождение материала в расплаве может достигать 60 минут и более.

В таблицах 20 и 21 представлены результаты оценки ПТР и ВОИ.

Таблица 20 – ВОИ и ПТР разных марок термопластичных вулканизатов

Показатель	Метод анализа	Результаты исследований		
		Dryflex VE 55A101	Армлен ПП ТЭП 12-55А-901	Santoprene 101-55
ВОИ при 200 °С, мин	ГОСТ Р 56756	40÷50	70÷80	15÷25
ПТР (230 °С, 10 кг), г/10 мин	ГОСТ 11645	29-32	28-29	14-17

Таблица 21 – ВОИ и ПТР для TPV, PE100 и ПЭ63

Показатель	Метод анализа	Результаты исследований		
		РЕ 100	РЕ 63	Армлен ПП ТЭП 12-55А-901
ВОИ при 200 °С, мин	ГОСТ Р 56756	> 60	40÷42	70÷80
ПТР (190 °С, 5 кг), г/10 мин	ГОСТ 11645	0,15	0,47	0,9

Как видно из таблиц 20 и 21, значения показателя текучести расплава (ПТР) термопластичных вулканизатов достаточно близки к величине ПТР трубных марок полиэтилена. ПТР является количественным показателем, на основании которого

производители принимают решение о допустимости переработки полимера тем или иным способом, в частности, в технологическом процессе экструзии полиэтиленовых труб. Технологические режимы процесса экструзии полимеров зависят от скорости сдвига, температуры и стойкости расплава к высокоэластическому срыву [30, 99, 133].

Реологические вязкостные характеристики разных марок TPV (кривые течения) при температуре 230 °С представлены на рисунке 49 в логарифмических координатах. Значения вязкости TPV в широком диапазоне скоростей сдвига от 5 до 1500 1/с представлены в таблице 22.

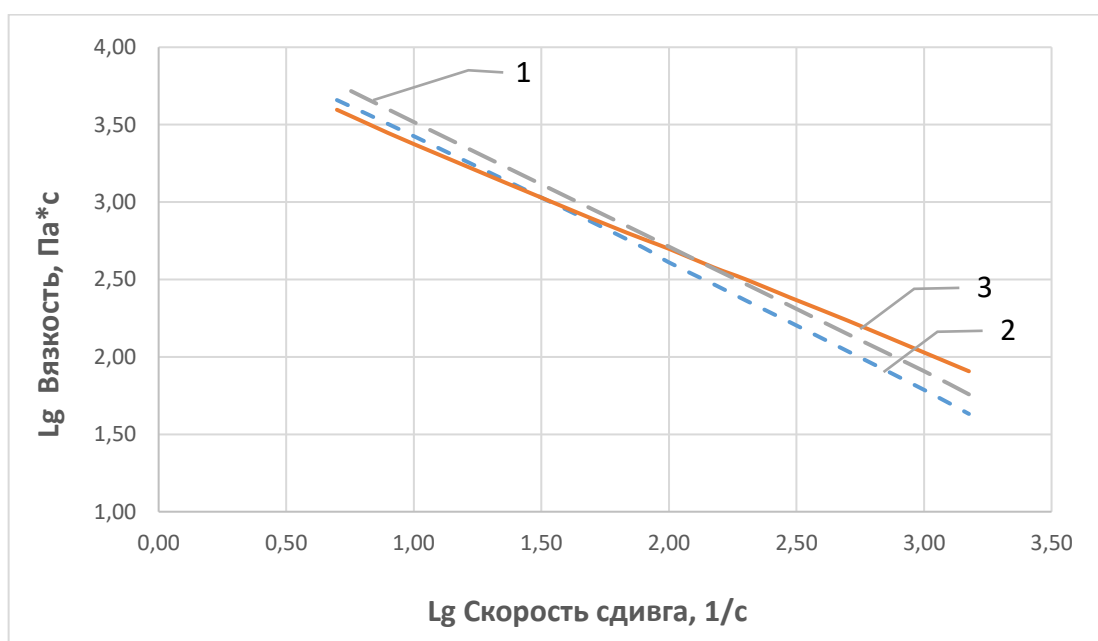


Рисунок 49 – Зависимость вязкости TPV от скорости сдвига при температуре 230 °С: 1 – Santoprene 101-55; 2 – Dryflex VE 55A101; 3 – Армлен ПП ТЭП 12-55А-901

Из рисунка 49 и данных таблицы 22 следует, что все марки TPV характеризуются близкими значениями вязкости. Кривые течения Dryflex VE 55A101 и Santoprene 101-55 имеют одинаковый угол наклона, отличный от угла наклона кривой течения Армлен ПП ТЭП 12-55А-901. При малых скоростях сдвига вязкость Santoprene немного выше, чем у Армлен ПП ТЭП 12-55А-901 и Dryflex VE 55A101, причем величина вязкости последних примерно равна. При приближении скоростей сдвига к величинам второго порядка кривые пересекаются и вязкость Армлен ПП ТЭП 12-55А-901 и Santoprene

101-55 становится одинаковой, а при скорости сдвига 1000 1/с наиболее вязким становится материал Армлен ПП ТЭП 12-55А-901. Во всем диапазоне скоростей сдвига у всех исследованных композиций стренги гладкие, однородные, не имеют шероховатостей и включений.

Таблица 22 – Вязкость TPV при различных скоростях сдвига

Скорость сдвига, с ⁻¹	Вязкость, (Па*с)*10 ³ (230 °С)			Вязкость, (Па*с)*10 ³ (190 °С)		
	Dryflex VE 55A101	Santoprene 101-55	Армлен ПП ТЭП 12-55А-901	Армлен ПП ТЭП 12-55А-901	PE 100	PE 63
10	2,67	3,29	2,37	3,04	12,6	9,5
100	0,41	0,52	0,50	0,63	2,73	2,73
1000	0,06	0,08	0,11	0,12	-	-

На рисунке 50 представлены кривые течения в логарифмических координатах для полиэтиленов и TPV марки Армлен ПП ТЭП 12-55А-901 при 190 °С, Армлен ПП ТЭП 12-55А-901 при 230 °С.

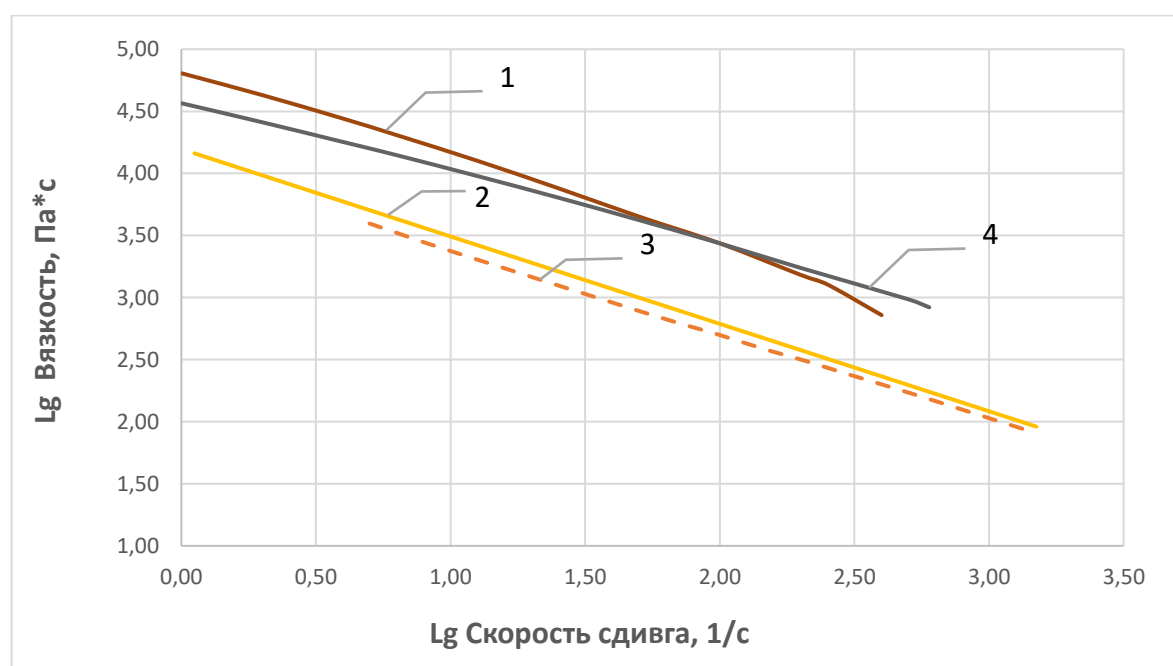


Рисунок 50 – Зависимость вязкости от скорости сдвига: 1 – PE 100 (190 °С); 2 – TPV (190 °С); 3 – TPV (230 °С); 4 – PE 63 (190 °С)

По полученным кривым течения (рисунок 50) установлено, что температура незначительно влияет на вязкость расплава TPV. Умеренная чувствительность

вязкости к температуре таких композиций позволяет осуществлять переработку в довольно широком интервале температур. При скоростях сдвига в интервале от 1 до 100 1/с, характерных для процесса экструзии полиэтиленовых труб [133], кривые течения термопластичных вулканизатов и полиэтиленов имеют схожий характер течения, при этом вязкость полиэтиленов заметно выше вязкости TPV (таблица 22). При очень низких скоростях сдвига отличия в вязкости TPV и полиэтиленов становятся немного меньше, причем наибольшее сближение наблюдается для кривых течения TPV и PE 63, который согласно величине ПТР является более текучим, чем PE 100.

Вязкость TPV при нулевых скоростях сдвига может стремиться к бесконечности, что можно объяснить взаимодействием сшитых доменов этиленпропилендиенового каучука. Одним из технологических преимуществ подобного поведения расплавов термопластичных вулканизатов является очень низкий уровень их разбухания, поскольку при выходе из экструзионной головки скорость сдвига резко падает до нулевого значения.

Результаты исследования реологических свойств в диапазоне скоростей сдвига от 5 до 1500 1/с показали, что термопластичный вулканизат Армлен ПП ТЭП 12-55А-901 и его зарубежные аналоги характеризуются близкими значениями вязкости и стойкостью к высокоэластическому срыву. При скоростях сдвига, соответствующих процессу экструзии труб, кривые течения Армлен ПП ТЭП 12-55А-901 и трубных марок PE имеют схожий характер.

3.4. Технология производства многослойных труб с внутренним слоем из термопластичного вулканизата

Технологическая схема производства полиэтиленовых труб номинальным наружным диаметром DN 75 и DN 40, с наружным слоем из PE100 2НТ-11-9 и внутренним слоем из Армлен ПП ТЭП 12-55А представлена на рисунке 51. Изготовление труб осуществлялось методом непрерывной шнековой экструзии на производственной линии, состоящей из следующих основных устройств, представленных в таблице 23.

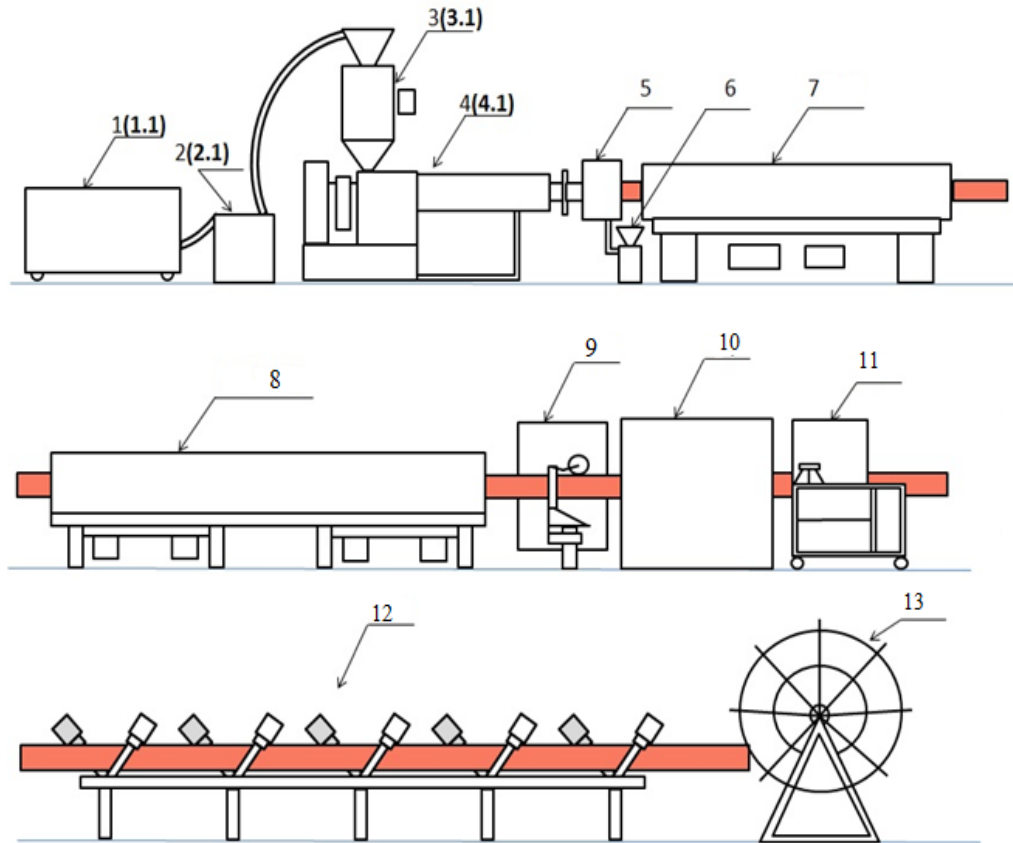


Рисунок 51 - Технологическая схема производства двухслойных труб

Таблица 23 – Состав производственной линии

№ позиции на рисунке 51	Наименование оборудования
1	Напольный бункер для сырья внутреннего слоя
1.1	Напольный бункер для сырья наружного слоя
2, 2.1	Вакуумные загрузчики сырья внутреннего и наружного слоев
3, 3.1	Сушильный бункера экструдеров внутреннего и наружного слоев
4	Экструдер внутреннего слоя
4.1	Экструдер наружного слоя
5	Формующая головка
6	Созэкструдер (для нанесения полос при необходимости)
7	Вакуумно-оросительные ванны
8	Оросительно-охлаждающие ванны
9	Маркировочное устройство
10	Тянущее устройство
11	Отрезное устройство
12	Рольганг-опрокидыватель
13	Устройство для намотки труб в бухты (бухтонамотчик)

Технологический процесс изготовления трубы включает следующие стадии:

- Сушка сырья;
- Подача сырья в экструдеры;
- Экструзия трубной заготовки;
- Формирование трубы;
- Калибрование и охлаждение трубы;
- Отвод трубы;
- Маркировка трубы;
- Резка и намотка трубы.

Сушка сырья выполняется в сушилках-бункерах, расположенных на экструдерах и отдельно стоящих сушилках бункерного типа.

Параметры изготавливаемых труб и технологические режимы представлены в таблице 24.

Таблица 24 – Технологические режимы и параметры

Контролируемый параметр	Труба DN 40		Труба DN 75	
	Наружный слой (PE100)	Внутренний слой (TPV)	Наружный слой (PE100)	Внутренний слой (TPV)
Толщина слоя, мм	4	3,5	7	5,5
Цвет слоя	черный	черный	черный	черный
Обороты экструдера, об/мин	45	75	91	115
Производительность экструдера, кг/час	50	39	95	55
Общая производительность, кг/час	89		150	
Скорость тянущего устройства, м/мин	2,0		1	

Гранулы PE 100 и TPV с помощью вакуумных загрузчиков подаются в сушильные бункеры соответствующих экструдеров. Из сушильных бункеров гранулы непрерывно ссыпаются в загрузочную зону экструдеров, захватываются витками шнека и перемещаются по его спиральному каналу. В случае необходимости нанесения полос, в со-экструдер для нанесения маркировочных полос сырьё загружается вручную. По мере продвижения по

каналу шнека полимерный материал уплотняется, нагревается, пластифицируется, гомогенизируется и непрерывно под давлением поступает в формующую головку

Цилиндр и голова разделены на несколько тепловых зон с самостоятельной автоматической регулировкой температуры в каждой зоне. При продвижении твердых гранул и в результате их трения между собой и о стенки цилиндра вырабатывается большое количество тепла, которое постепенно плавит полимер. Поддержание температуры по зонам на заданном уровне при установившемся тепловом режиме осуществляется внешними электронагревателями. Для предотвращения перегрева полимеров цилиндры экструдеров охлаждаются по зонам, обдуваясь воздухом при помощи вентиляторов, входящих в автоматическую систему терморегулирования. Во избежание преждевременного оплавления гранул и их зависания в загрузочной зоне экструдера производится водяное охлаждение загрузочной зоны цилиндра.

Температуры по зонам цилиндра экструдера представлены в таблицах 25 и 26.

Таблица 25 – Температурный режим экструдера наружного слоя (PE 100)

Тип трубы	Температура по зонам, °С					
	Зона загрузки	Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4	Адаптер
DN 40	85	200	200	200	205	210
DN 75	85	205	205	205	205	210

Таблица 26 – Температурный режим экструдера внутреннего слоя (TPV)

Экструдер	Температура по зонам, °С					
	Зона загрузки	Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4	Адаптер
DN 40	70	180	180	180	180	180
DN 75	74	180	180	180	180	180

Формирование многослойных труб происходит следующим образом: гомогенные расплавы вязкотекучих PE 100 и TPV, выдавливаемые шнеками соответствующих экструдеров, поступают в формующую головку с двумя

проточными каналами, по которым продвигаются в зону соединения в двойной сплошной поток, который выдавливается через кольцевой зазор, образуемый между матрицей и дорном, и формируют трубную заготовку. Температура по зонам головы представлена в таблице 27.

Таблица 27 – Температура обогрева экструзионной головки, °С

Температура по зонам, °С							
1	2	3	4	5	6	7	8
Зона формирующего инструмента	Зона рассекателя потока					Винтовая зона	
217	220	220	220	222	223	225	225

Горячая трубная заготовка поступает в калибрующее устройство, где формируется наружный диаметр трубы. Диаметр сформированной трубы зависит от величины вакуума, температуры охлаждающей воды, размеров калибрующей гильзы, скорости вытяжки трубы тянущим устройством, температуры расплава.

Толщина слоев трубы зависит от соотношения производительности экструдеров и скорости вытяжки трубы тянущим устройством, равномерности орошения калибрующей гильзы и трубы в вакуумной ванне.

При выпуске труб различных типоразмеров устанавливается соответствующий инструмент (дорн и матрица) формирующей головы (таблица 28).

Таблица 28 – Размер формирующего инструмента:

Наружный диаметр трубы, DN, мм	Диаметр матрицы, мм	Диаметр дорна, мм
40	47,2	28
75	90	60,4

Расплавленная масса поступает в калибр соответствующего размера, представляющий собой охлаждаемую металлическую втулку, внутренняя (рабочая) поверхность которой по размерам и конфигурации соответствует с учетом усадочных явлений формируемой трубе. Калибрование осуществляется

с помощью вакуума. При этом горячая заготовка прижимается к холодной калибрующей поверхности. Образовавшаяся в результате охлаждения затвердевшая поверхность материала к моменту выхода заготовки из калибра обеспечивает сохранение кольцевой формы и необходимых размеров. Из калибра труба попадает в охлаждающее устройство – вакуумные и оросительные ванны. В зависимости от скорости наработки трубы и её типоразмера количество используемых ванн может варьироваться.

Во всех ваннах линии охлаждение трубы ведётся оборотной водой через форсунки, размещённые на продольных коллекторах, напор воды в которых создаётся центробежными водяными насосами, обеспечивающими циркуляцию воды в оросительной системе ванн.

Отвод трубы с постоянной скоростью осуществляется тянущим устройством, снабженным счетчиком метража, регулировкой скорости протяжки и синхронизированным с пультом управления линии. Тянущее устройство непрерывно отводит трубу с заданной скоростью с помощью специальных приспособлений – траков, которые находятся в постоянном зацеплении с трубой.

Трубы режутся на отрезном устройстве, и отрезки поступают на рольганг-опрокидыватель и сбрасываются в накопитель труб. При необходимости допускается намотка труб небольшого диаметра в бухты (или на барабаны).

Наименование основного оборудования, входящего в состав линии Battenfeld-cincinnati (год выпуска 2011), на которой изготавливали трубы:

- Экструдер ВЕХ 60-30В (формирование наружного слоя);
- Экструдер ВЕХ 45-30В (формирование внутреннего слоя);
- Вакуумная ванна (длина 9 метров) CoolStream К63-21 – была включена;
- Оросительная ванна (четырёхсекционная; длина 16 метров) - не работала;
- Тянущее устройство В63/800;
- Отрезное устройство Cutstream RTA 63Е;
- Двухслойная экструзионная голова Helix 63-3 WPO.

3.5. Исследование износостойкости и гидравлических характеристик трубы двухслойной конструкции с внутренним слоем из термопластичного вулканизата при гидротранспорте хвостовой пульпы

3.5.1. Исследование величины потерь напора для определения коэффициентов гидравлического сопротивления

Для проведения лабораторных исследований по определению удельных потерь напора были смонтированы секции трубопроводов из исследуемых материалов в напорный трубопровод лабораторного стенда (рисунок 28). В качестве исследуемых материалов использовались трубы длиной 1000 мм с внутренним диаметром 50мм:

- Образец № 1 – труба из ПЭ2НТ11-9 класса РЕ 100 с дополнительным внутренним слоем из TPV Армлен ПП ТЭП 12-55А (рисунок 52);
- Образец № 2 – труба из ПЭ2НТ11-9;
- Образец № 3 – труба стальная электросварная прямошовная из углеродистой стали марки Ст3сп (ГОСТ 10704-91).

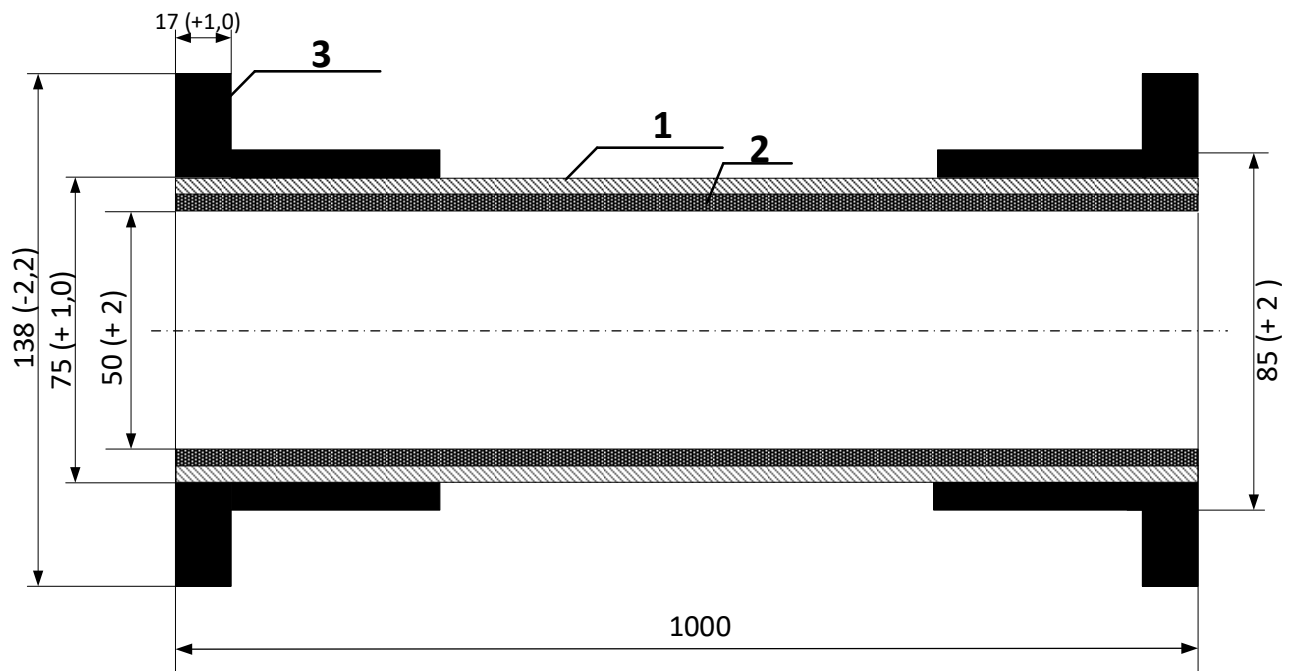


Рисунок 52 – Эскиз образца № 1 (размеры в миллиметрах): 1 – несущий давление полиэтиленовый слой, 2 – слой из TPV, 3 – полиэтиленовая втулка под фланец, приваренная к наружной поверхности трубы

В качестве твердого материала были взяты отвальные хвосты обогащения железной руды ПАО «Михайловский ГОК», предоставленные комбинатом для выполнения лабораторных экспериментов. Гранулометрический, минералогический и химический состав отвальных хвостов предоставлен ПАО «Михайловский ГОК» и (таблицы 29 -31).

Таблица 29 – Гранулометрический состав отвальных хвостов

Размер фракции, мм	+2	-2+1	-1+0,5	-0,5+0,25	-0,25+0,1	-0,1+0,05	-0,05+0	Итого
Содержание фракции, %	0,1	0,7	1,5	3,5	9,0	8,8	76,4	100,00

Таблица 30 – Минералогический состав отвальных хвостов

Минерал	М, %	Fe, %
Магнетит	0,894	0,633
Гематит	31,051	21,972
Гидроокислы Fe	0,728	0,457
Силикаты	15,565	2,844
Рудные карбонаты	6,481	2,190
Нерудные карбонаты	2,064	-
Апатиты	0,403	-
Кварц	42,303	-
Пирит	0,000	-
Прочие	0,509	-

Таблица 31 – Химический состав отвальных хвостов

Химический состав	%	Химический состав	%
Fe об.	28,100	S	0,056
Fe мг	0,633	P ₂ O ₅	0,136
FeO	3,328	ППП	3,805
Fe ²⁺	2,580	K ₂ O	1,288
Fe ₂ O ₃	36,495	Na ₂ O	0,538
SiO ₂	51,100	MnO	0,060
Al ₂ O ₃	0,154	P	0,063
CaO	1,414	CO ₂	3,376
MgO	1,335	C	0,896
TiO ₂	0,011		

Средневзвешенный диаметр частиц равен 0,07789 мм, а плотность частиц грунта – 3,1 г/см³. Интегральная кривая гранулометрического состава твердого материала хвостов обогащения руды приведена на рисунке 53.

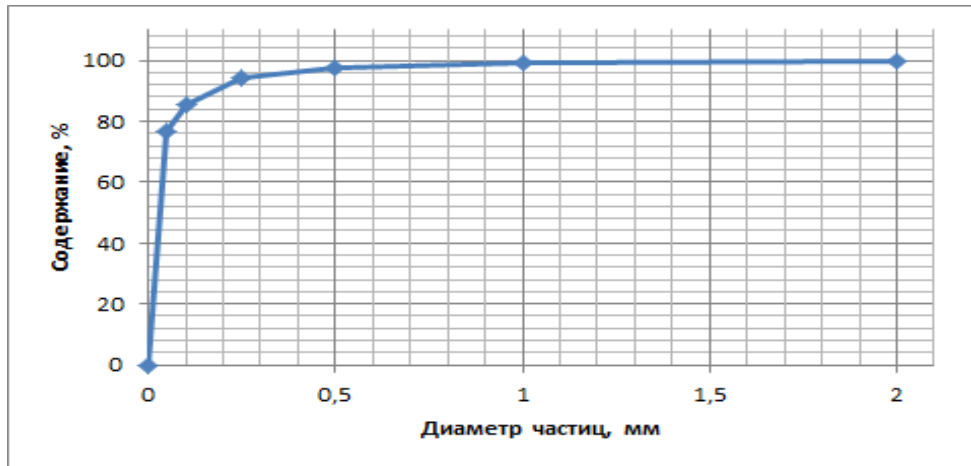


Рисунок 53 – Интегральная кривая распределения гранулометрического состава твердой фракции

Проведение лабораторных испытаний осуществлялось при следующих условиях:

- температура среды: от 15 до 30 °С;
- давление в системе (P): до 0,125 МПа;
- скорость потока в исследуемых трубопроводах с внутренним диаметром 50 мм: до 3,5 м/с;
- периоды изменения концентрации гидросмеси при определении удельных потерь давления: равные периоды, ориентировочно через каждые 30 минут;
- интервал изменения массовой концентрации (C_m): от 10 до 40 % с шагом в 10 %.

Экспериментам на гидросмеси хвостов обогащения железной руды предшествовали опыты на чистой воде. При этом осуществлялась проверка работы насоса, привода и стенда в целом, производилась тарировка приборов.

Результаты эксперимента на чистой воде представлены в таблице 32. Давление, указанное в таблицах 32-36, показывает значения давления на входе (P_{1cp}) и выходе (P_{2cp}) гидросмеси в образцы.

Таблица 32 – Результаты эксперимента на воде

Расход, Q, м ³ /ч	Образец № 1 (TPV)		Образец № 2 (PE 100)		Образец № 3 (Ст3сп)		ρ, кг/м ³	C _м , %
	P _{1ср} , Бар	P _{2ср} , Бар	P _{1ср} , Бар	P _{2ср} , Бар	P _{1ср} , Бар	P _{2ср} , Бар		
14,7	0,643	0,625	0,655	0,643	0,539	0,514	1000	0
12,8	0,737	0,723	0,743	0,737	0,658	0,636		
12,2	0,762	0,749	0,771	0,762	0,689	0,668		
10,3	0,782	0,771	0,788	0,782	0,717	0,700		
9,7	0,848	0,839	0,852	0,848	0,802	0,788		
6,8	0,93	0,926	0,932	0,93	0,912	0,905		
3,4	0,966	0,962	0,968	0,966	0,952	0,946		
1,0	1,004	1,003	1,004	1,004	1,002	1,000		

Для создания гидросмеси определённой концентрации в бак с водой добавляли определенную массу твердой фракции - отвалных хвостов. Объемная концентрация может быть определена по формуле:

$$C_{об} = \frac{\rho_{см} - \rho_0}{\rho_{тв} - \rho_0}, \quad (7)$$

где: $\rho_{см}$ – плотность гидросмеси, кг/м³, ρ_0 – плотность несущей среды (вода, $\rho_0=1000$ кг/м³), $\rho_{тв}$ – плотность твердой фракции ($\rho_{тв}=3100$ кг/м³). Плотность гидросмеси в этом случае определяется экспериментально с помощью мерной емкости.

Переход от объемной концентрации к массовой (C_м) осуществляется по формуле:

$$C_{.м} = C_0 \frac{\rho_{тв}}{\rho_{см}}, \quad (8)$$

Результаты первой серии эксперимента на гидросмеси представлены в таблице 33.

Таблица 33 – Результаты эксперимента на гидросмеси

Расход, Q, м ³ /ч	Образец № 1 (TRV)		Образец № 2 (PE 100)		Образец № 3 (СтЗсп)		ρ, кг/м ³	С _м (С _{об}), %
	Р _{1ср} , Бар	Р _{2ср} , Бар	Р _{1ср} , Бар	Р _{2ср} , Бар	Р _{1ср} , Бар	Р _{2ср} , Бар		
8,8	0,895	0,887	0,900	0,895	0,851	0,84	1086	12 (4)
7,9	0,844	0,833	0,849	0,844	0,787	0,778		
7,9	0,94	0,934	0,944	0,940	0,91	0,9		
5,2	0,996	0,992	0,998	0,996	0,98	0,974		
2,4	1,016	1,013	1,017	1,016	1,008	1,005		

Результаты второй серии эксперимента на гидросмеси представлены в таблице 34.

Таблица 34 – Результаты эксперимента на гидросмеси

Расход, Q, м ³ /ч	Образец № 1 (TRV)		Образец № 2 (PE 100)		Образец № 3 (СтЗсп)		ρ, кг/м ³	С _м (С _{об}), %
	Р _{1ср} , Бар	Р _{2ср} , Бар	Р _{1ср} , Бар	Р _{2ср} , Бар	Р _{1ср} , Бар	Р _{2ср} , Бар		
8,8	0,601	0,584	0,614	0,601	0,496	0,47	1200	25 (9,5)
8,4	0,665	0,649	0,677	0,665	0,578	0,556		
7,5	0,758	0,746	0,767	0,758	0,689	0,67		
6,6	0,895	0,885	0,901	0,895	0,845	0,83		
6,4	0,97	0,962	0,973	0,97	0,936	0,92		
6,1	1,013	1,007	1,015	1,013	0,99	0,98		
5	1,04	1,037	1,042	1,04	1,027	1,02		
2,95	1,073	1,071	1,074	1,073	1,068	1,064		

Результаты третьей серии эксперимента на гидросмеси представлены в таблице 35.

Таблица 35 – Результаты эксперимента на гидросмеси

Расход, Q, м ³ /ч	Образец № 1 (TRV)		Образец № 2 (PE 100)		Образец № 3 (СтЗсп)		ρ, кг/м ³	С _м (С _{об}), %
	Р _{1ср} , Бар	Р _{2ср} , Бар	Р _{1ср} , Бар	Р _{2ср} , Бар	Р _{1ср} , Бар	Р _{2ср} , Бар		
8,9	0,634	0,616	0,649	0,634	0,524	0,495	1240	29 (11)
8,4	0,736	0,719	0,747	0,736	0,646	0,62		
7,5	0,837	0,825	0,844	0,837	0,771	0,75		
7,1	1,018	1,011	1,024	1,018	0,984	0,97		
6,6	1,051	1,046	1,056	1,051	1,025	1,019		
3,6	1,111	1,109	1,112	1,111	1,103	1,1		

Результаты четвертой серии эксперимента на гидросмеси представлены в таблице 36.

Таблица 36 – Результаты эксперимента на гидросмеси

Расход, $Q, \text{ м}^3/\text{ч}$	Образец № 1 (TPV)		Образец № 2 (PE 100)		Образец № 3 (СтЗсп)		$\rho, \text{ кг}/\text{м}^3$	$C_m (C_{об}), \%$
	$P_{1cp},$ Бар	$P_{1cp},$ Бар	$P_{1cp},$ Бар	$P_{2cp},$ Бар	$P_{2cp},$ Бар	$P_{2cp},$ Бар		
13,8	0,735	0,716	0,746	0,735	0,613	0,588	1340	37 (16)
13,2	0,782	0,764	0,793	0,782	0,672	0,649		
12,2	0,854	0,838	0,862	0,854	0,763	0,74		
10,5	0,937	0,926	0,943	0,937	0,87	0,85		
8,7	1,006	0,999	1,011	1,006	0,957	0,945		
7	1,056	1,051	1,059	1,056	1,022	1,015		
3,7	1,108	1,106	1,109	1,108	1,092	1,09		

По результатам лабораторных исследований, приведенных в таблице 32, построена зависимость потерь напора (Δh) от расхода гидросмеси (Q) для трех образцов (рисунок 54).

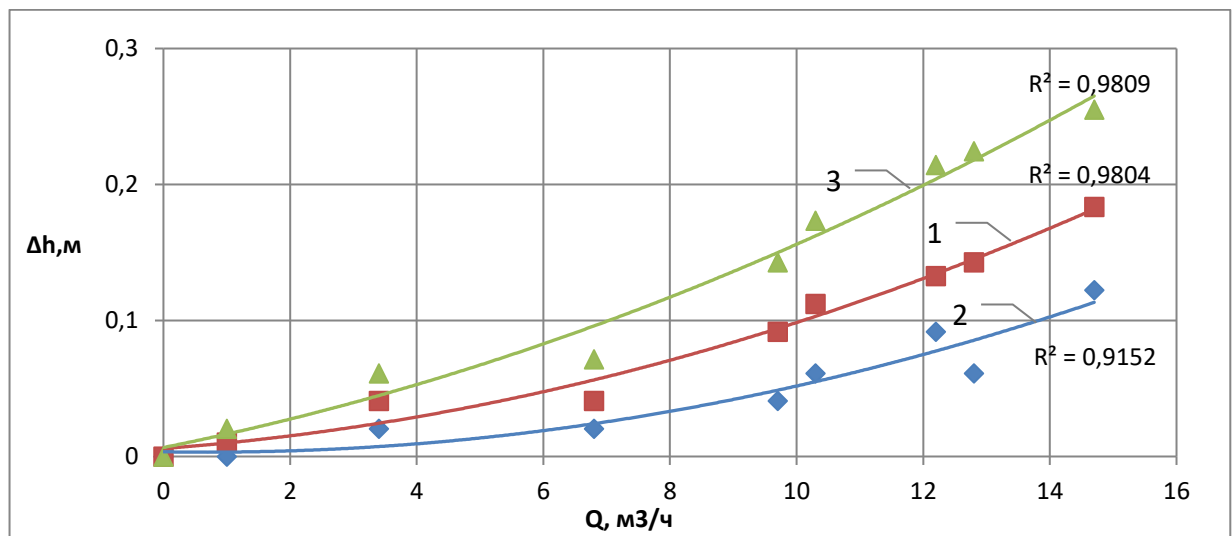


Рисунок 54 – Зависимость потерь напора от расхода при $C_m = 0$ (чистая вода) для TPV (1), PE 100 (2) и СтЗсп (3)

Наибольшие потери напора при транспортировании чистой воды наблюдаются у стальной трубы, а наименьшие – у трубы с внутренним слоем из TPV. Отметим, что зависимость потерь напора от расхода воды в трубе близка к квадратичной.

При расходе воды менее $1\text{ м}^3/\text{ч}$ наблюдается ламинарный режим течения и потери напора для всех трех образцов практически одинаковы. При турбулентном режиме течения и расходе $14,5\text{ м}^3/\text{ч}$ потери напора:

- у стальной трубы больше, чем у трубы с TPV, в 1,4 раза,
- у стальной трубы больше, чем у полиэтиленовой трубы, в 2,1 раза.

По результатам лабораторных исследований, приведенных в таблице 33, построена зависимость потерь напора (Δh) от расхода гидросмеси (Q) для трех образцов при концентрации гидросмеси 12 % (рисунок 55).

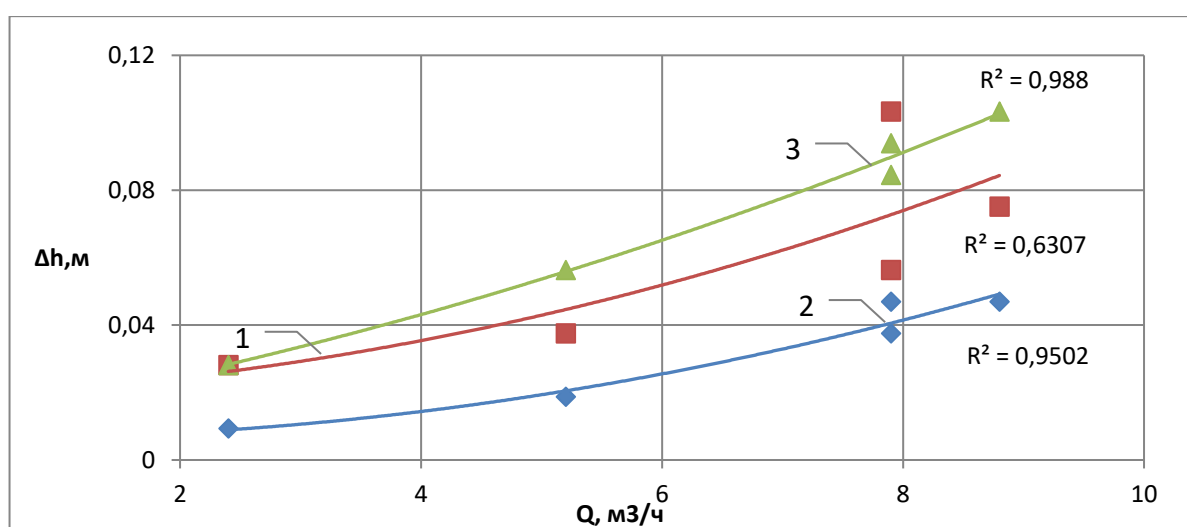


Рисунок 55 – Зависимость потерь напора от расхода при $C_m = 12\%$ для TPV (1), PE 100 (2) и СтЗсп (3)

Общая тенденция сохраняется: наибольшие потери у стальной трубы, наименьшие – у трубы с TPV. При турбулентном режиме течения и расходе $8,5\text{ м}^3/\text{ч}$ потери напора:

- у стальной трубы больше, чем у трубы с TPV, в 1,4 раза,
- у стальной трубы больше, чем у полиэтиленовой трубы, в 2,2 раза.

По результатам лабораторных исследований, приведенных в таблице 34, построена зависимость потерь напора (Δh) от расхода гидросмеси (Q) для трех образцов при концентрации гидросмеси 25 % (рисунок 56).

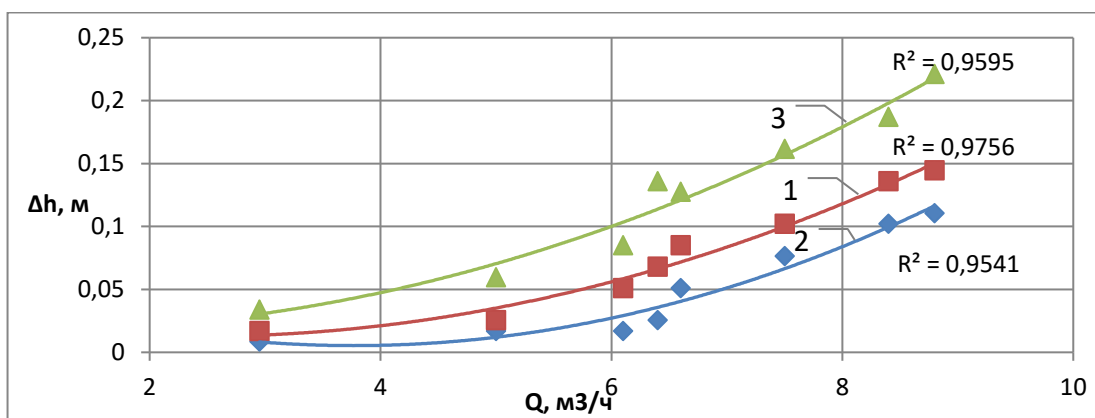


Рисунок 56 – Зависимость потерь напора от расхода при $C_M = 25\%$ для TPV (1), PE 100 (2) и СтЗсп (3)

Наибольшие потери напора у стальной трубы, наименьшие – у трубы с TPV. При турбулентном режиме течения и расходе $8,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ потери напора:

- у стальной трубы больше, чем у трубы с TPV, в 1,5 раза,
- у стальной трубы больше, чем у полиэтиленовой трубы, в 2,0 раза.

По результатам лабораторных исследований, приведенных в таблице 35, построена зависимость потерь напора (Δh) от расхода гидросмеси (Q) для трех образцов при концентрации гидросмеси 29 % (рисунок 57).

Наибольшие потери напора у образца №3, наименьшие – у образца №2. При турбулентном режиме течения и расходе $8,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ потери напора:

- у стальной трубы больше, чем у трубы с TPV, в 1,6 раза,
- у стальной трубы больше, чем у полиэтиленовой трубы, в 1,95 раза.

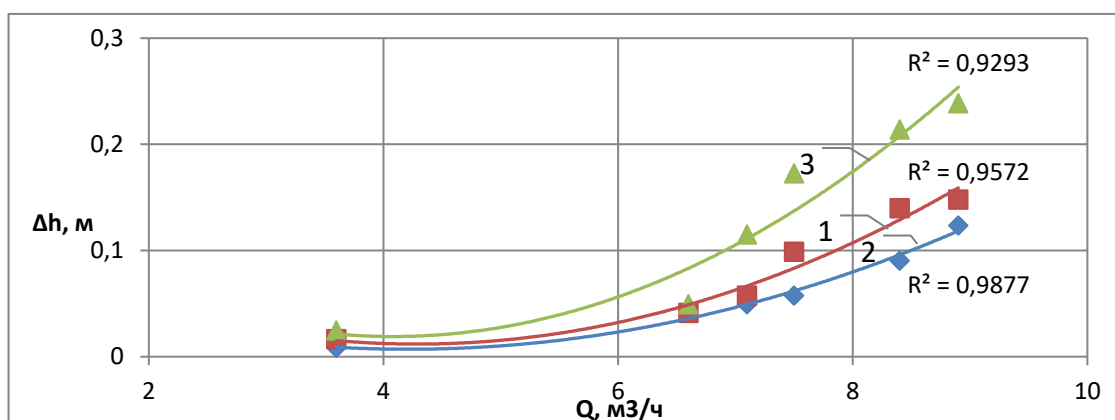


Рисунок 57 – Зависимость потерь напора от расхода при $C_M = 29\%$ для TPV (1), PE 100 (2) и СтЗсп (3)

По результатам лабораторных исследований, приведенных в таблице 36, построена зависимость потерь напора (Δh) от расхода гидросмеси (Q) для трех образцов при концентрации гидросмеси 37 % (рисунок 58).

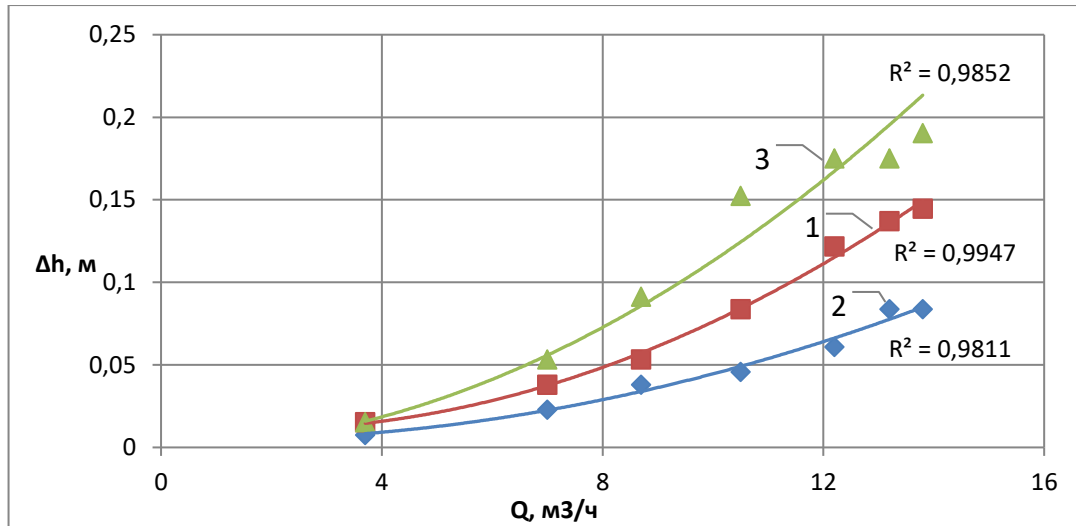


Рисунок 58 – Зависимость потерь напора от расхода при $C_m = 37\%$ для TPV (1), PE 100 (2) и Ст3сп (3)

Наибольшие потери напора у стальной трубы, наименьшие – у трубы с TPV. При турбулентном режиме течения и расходе $8,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ потери напора:

- у стальной трубы больше, чем у полиэтиленовой, в 2,3 раза,
- у стальной трубы больше, чем у трубы с TPV, в 1,3 раза.

Для расчета удельных потерь напора (гидравлического уклона) потери давления на измерительных участках трубопроводов приводились к потерям напора, и определялся гидравлический уклон (i):

$$i = \frac{\Delta P}{\rho_{см} g L}, \quad (9)$$

где i - удельные потери напора, м вод. ст./м; ΔP - разность показаний реле давлений, Па; $\rho_{см}$ - плотность гидросмеси, $\text{кг}/\text{м}^3$; g - ускорение силы тяжести, $\text{м}^2/\text{с}$; L - длина измерительного участка трубопроводов, м.

Для дальнейшего анализа результатов рассчитывали коэффициенты гидравлического сопротивления (λ) из формулы Дарси-Вейсбаха:

$$i = \lambda \frac{v^2}{2gD} \cdot \frac{\rho_c}{\rho_0} \rightarrow \lambda = i \cdot \frac{2gD}{v^2} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_c}, \quad (10)$$

где i – потери напора, м вод. ст./м; D – условный диаметр трубопровода, м; ρ_{cm} – плотность гидросмеси, кг/м³; ρ_0 – плотность воды, кг/м³.

Результаты расчетов значений удельных потерь напора (i) и коэффициентов гидравлического сопротивления (λ) представлены в таблице 37.

Таблица 37 – Значения удельных потерь напора и коэффициентов λ

Концентрация, С _м %	Удельные потери напора i			Коэффициент λ		
	ТРВ	РЕ 100	СтЗсп	ТРВ	РЕ 100	СтЗсп
0	0,17	0,12	0,26	0,04	0,03	0,06
	0,14	0,06	0,22	0,04	0,02	0,07
	0,13	0,09	0,21	0,04	0,03	0,07
	0,11	0,06	0,17	0,05	0,03	0,08
	0,09	0,04	0,14	0,05	0,02	0,07
	0,04	0,02	0,07	0,04	0,02	0,08
	0,04	0,02	0,06	0,16	0,08	0,26
	0,01	0,00	0,02	0,48	0,00	1,00
12	0,07	0,04	0,10	0,04	0,03	0,06
	0,05	0,04	0,09	0,04	0,03	0,06
	0,10	0,04	0,08	0,07	0,03	0,07
	0,04	0,02	0,06	0,06	0,03	0,09
	0,03	0,01	0,03	0,21	0,07	0,22
25	0,14	0,11	0,22	0,09	0,07	0,14
	0,13	0,10	0,19	0,09	0,07	0,13
	0,10	0,07	0,16	0,08	0,06	0,14
	0,08	0,05	0,13	0,09	0,05	0,14
	0,06	0,02	0,14	0,08	0,03	0,16
	0,05	0,02	0,09	0,06	0,02	0,11
	0,02	0,02	0,06	0,05	0,03	0,12
	0,02	0,01	0,03	0,09	0,05	0,19
29	0,14	0,12	0,24	0,09	0,07	0,15
	0,13	0,09	0,21	0,09	0,06	0,15
	0,09	0,05	0,17	0,08	0,05	0,15
	0,05	0,05	0,12	0,05	0,05	0,11
	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,06
	0,02	0,01	0,02	0,06	0,03	0,09
37	0,14	0,08	0,19	0,04	0,02	0,05
	0,13	0,08	0,18	0,04	0,02	0,05
	0,12	0,06	0,18	0,04	0,02	0,06
	0,08	0,04	0,15	0,04	0,02	0,07
	0,05	0,04	0,09	0,03	0,02	0,06
	0,04	0,02	0,05	0,04	0,02	0,05
	0,01	0,01	0,02	0,05	0,03	0,05

В результате можно сделать вывод, что удельные потери напора при гидротранспорте хвостовой пульпы при массовых концентрациях от 0 до 37% в трубе с внутренним слоем из TRV меньше, чем в стальной, в среднем в 1,5 раза. А удельные потери напора в полиэтиленовой трубе меньше, чем в стальной, в среднем в 2,5 раза. При этом основным критерием, определяющим величину удельных потерь, является коэффициент гидравлического сопротивления, который при концентрациях от 0 до 37% при турбулентном режиме движения гидросмеси для трубы с TRV изменяется в диапазоне от 0,04 до 0,08, для полиэтиленовой трубы – от 0,02 до 0,05, для стальной трубы – от 0,06 до 0,14.

3.5.2. Исследование изменения шероховатости внутренней поверхности

В качестве исследуемых образцов использовались трубы (вставки) с внутренним диаметром $D = 25$ мм и длиной $L = 70$ мм (рисунок 59):

1. Образец № 1 – вставка из PE 100 (ПЭНТ11-9) с внутренним слоем из термопластичного вулканизата Армлен ПП ТЭП 12-55А;
2. Образец № 2 – вставка из PE 100 (ПЭНТ11-9);
3. Образец № 3 – вставка стальная электросварная прямошовная из углеродистой стали марки Ст3сп (ГОСТ 10704-91).

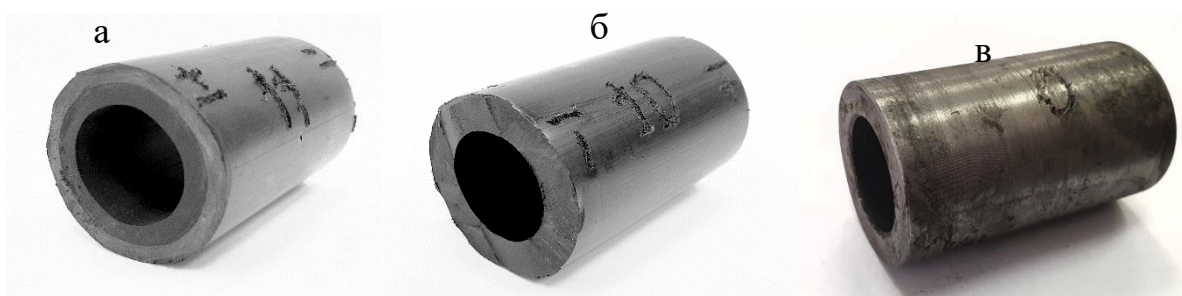


Рисунок 59 – Испытываемые образцы: а – образец № 1, б – образец № 2, в – образец № 3

Для измерения шероховатости поверхности использовался прибор SurfTest SJ-210 и специально сконструированное приспособление (рисунок 29). Данный инструмент позволяет измерить величину неровности поверхности различных

изделий по различным стандартам шероховатости и отображает результат измерения.

3.5.2.1. Исследование начальной шероховатости образцов

Измерения шероховатости внутренней поверхности образцов труб были произведены на образцах с внутренним диаметром 25 мм по трем линиям, расположенным под углом 120° друг к другу (линия 1, линия 2 и линия 3) на участках длиной 12 мм. Общее число участков измерений на каждом образце равнялось шести, то есть измерения осуществлялись с обеих сторон образца (рисунок 60). По шести полученным значениям шероховатости определено среднее арифметическое значение Ra и принято за абсолютную шероховатость поверхности Δ .

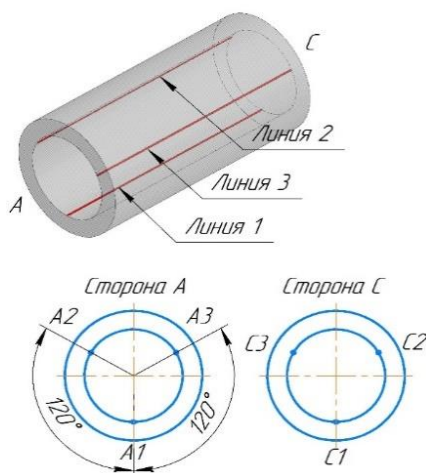


Рисунок 60 – Схема измерения шероховатости образцов

Результаты каждого измерения выведены в виде спектрограммы и характерных табличных значений. Пример отображения измеренных данных для точки А1 образца № 1 (вставка с внутренним слоем из TPV) приведен на рисунке 61.

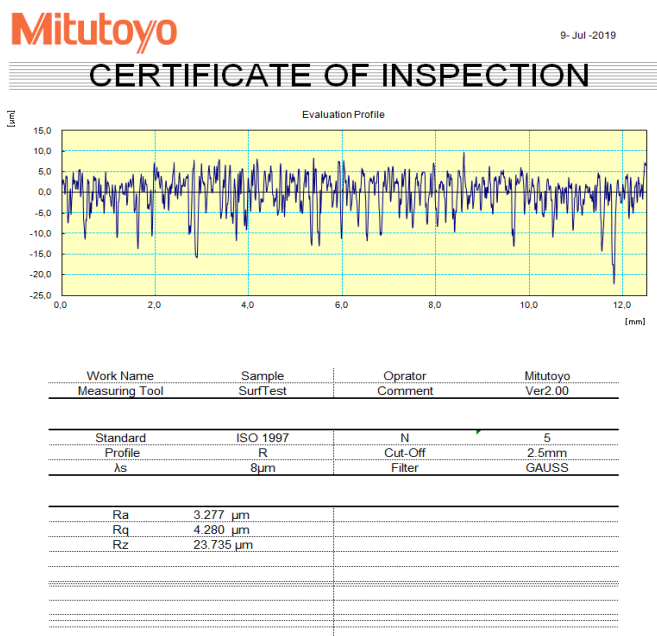


Рисунок 61 – Результаты измерения образца № 1

Результаты измерений шероховатости R_a образцов труб представлены в таблице 38.

Таблица 38 – Начальная шероховатость образцов

Образец	Точки измерения, мкм						Среднее значение R_a , мкм
	A1	A2	A3	C1	C2	C3	
№1	3,277	2,903	2,2	1,616	1,961	2,073	2,338
№2	0,537	0,679	0,621	0,368	0,88	0,802	0,649
№3	4,33	7,095	-	7,651	6,831	-	6,477

Сравнение начальной шероховатости исследуемых образцов показывает, что наименьшее значение $R_a = 0,649$ мкм наблюдается у образцов однослойных полиэтиленовых труб, а наибольшее значение $R_a = 6,477$ мкм у образца, изготовленного из СтЗсп.

Таким образом, начальная шероховатость образца трубы с внутренним слоем из TPV ниже начальной шероховатости СтЗсп в 2,8 раза, а начальная шероховатость образца полиэтиленовой трубы ниже шероховатости СтЗсп в 10 раз.

3.5.2.2. Исследование шероховатости приработанных образцов

Наработка шероховатости исследуемых образцов труб производилась на лабораторном стенде (рисунок 28). Монтаж исследуемых образцов к напорному трубопроводу осуществлялся с помощью переходных фланцев. Вставки № 1, № 2 и № 3 устанавливались в стальную трубу, которая крепилась к напорному трубопроводу с помощью фланцевого соединения.

В качестве твердого материала использовались отвальные хвосты обогащения железной руды ПАО «Михайловский ГОК». Массовая концентрация твердого в гидросмеси во время исследований составляла 37 %, а плотность – 1340 кг/м³.

Замеры шероховатости проводились каждые 100 часов наработки, количество отработанных часов фиксировалось механическим датчиком времени наработки (рисунок 62).

Температура гидросмеси в процессе эксперимента контролировалась датчиком температуры и системой охлаждения и находилась в диапазоне от плюс 25 до плюс 40°С.

При помощи расходомера (рисунок 62) фиксировался учет проходимого объема гидросмеси. Расход гидросмеси в системе варьировался в диапазоне от 10 до 14 м³/ч. Скорость гидросмеси в образцах изменялась в диапазоне от 5,6 до 8 м/с.



Рисунок 62 – Пусковой щиток насосов (слева), расходомер (в центре), датчики наработки (справа)

Для вставки из PE100 и вставки с внутренним слоем из TPV было наработано 300 часов, или прокачен объем пульпы, равный 3600 м³, а для стального образца – 400 часов, или объем 4352 м³. После чего для всех образцов было наработано дополнительно 200 часов (прокачен объем пульпы 1900 м³), массовая концентрация гидросмеси была увеличена до 40-50%.

Результаты по изменению шероховатости в процессе гидравлического транспорта хвостовой пульпы приведены в таблице 39.

Таблица 39 – Изменение шероховатости образцов в процессе гидротранспорта

Об-разец	Наработка, ч	Объем гидро-смеси, м ³	Точки измерения, мкм						Среднее значение Ra, мкм
			A1	A2	A3	C1	C2	C3	
№1	0	0	3,277	2,903	2,2	1,616	1,961	2,073	2,338
	100	1069	2,684	1,636	3,397	1,772	1,297	1,331	2,019
	200	2348	1,493	1,528	1,506	1,056	1,394	1,462	1,406
	300	3600	1,04	1,345	1,504	1,5	0,936	1,205	1,255
	500	5704	0,776	1,019	0,933	1,209	0,992	0,893	0,97
№2	0	0	0,537	0,679	0,621	0,368	0,88	0,802	0,649
	100	1069	1,105	1,086	1,291	1,565	1,255	1,571	1,312
	200	2348	0,932	0,899	0,971	0,837	0,912	1,058	0,935
	300	3600	1,012	1,011	1,262	0,726	1,032	0,925	0,995
	500	5704	0,98	0,795	1,02	1,286	0,789	0,825	0,949
№3	0	0	4,33	7,095	-	7,651	6,831	-	6,478
	50	369	4,942	6,368	-	9,064	6,953	-	6,832
	100	696	4,065	6,246	-	8,14	5,357	-	5,952
	200	1765	9,401	6,141	5,3	7,956	6,008	5,098	6,651
	300	3044	3,925	3,752	4,258	3,434	4,901	3,81	4,013
	400	4352	3,562	3,527	4,366	4,04	3,44	4,76	3,949
	600	6400	4,115	3,293	3,062	4,162	5,384	4,342	4,06

Зависимость изменения шероховатости от объема прокаченной гидросмеси для исследуемых образцов показана на рисунках 63 – 65.

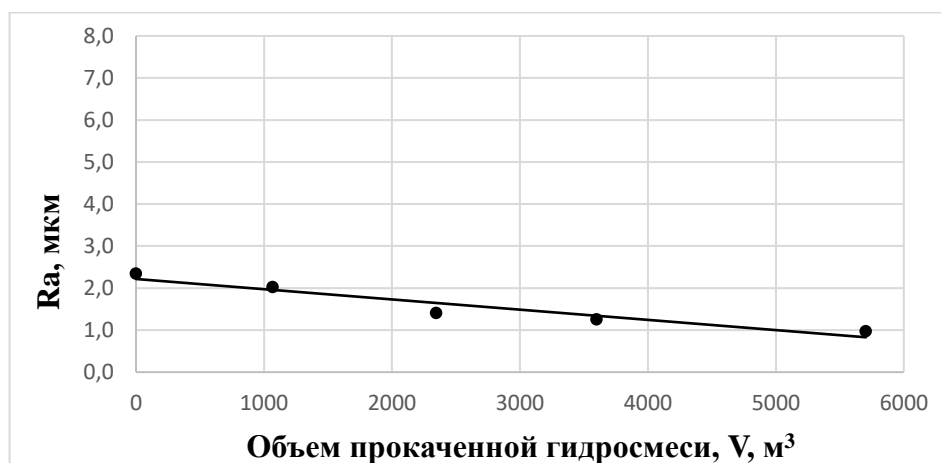


Рисунок 63 – Изменение шероховатости от объема пульпы для трубы внутренним слоем из TPV (образец № 1)

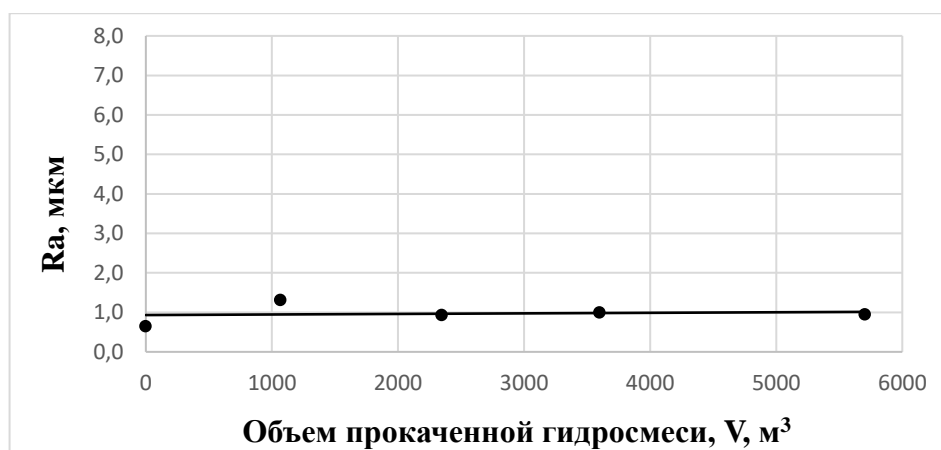


Рисунок 64 – Изменение шероховатости от объема пульпы для трубы из PE 100 (образец № 2)

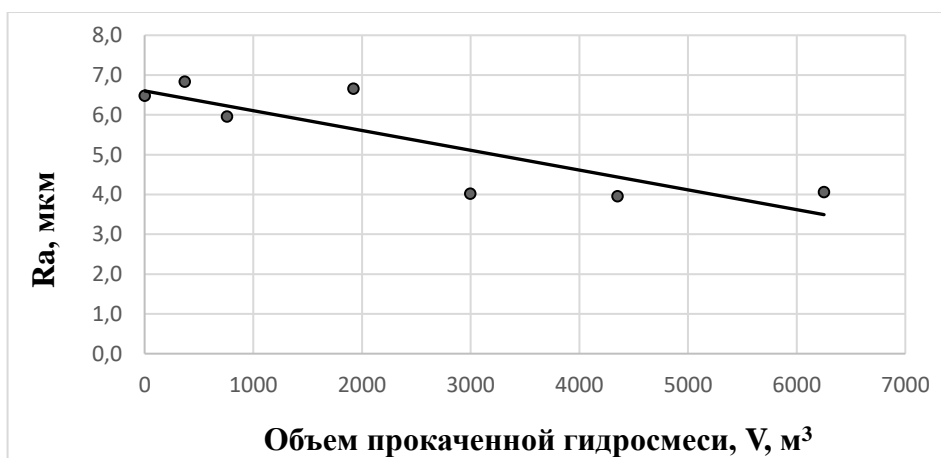


Рисунок 65 – Изменение шероховатости от объема пульпы для стальной трубы (образец № 3)

По результатам наработки можно сделать ряд выводов.

Изменение шероховатости TPV (№1) значительно, причем по рисунку 63 можно заметить, что падение шероховатости наблюдается на всех этапах эксперимента и доходит до значения 0,97 мкм, что соответствует уменьшению шероховатости на 59%.

Начальная шероховатость PE 100 (№2) составляет 0,649 мкм и в ходе эксперимента возрастает в среднем до 0,949 мкм, что соответствует увеличению шероховатости на 46%.

У стального образца (№ 3) шероховатость уменьшилась на 37%, однако в абсолютном значении снижение составило почти 2,5 мкм.

Снижение шероховатости внутренней поверхности из TPV продемонстрировано на спектрограмме профиля поверхности на одном и том же участке исследуемого образца соответственно до наработки и после (рисунок 66).

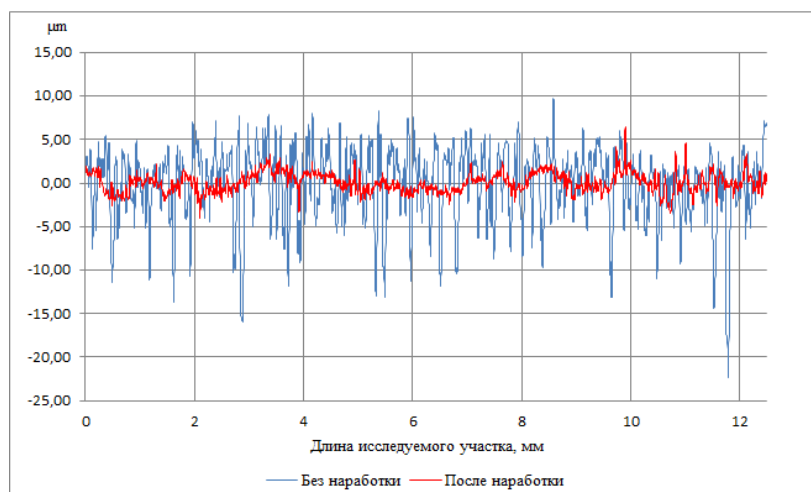


Рисунок 66 – Спектрограмма исследуемой поверхности вставки с внутренним слоем из TPV

На основании исследования шероховатости приработанных образцов следует отметить, что труба с внутренним слоем из TPV имеет склонность к уменьшению шероховатости, что приводит к снижению удельных затрат энергии в процессе гидротранспорта на примере хвостовой пульпы Михайловского ГОКа.

3.5.3. Теоретическое определение коэффициентов гидравлического сопротивления

Гидротранспорт хвостовых пульп на обогатительных фабриках обычно осуществляется при больших числах Рейнольдса и развитом турбулентном режиме. В области развитого турбулентного движения коэффициент гидравлического сопротивления λ является функцией только относительной шероховатости внутренней поверхности трубопровода:

$$\lambda = f\left(\frac{\Delta}{D}\right), \quad (11)$$

и увеличивается с возрастанием относительной шероховатости $\varepsilon = \left(\frac{\Delta}{D}\right)$. Потери напора на трение в этой области течения не зависят от вязкости гидросмеси и пропорциональны квадрату средней скорости потока (наблюдается квадратичный закон сопротивления).

Принятая в гидравлике методика определения Δ учитывает, что естественная поверхность (геометрическая $Ra = \Delta$) всегда неоднородна. Микрорельеф поверхности внутренних стенок труб зависит от многих факторов: материала, способа изготовления труб, физико-химических свойств перекачиваемой жидкости и срока эксплуатации.

Поскольку естественная шероховатость имеет многообразные нерегулярные формы, установить каким-либо геометрическим способом усредненное значение высоты бугорков, определяющее влияние шероховатости на потерю напора, оказывается невозможным, поэтому параметр шероховатости рассматривается как условная величина, определяемая по специальной шкале искусственной однородной шероховатости.

Такая шкала построена с помощью калиброванных зерен песка, наклеиваемых на гладкую поверхность трубы. Набор этих труб при различном

диаметре зерен дает ряд значений относительной шероховатости ε , в функции которой получены значения λ (формула И. Никурадзе):

$$\lambda = \frac{1}{\left(2 \lg \frac{\Delta_{\varepsilon}}{D} + 1,14\right)^2} \quad (12)$$

С помощью такой шкалы за абсолютную шероховатость принимается эквивалентная шероховатость, представляющая собой такой размер зерен песка искусственной шероховатости, который в квадратичной зоне равноценен по гидравлическому сопротивлению данной неоднородной поверхности.

Эквивалентная шероховатость - шероховатость, равная равномерной песочной шероховатости, по значению которой вычисляют такой же коэффициент гидравлического сопротивления, как и для фактической шероховатости.

Значение эквивалентной шероховатости может быть определено экспериментально, взято из справочных таблиц или вычислено по приближенной формуле (ГОСТ 8.586 1-2005):

$$\Delta_{\varepsilon} = \pi \cdot Ra \quad (13)$$

Для расчета Δ_{ε} используют значение естественной шероховатости элемента гидротранспортного трубопровода, в нашем случае – геометрическую шероховатость исследуемых образцов (таблица 39).

Коэффициент гидравлического сопротивления, являющийся функцией относительной шероховатости в квадратичной области сопротивления, определяется по формуле Шифринсона:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta_{\varepsilon}}{D}\right)^{0,25} \quad (14)$$

Результаты расчета коэффициента гидравлического сопротивления в квадратичной зоне для исследуемых образцов с начальной шероховатостью и приработанных образцов представлены в таблице 40.

Таблица 40 – Значения коэффициентов гидравлического сопротивления для квадратичной зоны сопротивления

Образец	Объем прокаченной гидросмеси, м ³	Среднее значение Ra , мкм	Эквивалентная шероховатость $\Delta\varepsilon$	Коэффициент гидравлического сопротивления λ
№1	0	2,338	7,341	0,014
	1069	2,019	6,340	0,014
	2348	1,406	4,415	0,013
	3600	1,255	3,941	0,012
	5704	0,97	3,046	0,012
№2	0	0,649	2,038	0,010
	1069	1,312	4,415	0,013
	2348	0,935	2,936	0,011
	3600	0,995	3,124	0,012
	5704	0,949	2,980	0,011
№3	0	6,478	20,341	0,019
	696	5,952	18,689	0,018
	1765	6,651	20,884	0,019
	3044	4,013	12,601	0,016
	4352	3,949	12,400	0,016
	6400	4,06	12,748	0,017

Для расчета гидравлических потерь напора при гидротранспорте хвостовой пульпы необходимо учитывать потери на транспортирование оборотной воды и потери, необходимые для транспортирования твердой фазы. Дополнительные потери напора на транспортирование твердой фазы являются функцией крупности твердых частиц, коэффициента разнородности и объемной концентрации гидросмеси, т.е. не зависят от параметров трубопровода, в том числе материала. Потери напора на транспортирование оборотной воды определяются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta h = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (15)$$

В формулу (15) входит коэффициент гидравлического сопротивления, который для квадратичной зоны был рассчитан ранее и представлен в таблице 40. Как было сказано ранее, коэффициент λ является функцией шероховатости и прямо пропорционально влияет на потери напора. Остальные параметры, входящие

в формулу (15), при прочих равных не будут отличаться (при рассмотрении трубопровода для конкретной обогатительной фабрики). Таким образом, можно сделать вывод, что трубопровод с наименьшей шероховатостью будет иметь наименьшие потери напора, т.е. будет энергетически эффективен.

По результатам расчетов, приведенных в таблице 38, построена графическая зависимость коэффициента гидравлического сопротивления λ от наработки для всех исследуемых образцов (рисунок 67).

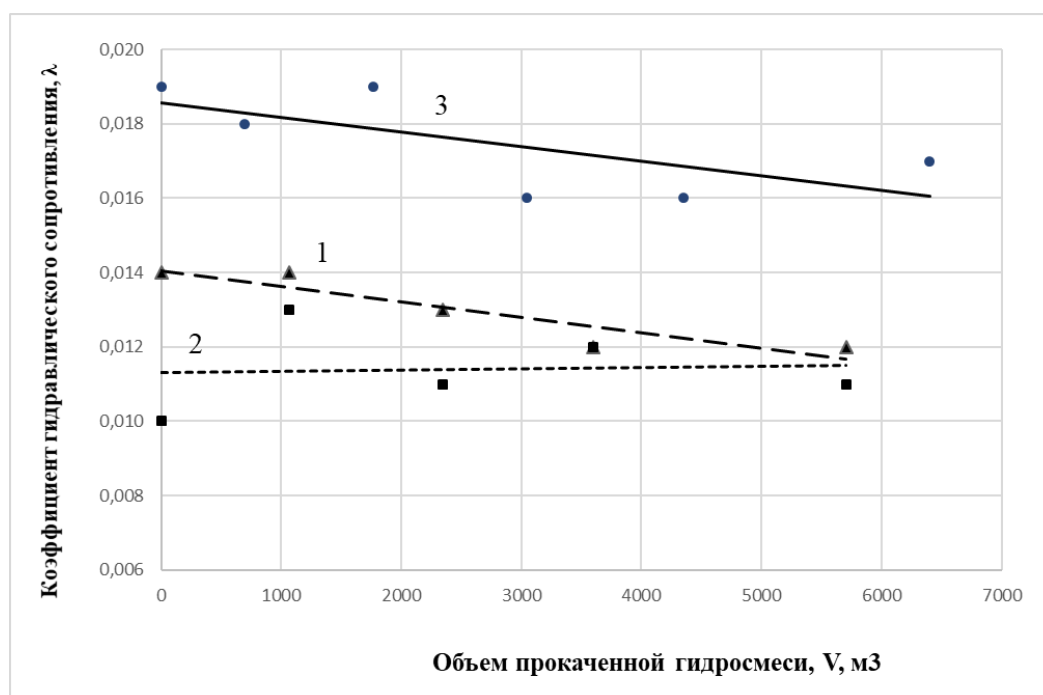


Рисунок 67 – Зависимость коэффициента λ от наработки для СтЗсп (3), PE 100 (2), TPV (1)

Наименьший коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda=0,010$ и, соответственно, наименьшие потери напора наблюдаются у полиэтиленовой трубы при отсутствии наработки (ноль часов).

Наибольший коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda=0,019$ и, соответственно, наибольшие потери напора наблюдаются у стальной трубы при отсутствии наработки.

Снижение коэффициентов гидравлического сопротивления в процессе наработки наблюдается у трубы с внутренним слоем из TPV и стальной трубы (образцы № 1 и № 3 соответственно).

Таким образом, при транспортировке хвостовой пульпы по трубопроводу в процессе эксплуатации возможны изменения параметров гидротранспорта, а именно: снижение или увеличение потерь напора в зависимости от выбранного материала внутренней поверхности. Труба с внутренним слоем из TPV имеет склонность к уменьшению коэффициента гидравлического сопротивления (0,014-0,012) и соответственно к снижению потерь напора в процессе гидротранспорта хвостовой пульпы Михайловского ГОКа. Труба из стали также имеет склонность к уменьшению коэффициента гидравлического сопротивления (0,019-0,017) при гидротранспорте хвостовой пульпы Михайловского ГОКа, однако удельные потери напора у стального образца будут значительно больше. Коэффициент гидравлического сопротивления трубы из PE100 слабо изменяется и имеет склонность к увеличению, тем самым в процессе эксплуатации удельные затраты энергии будут увеличиваться при использовании такого материала.

3.5.4. Исследование величины гидроабразивного износа

В качестве исследуемых материалов использовались трубы с внутренним диаметром 50мм и длиной 200мм и трубы (вставки) с внутренним диаметром 25 мм и длиной 70мм (рисунки 68 и 69):

- 1. Образец № 1** - Труба из PE 100 (ПЭ2НТ11-9) с внутренним слоем из TPV;
- 2. Образец №2** - Труба из PE 100 (ПЭ2НТ11-9);
- 3. Образец № 3** - Вставка из PE 100 (ПЭ2НТ11-9) с внутренним слоем из TPV (рисунок 59);
- 4. Образец № 4** - Вставка из PE 100 (ПЭ2НТ11-9) (рисунок 59);
- 5. Образец № 5** - Вставка стальная электросварная прямошовная из углеродистой стали марки СтЗсп (ГОСТ 10704-91) (рисунок 59);

6. **Образец №6.** Труба стальная электросварная прямошовная из углеродистой стали марки СтЗсп (ГОСТ 10704-91) с внутренним диаметром 25 мм (рисунок 68);
7. **Образец №7.** Труба стальная электросварная прямошовная из углеродистой стали марки СтЗсп (ГОСТ 10704-91) (рисунок 68);
8. **Образец №8.** Вставка из полиуретана твердостью 85 по Шору А (рисунок 69);
9. **Образец №9.** Вставка из полиуретана твердостью 89 по Шору А (рисунок 69);
10. **Образец №10.** Стальная труба с внутренним покрытием из полиуретана твердостью 90 по Шору А (рисунок 69);
11. **Образец №11.** Вставка из полиуретана твердостью 97 по Шору А;
12. **Образец №12.** Стальная труба с внутренним покрытием из полиуретана твердостью 95 по Шору А.

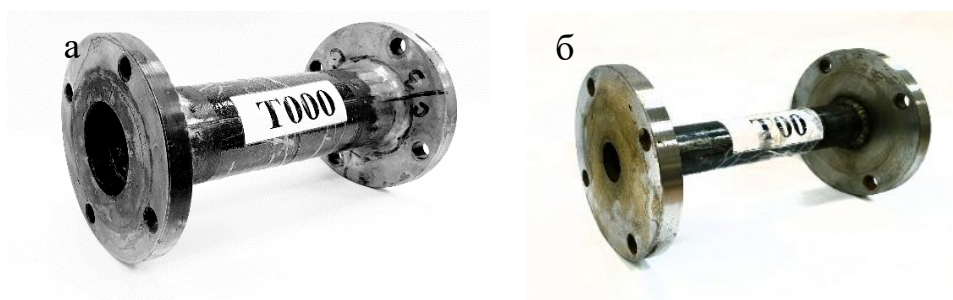


Рисунок 68 – Исследуемые образцы: а – образец стальной трубы № 7 (внутренний диаметр 50 мм), б – образец стальной трубы № 6 (внутренний диаметр 25 мм)



Рисунок 69 – Образцы с внутренней поверхностью из полиуретана

Образцы монтировались в систему трубопроводов (рисунок 28), образующих замкнутый гидравлический контур между насосом и расходным баком. В расходном баке подготавливалась гидросмесь из водопроводной воды и сухих хвостов обогащения Михайловского ГОКа (гидросмесь №1). После запуска насоса гидросмесь, перемещаясь по системе трубопроводов, изнашивала внутреннюю поверхность испытываемых образцов. Величина гидроабразивного износа оценивалась через потерю массы исследуемых образцов. Для замера массы образцов лабораторная установка останавливалась, производился демонтаж образцов, их просушка (искусственная и естественная), после чего проводились замеры массы. Массовая концентрация гидросмеси в процессе лабораторных испытаний изменялась от 10 до 50%.

Алгоритм проведения эксперимента:

1. Измерение начальной массы испытываемых образцов;
2. Подготовка образцов к монтажу в систему трубопроводов лабораторного стенда;
3. Монтаж лабораторного стенда, проверка на отсутствие утечек на чистой воде;
4. Подготовка гидросмеси;
5. Подключение и настройка измерительной аппаратуры;
6. Запуск установки, процесс гидротранспорта по замкнутой системе трубопроводов (установка останавливалась в нерабочее время, праздничные и выходные дни, а также при возникновении внештатных ситуаций; при остановке насоса гидросмесь из системы не удалялась);
7. Остановка установки после наработки определённого количества часов;
8. Демонтаж трубопроводов, промывка образцов;
9. Искусственная сушка образцов в печи при температуре 70-90°C в течение 20 часов;
10. Естественная сушка при комнатной температуре в течение 24 часов;
11. Измерение массы (m) образцов после наработки.

Пункты 1-11, описанные в алгоритме проведения эксперимента, составляют один этап. Этапы проведения эксперимента делились по времени наработки. Всего можно выделить 6 этапов, представленных в таблице 41.

Следует отметить, что на шестом этапе состав гидросмеси был изменен: вместо хвостов Михайловского ГОКа были использованы хвосты Качканарского ГОКа (гидросмесь №2) с повышенной массовой концентрацией. Образцы 1 и 2 были смонтированы в трубопроводную систему на четвертом этапе, образцы 3 и 4 – на третьем этапе.

Таблица 41 – Этапы проведения лабораторных исследований по гидроабразивному износу

№ Этапа	Наработка, ч	Объем прокаченной гидросмеси, V, м ³	Массовая концентрация, %	Исследуемые образцы	Сушка
1	50	369	10÷25	№ 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	Естественная
2	50	327	30	№ 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	Естественная
3	100	1069	38÷42	№ 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	Естественная
4	100	1279	38÷42	№ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	Естественная
5	300	3356	40÷50	№ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	Искусственная и естественная
6	100	840	40÷50	№ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12	Искусственная и естественная

Химический состав отвальных хвостов Качканарского ГОКа представлен в таблице 42, а гранулометрический состав – в таблице 43.

Таблица 42 – Химический состав отвальных хвостов Качканарского ГОКа

Химический состав	Содержание, %
окись кремния (SiO ₂)	45,02
диоксид титана (TiO ₂)	0,67
оксид алюминия (Al ₂ O ₃)	8,6
оксид железа (Fe ₂ O ₃)	17,68
оксид двухвалентного железа (FeO)	3,95
оксид марганца 2 (MnO)	0,14
окись кальция (CaO)	20,8
оксид натрия (Na ₂ O)	0,9
Прочие	2,24
СУММА	100,00

Таблица 43 – Гранулометрический состав отвальных хвостов Качканарского ГОКа

Размер фракции, мм	+1,6	-1,60+0,56	-0,56+0,28	-0,28+0,14	-0,14+0,071	-0,071	Итого
Содержание фракции, %	3,6	25,3	23,0	20,7	14,8	12,6	100,00

Средневзвешенный диаметр частиц качканарской пульпы равен 0,491 мм.

Результаты измерения массы исследуемых образцов при работе на гидросмеси Михайловского ГОКа представлены в таблицах 44 и 45.

Таблица 44 – Результаты изменения массы полиэтиленовых труб и труб с TPV при работе на гидросмесьях (последние 100 ч наработки на гидросмеси 2).

Образец	Общая наработка, ч	V, м ³	Масса образца, г
№1 (TPV)	0	0	1017,41
	100	1279	1017,63
	400	4635	1017,93
	500	5475	1017,91
№2 (PE 100)	0	0	997,13
	100	1279	996,86
	400	4635	996,45
	500	5475	996,47
№3 (TPV)	0	0	42,62
	100	1069	43,42
	200	2348	43,70
	500	5704	44,38
	600	6544	44,39
№4 (PE 100)	0	0	45,73
	100	1069	45,58
	200	2348	45,41
	500	5704	45,02
	600	6544	44,56

Таблица 45 – Результаты изменения массы стальных и полиуретановых образцов при работе на гидросмесьях (последние 100 ч наработки на гидросмеси 2).

Общая наработка, ч	V, м ³	Образец	Масса образца, г	Образец	Масса образца, г	Образец	Масса образца, г
0	0	№5	385,04	№8	63,11	№11	58,61
50	369		383,64		63,67		59,41
100	696		381,85		63,87		59,44
200	1765		379,73		63,76		59,43
300	3044		377,71		63,64		59,43
600	6400		370,86		63,2		59,07
700	7240		366,51		63,01		58,91
0	0	№6	2323,06	№9	65,89	№12	2758,02
50	369		2319,9		66,84		2761,43
100	696		2317,46		66,99		2762,57
200	1765		2310,58		66,91		2763,22
300	3044		2305,64		66,8		2763,55
600	6400		2285,2		66,18		2762,59
700	7240		2267,00		65,91		2762,17
0	0	№7	2322,22	№10	2896,34		
50	369		2320,88		2897,56		
100	696		2320,07		2899,34		
200	1765		2316,43		2899,65		
300	3044		2314,83		2899,79		
600	6400		2311,11		2898,21		
700	7240		2309,00		2897,74		

По результатам, представленным в таблице 44, построены зависимости массы от объема прокаченной гидросмеси для образцов из РЕ 100 и образцов с TPV (рисунок 70).

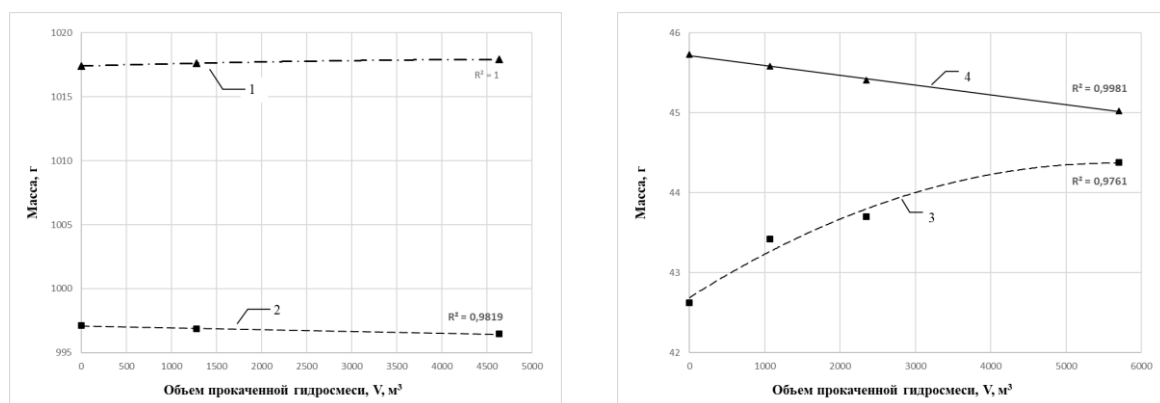


Рисунок 70 – Зависимости массы испытываемых образцов труб и вставок от объема прокаченной гидросмеси Михайловского ГОКа

По результатам, представленным в таблице 45, построены зависимости массы от объема прокаченной гидросмеси для образцов с внутренней поверхностью из стали и полиуретана (рисунок 71).

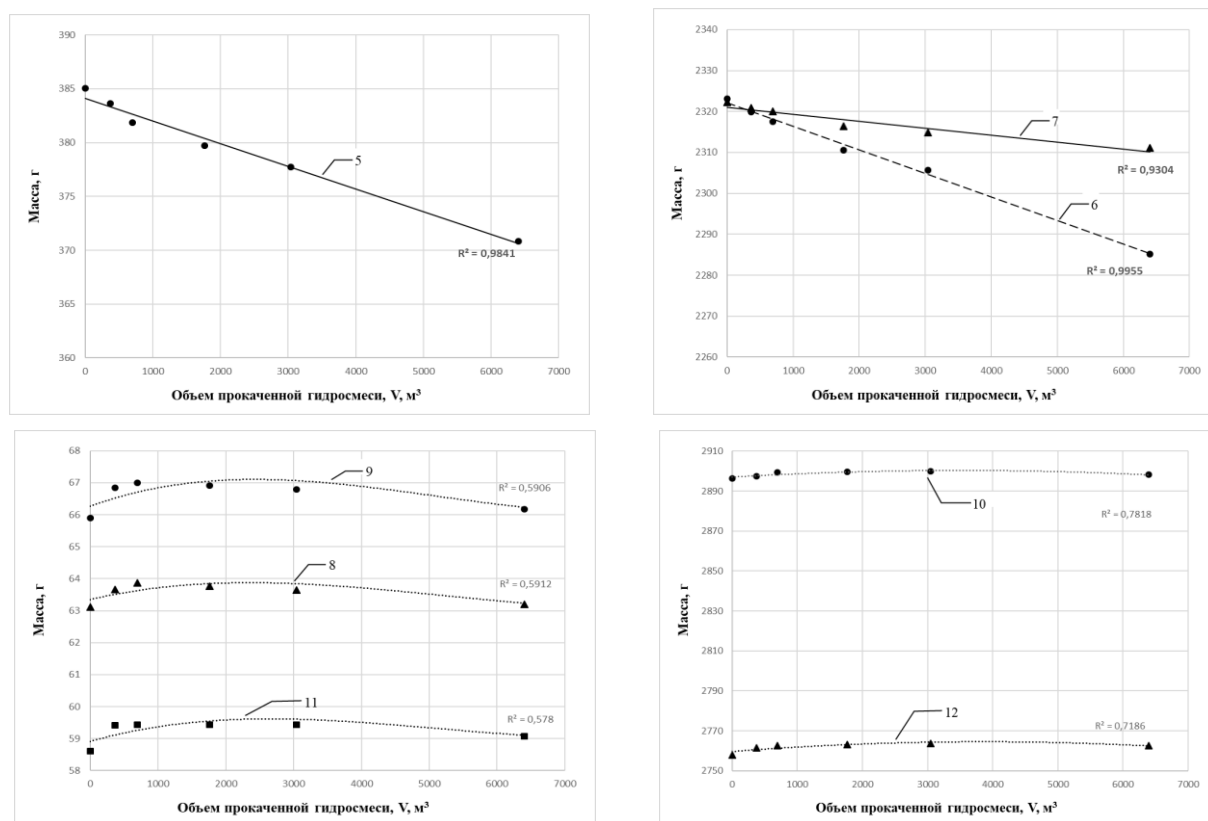


Рисунок 71 – Зависимости массы испытываемых образцов от объема прокаченной гидросмеси Михайловского ГОКа

По результатам графических зависимостей, представленных на рисунках 70 и 71, можно сделать несколько выводов:

1. Стальные образцы (образцы № 5, 6, 7) на протяжении всего эксперимента теряют массу, причем зависимость потери массы от объема – линейная. Наиболее интенсивная потеря массы наблюдается у образцов № 5 и № 7, что объясняется меньшим диаметром (25 мм) и, соответственно, большей скоростью гидросмеси в этих образцах. Стоит также отметить, что в процессе эксперимента были дважды заменены стальные отводы 90° вследствие их сквозного износа (рисунок 72).

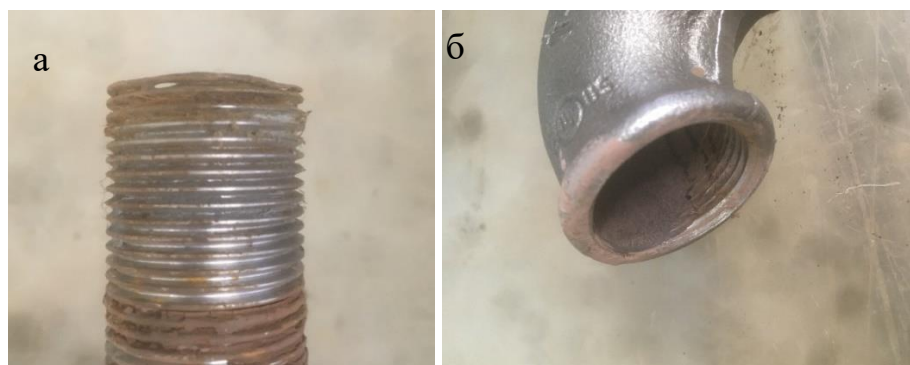


Рисунок 72 - Стальные образцы линейной части (а) и отвода (б) со следами сквозного износа

2. Образцы из РЕ 100 (№ 2 и № 4) также показывают линейное уменьшение массы, причем образец № 4 делает это интенсивнее, что объясняется меньшим диаметром образца и большой скоростью гидросмеси. Образец № 2 практически не теряет массы, однако объем прокаченной гидросмеси через него – наименьший.

3. Для образцов с внутренней поверхностью из PU различной твердости масса образцов возрастает до определенной критической точки (максимума), после которой начинается ее уменьшение (рисунок 71). Следует отметить, что на протяжении настоящего эксперимента для образцов с внутренним слоем из TPV видимой потери массы не наблюдается, однако зафиксирована остановка набора массы для обоих образцов. Это явление можно объяснить наличием инкубационного периода, который, как описано в литературе [16, 87, 114], предшествует началу процесса разрушения и сопровождается набором массы, обусловленным внедрением твердой фракции в материал образцов. При этом, на основании полученных данных можно предположить, что у TPV Армлен ПП ТЭП 12-55А-901 инкубационный период по времени более продолжительный, чем у исследованных TPU.

В работе [87] было установлено, что под ударным воздействием металлических шариков у хрупких полимеров, таких как полистирол, массовые потери можно было наблюдать с самого начала эксперимента, а отделение фрагментов материала у более пластичных полимеров начиналось только спустя определенный промежуток времени, при этом наблюдалось увеличение массы образцов вследствие внедрения эрозионных частиц. Однако по прошествии

инкубационного периода масса образцов начинала линейно уменьшаться. Для подтверждения факта внедрения твердой фракции в материал испытываемых образцов внутренняя поверхность была рассмотрена под микроскопом.

Результаты осмотра поверхности образцов представлены на рисунках 73-75, где хорошо видны твердые включения гидросмеси. В [16, 114] отсутствие весового износа в течение длительного времени объясняется наличием продолжительного инкубационного периода процесса разрушения. Однако к моменту отделения фрагмента материала в поверхности под сошедшим слоем уже накоплено некоторое количество микроповреждений, в связи с чем инкубационный период становится в несколько раз меньше и образование трещин происходит быстрее.

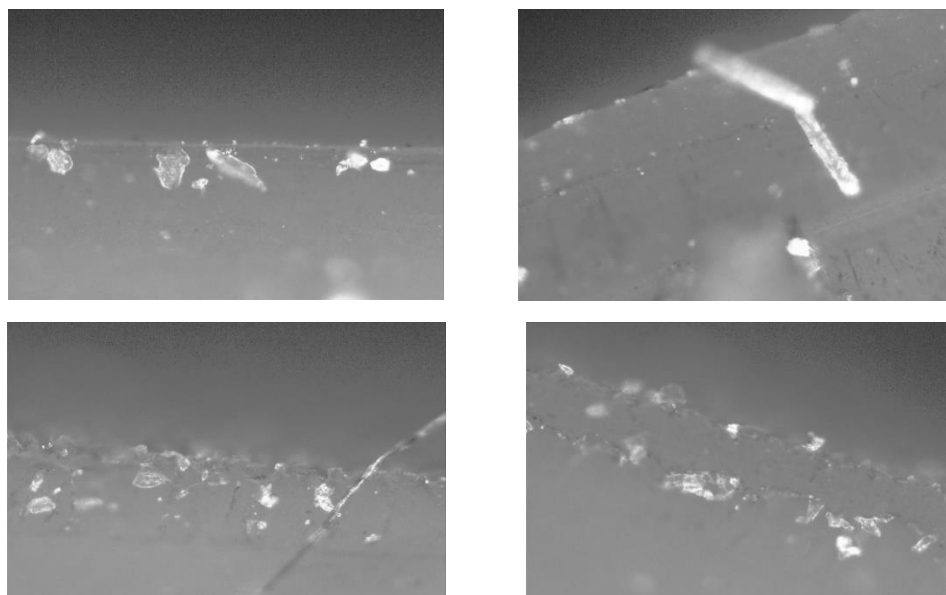


Рисунок 73 – Внутренняя поверхность полиуретановых образцов после взаимодействия в гидросмесь (увеличение в 200 раз)

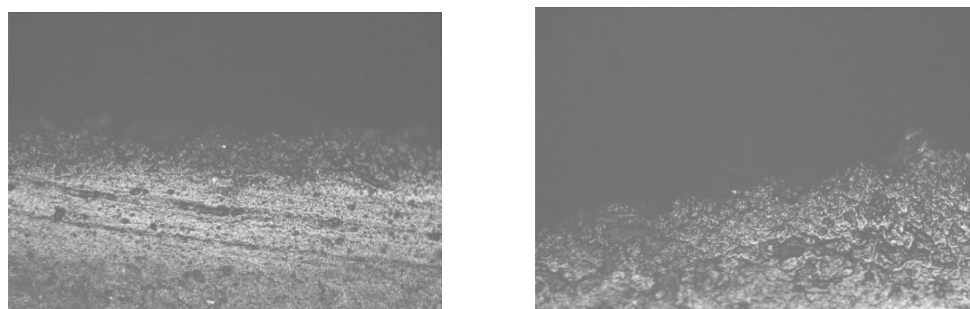


Рисунок 74 – Поверхность TPV до взаимодействия с гидросмесью (увеличение в 100 раз)

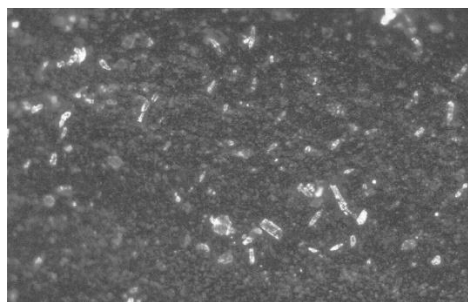


Рисунок 75 – Внутренняя поверхность образцов труб с внутренним слоем из TRV после взаимодействия с гидросмесью (увеличение в 100 раз)

Для количественной оценки величины износа переведем потери массы в объемную величину по следующей формуле:

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho}, \quad (16)$$

где Δm - изменение массы образца в процессе гидротранспорта, г; ρ – плотность материала образца, г/см³.

Интенсивность гидроабразивного износа (I , см³/м³) может быть определена по следующей формуле:

$$I = \frac{\Delta V}{V}, \quad (17)$$

где ΔV - изменение объема испытуемых образцов, см³; V – суммарный объем гидросмеси, прошедшей через испытуемый образец, м³.

Результаты исследований по гидроабразивному износу представлены в таблице 46.

Таблица 46 – Результаты исследований по гидроабразивному износу

D, мм	Труба	ρ , г/см ³	I , см ³ /м ³ (гидросмесь 1)	I , см ³ /м ³ (гидросмесь 2)	I , см ³ /м ³ (суммарная)
25	PE 100	0,959	$1,53 \times 10^{-4}$	$5,7 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$
50	PE 100	0,959	$1,3 \times 10^{-4}$	-	$1,2 \times 10^{-4}$
25	СтЗсп	7,85	$2,8 \times 10^{-4}$	$6,6 \times 10^{-4}$	$3,3 \times 10^{-4}$
50	СтЗсп	7,85	$2,2 \times 10^{-4}$	$3,2 \times 10^{-4}$	$2,3 \times 10^{-4}$

Для образцов с внутренними поверхностями из TRV (№ 1, № 3) и PU (№ 9, № 10, № 11 и № 12) интенсивность износа численно не была определена, так как значения

массы у указанных образцов оказались выше первоначальных. Для полиуретанового образца №8 после перехода на гидросмесь №2 было зафиксировано значение массы немного меньше первоначального (таблица 45), однако для достоверного вычисления удельной интенсивности износа требуется воздействие использованных в данной работе гидросмесей в течение более длительного времени, значительно выходящего за рамки инкубационного периода, что позволит снять достаточное количество показаний в линейной области.

Наибольшая величина изменения объема и интенсивности износа наблюдается у образца трубы стальной № 6 с внутренним диаметром 25 мм и составляет $7,5 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$ на гидросмеси №1 и $28 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$ на гидросмеси №2 (таблица 45). Значительная интенсивность износа – у вставки стальной (№ 5), составляющая $2,8 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$ на гидросмеси №1 и $6,6 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$ на гидросмеси №2. Указанные образцы изготовлены из одинакового материала и должны иметь близкую интенсивность износа, однако при изготовлении образца № 6 были допущены технологические ошибки при приваривании фланцев, в результате чего возникло несоответствие диаметров фланца и линейной части трубы, т.е. внезапное расширение и сужение – местные потери напора. Увеличенная интенсивность износа объясняется этой неточностью изготовления, так как в процессе проведения эксперимента место перехода диаметров было сглажено потоком гидросмеси, то есть помимо гидроабразивного износа в линейной части наблюдался износ в образованных местных сопротивлениях.

Стальные образцы № 5 и № 7 также изготовлены из одного материала, однако интенсивность износа выше у образца № 5. Такая разница объясняется разными диаметрами образцов и, соответственно, большей скоростью прохождения гидросмеси через образец № 5.

У образцов № 2 и № 4, изготовленных из РЕ 100, интенсивность изнашивания находится примерно на одном уровне: для образца № 2 величина интенсивности равна $1,3 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$, у образца № 4 (вставка) – $1,53 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$ при работе на гидросмеси №1. На гидросмеси №2 интенсивность износа полиэтиленовой вставки составила $5,7 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$. Следует отметить, что, по результатам оценки после

прокачивания двух гидросмесей, интенсивность износа полиэтиленовой трубы с внутренним диаметром 25 мм оказалась выше ($1,9 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$), чем у трубы с диаметром 50 мм ($1,2 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$).

При сравнении образцов из стали и PE 100 можно сделать вывод, что интенсивность износа полиэтиленовых труб оказалась ниже, чем у стальных, в 1,7 раза для $D=25$ мм и в 1,9 раза ниже для $D=50$ мм. После прокачивания двух гидросмесей в среднем величина интенсивности гидроабразивного износа у стальных образцов в 1,8 раза выше, чем у образцов из композиции полиэтилена высокой плотности.

3.5.5. Влияние на интенсивность износа концентрации, дисперсности и скорости гидросмесей

В общем виде на гидроабразивный износ оборудования трубопроводного транспорта, в том числе пульпопроводов, влияют следующие факторы [16, 134-138]: минералогический и гранулометрический состав транспортируемого материала, скорость прохождения частиц, угол воздействия частиц на поверхность, форма частиц, концентрация гидросмеси, время воздействия частиц, свойства изнашиваемого материала.

По результатам ряда исследований доказано, что работа, вызывающая износ от воздействия частиц твердого материала, пропорциональна кинетической энергии частиц [16, 139], причем авторы [16] отмечают, что если величина износа пропорциональна количеству поглощенной энергии, то жизненный цикл стали должен быть выше, чем у резины, но на практике, как правило, наблюдается обратная картина. В связи с этим в [16] сообщается о необходимости учитывать деформированный объем, для чего предлагается использовать удельную характеристику – плотность поглощенной энергии (формула б).

В работе [140] представлено следующее обобщенное уравнение, отражающее физическую сущность процесса износа:

$$I = c \cdot k \cdot E_{кин} \cdot t, \quad (18)$$

где I – износ (количество разрушенного материала); c – коэффициент, учитывающий свойства материала детали и свойства твердых частиц; k – коэффициент пропорциональности, указывающий долю кинетической энергии, истраченную на разрушение; $E_{кин}$ – кинетическая энергия твердых частиц, t – время воздействия частиц.

При прочих равных условиях кинетическая энергия твердых частиц определяется их скоростью в потоке гидросмеси, что позволяет говорить о зависимости износа от скорости потока гидросмеси. Так, в работе [134] представлена следующая функциональная зависимость интенсивности износа от скорости:

$$I \sim s \cdot u^n, \quad (19)$$

где: s – концентрация гидросмеси; u – скорость потока; n – показатель степени.

Показатель степени n (19) для прямых труб по данным [134] равен 3, по данным [139] – находится в пределах 2,5-3. В работе [16] интенсивность изнашивания резиновых материалов предлагается определять по эмпирической формуле $I = a \cdot u^{2,3}$, где a – коэффициент пропорциональности. С другой стороны, количество твердых частиц, соприкасающихся с изнашиваемой поверхностью, увеличивается пропорционально первой степени расхода или скорости гидросмеси [138].

Результаты экспериментальных исследований подтверждают зависимость интенсивности износа от скорости потока гидросмеси (таблица 46). Так, для стальной вставки (внутренний диаметр 25 мм) после прокачивания двух гидросмесей удельный износ составляет $3,3 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$, а для стальной трубы с внутренним диаметром 50 мм – $2,3 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$ (диаметр образца – 50 мм). Для полиэтиленовых труб величины износа составляют $1,9 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$ и $1,2 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$ соответственно. Интенсивность износа для образцов, имеющих меньший диаметр, в среднем в 1,5 раза выше при скорости потока, большей в 4 раза.

В работе [138] предлагается следующая эмпирическая формула, связывающая скорость изнашивания с концентрацией твердых частиц в гидросмеси:

$$I = k \cdot c^m, \quad (20)$$

где: k – коэффициент, зависящий от материала; c – концентрация абразивных частиц в гидросмеси.

В [138, 141] сообщается, что с увеличением концентрации износ может возрастать линейно, т.е. показатель степени $m = 1$ (20). Однако стоит отметить, что согласно [134] износ прямо пропорционален концентрации при значениях только в диапазоне от 0 до 0,25 %, а дальнейшее увеличение концентрации сказывается на износе значительно меньше. В работе [138] для образцов, изготовленных из различных марок чугунов и сталей (в том числе Ст3), рост интенсивности износа от концентрации по линейному закону наблюдается до концентраций 4-6 %, а при значениях более 10-12 % концентрация не оказывает влияния на износ. Среди возможных причин замедления скорости изнашивания при определенных значениях концентраций рассматриваются такие, как увеличение частоты соударений частиц друг с другом и экранирующий эффект по причине их осаждения в трубопроводе [16, 76].

В рамках настоящего исследования минимальная концентрация гидросмеси составляла 10 %, а – максимальная 50 %, и по полученным зависимостям массы от объема (рисунок 76) видно, что характер кривой, описывающей потерю массы, не менялся при разной концентрации, что подтверждает теорию.

Результаты исследований, представленные в [16], показывают влияние дисперсности на износ: интенсивность изнашивания возрастает с уменьшением дисперсности - увеличением содержания крупных частиц. На графических зависимостях (рисунок 76), полученных в результате представленного исследования, видно, что при переходе от гидросмеси № 1 (средневзвешенный диаметр частиц $d_{cp} = 0,07789$ мм) на гидросмесь № 2, имеющую средневзвешенный диаметр абразивных частиц $d_{cp} = 0,491$ мм, наблюдается увеличение потери массы

образцов. Для стальной трубы с внутренним диаметром 50 мм интенсивность износа возрастает с $2,2 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$ до $3,2 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$, а для стальной вставки – с $2,8 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$ до $6,6 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$. Для полиэтиленовой вставки интенсивность возрастает с $1,53 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$ до $5,7 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$, а масса образца с внутренним диаметром 50 мм остается практически неизменной. В литературе отмечается, что при достижении определенных значений размера абразивных частиц может наблюдаться и снижение интенсивности износа [16, 49, 76,106].

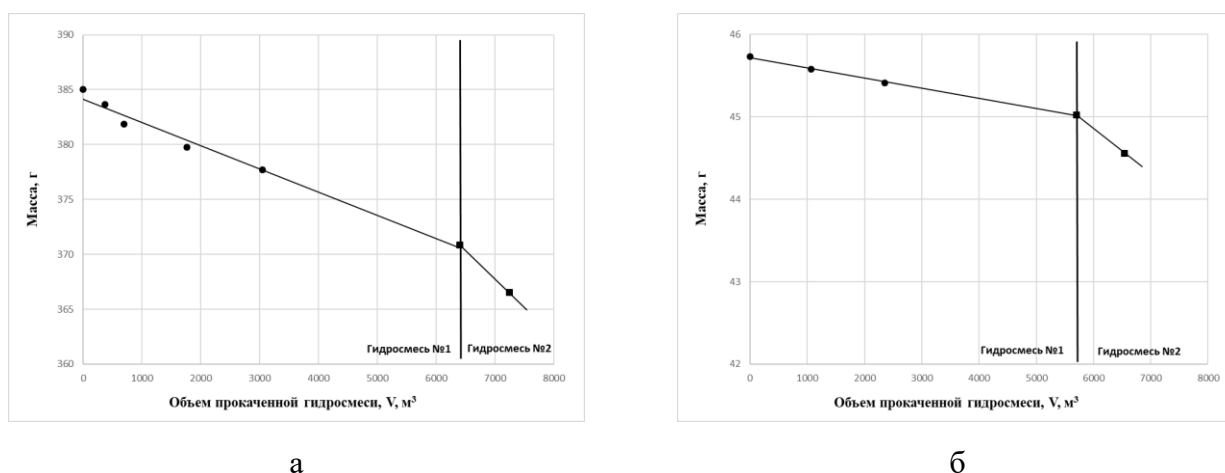


Рисунок 76 – Интенсивность уменьшения массы образцов стальной (а) и полиэтиленовой (б) труб ($D = 25 \text{ мм}$) в зависимости от типа гидросмеси

По результатам лабораторных исследований труб в условиях гидротранспорта хвостовой пульпы, можно сделать следующие выводы.

1. В процессе гидротранспорта хвостовой пульпы при массовых концентрациях от 0 до 37% удельные потери напора трубы с внутренним слоем из TPV меньше, чем у стальной трубы, в среднем в 1,5 раза, а удельные потери напора в образце полиэтиленовой трубы меньше, чем у стальной трубы, в среднем в 2,5 раза. При этом основным критерием, определяющим величину удельных потерь, является коэффициент гидравлического сопротивления, который при концентрациях от 0 до 37% при турбулентном режиме движения гидросмеси для трубы с внутренним слоем из TPV изменяется в диапазоне от 0,04 до 0,08, для PE 100 – от 0,02 до 0,05, для стальной трубы – от 0,06 до 0,14.

2. Начальная шероховатость TPV ниже начальной шероховатости СтЗсп в 2,8 раза, а начальная шероховатость PE 100 ниже, чем у стали, в 10 раз.

3. В процессе гидротранспорта хвостовой пульпы через напорный трубопровод происходит изменение шероховатости внутренней поверхности секций трубопровода, так, для TPV наблюдается снижение шероховатости на **59 %** при объеме прокаченной пульпы около 5000 м³; для PE 100 - увеличение на 46%; для СтЗсп - уменьшение шероховатости на 37% при объеме прокаченной пульпы 6000 м³. При этом минимальные абсолютные значения достигаются у образцов из трубы с внутренними поверхностями из TPV и PE 100.

4. При транспортировке хвостовой пульпы по трубопроводу в процессе эксплуатации возможны изменения параметров гидротранспорта, а именно: снижение или увеличение потерь напора в зависимости от выбранного материала внутренней поверхности. TPV имеет склонность к уменьшению λ (0,014-0,012) и, соответственно, к снижению потерь напора в процессе гидротранспорта хвостовой пульпы Михайловского ГОКа. СтЗсп также имеет склонность к уменьшению λ (0,019-0,017), однако удельные потери напора у стального образца будут значительно больше. λ полиэтилена слабо изменяется и имеет склонность к увеличению, тем самым в процессе эксплуатации удельные затраты энергии будут увеличиваться при использовании такого материала.

5. В процессе прокачивания гидросмеси TPV и TPU продемонстрировали высокую стойкость к гидроабразивному износу. С учетом данных по степени истирания материалов, представленных в разделах 3.1 и 3.2, и наличия достаточно продолжительного инкубационного периода процесса разрушения, который обычно характерен для износостойких марок резин, в условиях гидротранспорта хвостовой пульпы интенсивность изнашивания труб с внутренней поверхностью из исследованной марки TPV и TPU, применяемых для футеровки труб для пульпопроводов, значительно ниже, чем у трубы из ПЭ 100 и трубы из СтЗсп, причем полиэтилен и сталь характеризуются близкими значениями объемных потерь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение результатов наиболее жесткого вида износа – абразивного износа полиэтиленов по шлифовальной шкурке (Н12 по ГОСТ 13344) – представлено в таблице 47.

Таблица 47 – Износ различных видов полиэтилена по шлифовальной шкурке

Материал	Среднее значение износа, мм ³ /м	Стандартное отклонение среднего значения	Коэффициент вариации среднего значения, %
HDPE	3,1	0,15	4,8
PEX-a	3,8	0,15	4,0
LLDPE	3,7	0,12	4,2

Полученные данные показывают, что у всех образцов полиэтиленов показания износа являются близкими. Это связано с тем, что при испытаниях все образцы полиэтиленов: и линейных, и сетчатых – имеют близкие величины плотности, твердости и предела текучести (таблица 48).

Таблица 48 – Характеристики полиэтиленов

№	Показатель	HDPE 2HT11-9 (PE100)	LLDPE UT 404	PEX-a Lupolen 5261 ZQ 456	TPV Армлен ПП ТЭП 12-55А	TPU Elastollan С 85 А 10 000
1	Плотность, кг/м ³	959	919	955	889	1119
2	Относительное удлинение при разрыве, %	578	930	495	641	632
3	Предел текучести при растяжении, МПа	24	10	28	(4) *	(35) *
4	Модуль упругости при растяжении, МПа	830	185	1021	8,0	20,7
5	Твердость по Шору А	-	-	-	55	87
6	Твердость по Шору Д	60	46	64	9	34
7	Относительная остаточная деформация сжатия (72 ч., 23 °С), %	-	-	-	31	25
8	Относительная остаточная деформация сжатия (24 ч., 70 °С), %	-	-	-	44	35

* для TPU и TPV условная прочность

В свою очередь, при гидроабразивном воздействии были зафиксированы заметные различия в износостойкости между полиэтиленами низкой и высокой

плотности, что подчёркивает важность вопроса выбора методов оценки материалов с учетом фактических условий эксплуатации и механизмов изнашивания. По сравнению с рядом исследованных полиэтиленов, термопластичные полиуретаны и динамически вулканизованные термоэластопласты наиболее близки по характеристикам к резине.

Известно, что процесс эрозионного износа сопровождается не только изменением геометрических характеристик изделия, но и изменением свойств и структуры материала, что, в свою очередь, влияет и на интенсивность изнашивания. Износ происходит в результате воздействия внешних сил, и в зависимости от характера воздействия меняется интенсивность изнашивания; то есть материал, являющийся стойким к износу в одних условиях, может быть совершенно непригоден в других. Соответственно, для выбора методов оценки материалов необходимо понимать, какие виды нагружения действуют на материал и механизм изнашивания в конкретных условиях эксплуатации [16, 63, 65 – 67, 114]. В случае пульпопроводов, внутренняя стенка труб подвергается износу гидроабразивным потоком. Как отмечалось в литературном обзоре [16, 97, 114, 115], изнашивание материалов потоком частиц в условиях ударного нагружения поверхности отличается от простого скольжения, а характер нагружения определяется как контактно-динамический. Подчеркивается отличие механизмов изнашивания в разных средах, влияние на износ угла атаки частиц, скорости потока и эластичности материала. Изнашивание гидроабразивным потоком представляется как изнашивание в результате контактно-динамического взаимодействия тел в жидкой среде, при котором механизм разрушения имеет выраженный усталостный характер. В отличие от других видов изнашивания, в гидроабразивном потоке разрушение материала происходит вследствие размывания жидкостью микрповреждений различного происхождения: микротрещин усталостного происхождения, микропорезов частицами и т.п.

К фундаментальной особенности полимеров относится явление вязкоупругости, заключающееся в способности полимеров к обратимым эластическим деформациям при относительно малом периоде напряженного состояния, и наоборот – способность к течению (вязкая деформация) при

длительном нагружении, которое обусловлено распадом узлов флуктуационной сетки полимера [63]. Таким образом, механическое поведение полимера при синусоидальном нагружении может быть описано через комплексный модуль упругости G , включающий вещественную (упругую) G' и мнимую (вязкую) G'' составляющие [99, 100]:

$$G = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2}, \quad (21)$$

где G' – динамический модуль упругости, который определяется через максимальную амплитуду напряжения и совпадающую с ней по фазе деформацию; G'' – динамический модуль потерь, вычисляемый через максимальную амплитуду напряжения и соответствующую деформацию в противофазе.

Диссипативные потери при каждом цикле нагружения приводят к сдвигу деформации относительно напряжения на определенный фазовый угол. Согласно М.М. Резниковскому [100], механические потери могут быть количественно выражены через тангенс угла сдвига фаз $\text{tg}\delta$:

$$\text{tg}\delta = \frac{G''}{G'} \quad (22)$$

Динамический модуль потерь зависит от циклической частоты и температуры, а отношение G''/ω отражает сопротивление полимера сдвигу при определенной температуре и называется динамической вязкостью η [99]. Если предположить, что $w = \text{const}$, то динамическая вязкость образца при G'' , стремящемся к нулю, будет мала или неизменна, что, в свою очередь, и сказывается на степени изнашивания материала.

Полученные результаты наглядно демонстрируют, что в диапазоне температур от минус 30 до плюс 100 °С наблюдаются изменения во всех исследованных полиолефинах, вероятно, связанные со структурными перегруппировками, как отклик на деформационное воздействие. Отсутствие реакции на механическое воздействие характерно для TPU, TPV и резины на основе EPDM (модуль потерь у которых обнаруживается при более низких температурах), что приводит к снижению плотности поглощенной энергии и возникновению

меньших по величине контактных напряжений вследствие удара абразивных частиц [16, 97, 114].

На рисунке 77 представлена практически линейная зависимость между величиной модуля механических потерь (23 ± 2 °C) и степенью истирания материалов.

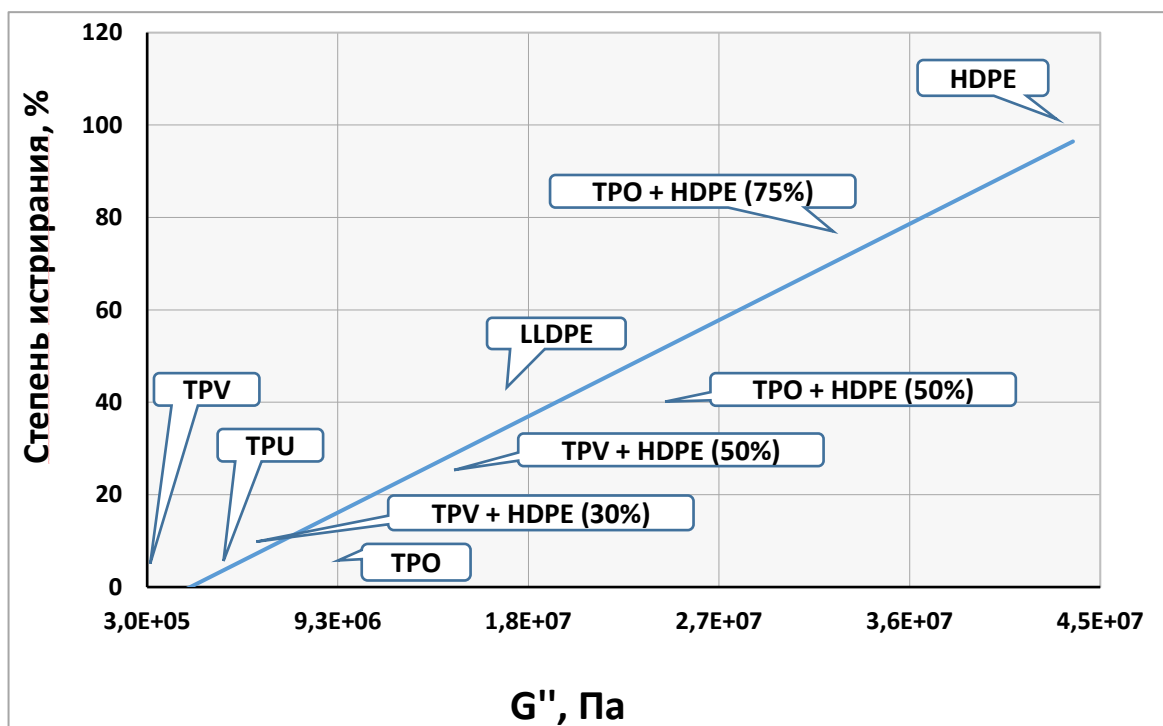


Рисунок 77 - Зависимость степени истирания от модуля механических потерь

В [16, 114] отмечается, что при скоростях потока, сопоставимых со скоростью релаксационных процессов в эластомере, наблюдается переход от усталостного износа к квазихрупкому разрушению, обусловленному переходом материала в стеклообразное физическое состояние. При достижении таких критических скоростей инкубационный период разрушения отсутствует, микроструи жидкости начинают воздействовать на материал подобно твердому телу, скорость развития трещин и размеры отделяемых фрагментов материала возрастают. Значение скорости, при которой происходит переход к квазихрупкому изнашиванию, возрастает с увеличением модуля упругости эластомера. Однако в известной практике эксплуатации пульпопроводов в горнорудной промышленности такие скорости не достигаются.

Результаты сравнительных исследований стойкости к гидроабразивному износу полимерных и стальных труб подтвердили, что самую высокую износостойкость имеют стальные трубы, футерованные TPU, и двухслойные полиэтиленовые трубы с внутренним слоем из термопластичного вулканизата Армлен ПП ТЭП-12-55А. Стойкость к гидроабразивному износу HDPE немного выше, чем у стальной трубы, но заметно уступает трубам с оболочками TPU и TPV. Поэтому применение трубопроводов из HDPE, UHMWPE, сшитого HDPE (например, PEХ-а) или двухслойных труб с внутренним слоем из марок PE с меньшей твердостью, таких как LLDPE, возможно для относительно мягкого абразива и на относительно непродолжительные периоды эксплуатации.

Результаты исследований показали, что TPU и специально разработанная экструзионная марка TPV для работы в условиях ударно-динамического нагружения являются одними из ближайших аналогов резины, что подтверждается наличием достаточно продолжительного инкубационного периода процесса разрушения, который обычно характерен для износостойких при работе в контактно-динамическом режиме нагружения марок резин [16, 87, 114].

Исходя из вышеизложенного, только TPU, резины на основе EPDM и динамически вулканизированный TPE Армлен ПП ТЭП-12-55А имеют несомненные преимущества в ряду исследованных полимерных материалов по стойкости к гидроабразивному износу, особенно в гидросмесях с крупными частицами пульпы (средневзвешенным диаметром частиц $d_{cp} = 0,491$ мм).

Технические условия на Трубы «МУЛЬТИПАЙП ИС» и инструкция по монтажно-строительным работам представлены в приложениях 1 и 2 соответственно. Перспективность применения двухслойных труб Мультипайп ИС доказана натурными испытаниями на объектах: ОАО «РиМ», ПК Арыстан (акты опытно-промышленных испытаний представлены в приложениях 3 и 4). Отзыв компании ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий», на Гремачинском месторождении которой проложено 13 км шламопровода из трубопроводной системы «МУЛЬТИПАЙП ИС», представлен в приложении 5.

По итогам работы сделаны следующие **выводы**:

1. Впервые проведены комплексные сравнительные исследования стойкости к гидроабразивному износу полиолефинов, термоэластопластов и их смесей. Полученные результаты показали, что близкие по свойствам к резине TPV и TPU характеризуются более высокой стойкостью к гидроабразивному износу. Увеличение содержания эластичного компонента (TPO или TPV, или LLDPE) в смеси полиолефинов и термоэластопластов приводит к повышению стойкости к гидроабразивному износу.

2. Впервые установлена практически линейная зависимость между модулем механических потерь и гидроабразивным износом для полиолефинов, термоэластопластов различного химического строения и их смесей.

3. Впервые экспериментально доказано наличие инкубационного периода процесса разрушения термоэластопластов (TPV) при гидроабразивном воздействии пульпой. Установлено, что удельные потери напора трубы с внутренним слоем из термопластичного вулканизата Армлен ПП ТЭП 12-55А при гидротранспорте хвостовой пульпы в 1,5 раза меньше, чем у трубы из стали марки СтЗсп, а у трубы из HDPE в 2,5 раза меньше, чем у стальной.

4. Сравнительное исследование реологических свойств HDPE трубных марок и TPV позволило установить, что вязкость расплава TPV зависит от скорости сдвига и практически не меняется в температурном диапазоне от плюс 190 до 230 °С, кривые течения исследованных термоэластопластов и трубных марок HDPE имеют схожий характер. Результаты позволили оптимизировать технологический режим производства труб двухслойной конструкции по технологии соэкструзии.

5. В рамках проведенной работы решена важнейшая на сегодняшний день задача импортозамещения. При разработке дизайна и технологии производства труб применяются только отечественные материалы: трубные марки HDPE и Армлен ПП ТЭП 12-55А-901.

6. Разработана технология производства соединительных деталей из отрезков труб методом сварки встык с использованием нагретого инструмента. Отводы изготавливаются в том числе и методом горячей гибки отрезков труб. Втулки под

фланец изготавливаются методом обточкой путем удаления части материала с наружной поверхности отрезка трубы с соответствующим внутренним диаметром и увеличенной толщиной стенки. Фланцевая часть также может быть изготовлена методом намотки на отрезок трубы полиэтиленовой ленты с последующей обточкой до заданных размеров. Перечисленные технологические приемы реализуются в стандартных технологических процессах на предприятиях ООО «Группа «ПОЛИПЛАСТИК».

7. По результатам натурных испытаний на участке перекачки пульпы Жезказганской обогатительной фабрики, входящей в состав холдинга «Казахмыс», и на опытно-промышленном участке золотоизвлекательной фабрики ОАО «Рудник имени Матросова» (ПАО «Полюс»), трубопроводные системы рекомендованы к использованию в качестве альтернативы армированным резиновым и металлическим трубопроводам, в том числе футерованным.

8. Разработаны технические условия ТУ 22.21.21-049-73011750-2022 «Трубы напорные из полиэтилена с повышенной стойкостью к гидроабразивному износу» и инструкция по строительно-монтажным работам ИМ.ГПП.19-19-2. Трубопроводные конструкции сертифицированы на соответствие ТУ (СС № РОСС RU.НВ24.АПТС Н00139/23) и требованиям промышленной безопасности (СС № С-РТЭ.002.Т.У.01194) и серийно производятся на предприятиях ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК» под торговым наименованием МУЛЬТИПАЙП ИС в стандартном исполнении, а также со специальными защитными покрытиями: МУЛЬТИПАЙП ОС ИС в трудногорючем исполнении и МУЛЬТИПАЙП УФ ИС со специальным покрытием, стойким к УФ-излучению для открытой прокладки. В настоящее время трубы надежно эксплуатируются на Гремячинском месторождении проекта «ЕвроХим-ВолгаКалий» и Наталкинском горно-обогатительном комбинате.

Разработанные трубопроводы рекомендуются к использованию при строительстве промышленных гидротранспортных систем для перемещения в виде гидросмесей руд черных и цветных металлов и их хвостов обогащения, золошлаковых материалов ТЭС, калийных солей и других твердых сыпучих

материалов. На сегодняшний день результаты исследований, представленные в работе, внедрены для труб двухслойной и трехслойной (в светостойком и/или трудногорючем исполнении) конструкции диаметрами от 110 до 1200 мм, с толщиной стенки от 7 до 110 мм. Развитие стойких к гидроабразивному износу трубопроводов следует рассматривать в нескольких направлениях:

- разработка гладкостенных многослойных конструкций с меньшей величиной линейного теплового удлинения, повышенной жесткостью для снижения провиса и обеспечения возможности прокладки с сохранением существующего шага опор для металлических трубопроводов;

- разработка трубопроводных систем с использованием современных ПКМ с антистатическими и/или трудногорючими характеристиками для применения в угольных шахтах;

- разработка дизайна и технологии производства труб большого диаметра (более 1200 мм) в многочисленных вариантах дизайна, включая погодостойкие, трудногорючие и антистатические исполнения.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

РБК – Россия, Белоруссия, Казахстан

PE – полиэтилен (ГОСТ 33366.1)

PE 100 – полиэтилен с минимальной длительной прочностью MRS 10,0 МПа, который применяют для изготовления напорных трубопроводных систем (ГОСТ ИСО 12162)

PE-RT – полиэтилен повышенной термостойкости для изготовления напорных трубопроводных систем горячего водоснабжения и отопления (ГОСТ 32415)

PE-X – сшитый полиэтилен (ГОСТ 33366.1)

TPU – термопластичный полиуретан (ISO 18064)

РТИ – резинотехническое изделие

СС – сертификат соответствия

PVC – поливинилхлорид (ГОСТ 33366.1)

HDPE – полиэтилен высокой плотности (ГОСТ 33366.1)

PP – полипропилен (ГОСТ 33366.1)

TPE – термопластичный эластомер/термоэластопласт (ISO 18064)

PUR – полиуретан (ГОСТ 33366.1)

NR – натуральный каучук (ГОСТ ISO 1629)

IR – изопреновый каучук, синтетический (ГОСТ ISO 1629)

BR – бутадиеновый каучук (ГОСТ ISO 1629)

SBR – стирол-бутадиеновый каучук (ГОСТ ISO 1629)

NBR – акрилонитрил-бутадиеновый каучук, известный как нитрильный каучук (ГОСТ ISO 1629)

EPDM – каучук на основе терполимера этилена, пропилена и диена (ГОСТ ISO 1629)

HNBR – гидрированный нитрильный каучук (ГОСТ ISO 1629)

AEM – каучук на основе сополимера этилакрилата (или других акрилатов) с этиленом (ГОСТ ISO 1629)

UHMWPE – сверхвысокомолекулярный полиэтилен (ГОСТ 33366.1)

М.ч. – массовая часть

MPP – перерабатываемые в расплаве каучуки

SBS – блок-сополимер стирол-бутадиен-стирольный (ISO 18064)

EPR – каучук на основе сополимера этилена с пропиленом (ГОСТ ISO 1629)

IIR – изобутен-изопреновый каучук, известный как бутилкаучук (ГОСТ ISO 1629)

TPS – стирольные термоэластопласты (ISO 18064)

TPS-SBS – термоэластопласты на основе блок-сополимера стирол-бутадиен-стирольного (ISO 18064)

TPS-SIS – термоэластопласты на основе блок-сополимера стирол-изопрен-стирольного (ISO 18064)

TPS-SEBS – термоэластопласты на основе блок-сополимера стирол-этилен-бутилен-стирольного (ISO 18064)

TPS-SEPS – термоэластопласты на основе блок-сополимера стирол-этилен-пропилен-стирольного (ISO 18064)

TPC – сополиэфирные термопластичные эластомеры (ISO 18064)

TPA – полиамидные термопластичные эластомеры (ISO 18064)

R-TPO – реакторные полиолефиновые термопластичные эластомеры

TPV – термопластичный вулканизат (ISO 18064)

TPO – полиолефиновые термопластичные эластомеры (ISO 18064)

T_c – температурный диапазон стеклования полимера

T_{пл} – температурный диапазон плавления полимера

G' – динамический модуль упругости

PP-B – полипропилен блок-сополимер (ГОСТ 32415)

LLDPE – полиэтилен линейной структуры низкой плотности (ГОСТ 33366.1)

O₂ – кислород

ПКМ – полимерный композиционный материал

E – модуль упругости при растяжении

PE 63 – полиэтилен с минимальной длительной прочностью MRS 6,3 МПа, который применяют для изготовления напорных трубопроводных систем (ГОСТ ИСО 12162)

G'' – модуль механических потерь

ДМА – динамический механический анализ

ПТР – показатель текучести расплава

ВОИ – время окислительной индукции

DN – номинальный наружный диаметр (условное обозначение размера, соответствующее минимальному среднему наружному диаметру)

ρ – плотность

P – давление в трубопроводной системе

C_m – массовая концентрация

Q – расход гидросмеси

$C_{об}$ – объемная концентрация

$\rho_{см}$ – плотность гидросмеси

Δh – потери напора

i – удельные потери напора (гидравлический уклон)

λ – коэффициент гидравлического сопротивления

R_a – геометрическая шероховатость

Δ – естественная шероховатость

ε – относительная шероховатость

Δ_{ε} – эквивалентная шероховатость

m – масса

I – интенсивность гидроабразивного износа

G – комплексный модуль упругости

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла сдвига фаз

ω – циклическая частота

η – динамическая вязкость

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дэвид А. Уиллоуби. Полимерные трубы и трубопроводы. Справочник / Дэвид А. Уиллоуби, Р. Додж Вудсон, Рик Суверлэнд; пер. с англ. под ред. В.В. Ковриги. – СПб: ЦОП «Профессия», 2010. - 488 с.
2. Полиэтиленовые трубопроводы – это просто: справочное пособие / ред. В.Е. Удовенко, В.С. Тхай, Ю.В. Коршунов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Полимергаз, 2012. – 416 с.
3. Внученков, Д.С. Локдауну вопреки. Рынок-2022: Рост на фоне кризиса / Д.С. Внученков, М.А. Усачев // Полимерные трубы. – 2023. – № 1 (79). – С. 36-41.
4. Гавриленко, В.А. Пластпереработка: состояние и перспективы / В.А. Гавриленко // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2020. – № 3 (99). – С. 24-28.
5. Сравнительное исследование полимерных материалов для труб специального назначения / А.И. Ермилова, В.В. Битт, Е.В. Калугина, П.В. Осипов // Пластические массы. – 2017 – №11-12. – С. 48-50.
6. Модификация полифениленсульфида с помощью добавок / В.В. Битт, А.Н. Иванов, Е.В. Калугина и др. // Конструкции из композиционных материалов. – 2016. – №3. – С. 51-57.
7. PE-RT, a new class of polyethylene for hot water pipes / J. Damen, D. Schramm, W. Quack, K. Sehanobish, P.M. Cham // Plastic Pipes XI: Conference proceedings. – London: IOM Communications, 2001. – P. 775-785.
8. Тараканов, А.И. Промысловые трубопроводы из полиэтиленовых армированных синтетическими нитями труб / А.И. Тараканов // Полимерные трубы. – 2015. – № 4 (50). – С. 47-48.
9. Иванова, Е.Ю. Определение усилия протяжки при ремонте стальных трубопроводов путем установки гибких труб / Е.Ю. Иванова, С.В. Якубовская // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2019. – № 4. – С. 14-17.

10. Низьев, С.Г. О противокоррозионной защите магистральных и промышленных трубопроводов современными полимерными покрытиями / С.Г. Низьев // Территория Нефтегаз. – 2009. – № 10. – С. 34-43.
11. Мустафин Ф.М. Обзор методов защиты трубопроводов от коррозии изоляционными покрытиями / Ф.М. Мустафин // Нефтегазовое дело. – 2003 – № 1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Mustafin/Mustafin_3.pdf.
12. S.D. Probert. Materials for internally lining pipes / S.D. Probert, C.Y. Chu // Applied Energy. – 1980. – № 6. – P. 385-393.
13. Стовманенко, А.Ю. Перспективы применения трубопроводов из полимерных материалов при транспортировании литых закладочных смесей / А.Ю. Стовманенко, А.Н. Анушенков // Известия Уральского государственного горного университета. – 2016. – № 4 (44). – С. 68-71.
14. Кириченко, Ю.В. Особенности эксплуатации полиэтиленовых труб при гидротранспорте илистого осадка / Ю.В. Кириченко, Ю.П. Горбатов, М.В. Прохоренко // Горный информационно-аналитический бюллетень. Тематическое приложение “Гидромеханизация”. – М: МГГУ, 2006. – С. 257-262.
15. Путилова, И.В. Рекомендации по снижению абразивного износа гидротранспортных трубопроводных систем золошлакоудаления ТЭС / И.В. Путилова // Альтернативная энергетика и экология. – 2020. – № 31-33 (353-355). – С. 81-92.
16. Гуммированные детали машин / Н.С. Пенкин, В.Г. Копченков, В.М. Сербин, А.Н. Пенкин; ред. Н.С. Пенкина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2013. – 245 с.
17. Снижение энергоемкости гидротранспортных хвостов обогатительного производства железнорудных горно-обогатительных комбинатов / И.Т. Мельников, И.А. Пыталев, С.Н. Корнилов и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2012. – № 2. – С. 15-19.

18. V I Alexandrov. Efficiency of Using Polyurethane-lined Pipes in Hydrotransport Systems of Slurry Tailings / V I Alexandrov, M A Vasilyeva, P A Vasilyeva // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1118. – Pap. № 012002.
19. Александров, В.И. Удельная энергоёмкость гидравлического транспортирования продуктов переработки минерального сырья / В.И. Александров, Иржи Собега // Записки горного института. – 2015. – Т.213. – С. 9-16.
20. Victor L. Aleksandrov. Hydraulic transportation of tailings os iron ore processing at Kachkanarsky GOK based on results of laboratory and pilot tests of hydrotransport system/ Victor L. Aleksandrov, Mariya A. Vasilyeva // Journal of Mining Institute. – 2018. – V. 233. – P. 471-479.
21. Metso Slurry Handling Solutions. Slurry Hose Systems. Design Manual – Edition 1. [сайт]. – URL: https://www.metso.com/globalassets/industry-pages/mining-industry-pages/slurry-handling/downloads/slurry-hose-systems/manuals/2630-09-13_en_hi.pdf (дата обращения: 17.12.2021). – Текст. Изображение: электронные.
22. Maurice Morton. Rubber technology / Maurice Morton (ed.). – 3rd edition. – New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1987. – 608 p.
23. Вопросы больше, чем ответов... Итоги конференции «Полиуретаны 2022» // Евразийский химический рынок. – 2022. – № 4 (211). – С. 27-28.
24. Антоев, К.П. Исследование стойкости к гидроабразивному воздействию перспективных полимерных футеровочных материалов / К.П. Антоев, С.Н. Попов, Б.Н. Заровняев // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2019. – № 1. – С. 185-191.
25. Перспективы применения полимерных материалов в гидромеханизации / Е.А. Чижов, А.Е. Чижов, С.Г. Новиков, Ю.А. Толкачев // Горный аналитический информационный бюллетень. – 2009. – № S1. – С. 367-383.
26. Российский рынок полиуретанов: вызовы и точки роста [сайт]. – URL: [https:// www.plastinfo.ru/information/articles/779/](https://www.plastinfo.ru/information/articles/779/) (дата обращения: 30.11.2023). – Текст. Изображение: электронные.

27. Weir: Шланги, трубы и катушки [сайт]. – URL: <https://www.global.weir/product-catalogue/hoses-pipes-and-spools> (дата обращения: 27.10.2021). – Текст. Изображение: электронные.
28. Еврогамма: производство полиуретановых изделий для промышленности [сайт]. – URL: <https://eurogamma.ru/> (дата обращения: 23.11.2021). – Текст. Изображение: электронные.
29. Володин, В.П. Экструзия пластмассовых труб и профилей / В.П. Володин. – Санкт-Петербург: Профессия, 2010. – 256 с.
30. Thermoplastic elastomers / Geoffrey Holden, Hans R. Kricheldorf, Roderic P. Quirk (eds.). – 3rd Edition. – Munich: Carl Hanser Verlag, 2004. – 540 p.
31. Ram Narayanaswamy. The Process of Materials Selection for Pipeline Systems Optimization for Life Cycles / Ram Narayanaswamy // Proceedings of ASME IOGPC2017. – New York, N.Y: American Society of Mechanical Engineers, 2017. – Pap. № IOGPC2017-2404.
32. An overview of burst, buckling, durability and corrosion analysis of lightweight FRP composite pipes and their applicability / M. Manoj Prabhakar, N. Rajini, Nadir Ayrilmis et al. // Composite Structures. – 2019. – V. 230. – Pap. № 111419.
33. David J. Chapman. Custom Fiberglass Reinforced Plastic Piping (FRP) Applications in Mineral Processing / David J. Chapman, Anthony M. Zacharewych // Extraction 2018: Proceedings of the First Global Conference on Extractive Metallurgy. – Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. – P. 1233-1244.
34. Восстановление трубопроводов гибким полимерным рукавом / А.Г. Гумеров, С.Г. Бажайкин, А.Г. Сираев и др. // Нефтепромысловое дело. – 2011. – № 2. – С. 49-52.
35. Clive Maier. Polypropylene: The Definitive User's Guide and Databook / Clive Maier, Theresa Calafut. - Norwich, NY: Plastics Design Library a division of William Andrew inc, 1998. – 432 p.
36. Devesh Tripathi. Practical Guide to Polypropylene / Devesh Tripathi. – Shawbury, U.K.: Rapra Technology Ltd., 2002. – 104 p.

37. Wanvimon Arayapranee. Rubber Abrasion Resistance / Wanvimon Arayapranee // Abrasion Resistance of Materials / Marcin Adamiak (ed.). – Rijeka: IntechOpen, 2012. – P. 147-166.
38. Огрель, Л.Д. Российский рынок полимеров и изделий из них / Л.Д. Огрель // Полимерные материалы. – 2020. – № 3. – С. 4-12.
39. Износостойкие трубопроводы с алюмотермическим покрытием на основе корунда / А.М. Белошицкий, Е.Н. Ильин, Ф.Л. Мантуров, А.С. Прокопьев // Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование: Материалы V международной конференции. – Москва, 2014. – С. 103-106.
40. Шлейман, Е.Л. Абразивный износ. Обзор американской печати. Абразивная стойкость материалов / Е.Л. Шлейман // Трение и износ. – 2006. – Том 27. – № 1. – С. 110-122.
41. Веселовский, Д.Р. Исследование гидроабразивного износа ремонтных полимерных композиций / Д.Р. Веселовский, Н.В. Савицкий, Р.А. Веселовский // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения: сб. научн. тр. – Днепропетровск, 2008. – № 47. – С. 165-168
42. Patent US8497005B1 of 2013-07-30, Int.Cl. B32B 1/08, B32B 15/085, B32B 15/18, B32B 15/20, B67D 99/00, F16L 9/14, F17D 1/00. Highly abrasion-resistant grafted polyolefin pipe / Richard Allen Hayes (US), Qin Lin (CA). – Appl. №: 13/534,058; Filed: 2012-06-27.
43. Amir Samimi. Application Polyurethane as Coating in Oil and Gas Pipelines / Amir Samimi, Soroush Zarinabadi // International Journal of Science and Engineering Investigations. – 2012. – V.1 (8). – P. 43-45.
44. Hossein Ashrafizadeh. Erosive and Abrasive Wear Resistance of Polyurethane Liners / Hossein Ashrafizadeh, Andre McDonald, Pierre Mertiny // Aspects of Polyurethanes / Faris Yilmaz (ed.). – Rijeka: IntechOpen, 2017. – P. 131-154.

45. Технология и оборудование для трассового нанесения полиуретановых мастик / Э.И. Велиюлин, С.В. Разгуляев, И.И. Велиюлин и др. // Территория нефтегаз. – 2011. - № 12. – С. 34-35.
46. Anne-Maria M. Baker. Thermoplastics / Anne-Maria M. Baker, Joey Mead // Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites / Charles A. Harper. – 4th Edition. – New York: McGraw Hill Professional, 2002. – P. 1-108.
47. Xian Jia. Two-body free-abrasive wear of polyethylene, nylon1010, epoxy and polyurethane coatings / Xian Jia, Ruofei Ling // Tribology International. – 2007. – № 40. – P. 1276-1283.
48. Yongsong Xie. Elastomers and plastics for resisting erosion attack of abrasive/erosive slurries / Yongsong Xie, Jiaren (Jimmy) Jiang, Md. Aminul Islam // Wear. – 2019. -V 426-427. – P. 621-619
49. S.W. Zhang. Investigation of abrasive erosion of polymers / S.W. Zhang, Wang Deguo, Yin Weihua // Journal of materials science. – 1995/ - № 30. – P. 4561-4566.
50. Abrasive wear of selected plastics in solvent/corundum suspensions / Konstantin Siegmann, Andreas Mosch, Alessandro Carlesso, Martin Winkler // Wear. – 2015. – V 324-325. – P. 118-121.
51. Wear resistance of materials used for slurry transport / Yongsong Xie, Jiare (Jimmy) Jiang, Kidus Yoseph Tufa, Sing Yick // Wear. – 2015. – V 332-333. – P. 1104-1110
52. Основы технологии переработки пластмасс: Учебник для вузов / С.В. Власов, Л.Б. Кандырин, В.Н. Кулезнев и др.; ред. В.Н. Кулезнева, В.К. Гусева. – М.: Мир, 2006. – 600 с.
53. Патент RU2563045C2, МПК F16L 9/147. Металлическая труба, имеющая эластомерное покрытие, соединительное устройство и система для транспортировки материала на минералоперерабатывающих заводах / Реннердаг Олоф (SE). - № 2013126381/06; заявл. 30.11.2010; опубл. 20.09.2015.
54. Patent US4376667A of 1983-03-15, Int.Cl. B05D 3/02, B05D 7/02, B29C 25/00, B32B 31/26. Method of increasing the wear resistance of an elastomeric body / Otto Beckmann (AT). - Appl. №: 926,222; Filed: 1978-07-19

55. Patent EP0192922B1, Int. Cl. F16L 11/08. Hose for conveying hot fluids e.g. hot bitumen, tar or asphalt / Albert Donauer. – Priority date: 1985-02-25.
56. Handbook of elastomers / Anil. K. Bhowmick (ed.). – 2nd Edition, revised and expanded. – New-York, NY: Marcel Dekker, Inc, 2001. – 922 p.
57. Philip A. Schweitzer. Corrosion of polymers and elastomers / Philip A. Schweitzer. – 2nd Edition. – Boca Raton: CRC Press, 2006 – 575 p.
58. Semperit – Industrial hoses [сайт]. – URL: <https://www.semperflex.com/en/industrial-hoses> (дата обращения: 17.12.2021). – Текст. Изображение: электронные.
59. Галибеев, С.С. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Тенденции и перспективы / С.С. Галибеев, Р.З. Хайруллин, В.П. Архиреев // Вестник Казанского технологического университета. – 2008. - № 2. – С. 50-55.
60. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности / И.Н. Андреева, Е.В. Веселовская, Е.И. Наливайко и др. – Л.: Химия, 1982. – 80 с.
61. Барцыхин, Е.А. Технология пластических масс: Учебное пособие для техникумов / Е.А. Барцыхин, Э.С. Шульгина. – Л.: Химия, 1982. – 328 с.
62. Патент SU1031746A1, МПК В29F 5/02. Способ изготовления полимерных изделий фигурного профиля / Варламов Б.Г., Дуничев Ю.Ф., Пугачев А.К. (СССР). – № 336602; заявл. 06.10.1981; опубл. 30.07.1983.
63. Кулезнев, В.Н. Химия и физика полимеров: Учебное пособие / В.Н. Кулезнев, В.А. Шершнева. – 3-е изд., испр. – Санкт-Петербург: Лань, 2014. – 386 с.
64. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (износ и безызносность): Учебник / Д.Н. Гаркунов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МСХА, 2001. – 616 с.
65. Истирание резин / Г.И. Бродский, В.Ф. Евстратов, Н.Л. Сахновский, Л.Д. Слюдинов. – М.: Химия, 1975. – 240 с.
66. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: ФИЗИАТЛИТ, 2007. – 368 с.

67. Гуль, В.Е. Структура и механические свойства полимеров: Учеб. Пособие для студентов хим. –технол. специальностей вузов / В.Е. Гуль, В.Н. Кулезнев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. Школа, 1979. – 352 с.
68. Бартнев, Г.М. Трение и износ полимеров / Г.М. Бартнев, В.В. Лаврентьев; ред. С.Л. Томарченко. – Л.: Химия, 1972. – 240 с.
69. A. Schallamach. Friction and abrasion of rubber / A. Schallamach // *Wear*. – 1957/58. – V. 1. – P. 384-417.
70. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
71. Ратнер, С.Б. О фрикционном износе (истирании) резины / С.Б. Ратнер, Г.С. Клитеник, М.В. Мельникова // Сухое и граничное трение. Фрикционные материалы: Труды третьей всесоюзной конференции по трению и износу в машинах / под ред. И.В. Крагельского. – Москва, 1960. – 2-т. – С. 93-101.
72. P.H. Shipway. Microscale abrasive wear of polymeric materials / P.H. Shipway, N.K. Ngao // *Wear*. – 2003. – V. 255. – P. 742-750.
73. J.K. Lancaster. Abrasive wear of polymers / J.K. Lancaster // *Wear*. – 1969. – V. 14. – P. 223-239.
74. Hardness and wear resistance of certain polyolefins with additions of molybdenum disulphide / V.P. Gordienko, V.G. Sal'nicov, R.V. Podlesnyi, A.V. Kasperrskii // *International Polymer Science and Technology*. – 2011. – V. 38 (1). – P. 21-23.
75. S.B. Ratner. Characteristics of impact friction and wear of polymeric materials / S.B. Ratner, E.E. Styller // *Wear*. – 1981. – V. 73. – P. 213-234.
76. N-M. Barkoula. Review. Processes and influencing parameters of solid particle erosion of polymers and their composites / N-M. Barkoula, J. Karger-Kocsis // *Journal of materials science*. – 2002. – № 37. – P. 3807-3820.
77. Гордиенко, В.П. Механохимическое влияние на структуру и износостойкость термопластичных систем: полиэтилен-карбиды / В.П. Гордиенко, Г.Н. Ковалева // *Пластические массы*. – 2017. – № 1 – 2. – С. 40-43.
78. J. C. Arnold. The mechanisms of erosion of unfilled elastomers by solid particle impact / J.C. Arnold, I.M. Hutchings // *Wear*. – 1990. – V. 138 (1-2). – P. 33-46

79. Чайкун, А.М. Резиновые уплотнительные материалы / А.М. Чайкун, И.С. Наумов, Е.В. Алифанов // Труды ВИАМ. – 2017. - № 49 (1). – С. 99-106.
80. E Harea. Study of friction and wear of thermoplastic vulcanizates: correlation with abraded surfaces topology / E Harea, R Stoczek, M Machovsky // Journal of Physics: Conf. Series. – 2017. – V. 843. – Pap. № 012070.
81. J. John Rajesh. Abrasive wear performance of various polyamides / J. John Rajesh, J. Bijwe, U.S. Tewari // Wear. – 2002. – V. 252. – P. 769-776
82. A.P. Harsha. An investigation on low stress abrasive wear characteristics of high performance engineering thermoplastics polymers / A.P. Harsha // Wear. – 2011. – V. 271. – P. 942-951.
83. Kenneth G. Budinski. Resistance to particle abrasion of selected plastics / Kenneth G. Budinski // Wear. – 1997. – V. 203-204. – P. 302-309.
84. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
85. K. Friedrich. On the wear of reinforced thermoplastics by different abrasive papers / K. Friedrich, M. Cyffka // Wear. – 1985. – V. 103. – P. 333-344.
86. A.P. Harsha. Two-body and three-body abrasive wear behaviour of polyaryletherketone composites / A.P. Harsha, U.S. Tewari // Polymer Testing. – 2003. – V. 22 (4). – P. 403-418.
87. Klaus Frisdrich. Erosive wear of polymers surfaces by steel ball blasting / Klaus Frisdrich // Journal of Materials Science. – 1986. – V. 21 (9). – P. 3317-3332.
88. B.F. Yousif. Wear characteristics of thermoset composite under high stress three-body abrasive / B.F. Yousif, N.S.M. El-Tayeb // Tribology International. – 2010. – V. 43 (12). – P. 2365-2371.
89. J.P. Giltrow. A relationship between abrasive wear and the cohesive energy of materials / J.P. Giltrow // Wear. – 1970. – V. 15. – P. 71-78.
90. Horst Czichos. Influence adhesive and abrasive mechanisms on the tribological of thermoplastic polymers / Horst Czichos // Wear. – 1983. – V. 83. – P. 27-43.
91. E. Hornbogen. The role of fracture toughness in the wear of metals / E. Hornbogen // Wear. – 1975. – V. – 33. – P. 251-259.

92. N. Viswanath. Development of an equation for the wear of polymers / N. Viswanath, D.G. Bellow // *Wear*. – 1994. – V. – 181-183. – P. 42-49.
93. Improvement of scratch and wear resistance of polymers by fillers including nanofillers / Witold Brostow, Haley E. Hagg Lobland, Nathalie Hnatchuk, Jose M. Perez // *Nanomaterials*. – 2017. - V. 7 (3). – Pap. № 66.
94. J.K. Lancaster. Relationships between the Wear of Polymers and their Mechanical Properties / J.K. Lancaster // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings*. – 1968. – 183 (16). – P. 98-106.
95. H. Ashrafizadeh. Evaluation of the effect of temperature on mechanical properties and wear resistance of polyurethane elastomers / H. Ashrafizadeh, P. Mertiny, A. McDonald // *Wear*. – 2016. – V. 368-369. – P. 26-38.
96. Зуев, Ю.С. Разрушение эластомеров в условиях, характерных для эксплуатации / Ю.С. Зуев. – М.: Химия, 1980. – 288 с.
97. Пенкин, Н.С. Повышение надежности и долговечности горнообогатительного оборудования методом гуммирования / Н.С. Пенкин, В.М. Сербин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2017. - № 9. – С. 71-78.
98. Практикум по высокомолекулярным соединениям / ред. В.А. Кабанова. – М.: Химия, 1985. – 224 с.
99. Тагер, А.А. Физико-химия полимеров / А.А. Тагер; ред. А.А. Аскадского. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Научный мир, 2007. – 576 с.
100. Резниковский, М.М. Механические испытания каучука и резины / М.М. Резниковский, А.И. Лукомская; ред. Ю.С. Зуева. – М.: Химия, 1964. – 528 с.
101. Заскалько, П.П. Теоретические основы трения и износа / П.П. Заскалько, В.Л. Лашхи, В.В. Сеницын // *Теоретические основы химмотологии* / ред. А.А. Братков. – М.: Химия, 1985. – С. 222-278.
102. Ларионов, В.П. Хладостойкость и износ деталей машин и сварных соединений / В.П. Ларионов, В.А. Ковальчук; ред. Н.В. Черского. – Новосибирск: Наука, 1976. – 207 с.

103. Мур Десмонд Ф. Трение и смазка эластомеров / Мур Десмонд Ф.; пер. с англ. Г.И. Бродского. – М.: Химия, 1977. – 264 с.
104. Торская, Е.В. Моделирование усталостного изнашивания тел с покрытиями при фрикционном нагружении / Е.В. Торская // Физическая мезомеханика. – 2016. – Т. 19. – № 1. – С. 68-74.
105. Энциклопедия неорганических материалов: в 2-х т. / ред. И.М. Федорченко. – Киев: Высш. школа, 1977. – 822 с. – 2 т.
106. H. Sin. Abrasive wear mechanisms and the grit size effect / H. Sin, N. Saka, N.P. Suh // *Wear*. – 1979. – V. 55. – P. 163-190.
107. Кащеев, В.Н. Износ при наличии абразива / В.Н. Кащеев, Г.Я. Ямпольский // Трение, изнашивание и смазка: Справочник: в 2-х т. / ред. И.В. Крагельский, В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978. – 2 т. – С. 323-337.
108. E. Howard Coker. The erosion of horizontal sand slurry pipelines resulting from inter-particle collision / E. Howard Coker, Dan Van Peurseem // *Wear*. – 2018. – V. 400 – 401. – P. 74-81.
109. Z.G. Liu. A numerical study on the effect of particle shape on the erosion of ductile materials / Z.G. Liu, S. Wan, V.B. Nguyen, Y.W. Zhang // *Wear*. – 2014. – V. 313 (1-2). – P.135-142.
110. Yu. S. Zuev. Effect of temperature and concentration of aggressive media on rubber rear in an abrasive flow / Yu. S. Zuev, A.D. Chelmodeev // *Mekhanika Polimerov*. – 1968. – V. 4. – № 1. – P. 95-101.
111. Kalle Koskela. Slurry erosion resistance of polyethylene under conditions relevant for mineral processing / Kalle Koskela, Mari Lindgren, Rodrigo Serna-Guerrero // *Wear*. – 2017. – V. 392-393. – P. 1-7.
112. Ian M Hutchings. Ductile-brittle transitions and wear maps for the erosion and abrasion of brittle materials / Ian M Hutchings // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1992. – V. 25. – № 1A. – P. A212-A221.
113. Sunny Zafar. Abrasive and erosive wear behavior of nanometric WC – 12Co microwave clads / Sunny Zafar, Apurbba Kumar Sharma // *Wear*. – 2016. – V. 346 -347. – P. 29-45.

114. Копченков, В.Г. Трение и изнашивание эластомеров в условиях контактно-динамического нагружения: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04 / Копченков Вячеслав Григорьевич. – Ставрополь, 2004 – 424 с.
115. Копченков, В.Г. Виды и механизмы изнашивания резин в условиях контактно-динамического нагружения / В.Г. Копченков // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. – № 6. – С. 24-28.
116. Термопласты / под ред. В.В. Моисеева. – М.: Химия, 1985. – 184 с.
117. Handbook of thermoplastic elastomers / Jiri George Drobny (ed.). – 2nd Edition. – Oxford, U.K.: William Andrew, 2014. – 464 p.
118. Declan Whelan. Thermoplastic elastomers / Declan Whelan // Brydson's plastics materials / Marianne Gilbert (ed.). – 8th Edition. – Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2016. – P. 653-703
119. Zhiyang Zhao. Melt synthesis of sulfonated EPDM ionomers in batch and continuous processes / Zhiyang Zhao, Linkun Zhang, R. A. Weiss // Polymer engineering and science. – 2020. – V.60 (12). – P. 3216-3230.
120. Nanostructured ionomeric elastomers / Debdipta Basu, Amit Das, Klaus Werner Stockelhuber, Sven Wiebner// Applied polymer science. – 2016. – V. 275. – P. 235-266.
121. Prince Antony. Ionic thermoplastic elastomers: a review / Prince Antony, Sadhan Kumar De // Journal of Macromolecular Science. – 2001. – V. 41 (1-2). – P. 41-77.
122. Raymond B. Seymour. Elastomers: III. Thermoplastic Elastomers / Raymond B. Seymour, George B. Kauffman // Journal of chemical education. – 1992. – V. 69 (12). – P. 967-970.
123. Triblock polyester thermoplastic elastomers with semi-aromatic polymer end blocks by ring-opening copolymerization / Georgina L. Gregory, Gregory S. Sulley, Leticia Pena et al. // Chemical science. – 2020. – № 11 – P. 6567-6581.
124. Вольфсон, С.И. Получение и свойства динамически вулканизованных термопластичных материалов: учебное пособие / С.И. Вольфсон, Н.А. Охотина, А.И. Нигматуллина. – Казань: Изд-во Казан. нац. исслед. технол. ун-та, 2012. – 82 с.

125. Asit Baran Bhattacharya. Automotive applications of thermoplastic vulcanizates / Asit Baran Bhattacharya, Tuhin Chatterjee, Kinsuk Naskar // Applied polymer science. – 2020. – V. 137 (27). – Pap. № 49181.
126. Анализ размера и доли рынка термопластичных эластомеров – тенденции роста и прогнозы (2023-2028 гг.) [сайт]. – URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/thermoplastic-elastomers-tpe-market> (дата обращения: 14.11.2023). – Текст. Изображение: электронные.
127. Shib Shankar Banerjee. High-temperature thermoplastic elastomers from rubber-plastic blends: a state-of-the-art review / Shib Shankar Banerjee, Anil K. Bhowmick // Rubber chemistry and technology. – 2017. – V. 90 (1). – P. 1-36.
128. Aizeti Burgoa. Toward superior applications of thermoplastic elastomer blends: double Tg increase and improved ductility / Aizeti Burgoa, Ricardo Hernandez, Jose L Vilas // Polymer international. – 2019. – V. 68 (6). – P. 1130-1139.
129. Geoffrey Holden. Thermoplastic elastomers / Geoffrey Holden // Applied plastics engineering handbook / Myer Kutz (ed.). – 1st Edition. – Waltham, U.S.A.: William Andrew, 2011. – P. 77-91
130. Ali Fazli. Waste Rubber Recycling: A review on the evolution and properties of thermoplastic elastomers / Ali Fazl, Denis Rodrigue // Materials. – 2020. – V. 13 (3). – Pap. № 782.
131. Kinsuk Naskar. Thermoplastic elastomers based on PP/EPDM blends by dynamic vulcanization / Kinsuk Naskar // Rubber chemistry and technology. – 2007. – V. 80 (3). – P. 504-519.
132. Recent advances in thermoplastic elastomers from living polymerizations: Macromolecular architectures and supramolecular chemistry / Weiyu Wang, Wei Lu, Andrew Goodwin et al. // Progress in Polymer Science. – 2019. – V. 95. – P. 1-31.
133. Реология полиэтиленов и экструзия труб / И.В. Волков, В.В. Битт, Е.В. Калугина и др. // Полимерные трубы. – 2014. – № 4 (46). – С. 46-50.
134. Смолдырев, А.Е. Трубопроводный транспорт / А.Е. Смолдырев. – изд. 3, перераб. и доп. – М.: Недра, 1980. - 293 с.

135. Долганов, А.В. Гидроабразивный износ насосов рудничного водоотлива: научная монография / А.В. Долганов, С.А. Тимухин. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2016. – 180 с.
136. Долганов, А.В. Влияние гидроабразивного износа элементов проточной части на эксплуатационные качества центробежных насосов медно-колчеданных рудников / А.В. Долганов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №8. – С. 181-186.
137. 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.
138. Некоторые вопросы износа, расчета и конструирования углесосно-насосного оборудования / А. И. Борохович, П. И. Юрин, А. И. Никулин, В.А. Татьков; под общ. ред. П.И. Юрина. – Новокузнецк, 1968. – 145 с.
139. Тимербулатов, М.Г. Роторная установка для испытания металлов на гидроабразивный износ / М.Г. Тимербулатов // Заводская лаборатория. – 1964. – Т. XXX. - №1. – С.95.
140. Кащеев, В.Н. Абразивное зерно и абразивное разрушение поверхности твердого тела: дис. ...канд. физ.-мат. наук: 01.00.00 / Кащеев Виталий Николаевич. – Томск, 1953 – 261 с.
141. Козырев, С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации / С.П. Козырев. – М: Машиностроение, 1964. – 139 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Технические условия на трубы напорные из полиэтилена
с повышенной стойкостью к гидроабразивному износу**

**Общество с ограниченной ответственностью «Группа ПОЛИПЛАСТИК»
ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК»**

ОКПД2 22.21.21.129

ОКС 23.040.20

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК»

 М.И. Гориловский
2022


**ТРУБЫ НАПОРНЫЕ ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНА
С ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТЬЮ К ГИДРОАБРАЗИВНОМУ ИЗНОСУ**

Технические условия

ТУ 22.21.21-049-73011750-2022
(Взамен ТУ 22.21.21-049-73011750-2017)

Дата введения в действие — 2022 – 11 – 22

СОГЛАСОВАНО

Директор Департамента стратегического
развития ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК»

 И.В. Кривошеин
2022
Директор Научно-исследовательского института
ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК»

 С.В. Шаляпин
2022
Директор Департамента промышленных проектов
ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК»

 М.В. Колесов
2022

РАЗРАБОТАНО

Заместитель директора – начальник
Управления применения материалов НИИ
ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК»

 А.Н. Крючков
2022
Генеральный директор
ООО «Климовский трубный завод»

 В.А. Метёлкин
2022
Заместитель директора – начальник
Управления сертификации и стандартизации
НИИ ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК»

 Л.И. Солдатенко
2022

г. Москва
2022

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Инструкция по строительно-монтажным работам
ИМ.ГПП.19-19-2 труб МУЛЬТИПАЙ ИС**



ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Акт промышленных испытаний полимерного трубопровода МУЛЬТИПАЙП ИС на опытно-промышленном участке ОАО «РИМ»



АКТ промышленных испытаний полимерного трубопровода МУЛЬТИПАЙП ИС

п. Омчак

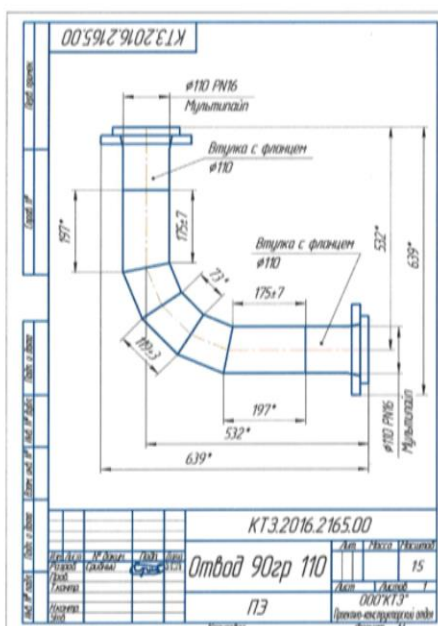
«21» апреля 2017г.

Комиссия, в составе:

1. Боровкова С.А. – начальника ОПУ
(Ф.И.О., должность)
2. Башук А.С. – главного технолога ЗИФ
(Ф.И.О., должность)
3. Харахулах Д.С. – главного технолога ОПУ
(Ф.И.О., должность)
4. Голик А.В. – механика ЗИФ ДПП
(Ф.И.О., должность)
5. Гаврилова Ю.С. – механика ОПУ
(Ф.И.О., должность)

составила настоящий Акт о нижеследующем:

С целью определения стойкости трубопровода к гидроабразивному износу при транспортировке пульпы (максимальный размер частиц – 2 мм, плотность пульпы 60%, объем подаваемой пульпы 45-55м³), на ОПУ ОАО «РиМ» проведены испытания образца полимерного трубопровода (отвод 90 гр.) МУЛЬТИПАЙП ИС Ø110мм:





1. Методика проведения испытаний:

- 1) Испытуемый образец устанавливается на линию трубопровода по транспортировке пульпы на ОПУ ОАО «РиМ»;
- 2) После проведения испытаний образец демонтируется (Фото 1):

Фото 1. Испытуемый образец после проведения испытаний.



- 3) Испытуемый образец разрезается с помощью трубореза в местах средней части сварных сегментов на 6 образцов для измерений толщины стенок (Фото 2):

Фото 2



- 4) Производятся замеры толщины стенки трубопровода по 4-м точкам в местах разреза (Рис.1, Фото 4):

Рисунок 1



Фото 4



- 5) Проводится сравнение результатов измерений с толщиной стенки эталонного образца трубопровода МУЛЬТИПАЙП ИС Ø110мм (фото 5):



Фото 5



2. Условия проведения промышленных испытаний:

1) Режимы эксплуатации:

- Транспортируемая среда – пульпа;
- Концентрация твердого – 40-60%;
- Размер фракции твердого - 0÷2 мм;
- Рабочее давление трубопровода– 6-8 кг/см²;
- Расход – 45-55 м³;
- Скорость потока – 2-4 м/с;
- Температура транспортируемой среды +10°C;

- 2) Срок проведения испытаний – с 15.12.2016г. по и 17.03.2017.- 2208 часов непрерывной эксплуатации.

3. Методика измерений – Штангенциркуль цифровой Würth 0-150 mm digital caliper (DIN 862);

4. Результаты измерений:

№№ образцов	Толщина стенки трубы, мм				среднее значение толщины стенки трубы, мм	степень истирания стенки трубы, %
	Расположение точек измерения на трубе					
	а	б	в	г		
Эталон	9,44	9,28	9,38	9,4	9,38	
Образец №1	9,49	9,45	9,09	8,9	9,23	1,52%
Образец №2	9,15	9,2	9,16	9,29	9,20	1,87%
Образец №3	9,23	9,04	9,08	9,17	9,13	2,61%
Образец №4	9,01	9,14	9,19	8,94	9,07	3,25%
Образец №5	9,23	9,33	9,3	9,11	9,24	1,41%
Образец №6	9,32	9,09	8,99	9,3	9,18	2,13%



На основании вышеприведенных данных:

- средний износ (истирание) толщины стенки испытуемого образца составил **0,2 мм**;
- средняя степень истирания стенки трубы составила **2,13%**

Продукция соответствует техническим требованиям и пригодна к применению на линиях гидротранспорта с высоким содержанием механических примесей – шлам, пульпа и т.п. в качестве альтернативы металлическим, металлическим футерованным и резиново-армированным трубопроводам.

Настоящий Акт составлен в 2-х экземплярах.

Члены комиссии:





Начальник ОПУ

Главный технолог ЗИФ

Главный технолог ОПУ

Механик ЗИФ ДПП

Механик ОПУ

	Боровков С.А.
	Башук А.С.
	Харахулах Д.С.
	Голик А.В.
	Гаврилов Ю.С.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Акты осмотра тестовых образцов трубопровода на
Жезказганской обогатительной фабрике**

**Акт осмотра
тестовых образцов трубопровода
ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК»**

от 08.07.2016г

Мы, нижеподписавшиеся,
Начальник ГК-2 Наливайко И.Ю.
И.о.ст.механика ГК-2 Высочин А.И.
М/механик ГК-2 Жукенов Д.С.

Составили настоящий акт о том, что 20 января 2016г ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК» установила тестовые образцы трубопровода для проведения промышленных испытаний на Жезказганской обогатительной фабрике в Главном корпусе №2 на трубопровод перекачки пульпы (песковый центробежный насос 8гр №37, секция №11).

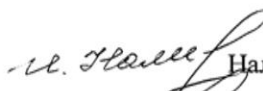
Рабочие условия эксплуатации:

- Транспортируемая среда - пульпа (Cu, Zn, S, Pb, SiO₂);
- Концентрация твердого вещества – 44-46%;
- Величина фракций твердого вещества – 0,71-25 мм.
- Расход – 400 м³/ч;
- Скорость потока – 3-5 м/с
- Рабочее давление пульпопровода – 6-8 Бар;
- Рабочая температура транспортируемой пульпы – от +10 °С до +20 °С
- Температура окружающей среды – от +5 °С до +40 °С

За время испытаний (после 6 месяцев непрерывной работы) абразивного износа (истирания) внутренней стенки трубы и отвода на испытуемых образцах не обнаружено.

Образцы:

1. Отвод МУЛЬТИПАЙП ИС Ø 315мм SDR11, L=1300 7-ми секционный офланцованный;
 2. Труба МУЛЬТИПАЙП ИС Ø315мм SDR11, L=1500 офланцованная.
- пригодны для использования в Главном корпусе №2 ЖОФ №1,2,3

Начальник ГК-2:  Наливайко И.Ю.

И.о.ст.механика ГК-2:  Высочин А.И.

М/механик ГК-2:  Жукенов Д.С.

**Акт осмотра
трубопровода н.п.№37**

от 20.09.2017г

Мы, нижеподписавшиеся,

Гл. механик ЖОФ№1,2,3 Жиенбаев А.А.

Ст.механик ГК-2 Мусулманбеков Н.Т.

М/механик ГК-2 Жукенов Д.С.

Составили настоящий акт о том, что на насос песковый №37 в январе 2016г была установлена полимерная труба ПК «Арыстан»

20 сентября 2017г (по истечении 21 месяца работы) в результате осмотра, было выявлено, что износ полимерной трубы составляет - 45%

Гл. механик ЖОФ№1,2,3:  Жиенбаев А.А.

Ст.механик ГК-2:  - Мусулманбеков Н.Т.

М/механик ГК-2:  Жукенов Д.С.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Отзыв компании ЕвроХим-ВолгаКалий по результатам эксплуатации трубопроводной системы «МУЛЬТИПАЙП ИС»



Общество с ограниченной ответственностью «ЕвроХим-ВолгаКалий»
Ленина ул., д. 7, г. Котельниково, Котельниковский р-н, Волгоградская обл., 404354, Россия
тел.: +7 (84476) 55010, факс: +7 (84476) 55040
www.eurochemgroup.com, eurochem-volgakaliy@eurochem.ru

21.04.2021 № 16/3-3/86
На № _____ от _____

ООО «ПОЛИПЛАСТИК» Поволжье
Генеральному директору
Семенюк П.А.

Отзыв о компании «Полипластик»

Уважаемый Павел Александрович!

В процессе строительства рассолопровода и шламопровода хвостохранилища Гремячинского ГОКа, были использованы многослойные износостойкие трубы «Мультипайп ИС» Протект тип II производимые вашей компанией. Трубопровод был спроектирован и смонтирован надземно, на опорных ж/б конструкциях.

Строительство шламопровода более 13 км было осуществлено в кратчайшие сроки, благодаря преимуществу монтажа полимерных труб. За 3 года использования - трубы «Мультипайп ИС» показали высокие эксплуатационные результаты.

Со своей стороны, хотим поблагодарить Вашу компанию за инновационное решение для горнодобывающей отрасли, а также приглашаем ваших специалистов для проведения аудита и толщинометрии смонтированных трубопроводов на нашей площадке Гремячинского ГОКа.

С уважением,

Главный инженер
Технической дирекции

И.В. Поляков

Исп.: Косенко И. Е.
Тел. (84476) 5-50-10, доб. 41386