

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ ЛИТЫХ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ

А. Ю. Стовманенко, А. Н. Анушенков

Perspectives of using pipelines from polymer materials during transportation of cast packing filled mixtures

A. Yu. Stovmanenko, A. N. Anushenkov

The purpose of conducted research is the modernization of pipeline transport of cast packing filled mixtures, during underground development of mineral products. Due to the registered operation problems of steel pipelines in conditions underground workings on process sections of pipeline flushing system a decision to replace steel pipes on more fitting polymer pipes was proposed. In order to determine the more abrasion-resistant type of non-metallic pipelines a few samples of the more common types of plastic and polymer pipelines were selected, additionally comparative testing based on the wearability criterias were carried out. Research was made on the developed test facility of friction. The results of comparative studies of wearability of such polymer and plastic materials as fiber-glass, polyvinyl chloride, polyethylene of high density and polypropylene that were received with the help of experimental unit showed that pipelines from polyethylene of high-density PE-100 are the most abrasion resistant. The conducted comparative evaluation of cost of polyethylene pipes with operating pressure of up to 4–6 MPa showed that for today the unit cost of polyethylene pipes almost came close to the cost of steel pipes that are equal in strength and furthermore, considerably lower in cost than similar pipes from other polymer materials and plastic. This allows to assert that on underground loose items of the pipelines for transportation of cast stowing mixtures, where the operating pressure does not exceed 4–6 MPa, using polyethylene pipes PE100 will be more efficient than using steel pipes or pipes from other reviewed polymer or plastic materials.

Keywords: stowing complexes; stowing operations; pipeline transport; polymer pipes; plastic pipes.

Целью проводимых исследований является модернизация систем трубопроводного транспорта литых закладочных смесей при подземной разработке полезных ископаемых. В связи с отмеченными проблемами эксплуатации стальных трубопроводов в условиях подземных выработок, на технологических забойных участках трубопроводной закладочной системы предлагается заменить стальные трубы на полимерные. Для определения наиболее износостойкого вида неметаллических трубопроводов были выбраны несколько образцов самых распространенных типов пластиковых и полимерных трубопроводов и проведены их сравнительные испытания по критерию истираемости (изнашиваемости). Исследования проводились на разработанной испытательной установке трения. Полученные с помощью опытной установки результаты сравнительных исследований износостойкости таких полимерных и пластиковых материалов, как стеклопластик, поливинилхлорид, полиэтилен высокой плотности и полипропилен, показали, что наиболее износостойкими являются трубопроводы из полиэтилена высокой плотности ПЭ100. Произведенная сравнительная оценка стоимости полиэтиленовых труб с рабочим давлением до 4–6 МПа показала, что на сегодняшний день удельная стоимость полиэтиленовых труб практически сравнялась со стоимостью равнопрочных им стальных труб и при этом существенно ниже стоимости аналогичных труб из других полимерных материалов и пластика. Это позволяет утверждать, что на подземных забойных участках трубопровода для транспортирования литых закладочных смесей, где рабочее давление не превышает 4–6 МПа, применение полиэтиленовых труб ПЭ100 будет более эффективно, чем применение стальных труб или труб из других рассмотренных полимерных и пластиковых материалов.

Ключевые слова: закладочные комплексы; закладочные работы; трубопроводный транспорт; полимерные трубы; пластиковые трубы.

Введение

Трубопроводный транспорт получил наиболее широкое распространение при доставке закладочного материала в подземные горные выработки. При транспортировании закладочных материалов в виде литых твердеющих смесей (ЛТС) трубопроводным транспортом возникает ряд существенных трудностей, связанных с эксплуатацией трубопроводов из стальных труб. Одной из основных причин разгерметизации подземных трубопроводов является образование каверн, трещин и разрывов вследствие химической и электрокоррозии стальных труб [1, 2].

Закладочный трубопровод обычно состоит из участков, различаемых по расположению и продолжительности использования:

- *вертикальный трубопроводный став*, работает в условиях повышенного и пульсирующего давления смеси, вызванного большой скоростью движения ЛТС и значительной высотой вертикального шахтного ствола;
- *магистральные горизонтальные трубопроводы*, также характеризуются высокой скоростью движения и значительным давлением ЛТС, особенно на начальных участках;
- *забойные участки*, имеют непостоянное положение ввиду того, что регулярно необходимо внесение изменения в конструкцию трубопровода, связанное с постоянным перемещением фронта горных работ.

Эксплуатация трубопроводов забойных участков предполагает их частый монтаж и демонтаж, перевозку секций труб, наращивание или уменьшение длины трубопровода, установку пневмоврезок и т. д. [3], что приводит к значительным трудовозатратам, связанным еще и со сложностью применения средств механизации в стесненных условиях подземных горных выработок. Это ведет к увеличению себестоимости закладочных работ, простоям закладочного комплекса в момент внесения изменений в конструкцию трубопровода, а также к снижению общей производительности закладочных и основных горных работ.

В качестве одного из способов решения данных проблем предлагается применение в закладочной трубопроводной системе труб, изготовленных из полимерных или пластиковых материалов. Применение полимерных труб на вертикальном ставе и на начальном участке самотека на данный момент затруднительно, так как в период закупорки трубопроводов в них возникает значительное давление закладочной смеси. В то же время на забойных горизонтальных подземных участках закладочного трубопровода применение труб из полимерных или пластиковых труб вполне возможно.

Анализ характеристик современных полимерных и пластиковых труб

В настоящее время в трубопроводном транспорте возможно применение труб из разнообразных полимерных и пластиковых материалов. Эти трубы антикоррозионные, они обычно намного легче стальных труб (особенно футерованных), при этом обладают меньшим гидравлическим сопротивлением вследствие более гладкой внутренней поверхности. Далее приведены основные характеристики наиболее широко применяемых полимерных и пластиковых труб.

Стеклопластиковые трубы (ГОСТ Р 53201–2008) состоят из полиэфирных смол, усиленных стеклянными волокнами. Для изготовления труб в зависимости от назначения, места и способа прокладки могут применяться различные материалы: базальтовые, стеклянные или углеродные волокна, синтетические волокна из различных материалов, резинопласты и фторопласты различных марок, связующие материалы на базе различных смол и клеевых композиций. Высокие удельные показатели прочности и жесткости волокнистых композиционных материалов наряду с химической стойкостью, сравнительно малым весом и другими свойствами сделали эти материалы привлекательными для изготовления трубопроводов различного назначения. Стеклопластики характеризуются относительно высокой плотностью 1750–2100 кг/м³, имеют прочность 2–14 МПа и обладают высокой коррозионной стойкостью. Однако при нарушении сплошности внутренним гидростатическим давлением стеклопластиковые трубы могут терять герметичность при нагрузках более низких, чем механическая прочность стеклопластика.

ПВХ трубы (винилпластовые) (ГОСТ Р 51613–2000) изготавливают из поливинилхлоридной смолы, получаемой полимеризацией хлористого винила. Наряду с такими положительными физико-механическими



Рисунок 1. Примеры соединений полимерных труб. а – фланцевые фрикционные; б – фланцевые резьбовые; в – прессовые; г – с накидной гайкой; д – соединенные с помощью сварки.

свойствами, как высокий предел прочности при разрыве (4–15 МПа), винипласт обладает и отрицательными свойствами, такими как хрупкость и резкое изменение физико-механических свойств при длительном нагружении. Винипластовые трубы сохраняют механическую прочность в диапазоне температур от 10 до 90 °С, кроме того, удельная ударная вязкость снижается при надрезах и царапинах. При низких отрицательных температурах винипласт становится хрупким. В последние годы доля труб ПВХ в общем объеме производства постепенно уменьшается, уступая другим видам полимеров, прежде всего полипропилену и полиэтилену.

Полиэтиленовые трубы (ГОСТ Р 18599–2001) изготавливаются из гранулированного полиэтилена высокой и низкой плотности методом непрерывной экструзии на шнек-прессах. Полиэтиленовые трубы имеют ряд положительных свойств:

- малый объемный вес (полиэтилен высокой плотности имеет удельную массу около 960 кг/м³);
- сопротивление удару, значительно превышающее требования, предъявляемые к трубам при их транспортировке и монтаже;
- высокие физико-механические свойства полиэтилена позволяют получать трубы, обладающие исключительно высокой гибкостью;
- стойкость к воздействию коррозионных сред и к электрокоррозии, поскольку полиэтилен не является проводником электрического тока. Трубы из полиэтилена имеют гладкую поверхность. Низкое значение модуля упругости полиэтилена, а также его эластичность обеспечивают сохранение целостности трубопровода при вибрационных нагрузках. Полиэтиленовые трубы на сегодняшний день могут применяться для давлений до 1,2–10 МПа и позволяют эксплуатировать их при температурах от –60 до +60 °С.

Полипропиленовые трубы (ГОСТ Р 52134–2003), изготовленные из термопластичного полимера методом объединения (полимеризации) молекул производной газа этилена, имеют плотность 930 кг/м³, прочность 2–10 МПа, модуль упругости 800 МПа. Их общие свойства схожи со свойствами полиэтиленовых труб.

Наиболее часто полимерные трубы, которые применяются в трубопроводах с высоким давлением, армированы синтетическими нитями. Такие высоконапорные трубы применяются в промышленном масштабе для строительства трубопроводов с рабочим давлением до 4–6 МПа. Армированные трубы относятся к классу композиционных материалов на основе термопластичных матриц и подчиняются тем же законам, что и композиционные материалы. Регулируемое армирование при намотке обеспечивает заданную анизотропию физико-механических свойств материала как по направлению, так и по величине. При армировании полимеров меняется характер деформирования и разрушения, причем

прирост сопротивления термопластичных композиционных материалов внешней нагрузке может исчисляться сотнями процентов [4].

Для соединения полимерных трубопроводов разработано большое количество надежных разъемных и неразъемных соединений, используемых как для соединения нескольких полимерных труб, так и для стыковки полимерных труб с металлическими (рис. 1).

Сравнение характеристик различных видов трубопроводов (рис. 2, а) показывает, что при одинаковой толщине стенок полимерные трубопроводы в 5–7 раз легче, чем стальные. При обеспечении условия равнопрочности (равном возможном внутреннем давлении) необходимая толщина стенки у полимерных трубопроводов (даже у армированных) будет существенно больше, чем у стальных. Сравнительные расчеты параметров равнопрочных труб при давлении от 4 до 6 МПа (рис. 2, б), показали, что погонная масса 1 м трубопроводов из стеклопластика и ПВХ будет близка к стальным нефутерованным трубам, а трубы из полиэтилена и полипропилена в 1,5–2 раза легче вследствие их меньшего удельного веса.

Практика применения полимерных трубопроводов для транспортирования мелкодисперсных гидросмесей

В России полимерные трубы на сегодняшний день пока ограничено применяются в системах транспортирования мелкодисперсных материалов. Исследования и эксперименты использования полимерных труб в практике горно-обогатительного производства носят чаще всего практический характер.

Так, в работе [5] описывается промышленный эксперимент, проведенный в 2011 г. компанией ЕВРАЗ. Образцы труб разных типов диаметром 630 мм (стальной футерованной резиной и полиэтиленовой) были установлены в действующую систему самотечного транспортирования хвостовой пульпы. Условия эксплуатации опытного участка были следующими: транспортируемая среда – хвостовая пульпа обогатительного производства; насыпная плотность – 1,9 т/м³; рабочее давление – 10 кг/см². Испытания длились два года. За это время представители ЕВРАЗ произвели 7 официальных мониторингов состояния экспериментальных шламопроводов с демонтажом опытных отрезков и инструментальными замерами. В результате проведенных испытаний был сделан вывод о целесообразности применения в промышленных масштабах полиэтиленовых труб ПЭ100 для транспортировки абразивной среды. Средний износ составил 4,6 мм при толщине стенки 37,4 мм.

В работе [6] описан практический эксперимент в условиях гидро-транспортного комплекса «Вольногорский горно-металлургический комбинат» (ВГМК), где в апреле 2006 г. был введен в эксплуатацию опытный участок полиэтиленовой трубы длиной 160 м, смонтированный на рабочем трубопроводе. Была применена труба ПЭ 80 SDR 21 диаметром

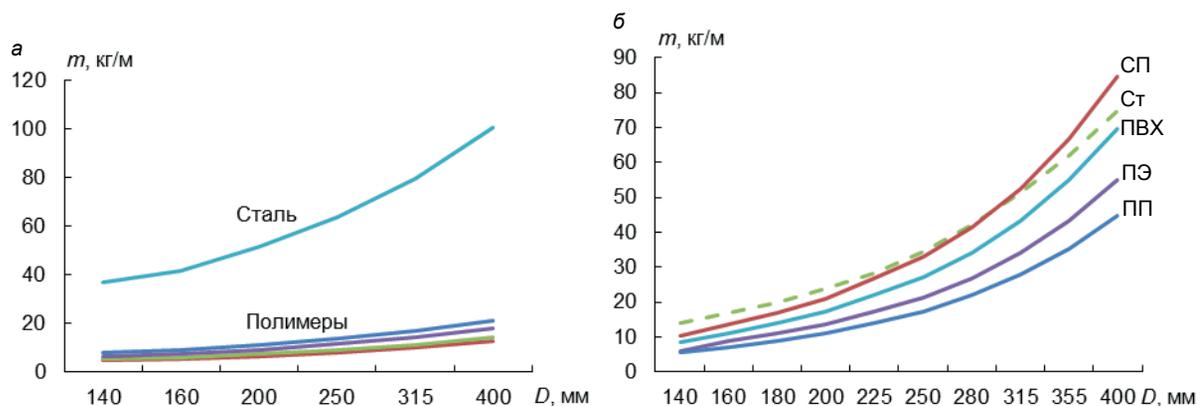


Рисунок 2. Сравнение значения массы 1 пог. м стальных и полимерных труб. а – равнотолщинных; б – равнопрочных. Сравнение паспортных характеристик трубопроводов диаметром 140–400 мм из стеклопластика (СП), поливинилхлорида (ПВХ), полипропилена (ПП), полиэтилена (ПЭ) и стали (Ст).

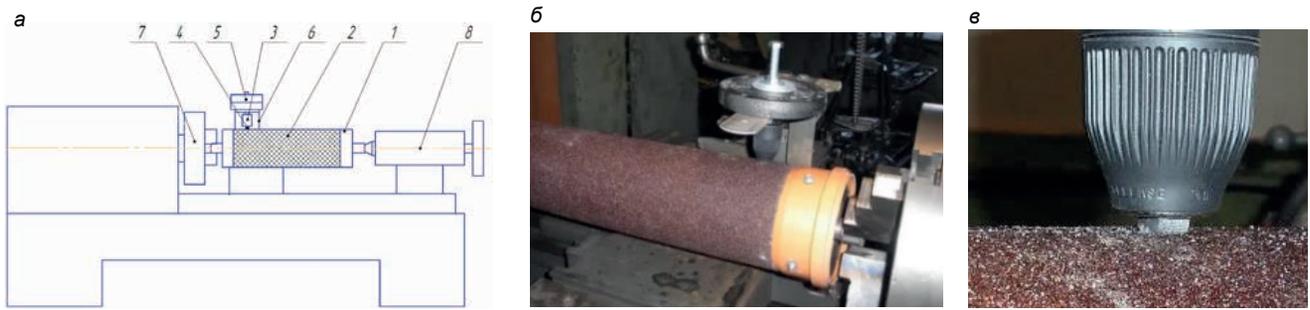


Рисунок 3. Установка для исследования полимерных труб на износостойкость. а – схема установки; б – конструкция установки; в – патрон-держатель с исследуемым образцом.

630 мм с толщиной стенки 30 мм, рассчитанная на рабочее давление до 6 атм. Трубопровод отработал более 3500 ч, было подано более 2 млн м³ рудных песков. Плотность пульпы в зависимости от режима работы гидротранспортного комплекса изменялась от 1,01 до 1,22 т/м³. При осмотре внутренняя часть трубы была практически гладкая, небольшая шероховатость заметна только в нижней части трубы в пределах от 200 до 300 мм по дуге. Замер толщины труб ультразвуковым переносным прибором показал износ не более 1,5 мм.

Значительный опыт использования полимерных трубопроводов также накоплен в нефтегазовой промышленности [7] и в сфере ЖКХ.

Проведение исследования абразивной износостойкости полимерных трубопроводов

Вопросы сравнительной оценки износостойкости полимерных труб до настоящего времени остаются недостаточно освещенными, что в свою очередь затрудняет обоснование применимости полимерных трубопроводов в практике горного производства.

В работе [8] описывается разработанный метод испытаний труб на износ, где испытательные образцы труб длиной 1 м наклонялись вперед и назад с частотой 21 цикл/мин. Объем абразивного материала (кварцевый песок с размерами частиц 0–3 мм) в воде составлял 46 %. Результирующая скорость потока составляла 0,36 м/с. Используя этот метод, установили, что полиэтиленовые трубы имели износ до 0,3 мм после 400 000 циклов. Указывается, что полиэтиленовые трубы имеют хорошую износостойкость по сравнению с трубами из железобетона, алюминия и стали. Сообщается, что в шламопроводах ими целесообразно заменять металлические трубы.

Для решения задачи рационального выбора материала полимерных и пластмассовых трубопроводов для транспортирования литых закладочных смесей, авторами были проведены сравнительные исследования на износостойкость материалов труб из наиболее известных полимерных и пластических материалов.

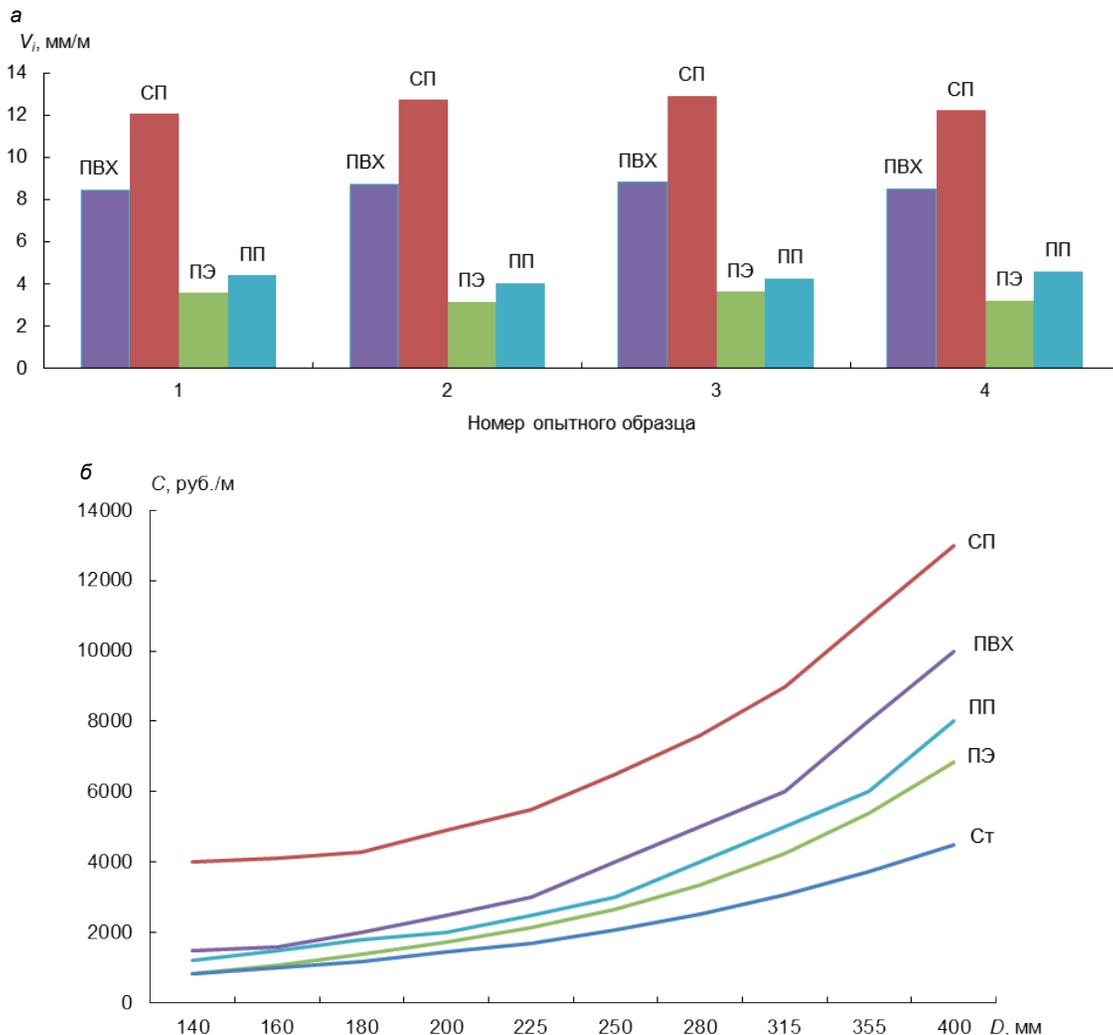


Рисунок 4. Сравнение характеристик пластиковых и полимерных труб. а – по величине опытного показателя истирания V_i ; б – по стоимости 1 пог. м труб одинаковой прочности.

Работа проводилась согласно методике испытания пластмассовых изделий на истирание, приведенной в ГОСТ 11012–69. Для испытания пластмасс на абразивный износ применялась разработанная испытательная машина, схема которой приведена на рис. 3.

Испытательная машина состоит из вращающегося цилиндра 1, диаметром 160 мм, предназначенного для закрепления на нем шлифовальной шкурки 2, патрона-держателя 3 с закрепленным в нем образцом 4, грузов 5, опорной шарнирной штанги 6. Барабан устанавливается в типовые зажимные устройства токарного станка. Один конец вала барабана зажимался с усилием, достаточным для передачи крутящего момента в токарный трехкулачковый патрон 7, а второй устанавливался в задний центр 8.

Длина рабочей части цилиндра составляла 0,7 м, что обеспечивало путь истирания образцов по винтовой линии не менее 30 м. Нагружающее устройство, согласно ГОСТ 11012–69, обеспечивало приложение регулируемой нагрузки перпендикулярно истирающей поверхности.

В качестве механизма, обеспечивающего равномерное перемещение патрона-держателя вдоль образующей цилиндра (на расстоянии 10 мм за время одного оборота) был использован стандартный механизм подачи токарного станка 16К20. Конструкция барабана обеспечивала плотное закрепление шлифовальной шкурки на его поверхности без вздутий и перекосов. Для испытания применялась шлифовальная шкурка по ГОСТ 344–85 в рулоне. В качестве образцов пластмасс для испытания использовались бруски квадратного сечения 10 × 10 мм высотой 15 мм. Образцы для испытания выпиливались из труб исследуемого материала. Для исследований брались трубы из винилпаста, полипропилена, полиэтилена ПЭ100 и фторопласта-4. Эталон из металлического цинка чистоты 99,9 % по ГОСТ 2999–75 служил для тарировки истирающей способности применяемой шкурки. Он имел форму и размеры, как у образцов.

Испытания проводили по методике, описанной в ГОСТ 11012–69, с усилием 19,62 Н (2 кгс). Испытание каждого образца продолжалось в течение одного и того же заранее заданного пути истирания (примерно 10–11 м). Истирание образцов в соответствии с требованиями ГОСТа проводилось только по свежей поверхности шкурки после установки взвешенного образца в патрон-держатель машины в том же положении, что и до притирки, при установленной внешней нагрузке. На истираемой поверхности образца не допускались раковин, сколов, пор, заусенцев, вздутий и других дефектов, видимых невооруженным глазом. Окружная скорость поверхности цилиндра составляла 0,3 м/с, что соответствовало частоте вращения шпинделя станка 0,6 об/с (36 об/мин).

Данные опытов обрабатывались с помощью математической статистики. Показатель истирания V_i , мм³/м, каждого образца пластмассы рассчитывался по формуле, рекомендованной ГОСТ 11012–69:

$$V_i = K \frac{G_0 - G_1}{\rho L} 1000,$$

где K – коэффициент пересчета, характеризующий истирающую способность неэталонного рулона шкурки; G_0 – масса испытуемого образца до истирания, г; G_1 – масса испытуемого образца после истирания, г; ρ – плотность образца, г/мм³; L – длина пути истирания, м.

За результат испытания на истирание (износ) принималось среднее арифметическое значение полученных показателей истирания испытываемых образцов одного вида. Окончательные данные испытания для всех материалов (по 4 образцам) приведены на рис. 4, а. Для образцов каждого типа опытные средние значения показателя истирания V_i составили: из стеклопластика (СП) – 12,46, мм³/м; из винила (ПВХ) – 8,63, мм³/м; из полипропилена (ПП) – 4,31, мм³/м; из полиэтилена (ПЭ) – 3,44, мм³/м.

По опытным данным можно сделать вывод, что по истиранию (абразивному износу) для трубопроводного транспорта закладочных смесей лучше всего подходят трубы из полиэтилена ($V_i = 3,44$ мм³/м). На рис. 4, б приведены сравнительные данные по стоимости 1 пог. м труб из пластических масс.

Выводы

Таким образом, учитывая приведенные сведения о физико-механических свойствах и более высокой износостойкости полиэтиленовых труб, а также то, что стоимость полиэтиленовых труб среднего диаметра с рабочим давлением до 4–6 МПа на сегодняшний день практически

сравнилась со стоимостью равнопрочных им стальных труб (рис. 4, б), можно утверждать, что для транспортирования литых закладочных смесей на забойных участках закладочных трубопроводов, там, где расчетное рабочее давление смеси не превышает 4–6 МПа, применение полиэтиленовых труб высокой плотности будет более эффективно, чем применение стальных труб или труб из других рассмотренных полимерных и пластиковых материалов.

Полиэтиленовые трубы легкие, достаточно прочные, гибкие, коррозионно- и износостойкие и, следовательно, более эффективны для прокладки в стесненных условиях подземных горных выработок. Трубы из полиэтилена значительно облегчат транспортные и монтажные работы на закладочных трубопроводах. Уменьшение гидравлического сопротивления вследствие меньшей шероховатости внутренних стенок полиэтиленовых труб увеличит возможное наибольшее горизонтальное расстояние подачи закладочных смесей, что в итоге обеспечит лучшие условия работы всего закладочного транспортного комплекса, повысит скорость ведения закладочных работ, долговечность эксплуатации трубопроводов и в конечном итоге приведет к снижению общей себестоимости закладки подземных горных выработок.

ЛИТЕРАТУРА

- Кузнецов М. В., Новоселов В. Ф., Тугунов П. И. и др. Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров. М.: Недра, 1992. 238 с.
- Лейзерович С. Г., Ельников В. Н. Исследование процесса заполнения хвостами обогащения верхней части подземных камер и характера износа вертикального пульповода // ГИАБ. 2006. № 4. С. 209–214.
- Хайрутдинов М.М. Подземная геотехнология с закладкой выработанного пространства. Недостатки и возможности совершенствования // ГИАБ. 2009. № 1. С. 240–250.
- Пепеляев В. С. Полиэтиленовые армированные трубы высокого давления // Сфера. Нефть и газ. 2011. № 3. С. 176–178.
- Муравин И. А., Кривоноженко Н. Н. Износостойкость полиэтиленовых труб доказана практикой // Полиэтиленовые трубы. Украина. 2013. № 4. С. 51–54.
- Шурыгин В. Д., Семенов Е. В. Износ полиэтиленовых труб при гидротранспорте исходных песков Малышевского месторождения // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. 2007. № 6. С. 90–93.
- Мустафанов Ф. М. Промысловые трубопроводы и оборудование. М.: Недра, 2004. 662 с.
- Kirschmer O. Problems of Abrasion in Pipes // Steinzeugin Formationen. 1988. № 1. P. 3–13.

REFERENCES

- Kuznetsov M. V., Novoselov V. F., Tugunov P. I., Kotov V. F. 1992, *Protivokorroziynaya zaschita truboprovodov i rezervuarov* [Anti-corrosion protection of pipelines and tanks]. Moscow, 238 p.
- Leizerovich S. G., El'nikov V. N. 2006, *Issledovaniye protsessy zapolneniya khvostami obogascheniya verkhnei chasti podzemnykh kamer i kharaktera iznosa vertikal'nogo pul'povoda* [Research of the process of filling by rewash discard of upper part of underground chambers and the nature of wear and tear of vertical pulp line]. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin]. pp. 209–214.
- Khairutdinov M. M. 2008, *Podzemnaya geotekhnologiya s zakladkoi vyrabotannogo prostranstva. Nedostatki i vozmozhnosti sovershenstvovaniya* [Underground geotechnology with goave packing. Problems and capabilities of modernization]. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin]. pp. 240–250.
- Pepelyaev V. S. 2011, *Polietilenovyye armirovannyye truby vysokogo davleniya* [Polyethylene reinforced pipes of high pressure]. *Sfera. Neft' i gaz* [Sphere. Oil and Gas]. No. 3. pp. 176–178.
- Muravin I. A., Krivonozhenko N. N. 2013, *Iznosostoykost' polietilenovykh trub dokazana praktikoi* [Abrasion resistance of polyethylene pipes proven in use]. *Polietilenovyye truby* [Polyethylene pipes]. No. 4. pp. 51–54.
- Shurygin V. D., Semenenko E. V. 2007, *Iznos polietilenovykh trub pri gidrotransporte iskhodnykh peskov Malyshevskogo mestorozhdeniya* [Abrasive resistance of polyethylene pipes during hydrotransport of initial sands of Malyshevskiy deposit]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Metal Mining industry]. No. 6. pp. 90–93.
- Mustafanov F. M. 2004, *Promyslovyye truboprovody i oborudovanie* [Field pipelines and equipment]. Moscow, 662 p.
- Kirschmer O. Problems of Abrasion in Pipes, *Steinzeugin Formationen*, 1988, No. 1, pp. 3–13.

Андрей Юрьевич Стовманенко,
s600122@yandex.ru
Александр Николаевич Анушенков,
sfu-prm@ya.ru
Сибирский федеральный университет
Россия, Красноярск, просп. Свободный, 79

Andrey Yur'evich Stovmanenko,
s600122@yandex.ru
Aleksandr Nikolaevich Anushenkov,
sfu-prm@ya.ru
Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russia