

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»**

На правах рукописи



Скрбнев Владимир Игоревич

**ПОЛИМЕРНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ ДЛЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК».

Научный руководитель:

Калугина Елена Владимировна

доктор химических наук, заместитель директора - начальник управления исследования материалов НИИ ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК», профессор кафедры химии и технологии переработки пластмасс и полимерных композитов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»

Официальные оппоненты:

Саморядов Александр Владимирович

доктор технических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Межведомственного центра аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме Российской академии наук

Калинина Ирина Георгиевна

кандидат химических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук

Ведущая организация:

Акционерное общество «Институт пластмасс имени Г.С. Петрова»

Защита состоится 16 мая 2024 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета РХТУ.2.6.05 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047 г. Москва, Миусская пл., 9) в конференц-зале (ауд. 443).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://diss.muotr.ru> федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета РХТУ.2.6.05
кандидат химических наук, доцент

Биличенко Юлия Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Основными факторами, определяющими общую производительность и себестоимость эксплуатации промышленных систем трубопроводного гидротранспорта пульпы (пульпопроводов), являются уменьшение трудоемкости работ при техническом обслуживании, снижение энергоемкости процессов гидротранспортировки 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.

Трубопроводы из термопластов, например, из композиций на основе сополимеров этилена с 1-гексеном или 1-бутеном (PE 100), в том числе из термостойких композиций полиэтилена (PE-RT – сополимер этилена и 1-октена; PE-X – сшитый полиэтилен) активно эксплуатируются в химической и энергетической промышленности. Однако применение трубопроводных систем с рабочей поверхностью из полиэтилена для транспортировки гидросмесей достаточно ограничено в связи с недостаточной износостойкостью. Промышленные гидротранспортные системы, применяемые в России для перемещения гидросмесей, традиционно выполняются из недорогих марок стали. Трубы из углеродистой стали характеризуются стойкостью к высоким рабочим давлениям, но подвержены химической коррозии, а высокий коэффициент гидравлического сопротивления приводит к заметным потерям напора и увеличению удельных затрат энергии. В результате изнашивания потоками взвешенных абразивных частиц такие трубопроводы достаточно быстро выходят из строя.

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

Одним из направлений повышения общей эффективности пульпопроводов может стать использование полиэтиленовых труб с внутренним соэкструдированным слоем из термопластичных эластомеров (ТРЕ). При изготовлении таких труб используются современные

высокопроизводительные методы соэкструзии, при этом не только технологические отходы возвращаются в процесс, но и отработанные трубы подвержены рециклингу. Трубы имеют относительно малый вес по сравнению со стальными. Отсутствие коррозии, зарастания стенок и отложений при эксплуатации, гибкость, способность к поглощению шума и вибрации, низкая шероховатость – важнейшие конструктивные преимущества. Кроме того, их легко монтировать по технологии сварки встык или сварки электрофузионными муфтами.

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 «Полюс») 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 строительным 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 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 работы. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и аргументирована научная новизна исследований, представлены положения, выносимые на защиту, показана практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлен обзор научно-технической литературы, в котором рассмотрены виды технологических трубопроводов и описаны материалы, применяемые для улучшения их эксплуатационных характеристик. Проведен анализ научной литературы, касающейся механизмов различных видов износа и факторов, влияющих на процесс изнашивания абразивными частицами, рассмотрены особенности гидроабразивного изнашивания полимеров и основная номенклатура термоэластопластов. 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 термоэластопластов – материалов, близких по свойствам к резине, что является особенно актуальным при разработке полимерных труб с высокой стойкостью к гидроабразивному износу.

Во второй главе описаны объекты и методы исследования.

В качестве базовых термопластов (таблица 1) выбраны трубные марки полиэтилена высокой плотности (HDPE), линейные полиэтилены низкой плотности (LLDPE) и трубные марки блок-сополимера полипропилена (PP-B). Кроме базовых полиолефинов, на стойкость к износу исследовали наполненные стеклошариками композиции на базе линейного полиэтилена низкой плотности – Армлен ПЭ СШ-40-1К и полипропилена – Армлен ПП СШ-45-1К.

Таблица 1 – Базовые термопласты

Тип полиолефина	Марка	Производитель
HDPE	ПЭ 273-83	ООО «Ставролен», РФ
	ПЭ2НТ11-9	ПАО Казаньоргсинтез», РФ
	PEX-a Lupolen 5261Z Q456	LyondellBasell Industries Holdings, Нидерланды
LLDPE	LLDPE UT404 (LLDPE 1)	Saudi Basic Industries Corporation, Саудовская Аравия
	LLDPE 318BJ (LLDPE 2)	LOTTE Chemical Corporation, Южная Корея
PP-B	SABIC PP RELY 71EK671PS (PP-B 1)	Saudi Basic Industries Corporation, Саудовская Аравия
	SABIC PP RELY 61EK61PS (PP-B 2)	Saudi Basic Industries Corporation, Саудовская Аравия
	Eltex TUB 350-НМ00 (PP-B 3)	Ineos Group Ltd, Великобритания

В работе изучены отечественные и зарубежные ТРЕ (таблица 2). В качестве объектов сравнения исследовали РТИ на основе этиленпропилендиенового каучука (EPDM) с твердостью 65 по Шору А и углеродистую сталь марки Ст20.

Таблица 2 – Термоэластопласты

№	Тип ТРЕ		Марка и производитель
1	TPS-SEBS	Блок-сополимер стирола и этилен-бутиленового каучука	Dryflex PS 60R201B (HEXPOL Group, Швеция)
			ТО 623 60A2155 (Mitsubishi Chemical Corp., Япония)
			ТО S1 631 60A2155 (Mitsubishi Chemical Corp., Япония)
			Thermolast К TC6CSZ (KRAIBURG TPE, Германия)
			Thermolast К TC5CSZ (KRAIBURG TPE, Германия)
2	TPS-SBS	Блок-сополимер стирола и бутадиенового каучука	Армен ПП ТЭП-20-60А-9010 (НПП «ПОЛИПЛАСТИК», Россия)
			Армен ПП ТЭП-20-45Д (НПП «ПОЛИПЛАСТИК», Россия)
			Армен ПП ТЭП-10-75А-819 (НПП «ПОЛИПЛАСТИК», Россия)
			Армен ПП ТЭП-11-80А-9010 (НПП «ПОЛИПЛАСТИК», Россия)
3	TPV	Термопластичный вулканизат, состоящий из полипропиленовой матрицы с распределенной в ней сшитой фазой из EPDM	Армен ПП ТЭП 12-55А-901 (TPV) (НПП «ПОЛИПЛАСТИК», Россия)
			Santoprene 101-55 (TPV 2) (ExxonMobil Chemical, США)
			Dryflex VE 55A101 (TPV 3) (HEXPOL Group, Швеция)
			Армен ПП ТЭП 15-60А-901 (TPV 4) (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)

Для изготовления образцов однослойных труб или слоя трубы, несущего давление в двухслойной конструкции, использовали трубные марки HDPE. Внутренний слой труб двухслойной конструкции изготавливали из TPV марки Арлен ПП ТЭП 12-55А-901; LLDPE, в том числе стеклонаполненного; смесей HDPE с TPV или LLDPE. В качестве объектов сравнения использовали трубы из стали марки СтЗсп и трубы с рабочей поверхностью из TPU.

Физико-механические характеристики при растяжении, остаточную деформацию при сжатии, твердость по Шору, время окислительной индукции, реологические свойства и плотность определяли согласно стандартным методикам и ГОСТ. 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.

Тестирование материалов и труб на стойкость к износу проводили в условиях гидроабразивного воздействия. Дополнительно оценили истирание полиэтиленов разных типов шлифовальной шкуркой (Н12 ГОСТ 13344) по ГОСТ 11012.

Сущность испытания при высокоскоростном воздействии абразивных суспензий (на основе требований ISO 15527) заключалась в измерении величины потери массы образца в форме пластины за единицу времени в процессе вращения в смеси кварцевого песка и воды. В качестве эталона применяли образцы из ПЭ 273-83, степень истирания которого принята за 100 %.

В «Дармштадтском методе» (EN 295-3:2012) измеряли потери толщины стенки образца трубы, заполненного водной суспензией с частицами натурального кварцевого песка. Движение абразивного материала обеспечивалось за счет изменения наклона образца от горизонтали на $\pm 22,5$ градуса с частотой колебаний 20 циклов в минуту.

Исследование потерь напора и гидроабразивного износа в трубопроводной системе проводилось на лабораторном стенде в Санкт-Петербургском горном университете путем непрерывной перегонки хвостов обогащения железных руд по замкнутому гидравлическому контуру. Величину износа оценивали по изменению массы образцов. Анализ топографии внутренней поверхности труб до и после взаимодействия с гидросмесью проводили с помощью инвентированного светового микроскопа Leica DM1LM.

Для измерений шероховатости внутренней поверхности труб использовался контактный профилометр SurfTest SJ-210 и специально сконструированное приспособление для фиксации образца трубы и измерительного устройства. Профилометр представлял собой индуктивный датчик (детектор в виде измерительного щупа) с алмазной иглой и опорой на измеряемую площадь.

В третьей главе приведены результаты проведенных исследований и их обсуждение.

Параграф **3.1** посвящен исследованию физико-механических свойств полимерных материалов и износостойкости.

Согласно результатам, полученным при оценке износа при высокоскоростном воздействии абразивных суспензий, степень истирания LLDPE (UT404 и 318BJ) ниже, чем у HDPE ПЭ 273-83, и находится примерно на одном уровне со сталью Ст20, степень истирания образцов из которой составила 43 % (расчёт через объёмные потери). Степень истирания исследованных PP-B оказалась хуже, чем у полиэтиленов, и находилась на уровне 156-200 %. TPV проявил в 2 раза лучшую износостойкость, чем ТРО: степень истирания Армлэн ПП ТЭП 12-55А-901 составила 3 % против 6 % у БСК-50. Введение стеклошариков в состав полиолефинов не приводит к улучшению износостойкости: степень истирания композиции на основе LLDPE с 40 % стеклошариков составила 82 %, а PP, содержащего 45 % стеклошариков, – 300 %.

Данные испытаний по Дармштадскому методу коррелируют с результатами, полученными при высокоскоростном вращении в песчаных суспензиях. Однако Дармштадтский метод моделирует условия эксплуатации самотечных трубопроводных систем и не позволяет оценить работоспособность материалов в процессе напорного гидротранспортирования.

Результаты проведенных исследований показали, что стойкость к гидроабразивному износу коррелирует с жесткостью материалов (рисунки 1 и 2).

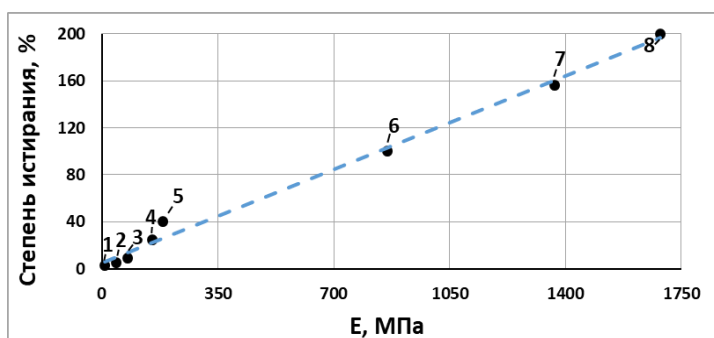


Рисунок 1 – Зависимость степени истирания от модуля упругости: 1 – TPV; 2 – TPV + LLDPE 1 (30 %); 3 – TPV + HDPE (30 %); 4 – TPV + HDPE (50 %); 5 – LLDPE 1; 6 – HDPE; 7 – PP-B 1; 8 – PP-B 2

Установлена взаимосвязь степени истирания под воздействием гидроабразивного потока с модулем упругости и твердостью полиолефинов, термоэластопластов на базе полиолефинов и их смесей.

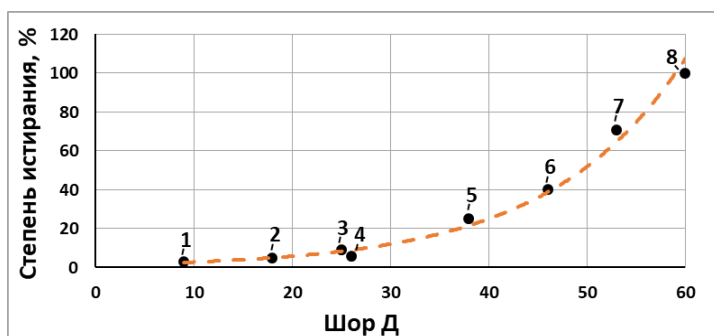


Рисунок 2 – Зависимость степени истирания от твердости: 1 – TPV; 2 – TPV + LLDPE 1 (30 %); 3 – ТРО; 4 – TPV + HDPE (30 %); 5 – TPV + HDPE (50 %); 6 – LLDPE 1; 7 – ТРО + HDPE (75 %); 8 – HDPE

Параграф 3.2 посвящен исследованию износостойкости и термомеханических свойств полиолефинов, термоэластопластов и их смесей. Стойкость к износу обусловлена совокупностью

взаимосвязанных параметров, которые учитывают различные свойства материала и характер взаимодействия контактирующих тел. Поскольку под действием гидроабразивного потока материал подвергается многократным кратковременным деформациям, приводящим в последствии к снижению его усталостной прочности, то для понимания проблемы гидроабразивного износа целесообразно исследовать динамические механические свойства (рисунок 3). 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'' .

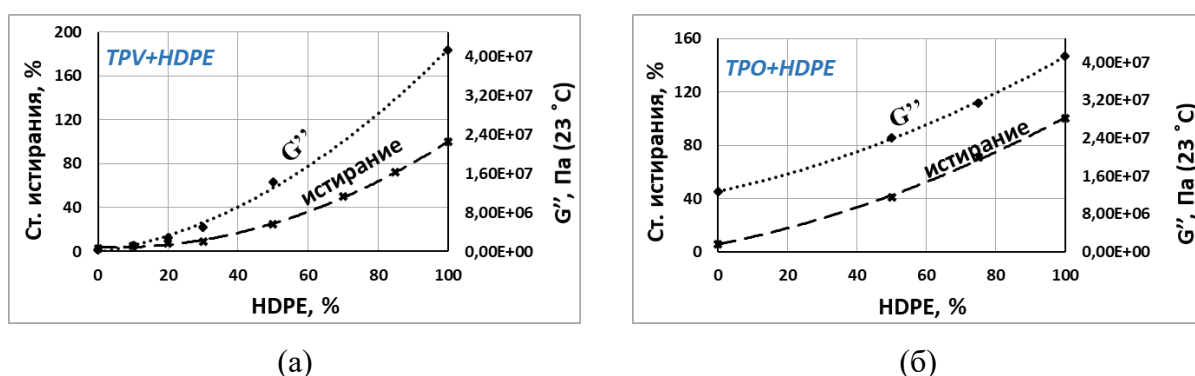


Рисунок 3 – Модуль механических потерь при 23 ± 2 °C и степень истирания в зависимости от соотношения компонентов в смеси HDPE + TPV (а) и HDPE + TPO (б)

Результатами динамического механического анализа (ДМА) установлено, что наибольшие значения модуля потерь в диапазоне рабочих температур пульпопроводов (до 60 °C) у HDPE марки ПЭ 273-83, а наименьшие – у TPV Армен ПП ТЭП 12-55А-901, причем механические потери полиэтилена оказались на 2 порядка выше. С увеличением содержания HDPE в смесях с TPE в диапазоне отрицательных температур интенсивность пика снижалась симбатно изменению концентрации, при этом интенсивность пика увеличивалась в диапазоне положительных температур – чем выше упругость полимера, тем медленнее скорость его перехода в равновесное состояние, больше гистерезис и выше уровень механических потерь.

Наилучшую износостойкость проявили термоэластопласты, поэтому изучили динамические механические свойства и оценили степень истирания различных типов TPE.

Все TPS-SEBS продемонстрировали хорошую стойкость к истиранию, которая варьируется от 6 до 14 %. Полученные результаты согласуются с данными ДМА – низкие значения модуля потерь в диапазоне положительных температур. Результаты исследования маслonaполненных TPE-SBS, серийно применяемых для изготовления уплотнений бытовых приборов на рабочие температуры от минус 20 до плюс 20 °C, показали низкую стойкость к истиранию (от 28 до 270 %), а зависимость между величиной модуля механических потерь в интервале температур от 0 до плюс 100 °C и степенью истирания для них не обнаружена.

Почти все исследованные марки термопластичных вулканизатов проявили высокую стойкость к гидроабразивному износу, которая характерна для износостойких марок TPU, предназначенных для изготовления шлангов, покрытий и сит грохота для горнодобывающей промышленности, и значительно превосходят по стойкости полиолефины и сталь (таблица 3).

Таблица 3 – Степень истирания TPE, TPU, полиолефинов и стали (эталон – ПЭ 273-83)

Материал	Степень истирания, %	Материал	Степень истирания, %
Армлен ПП ТЭП 12-55А-901 (TPV)	3	Elastollan C85A 10 000 (TPU)	4
Santoprene 101-55 (TPV 2)	4	UT 404 (LLDPE 1)	40
Dryflex VE 55A101 (TPV 3)	14	ПЭ 273-83 (HDPE)	100
Армлен ПП ТЭП 15-60А-901 (TPV 4)	6	SABIC PP RELY 71EK671PS (PP-B 1)	200
БСК-50 (TPO)	6	Ст20 (углеродистая сталь)	43

Сравнение результатов наиболее жесткого вида износа – абразивного износа полиэтиленов по шлифовальной шкурке (Н12 по ГОСТ 13344) показало (таблица 4), что у всех образцов полиэтиленов показания износа являются близкими. Это связано с тем, что все образцы полиэтиленов: и линейных, и сетчатых - имеют близкие величины плотности, твердости и предела текучести. При гидроабразивном воздействии (таблица 3, рисунки 1 и 2) были зафиксированы заметные различия 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 вулканизированные термоэластопласты наиболее близки по характеристикам к резине.

Таблица 4 – Износ различных видов полиэтилена по шлифовальной шкурке

Материал	Среднее значение износа I, мм ³ /м	Стандартное отклонение среднего значения	Коэффициент вариации среднего значения, %
HDPE (PE100 2HT11-9)	3,1	0,15	4,8
PEX-a (Lupolen 5261 ZQ 456)	3,8	0,15	4,0
LLDPE (UT 404)	3,7	0,12	4,2

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. Динамический модуль потерь зависит от циклической частоты и температуры, а отношение G''/G' - тангенс угла механических потерь характеризует диссипативные потери в каждом цикле нагружения. Отношение G''/ω отражает сопротивление полимера сдвигу при определенной температуре и называется динамической вязкостью η . Если предположить, что

частота ω не меняется, 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 (рисунок 4) наглядно демонстрируют, что в диапазоне температур от минус 30 до плюс 100 °C во всех исследованных полиолефинах наблюдаются изменения, вероятно, связанные со структурными перегруппировками, как отклик на деформационное воздействие.

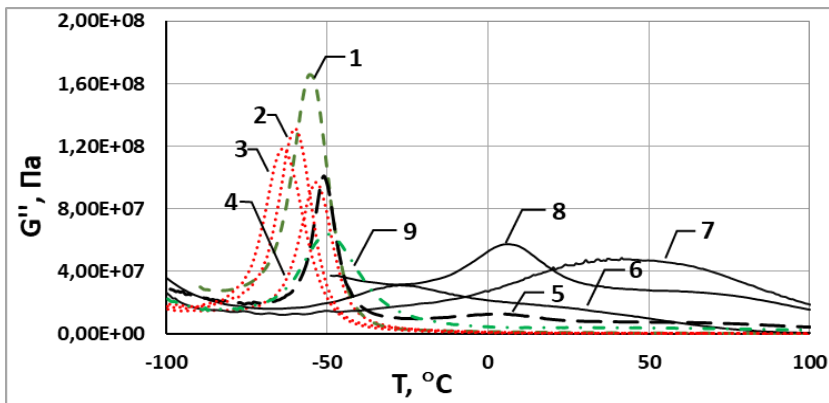


Рисунок 4 – Модуль механических потерь в зависимости от температуры: 1 – EPDM; 2 – TPV 2; 3 – TPV 3; 4 – TPV; 5 – TPO; 6 – LLDPE 1; 7 – HDPE; 8 – PP-B 3; 9 – TPU

Отсутствие реакции на механическое воздействие (рисунок 4) характерно только для TPU, TPV и РТИ на основе EPDM, модуль потерь у которых обнаруживается при более низких температурах, что в свою очередь приводит к снижению плотности поглощенной энергии и возникновению меньших по величине контактных напряжений вследствие удара абразивных частиц.

Проведенные исследования показали, что сшитые структуры, такие как термопластичные вулканизаты, термопластичные полиуретаны и резины характеризуются максимальной стабильностью к динамическим нагрузкам. Зависимость между величиной модуля механических потерь (23 ± 2 °C) и стойкостью к гидроабразивному износу линейная (рисунок 5).

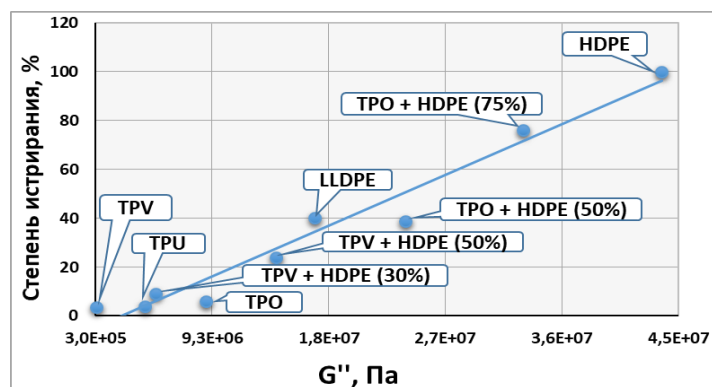


Рисунок 5 - Зависимость степени истирания от модуля механических потерь

В параграфе 3.3. представлены результаты исследования реологических характеристик термопластичных вулканизатов и трубных марок полиэтилена высокой плотности (таблица 5).

Таблица 5 – Вязкость TPV и HDPE 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	ПЭ2НТ11-9	ПЭ 273-83
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	-	-

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. Установлено, что температура незначительно влияет на вязкость расплава TPV, что позволяет осуществлять их переработку в довольно широком интервале температур. При скоростях сдвига в интервале от 1 до 100 1/с, соответствующих процессу экструзии полиэтиленовых труб, кривые течения Армлен ПП ТЭП 12-55А-901 и трубных марок полиэтилена имеют схожий характер (рисунок 6).

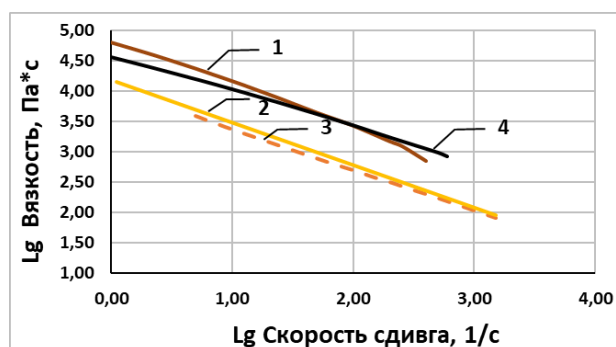


Рисунок 6 – Зависимость вязкости от скорости сдвига: 1 – ПЭ2НТ11-9 (190 °С); 2 – Армлен ПП ТЭП 12-55А (190 °С); 3 – Армлен ПП ТЭП 12-55А (230 °С); 4 – ПЭ 273-83 (190 °С)

Параграф 3.4 описывает технологию производства напорных труб двухслойной конструкции с наружным слоем из HDPE марки ПЭ2НТ-11-9 и внутренним слоем из термопластичного вулканизата Армлен ПП ТЭП 12-55А. Изготовление образцов осуществлялось методом одношнековой экструзии через двухслойную экструзионную головку Helix 63-3 WPO на производственной линии Battenfeld-cincinnati Климовского трубного завода (ООО «КТЗ»).

3.5. Исследование износостойкости и гидравлических характеристик трубы двухслойной конструкции с внутренним слоем из термопластичного вулканизата при гидротранспорте хвостовой пульпы. В параграфе 3.5.1 представлены результаты оценки величины потерь напора при гидротранспорте отвальных хвостов обогащения железной руды ПАО «Михайловский ГОК» со средневзвешенным диаметром частиц 0,07789 мм и плотностью частиц грунта – 3,1 г/см³. При этом основным критерием, определяющим величину удельных потерь, является коэффициент гидравлического сопротивления (λ), который рассчитали из формулы Дарси-Вейсбаха:

$$i = \lambda \frac{v^2}{2gD} \cdot \frac{\rho_c}{\rho_0} \rightarrow \lambda = i \cdot \frac{2gD}{v^2} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_c}, \quad (1)$$

где i – потери напора, м вод. ст./м; D – внутренний диаметр трубопровода, м; $\rho_{см}$ – плотность гидросмеси, кг/м³; ρ_0 – плотность воды, кг/м³, v – средняя скорость потока; g – ускорение свободного падения.

При гидротранспорте хвостовой пульпы, при массовых концентрациях абразивных частиц от 0 до 37% удельные потери напора трубы с внутренним слоем из TPV Армлен ПП ТЭП 12-55А меньше, чем у стальной трубы из СтЗсп (ГОСТ 10704-91), в среднем в 1,5 раза, а удельные потери напора в трубе из HDPE марки ПЭ2НТ11-9 (ГОСТ 18599) оказались меньше, чем у стальной трубы, в 2,5 раза. При концентрациях от 0 до 37% для трубы с внутренним слоем из TPV коэффициент гидравлического сопротивления изменялся в диапазоне от 0,04 до 0,08, полиэтиленовой трубы – от 0,02 до 0,05, а стальной трубы – от 0,06 до 0,14.

В параграфе 3.5.2 представлены результаты изменения шероховатости (R_a) внутренней поверхности при гидротранспорте хвостовой пульпы через трубы с внутренней поверхностью из TPV, СтЗсп и HDPE. В процессе гидротранспорта, при объеме прокачки около 6000 м³, происходило изменение шероховатости внутренней поверхности секций трубопровода (рисунок 7): для трубы с внутренним слоем из TPV наблюдалось снижение естественной шероховатости в среднем на 59% до $R_a = 0,97$ мкм; для полиэтиленовой трубы – увеличение шероховатости от начальной $R_a = 0,649$ мкм на 46%; а у стальной трубы шероховатость уменьшилась на 37% до $R_a = 4,06$ мкм. При этом минимальные абсолютные значения R_a в процессе наработки достигаются у образцов из трубы с внутренним слоем из TPV и полиэтиленовой трубы.

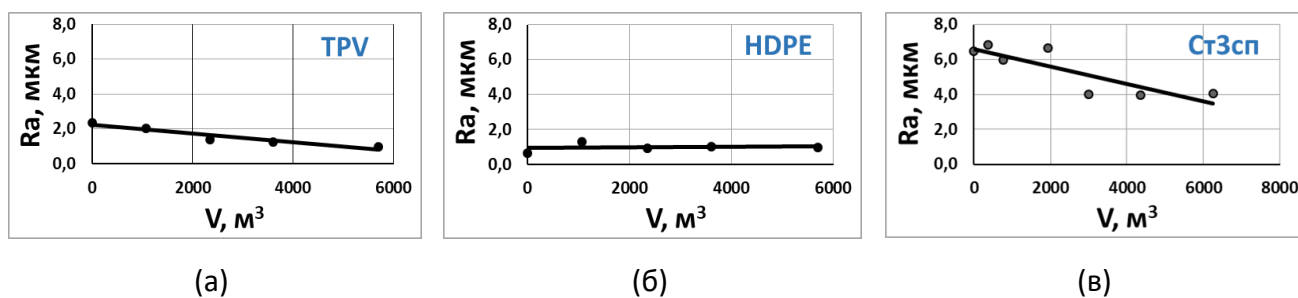


Рисунок 7 – Изменение шероховатости от объема пульпы для труб с внутренней поверхностью из TPV (а), HDPE (б), СтЗсп (в)

В параграфе 3.5.3 проведено теоретическое определение коэффициентов гидравлических сопротивлений. Коэффициент гидравлических сопротивлений, являющийся функцией относительной шероховатости в квадратичной области сопротивления, определялся по формуле Шифринсона:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta_э}{D} \right)^{0,25} \quad (2)$$

Значение эквивалентной шероховатости вычислено по приближенной формуле согласно ГОСТ 8.586.1:

$$\Delta_{\text{э}} = \pi \cdot Ra \quad (3)$$

По результатам расчетов построена графическая зависимость коэффициента гидравлических сопротивлений от наработки для всех исследуемых образцов (рисунок 8).

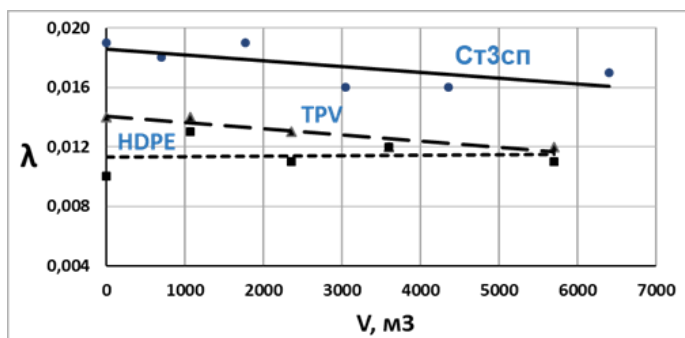


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента λ от объема прокачанной пульпы для СтЗсп, TPV и HDPE

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 проявила склонность к уменьшению коэффициента гидравлического трения (от 0,014 до 0,012) и соответственно к снижению потерь напора в процессе гидротранспорта хвостовой пульпы. Коэффициент гидравлического трения трубы из стали также уменьшился в процессе прокачки гидросмеси (от 0,019 до 0,017), однако удельные потери напора у стального образца оказались значительно больше. Коэффициент гидравлического трения полиэтиленовой трубы слабо изменялся, и можно наблюдать некоторое его увеличение (от 0,010 до 0,011),

Параграф **3.5.4** посвящен исследованию величины гидроабразивного износа труб внутренним диаметром (D) 25 и 50 мм, с внутренней поверхностью из TPV, HDPE, СтЗсп и TPU. Износостойкость оценивалась при гидротранспорте хвостовой пульпы Михайловского ГОК (гидросмесь №1) и Качканарского ГОК (гидросмесь №2) со средневзвешенным диаметром частиц последнего – 0,491 мм. Суммарный объем прокачанной гидросмеси для разных образцов составлял 5475÷7240 м³. Массовая концентрация абразивных частиц в гидросмеси планомерно повышалась (от 10 до 50 %) после каждого этапа снятия показаний по массе образцов, при этом на последнем этапе, при переходе на хвосты Качканарского ГОК, концентрацию не меняли. При сопоставлении интенсивности износа потери массы образцов переводили в объемную величину в связи с различиями в плотности исследуемых материалов.

В процессе прокачивания гидросмеси отделение фрагментов материала для стальных и полиэтиленовых труб наблюдалось с самого начала испытаний, а массы образцов труб с внутренней поверхностью из TPU возрастали до определенной критической точки, после

которой начиналось их уменьшение. В рамках настоящего эксперимента для образцов с внутренним слоем из TPV видимой потери массы не наблюдалось, однако зафиксирована остановка набора массы для обоих образцов (рисунки 9, 10 и 11). Это явление можно объяснить наличием инкубационного периода, который предшествует началу процесса разрушения и сопровождается набором массы, обусловленным внедрением твердой фракции в материал образцов (рисунок 12).

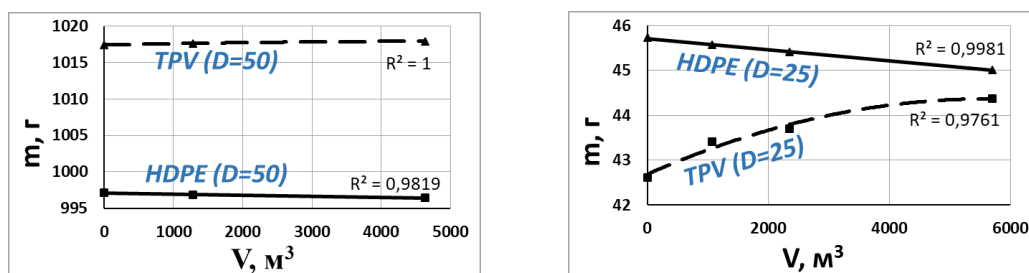


Рисунок 9 – Зависимость массы от объема прокаченной гидросмеси Михайловского ГОК для полиэтиленовых труб и труб с внутренним слоем из TPV

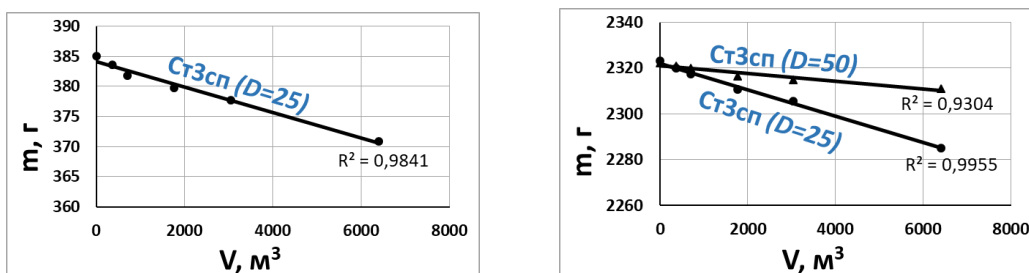


Рисунок 10 – Зависимость массы от объема прокаченной гидросмеси Михайловского ГОК для стальных труб

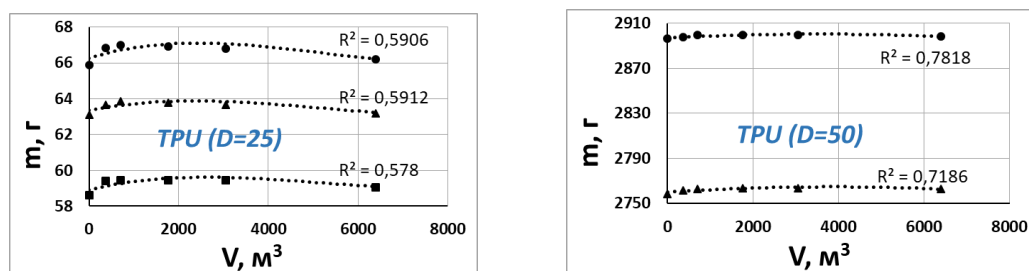


Рисунок 11 – Зависимость массы от объема прокаченной гидросмеси Михайловского ГОК для труб с внутренней поверхностью из TPU

На основании полученных данных проведен расчет удельной интенсивности износа через объемные потери ΔV (по отношению к объему гидросмеси), согласно которому 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 (таблица 6).

Таблица 6 – Интенсивность износа (I) труб из полиэтилена и стали

D, мм	Труба	$I, \text{см}^3/\text{м}^3$ (гидросмесь 1)	$I, \text{см}^3/\text{м}^3$ (гидросмесь 2)	$I, \text{см}^3/\text{м}^3$ (суммарная)
25	HDPE	$1,53 \times 10^{-4}$	$5,7 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-4}$
50	HDPE	$1,3 \times 10^{-4}$	-	$1,2 \times 10^{-4}$
25	Ст3сп	$2,8 \times 10^{-4}$	$6,6 \times 10^{-4}$	$3,3 \times 10^{-4}$
50	Ст3сп	$2,2 \times 10^{-4}$	$3,2 \times 10^{-4}$	$2,3 \times 10^{-4}$

Для образцов с внутренними поверхностями из TPV и TPU 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, 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.

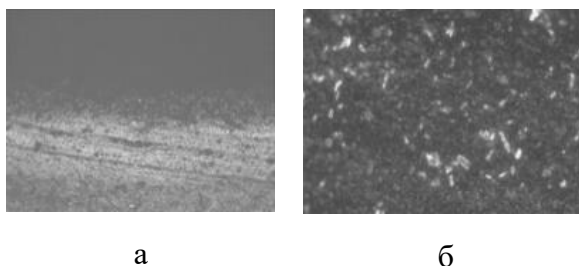


Рисунок 12 – Внутренняя поверхность образцов труб с внутренним слоем из TPV до (а) и после (б) взаимодействия с гидросмесью (увеличение в 100 раз)

Принимая во внимание данные по степени истирания материалов, представленные в параграфе 3.1, и наличие достаточно продолжительного инкубационного периода процесса разрушения, который обычно характерен для износостойких марок резин, установлено, что в условиях гидротранспорта хвостовой пульпы стойкость к гидроабразивному износу труб с внутренними слоями из TPU и исследованной марки TPV значительно выше стойкости полиэтиленовой и стальной труб, причем полиэтилен высокой плотности и сталь характеризуются близкими значениями интенсивности износа.

В заключительном параграфе 3.5.5 проведена оценка влияния на интенсивность износа концентрации, дисперсности и скорости гидросмеси. После прокачивания двух гидросмесей удельная интенсивность износа стальной трубы с внутренним диаметром 25 мм составила $3,3 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$, а стальной трубы с внутренним диаметром 50 мм – $2,3 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$. Величины износа полиэтиленовых труб составили $1,9 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$ и $1,2 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$ соответственно. Интенсивность износа для образцов, имеющих меньший диаметр, в среднем оказалась в 1,5 раза выше при скорости потока, большей в 4 раза. На графических зависимостях (рисунок 13) видно,

что при переходе от гидросмеси № 1 на гидросмесь № 2, с частицами большего размера, интенсивность износа стальной трубы повысилась с $2,8 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$ до $6,6 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$, а полиэтиленовой трубы – с $1,53 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$ до $5,7 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$.

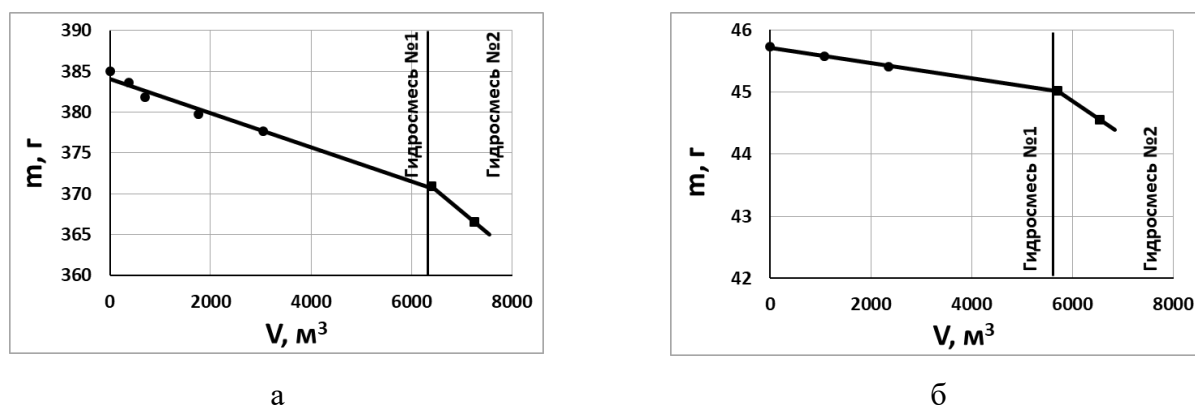


Рисунок 13 – Интенсивность уменьшения массы образцов стальной (а) и полиэтиленовой (б) труб в зависимости от типа гидросмеси

Характер кривой (рисунок 13), описывающей потерю массы в процессе гидротранспорта хвостовой пульпы Михайловского ГОК (гидросмесь 1), не менялся при планомерном увеличении концентрации от 10 до 50 %, что согласуется с результатами исследований, представленных в научно-технической литературе, согласно которым износ прямо пропорционален концентрации только при относительно невысоких значениях, а дальнейшее повышение содержания абразивных частиц не оказывает влияния на скорость изнашивания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 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. 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 строительным-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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

1. Serzhan S.L. Study of the effects of steel and polymer pipe roughness on the pressure loss in tailings slurry hydrotransport / S.L. Serzhan, **V.I. Skrebnev**, D.V. Malevannyi // *Obogashchenie rud.* – 2023. – № 4. – P. 41-49. DOI: 10.17580/or.2023.04.08. (Scopus)
2. **Скребнев В.И.** Оценка работоспособности материалов для применения в качестве износостойкого слоя полимерных пульпопроводов / В.И. Скребнев, В.В. Битт, Е.В. Калугина, А.Н. Крючков // *Пластические массы.* – 2018. – № 7-8. – С. 56-59. (ВАК)
3. **Скребнев В.И.** Исследование стойкости к гидроабразивному износу полимерных и стальных труб. Оценка основных параметров, влияющих на интенсивность износа гидротранспортных систем пульпопроводов / В.И. Скребнев, С.Л. Сержан, Е.В. Калугина // *Пластические массы.* – 2020. – № 9-10. – С. 40-44. (ВАК)
4. Евсева К.А. Новые полимерные трубы для промышленного применения / К.А. Евсева, В.В. Битт, **В.И. Скребнев**, Е.В. Калугина // *Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева).* – 2021. – Т. LXV. – № 3. – С. 85-90. (ВАК)
5. **Скребнев В.И.** Исследование стойкости к гидроабразивному износу термопластичных полимеров, применяемых для защиты внутренней поверхности гидротранспортных систем / В.И. Скребнев, С.Л. Сержан, Е.В. Калугина // *Пластические массы.* - 2023. - № 9-10. – С. 43-47. (РИНЦ)

6. **Skrebnev V.I.** Thermoplastic vulcanizates for use as a wear-resistant coextruded layer of polymeric slurry pipelines / V.I. Skrebnev, E.V. Kalugina // Химические технологии функциональных материалов: материалы V Международной Российско-Казахстанской научно-практической конференции, посвященной 85-летию Казахского национального университета им. аль-Фараби / отв. ред. А.И. Апарнев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – С. 291-292
7. Белкин С.А. Композиционные полимерные материалы в технологических промышленных трубопроводах и кабелезащите / С.А. Белкин, В.В. Битт, **В.И. Скребнев**, Е.В. Калугина, М.И. Горилловский // Технологии и материалы для экстремальных условий: материалы XIV Всероссийской научной конференции, 16–20 сентября 2019 г., Агой / Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме Российской академии наук; под общей редакцией акад. Б.Ф. Мясоедова – М: МЦАИ РАН, 2019. – С. 95-103.
8. **Скребнев В.И.** Долговечность полимерных кабельных каналов / В.И. Скребнев, С.А. Белкин, Е.В. Калугина // VIII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Москва. 19-22 ноября 2019 г. / Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2019. – С. 485-487.
9. **Скребнев В.И.** Разработка, испытания и внедрение в промышленность износостойких трубопроводов нового поколения / В.И. Скребнев, Е.В. Калугина // Science, Technology and Life 2020: Proceedings of articles the VII International scientific conference. Czech Republic, Karlovy Vary - Russia, Moscow, December 24-25, 2020. - Czech Republic, Karlovy Vary: Skleněný Můstek – Russia, Kirov: MCNIP, 2021. – P.29-51.
10. **Скребнев В.И.** Термопластичные олефиновые эластомеры как технологичный аналог резины в гидротранспортных системах / В.И. Скребнев // XXVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2021» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов, Е.И. Зимакова. [Электронный ресурс] – М.: МАКС Пресс, 2021. – Секция «Химия». – Подсекция «Высокомолекулярные соединения». - № 135.

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.