

Исследование стойкости к гидроабразивному износу термопластичных полимеров, применяемых для защиты внутренней поверхности гидротранспортных систем

Research of resistance to hydro-abrasive wear of thermoplastic polymers used to protect the inner surface of hydraulic transport systems

В.И. СКРЕБНЕВ¹, С.Л. СЕРЖАН², Е.В. КАЛУГИНА^{1,3}

V.I. SKREBNEV¹, S.L. SERZHAN², E.V. KALUGINA^{1,3}

^{1,3} ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК», Москва, Россия

² Санкт-Петербургский Горный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

¹ POLYPLASTIC Group, Moscow, Russia

² Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

³ MIREA – Russian Technological University (Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, Russia

vladimir.skrebnev@polyplastic.ru

В работе представлены результаты испытаний материалов на стойкость к гидроабразивному износу, а также величины эрозии исследованных материалов. Установлено, что применение термопластичных вулканизатов (ТПВ) в качестве соэкструдированного покрытия внутренней поверхности полимерных трубных систем позволяет значительно увеличить время жизни пульпопроводов при воздействии гидросмесей, в частности, хвостов обогащения железных руд. В модельном эксперименте, максимально приближенном к реальным условиям эксплуатации трубопровода, показано, что покрытия из ТПВ и термопластичного полиуретана (ТПУ) значительно превосходят по стойкости полиэтилен высокой плотности (ПЭПВ) и сталь.

Ключевые слова: пульпа, гидротранспорт, пульпопроводы, износостойкость, эрозия труб, гидроабразивный износ, гидросмеси, хвосты обогащения

The results of tests of materials for hydro-abrasive wear resistance, as well as the erosion values of studied materials, are presented. It has been found that the use of thermoplastic vulcanizates (TPV) as a co-extruded coating of the inner surface of polymer pipe systems can significantly increase the lifetime of slurry pipelines when exposed to hydraulic mixtures, in particular iron ore tailings. In a model test simulating actual operating conditions of the pipeline, it was shown that TPV and thermoplastic polyurethane (TPU) coatings are significantly superior in wear resistance to high-density polyethylene (HDPE) and steel.

Keywords: pulp, hydraulic transport, pulp pipelines, wear resistance, pipe erosion, hydro-abrasive wear, hydraulic mixtures, enrichment tails

DOI: 10.35164/0554-2901-2023-9-10-43-47

Введение

При выборе материалов для изготовления технологических трубопроводов обычно руководствуются особенностями конструкции, возможностью технического обслуживания, безопасностью, экономическими и экологическими аспектами. Также необходимо соблюдать отраслевые стандарты, нормы и правила, включающие обязательные требования к технологическим трубопроводам и рекомендации. Непрерывное развитие и распространение технологий, обновление регламентирующей документации в конечном счете привели к появлению на рынке промышленных трубопроводных систем, произведенных с применением полимерных композиционных материалов (ПКМ) – термопластов, реактопластов, эластомеров и термоэластопластов. При этом ПКМ используются как для изготовления конструктивных слоев, так и для формирования дополнительных покрытий/оболочек металлических и полимерных трубопроводных систем с целью улучшения их эксплуатационных характеристик. Стеклопластиковые трубопроводы, как правило, производятся из композиций на основе полиэфирных смол и характеризуются высокой жесткостью, теплостойкостью и химической стойкостью. Резиноармированные трубопроводы обычно применяются там, где требуется повышенная стойкость к истиранию, гибкость, стойкость к агрессивным химическим средам. Трубы из крупнотоннажных термопластичных полимеров, таких как полиэтилен высокой плотности, полипропилен и поливинилхлорид, также находят приме-

нение в промышленности, но в основном используются для строительства магистральных и бытовых систем водоснабжения и стоков. Для улучшения гидромеханических свойств и защиты от коррозии наружной/внутренней поверхности трубопроводных систем из углеродистой стали часто используют покрытия на базе полиуретана, полимочевины, эпоксидных или полиэфирных смол, реже – футеровку из полиолефинов. С целью повышения стойкости к гидроабразивному износу внутреннюю поверхность стальных трубопроводов обычно футеруют резиной или полиуретаном. Полиуретановые эластомеры характеризуются высокой износостойкостью и химической стойкостью к разным средам при допустимых рабочих температурах. В отличие от резин, полиуретаны могут быть как реактопластами (для отверждаемых покрытий), так и термопластами (ТПУ), которые можно наносить на поверхность трубопровода из расплава. Следует отметить, что к настоящему моменту сохраняется импортозависимость в части одного из основных компонентов полиуретанов – изоцианатов [1–16].

В горнорудной промышленности экономическая эффективность гидротранспортирования в целом определяется энергоемкостью этого процесса и долговечностью трубопровода. Энергоемкость процесса обуславливается потерями напора, которые будут определяться величиной коэффициента гидравлического сопротивления, характеризующего, в свою очередь, внутреннюю поверхность трубопроводной системы. Эти вопросы ранее рассмотрены на примере труб с рабочей поверхностью из углеродистой стали,

полиэтилена и термопластичных эластомеров [17]. Срок службы пульпопровода определяется его химической стойкостью и стойкостью к изнашиванию под воздействием гидроабразивной среды. Выход из строя трубопроводов в результате истирания потоками гидросмесей может приводить к загрязнению окружающей среды и простоям производства, приводящим, в свою очередь, к снижению производительности и дополнительным трудовым и финансовым затратам. Поэтому повышение долговечности трубопроводов является одной из наиболее актуальных задач, которая решается при проектировании и эксплуатации трубопровода.

Объекты исследования

В качестве объектов исследования использовали образцы в форме пластин и труб.

Пластины изготавливали методом литья под давлением из следующих материалов: полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) трубной марки ПЭ 273-83; термопластичный вулканизат (ТПВ) марки Армлен ПП ТЭП 12-55А производства ЗАО НПЦ «ПОЛИ-ПЛАСТИК», специально разработанный для применения в ударно-динамическом режиме нагружения; термопластичный полиуретановый эластомер (ТПУ) зарубежного производства, который рекомендуется для изготовления шлангов для горнодобывающей промышленности. Основные характеристики материалов представлены в таблице 1. Пластины из углеродистой стали класса Ст 3сп изготовили механической обработкой.

Таблица 1. Характеристики материалов.

№	Показатель	ПЭВП	ТПВ	ТПУ
1	Условная прочность при растяжении, МПа	25*	4	35
2	Относительное удлинение при разрыве, %	530	605	590
3	Модуль упругости при растяжении, МПа	863	8	21
4	Твердость по Шор А	97	55	85
5	Относительная остаточная деформация сжатия (24 ч., 70°C), %	–	39	25
6	Плотность, кг/м³	950	890	1119

* Предел текучести при растяжении

В модельном эксперименте использовали образцы в виде труб (табл. 2): труба многослойной конструкции с внутренним слоем из ТПВ Армлен ПП ТЭП-12-55А (№1); труба из ПЭВП марки ПЭНТ11-9 (РЕ 100), выпущенная в соответствии с требованиями ГОСТ 18599 (№2); труба стальная Ст 3сп электросварная прямошовная по ГОСТ 10704 (№3); трубки из ТПУ (№4–6), которые рекомендуются для футеровки стальных труб.

Таблица 2. Характеристики исследуемых труб.

№ образца	Внутренний диаметр	Количество слоев	Материал
1	25	2	Наружный несущий слой: ПЭВП класса РЕ 100 Внутренний слой: ТПВ
2	25	1	ПЭВП класса РЕ 100
3	25	1	Углеродистая сталь Ст3сп
4, 5, 6	25	1	ТПУ

Методы исследования

Тестирование материалов на стойкость к истиранию проводили по методу определения износа при высокоскоростном воздействии абразивных суспензий на основе требований ISO 15527, сущность которого заключается в измерении величины потери массы образца за единицу времени. Образец установленной формы (рис. 1) помещают в емкость со смесью песка и воды. Вал с образцом приводится во вращение со скоростью не менее 1200 об/мин. Износ определяют по отношению к эталонному образцу, изготовленному из трубной марки ПЭВП. Показатель «степень истирания» рассчитывается как отношение потери массы/объема образца к потере массы/объема эталона.

Интенсивность износа образцов труб в модельном эксперименте, максимально приближенном к условиям эксплуатации пульпо-

провода, оценивали на лабораторном стенде, разработанном в Санкт-Петербургском горном университете (рис. 2) [17]. Стенд представляет собой замкнутую гидравлическую систему, состоящую из расходного бака 1, наполненного гидросмесью (вода/пульпа), двух центробежных насосов 2, секций трубопроводов, запорной (3, 6, 10) и контрольно-измерительной аппаратуры (4, 5, 7–9, 12), а также теплообменного аппарата (11), по которой циркулирует гидравлическая смесь заданной концентрации.

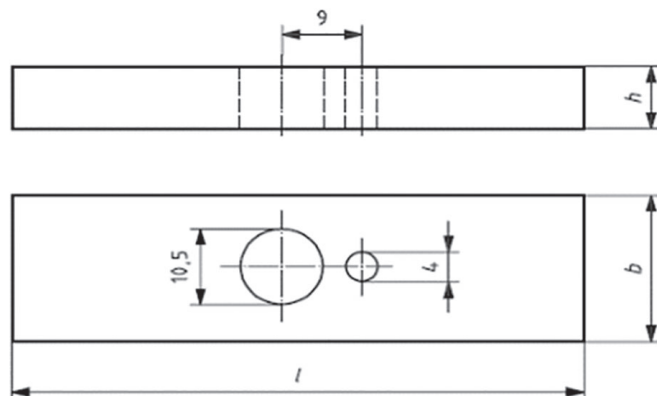


Рис. 1. Образец для оценки степени истирания на приборе для определения износа по методу ISO 15527:2010: 1: толщина (h) 6,35 мм $\pm$ 0,10 мм, ширина (b) 25,4 мм $\pm$ 0,20 мм, длина (l) 76,20 мм $\pm$ 0,20 мм

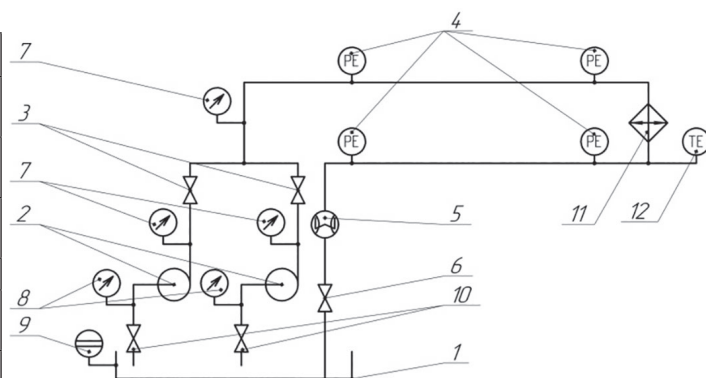


Рис. 2. Принципиальная гидравлическая схема лабораторного стенда: 1 – бак; 2 – центробежные насосы; 3, 6, 10 – шаровые краны; 4 – реле давления; 5 – расходомер; 7 – манометры с разделителями сред; 8 – вакуумметры с разделителями сред; 9 – указатель уровня; 11 – теплообменник; 12 – термометр.

Образцы для тестирования вставляли в подготовленную секцию трубопровода, которая монтировалась в систему трубопроводов фланцевыми соединениями. Система представляет собой замкнутый гидравлический контур между насосом и расходным баком. После запуска насоса гидросмесь, перемещаясь по системе трубопроводов, изнашивает внутреннюю поверхность образцов. Величина гидроабразивного износа оценивалась по потере массы образцов. Для измерения массы образцов лабораторная установка останавливалась, производился демонтаж образцов, их промывка и естественная (при комнатной температуре 25°C в течение 24 часов) и/или искусственная (в печи при температуре 70–90°C в течение 20 часов) сушка. После сушки образцы взвешивали, повторно монтировали трубопровод и проводили запуск следующего цикла испытаний.

Условия проведения испытаний:

- температура среды – до 40°C;
- давление в системе – до 0,125 МПа;
- скорость потока в образцах – до 8 м/с;
- в качестве твердого материала для получения гидросмеси использовали хвосты обогащения железной руды со средневзвешенным диаметром частиц $d_{ср} = 0,07789$ мм и средней плотностью частиц грунта – 3,1 г/см³;

Лабораторные испытания проводились в несколько циклов, отличающихся временем наработки, массовой концентрацией гидросмеси, способом сушки образцов (таблица 3). Общий объем прокачанной гидросмеси для образцов №1 и №2 составил 5704 м³, для образцов №3–6 – 6400 м³.

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

Таблица 3. Этапы проведения лабораторных исследований.

№ цикла	Наработка, ч / Объем прокачанной гидросмеси, м ³	Массовая концентрация, %	Исследуемые образцы	Способ сушки
1	50/369	10–25	№ 3, 4, 5, 6	Естественная
2	50/327	30	№ 3, 4, 5, 6	Естественная
3	100/1069	38–42	№ 1, 2, 3, 4, 5, 6	Естественная
4	100/1279	38–42	№ 1, 2, 3, 4, 5, 6	Естественная
5	300/3356	40–50	№ 1, 2, 3, 4, 5, 6	Искусственная и естественная

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний образцов в форме пластин при высокоскоростном вращении в абразивной суспензии на основе смеси кварцевого песка и воды представлены в таблице 4.

Вопросы взаимосвязи динамических механических характеристик и других свойств полимеров с их стойкостью в условиях гидроабразивного воздействия ранее подробно рассмотрены в [18]. Проведенные исследования [18] показали, что шитые структуры, такие как ТПВ и резины, характеризуются максимальной стабильностью к динамическим нагрузкам. Согласно полученным данным, близкие по своим характеристикам к резине материалы ТПВ и ТПУ демонстрируют высокую стойкость к гидроабразивному износу, значительно превосходящую стойкость ПЭВП и стали (табл. 1 и 4).

Таблица 4. Степень истирания образцов в абразивной суспензии.

Тип материала	Степень истирания, %	Состав
ТПВ	3	Термопластичный вулканизат на базе этилен-пропилен-диенового каучука
ТПУ	4	Термопластичный полиуретан, представляющий собой сегментированный блок-сополимер
ПЭВП	100	Полиэтилен высокой плотности, предназначенный для производства напорных труб
Сталь	43	Углеродистая сталь класса Ст 3сп

Результаты испытаний трубных образцов в замкнутом гидравлическом контуре представлены на рисунках 3–6. Образец трубы, выполненный из материала Ст 3сп (рис. 3), на протяжении всего эксперимента теряет массу, причем зависимость потери массы от объема прокачанной гидросмеси – линейная. Для трубы из РЕ 100 также наблюдается линейное уменьшение массы (рис. 4).

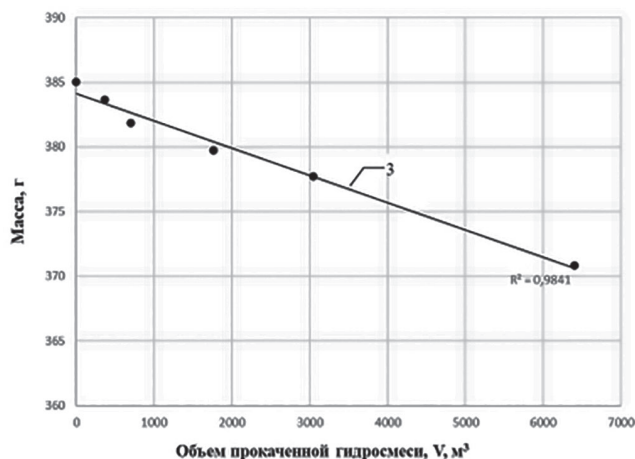


Рис. 3. Зависимость массы образца от объема прокачанной гидросмеси для стальной трубы.

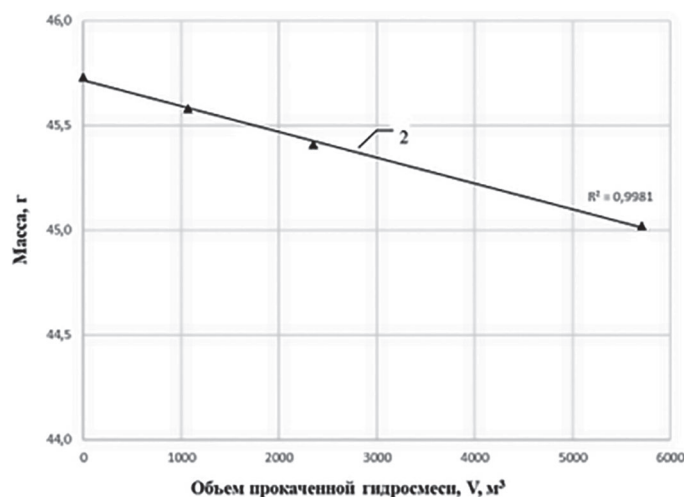


Рис. 4. Зависимость массы образца от объема прокачанной гидросмеси для полиэтиленовой трубы.

Результаты исследований [19, 20] показывают, что с увеличением концентрации гидроабразива износ возрастает линейно. Однако стоит отметить, что износ прямо пропорционален концентрации гидроабразива при значениях c только в диапазоне от 0 до 0,25% [21], а дальнейшее увеличение концентрации сказывается на износе значительно меньше. В работе [22] для образцов, изготовленных из различных марок чугунов и сталей (в т.ч. Ст 3сп), 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 из-за осаждения абразивного материала в трубопроводе [16, 23]. В настоящем исследовании минимальная концентрация гидросмеси составляла 10%, а максимальная – 50%, и по полученным зависимостям массы образца от объема прокачанной гидросмеси (рис. 3 и 4) видно, что изменение содержания твердой фракции не оказало влияния на характер кривой, описывающей потерю массы.

Для образцов труб с внутренней поверхностью из ТПУ масса возрастает до определенной критической точки (максимума), после которого начинается ее уменьшение (рис. 5), что отражает экстремальный характер износа.

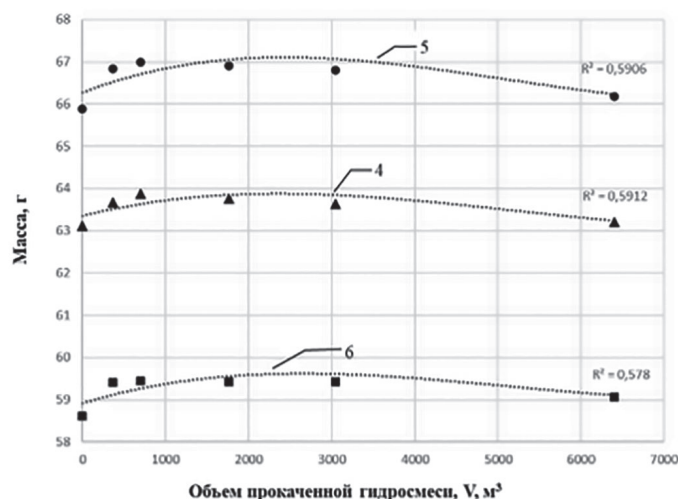


Рис. 5. Зависимости массы образца от объема прокачанной гидросмеси для труб из ТПУ.

В рамках настоящего эксперимента для образца трубы с внутренним слоем из ТПВ в исследованном временном диапазоне потери массы не зафиксированы. Характер изменения массовых потерь ТПВ аналогичен образцам из ТПУ: увеличение массы, затем стагнация – остановка увеличения массы (рис. 6), за которой должно последовать плавное снижение, которого так и не удалось достичь из-за ограниченного времени эксперимента. Явление стагнации можно объяснить наличием инкубационного периода процесса разрушения, который сопровождается набором массы

образца, обусловленным внедрением твердой фракции абразивной гидросмеси в эластичную мягкую рабочую поверхность ТПВ или ТПУ. При этом на основании полученных данных можно предположить, что у ТПВ Армлен ПП ТЭП 12-55А-901 инкубационный период по времени более продолжительный, чем у исследованных ТПУ, что вполне коррелирует с показателем твердости.

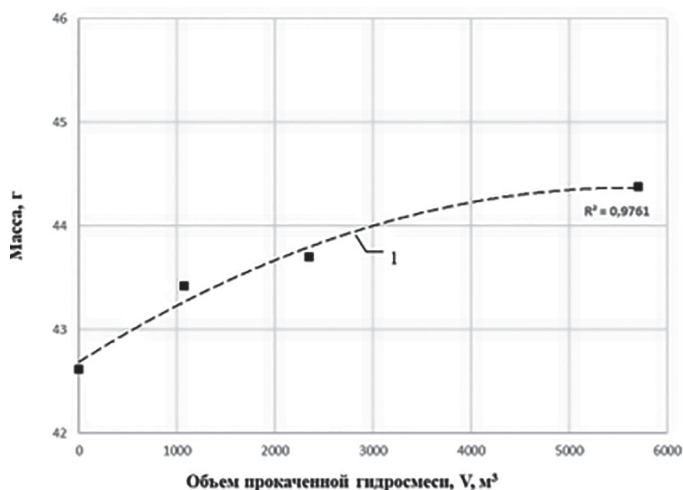


Рис. 6. Зависимость массы образца от объема прокачанной гидросмеси для трубы с рабочей поверхностью из ТПВ.

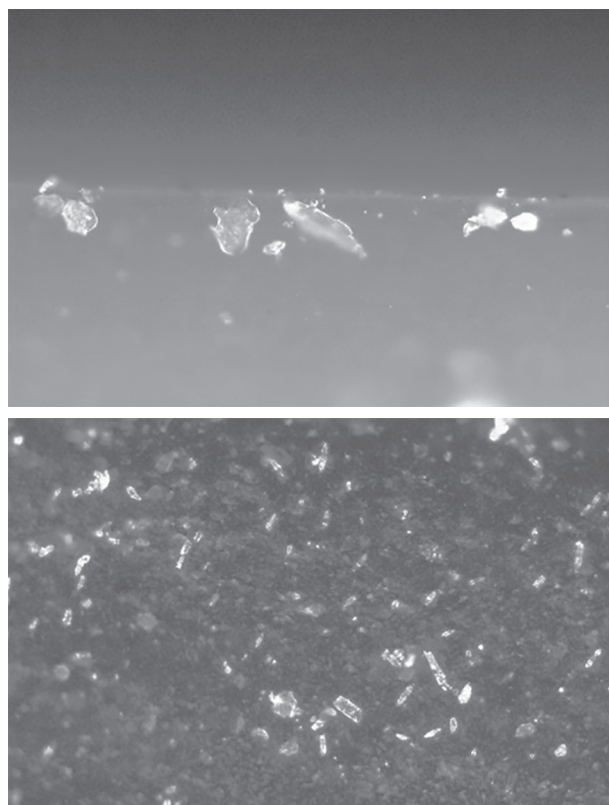


Рис. 7. Внутренняя поверхность образцов из ТПУ (а) и ТПВ (б) после взаимодействия с гидросмесью.

В работе [24] 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 эрозийных частиц. Однако по прошествии инкубационного периода масса образцов начинала линейно уменьшаться. Для подтверждения факта внедрения твердой фракции гидросмеси в поверхность образцов труб из ТПВ и ТПУ их внутренняя поверхность была рассмотрена под микроскопом. Результаты осмотра поверхности образцов представлены на рис. 7, где хорошо видны включения твердой фракции гидросмеси. В [16] отсутствие весового износа у резины в течение

длительного времени объясняется наличием продолжительного инкубационного периода процесса разрушения. При этом подчеркивается, что к моменту отделения фрагмента материала в поверхности под сошедшим слоем уже накоплено некоторое количество микрповреждений, в связи с чем инкубационный период становится в несколько раз меньше и образование трещин происходит быстрее.

Удельная интенсивность износа, выраженная в $\text{см}^3/\text{м}^3$, определена по формуле:

$$I = \frac{\Delta m}{\rho \cdot V}, \quad (1)$$

где Δm – убыль массы исследуемого образца (абсолютный износ), г; ρ – плотность материала исследуемого образца, $\text{г}/\text{см}^3$; V – суммарный объем гидросмеси, прошедший через испытуемый образец, м^3 .

Результаты расчета удельного гидроабразивного износа испытанных образцов представлены в таблице 5.

Таблица 5. Интенсивность изнашивания полиэтиленовой и стальной труб.

Образец	Объем прокачанной гидросмеси $V_1, \text{м}^3$	Плотность образца $\rho, \text{г}/\text{см}^3$	Изменение объема $\Delta V, \text{см}^3$	Интенсивность износа $I, \text{см}^3/\text{м}^3$ (гидросмесь №1)
РЕ100	5704	0,959	1,22	$1,3 \times 10^{-4}$
Ст 3сп	6400	7,850	2,36	$2,8 \times 10^{-4}$

Для образца трубы с внутренним слоем из ТПВ и образцов ТПУ величина интенсивности износа численно не определена, так как значения массы оказались выше первоначальных. Наибольшая величина изменения объема и интенсивности износа наблюдается у образца стальной трубы и составляет $2,8 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$, а интенсивность износа полиэтиленовой трубы составила $1,3 \times 10^{-4} \text{ см}^3/\text{м}^3$. При сравнении образцов из стали и РЕ 100 можно сделать вывод, что интенсивность износа у стального образца примерно в 2 раза выше.

Закключение

В процессе прокачивания гидросмеси объемом более 5700 м^3 и общей наработки более 600 часов, ТПВ и ТПУ продемонстрировали высокую стойкость к гидроабразивному износу. С учетом данных о степени истирания материалов при высокоскоростном вращении в абразивной суспензии и наличия достаточно продолжительного инкубационного периода процесса разрушения, который обычно характерен для износостойких марок резин, установлено, что в условиях гидротранспорта хвостовой пульпы интенсивность изнашивания труб с рабочей поверхностью из ТПУ и ТПВ значительно ниже, чем у напорной трубы из ПЭВП (ПЭ 100) и трубы из стали Ст 3сп, причем ПЭВП и Ст 3сп характеризуются близкими значениями объемных потерь. Проведенный сравнительный анализ интенсивности изнашивания показал, что специально разработанная экструзионная марка ТПВ Армлен ПП ТЭП12-55А демонстрирует аналогично ТПУ высокую стойкость к гидроабразивному износу. Применение труб двухслойной конструкции с внутренним износостойким слоем из Армлен ПП ТЭП12-55А, являющимся стойким к ударно-динамическим нагрузкам, гарантирует долговечность пульпопровода.

Литература

- Дэвид А. Уиллоуби. Полимерные трубы и трубопроводы. Справочник / Дэвид А. Уиллоуби, Р. Додж Вудсон, Рик Суверленд; пер. с англ. под ред. В.В. Ковриги. – СПб: 2010. 488 с.
- Низьев, С.Г. О противокоррозионной защите магистральных и промышленных трубопроводов современными полимерными покрытиями / С.Г. Низьев // Территория Нефтегаз. 2009. №10. С. 34–43.
- Мустафин Ф.М. Обзор методов защиты трубопроводов от коррозии изоляционными покрытиями / Ф.М. Мустафин // Нефтегазовое дело [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ogbus.ru/authors/Mustafin/Mustafin_3.pdf, свободный.
- S.D. Probert. Materials for internally lining pipes / S.D. Probert, C.Y. Chu // Applied Energy. 1980. №6. P. 385–393.

5. 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.
6. Metso Slurry Handling Solutions. Slurry Hose Systems. Design Manual. – 1st Edition. – Manual No. 2630-06-11-SBL/Ersmark – ENG (UK). – Sweden: Metso® Minerals (Sweden) AB, 2012. 62 p.
7. 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.
8. Weir minerals: Linatex Rubber Products. Hose Range [сайт]. – URL: <https://www.global.weir/product-catalogue/hoses-pipes-and-spools> (дата обращения: 27.10.2021). Текст: электронный.
9. 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.
10. An overview of burst, buckling, durability and corrosion analysis of lightweight FRP composite pipes and their applicability / M. Manoj Prabhakar, N. Rajini, Nadir Ayilimis at al. // Composite Structures. 2019. V. 230. Pap. № 111419.
11. 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.
12. Clive Maier. Polypropylene: The Definitive User's Guide and Data-book / Clive Maier, Theresa Calafut. Norwich, NY: Plastics Design Library a division of William Andrew inc, 1998. 432 p..
13. Devesh Tripathi. Practical Guide to Polypropylene / Devesh Tripathi. – Shawbury, U.K.: Rapra Technology Ltd.. 2002. 104 p.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Сержан, С.Л. Исследование влияния шероховатости стальных и полимерных труб на потери напора в условиях гидротранспорта хвостовой пульпы пульпопроводов / С.Л. Сержан, В.И. Скребнев, Д.В. Малеванный // Обогащение руд. 2023. №4. С. 41–49.
18. 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.
19. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. М: Машиностроение. 1964. 139 с.
20. Смолдырев А.Е., Архипова Л.А. Гидравлический напорный транспорт угля с высокими концентрациями // Уголь. 1963. №2.
21. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт. Изд. 3, перераб. и доп. М.: Недра.1980. 293 с.
22. Борохович А.И. и др. Некоторые вопросы износа, расчета и конструирования углесосно-насосного оборудования. Новокузнецк, 1968. 148 с.
23. N-M. Barkoula, J. Karger-Kocsis. Review. Processes and influencing parameters of solid particle erosion of polymers and their // Journal of materials science. 2002. № 37. P. 3807 – 3820.
24. Klaus Frisdrich. Erosive wear of polymers surfaces by steel ball blasting / Klaus Frisdrich // Journal of Materials Science. 1986. V. 21 (9). P. 3317–3332.