

Аналогичный качественный прогноз наступления критической ситуации (допустимой упругопластической деформации, равной $\varepsilon = 2,5\%$ в области концентрации напряжений) в металле ЗТВ корневых швов сварных соединений при достижении действующих напряжений $\sigma_{нц}$ и среднем значении количества остановок и пусков примерно 100 (150) циклов в год и тех же уровнях роста давлений от 4,59 до 7,14 МПа произойдет в среднем примерно через 55,5 (54,0); 45,2 (43,7); 37,8 (36,0); 30,0 (28,5) лет соответственно.

Выводы

Обобщение этих данных показывает, что долговечность труб ППМН через р. Лена соответствует общепринятым проектным срокам эксплуатации подводных переходов нефтепроводов, равным 30 годам. Но в зависимости от воздействия нефункциональных нагрузок (заторможенных и паводковых явлений, наводнений, изменений профиля дна реки и дна траншеи, а также температуры среды, остаточных усилий от технологического процесса протаскивания дюкера, выталкивающих сил барража склоновых грунтовых вод и т.д.) сроки безопасной эксплуатации ППМН через р. Лена могут значительно сократиться.

Литература и источники

1. Гутман Э.М., Амосов Б.В., Худяков М.А. Влияние коррозионной усталости материала нефтепроводов на их надежность // Нефтяное хозяйство. 1977. № 8. С. 59–62.
2. Илюшин Н.В., Лейфрид А.В., Валеев А.С., Ривкин П.Р. Коррозия внутренней поверхности

нефтеборных промысловых нефтепроводов // Нефтяное хозяйство. 2002. № 3. С.85–86.

3. Гусенков А.П. Прочность при изотермическом и неизотермическом малоцикловом нагружении. М.: Наука, 1979. 294 с.

4. Гуселков А.П., Аустов А.С. Исследование малоцикловой прочности труб большого диаметра магистральных газо- и нефтепроводов // Машиностроение. 1975. № 3. С.61–71.

5. Навроцкий Д.И. Прочность сварных соединений. М.:Л.: Машгиз, 1961. 176 с.

6. Макаров И.И., Емельянова Т.М. Концентрация напряжений в сварных стыковых соединениях со смещением кромок // Труды МВТУ им. Баумана, № 133. М.: Машиностроение, 1969, С. 29–41.

7. Труфяков В.И., Осауленко Л.Л., Корягин Ю.А. Концентрация напряжений в сварных стыковых соединениях // Автоматическая сварка. 1966. № 10. С. 42–49.

8. СНиП-11-45-75. Строительные нормы и правила, нормы проектирования, магистральные трубопроводы. М., 1975. 62 с.

9. Фокин М.Ф., Гусенков А.П., Аустов А.С. Оценка циклической долговечности сварных труб магистральных нефте- и продуктопроводов //Машиноведение. 1984. № 6. С. 49–55.

10. Manson S.S. Fatigue A Complex-Some simple Approximations. Experimental Mech., 1965. V. 5, № 7.

11. Отчет по ГК №018-2009 «Экологическая безопасность перехода нефтепровода ВСТО через реку Лена с учетом оценки надежности сварных соединений подводного перехода магистрального нефтепровода». Якутск, 2009.

Поступила в редакцию 25.10.2016

УДК 622.685; 620.178.169

Исследование стойкости к гидроабразивному износу стеклопластиковых труб с полиуретановым покрытием

К.П. Антоев^{*,**}, С.Н. Попов^{*}

^{*} Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск

^{**}Северо-Восточный федеральный университет им.М.К. Аммосова, г. Якутск

Приведены результаты исследования стойкости к гидроабразивному воздействию стеклопластиковых труб, в том числе с полиуретановым покрытием, которые используются при гидротранспор-

АНТОЕВ Карл Петрович – инженер, аспирант, antoevkr@gmail.com; ПОПОВ Савва Николаевич – д.т.н., проф., зам. директора.

те горных пород (пульпопроводы). Гидроабразивное изнашивание проводилось на устройстве, разработанном при участии авторов. Разработанное устройство позволяет исследовать износостойкость материалов и покрытий при моделировании течения гидроабразивной среды. В качестве объектов для исследования были выбраны промышленные образцы стеклопластиковых труб с полиуретановым покрытием и без покрытия. Труба с покрытием состоит из нескольких слоев: внутренний слой из чистого полиуретана, затем идет слой полиуретана, армированный стекловолокном, и внешний стеклопластиковый слой. Проведен сравнительный анализ интенсивности и характера изнашивания стеклопластиковых труб с покрытием и без. Установлено, что стойкость к гидроабразивному износу стеклопластиковой трубы без покрытия на порядок выше, чем у труб с полиуретановым покрытием. Труба с полиуретановым покрытием сопротивляется гидроабразивному износу до тех пор, пока не сотрется тонкий слой чистого полиуретана, а слой полиуретана, армированный ровингом, имеет низкую стойкость к гидроабразивному износу.

Ключевые слова: гидроабразивный износ, гидротранспортные системы, стеклопластик, полиуретан, износостойкие покрытия, линейный износ.

Study of Resistance to Hydroabrasive Wear of GRP Pipes with a Polyurethane Coating

K.P. Antoev^{*,**}, S.N. Popov^{*}

^{*}Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Yakutsk

^{**}M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk

The results of a study of resistance to hydroabrasive effect of GRP pipes with a polyurethane coating that are used in a hydraulic transport of rocks (slurry pipelines) are presented. Hydro-abrasive wear was carried out on a device designed by the authors. The device allows to explore the durability of materials and coatings in the modeling of flow of hydro-abrasive environment. Industrial GRP pipes coated with polyurethane and uncoated were tested. A pipe with a coating consists of several layers. The inner layer is made of pure polyurethane, it is followed by a layer of polyurethane reinforced with roving and fiberglass is an outer layer. Another pipe consists of uncoated glass fiber. The inner and outer diameters of the pipes are the same. A comparative analysis of the intensity and character of the wear of GRP pipes with coating and without is carried out. It is established that the resistance to hydroabrasive wear of GRP pipes without coating is much higher than that of pipes with polyurethane coating. A pipe with a polyurethane coating resists to hydroabrasive wear until a layer of pure polyurethane is erased. And a layer of polyurethane reinforced with roving has a low resistance to a hydroabrasive wear.

Key words: hydroabrasive wear, hydro-transport system, glass reinforced plastic, polyurethane, wear resistant coating, linear wear.

Введение

Для интенсификации добычи рудных полезных ископаемых в горнодобывающих предприятиях применяют гидротранспорт. Гидротранспортные системы в основном используются для доставки горной массы руд и удаления отходов. В связи с высокой абразивностью транспортируемой гидросмеси одной из наиболее важных проблем является гидроабразивный износ внутренних стенок пульпопроводов. Сущность гидроабразивного износа заключается в совместном воздействии на внутреннюю поверхность труб твердых частиц и несущей жидкости, в результате которого происходят эрозионные процессы. Интенсивность изнашивания, определяющая долговечность трубопровода, в первую очередь, зависит от свойств материала трубы, а

также от характеристик гидроабразивной среды и скорости её течения [1,2].

До недавнего времени для транспортировки пульпы использовались стальные трубопроводы. Стальные трубы имеют низкое сопротивление к гидроабразивному воздействию, что в значительной мере снижает ресурс трубопроводов. На сегодняшний день известно огромное количество полимерных материалов, которые могли бы использоваться при строительстве пульпопроводов. Выбор конкретных типов материалов должен при этом осуществляться по показателям износостойкости [3]. Износостойкость полимерных материалов при абразивном воздействию в России определяется единственным методом по ГОСТ 11012-69 [4], суть которого заключается в истирании образцов шлифо-

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ К ГИДРОАБРАЗИВНОМУ ИЗНОСУ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ТРУБ

вальной шкуркой. При эксплуатации полимерных труб в пульпопроводах трубы подвергаются гидроабразивному износу, характер воздействия которого отличается от испытания образцов материала труб по ГОСТ 11012-69. Наиболее показательным методом по оценке гидроабразивного истирания внутренней поверхности труб является метод определения износостойкости внутренней поверхности стеклопластиковых труб по ГОСТ Р 55877-2013 [5]. Этот подход основан на дармштадском методе DIN EN 295-3:2012-03 [6], где отрезки труб длиной 1 м заполняются гидроабразивной средой и подвергаются качанию с частотой 10 качаний в минуту, тем самым вызывая истирание внутренней поверхности трубы при перемещении абразивных частиц. Эта технология определения гидроабразивного износа применима только для труб водоснабжения, т.к. условия испытаний для пульпопроводов слишком мягкие, при испытании полимерных труб интенсивность износа мизерная, например, после 100 000 циклов испытаний полипропиленовой трубы износ составил 0,064 мм [7], исходя из этого, таким гидроабразивным износом можно пренебречь.

Целью данной работы является определение износостойкости стеклопластиковых материалов и покрытий пульпопроводов, работающих в условиях интенсивного гидроабразивного воздействия.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов для исследования были выбраны промышленные образцы стеклопластиковых труб с полиуретановым покрытием и без покрытия на эпоксидном связующем, предназначенные для транспортировки агрессивных, высокоабразивных сред и гидросмесей. Внутренний диаметр 100 мм, высота образцов 50 мм. Труба с покрытием состоит из нескольких слоев: внутренний слой из чистого полиуретана толщиной 0,2 мм, затем идет слой полиуретана, армированный стеклоровингом толщиной 1,8 мм, и внешний стеклопластиковый слой на эпоксидном связующем.

Исследования проводились на трех типах трубных образцов:

1. СП труба – труба из стеклопластика на эпоксидном связующем;

2. СП ППУ труба – труба с внешним слоем из стеклопластика на эпоксидном связующем, промежуточным слоем из армированного стеклоровингом полиуретана и внутренним полиуретановым покрытием;

3. СП ПУ – труба с удаленным полиуретановым покрытием для определения износостойкости полиуретана, армированного ровингом (1,8 мм).

Испытуемые материалы характеризуются следующими показателями (таблица).

Физико-механические свойства полиуретанового покрытия (ЭП СКУ ПТ-74) и стеклопластика (ГОСТ Р 55068-2012 [8])

Показатель	Полиуретан ЭП СКУ ПТ-74	Стеклопластик
Условная прочность при растяжении, МПа	5	190–460
Твердость по Шору А, усл. ед.	55–65	60–70
Плотность, г/см ³	1,1–1,2	1,8–2,1
Модуль упругости, МПа	15000–35000	29–67

Испытания проводились на разработанном устройстве, описанном в работе [9], при следующих условиях:

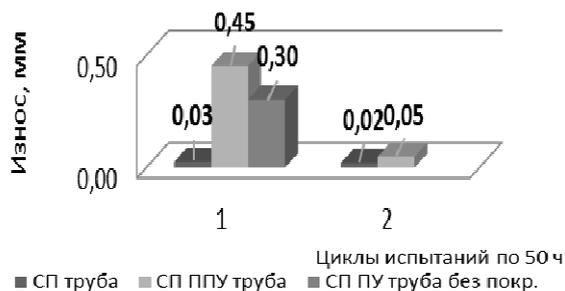
- гидроабразивная среда – 40 мас. % горного песка (размеры частиц 0,3 – 0,5 мм) и 60 мас. % воды;
- скорость потока гидроабразивной среды на поверхности трубы – 1,3 м/с;
- зазор между стенкой труб и лопастями смесителя – 5 мм;
- время одного цикла испытания – 50 ч.

После каждого цикла испытаний образец высушивался при 60 °С в течение 1 ч, термостатировался при комнатной температуре (23 °С) в течение 30 мин. Линейный износ (изменение толщины) определялся микрометром (ГОСТ 6507-90 [10]) в 12 точках, равномерно распределенных по периметру и высоте образца. Измерения износа проводились циклично через каждые 50 ч испытаний.

Результаты и обсуждение

Исследование гидроабразивного изнашивания стеклопластиковых труб позволило получить данные интенсивности гидроабразивного износа, которые приведены на рисунке.

Из рисунка видно, что СП труба имеет наименьший износ в течение обоих циклов эксперимента, средний износ трубы без покрытия после первого цикла (50 ч) составил 0,03 мм, после второго цикла труба изнашивалась на



Износ труб при воздействии гидроабразивной среды

0,02 мм, т.е. средняя интенсивность изнашивания составила 0,05 мм за 100 ч воздействия гидроабразивной среды со скоростью 1,3 м/с.

Средний износ трубы с покрытием СП ППУ после первого цикла составил 0,45 мм, интенсивный износ наблюдался в точках контроля 4.1 (1,47 мм); 4.2 (1,97 мм); 4.3 (1,86 мм). Причиной интенсивного локального износа, по мнению авторов, явился отрыв полиуретанового покрытия от поверхности стекловолокна из-за низкого уровня адгезии. При этом слой армированного стекловолокном полиуретана изнашивался практически до поверхности стеклопластика на эпоксидном связующем.

После второго цикла испытаний СП ПУ труба изнашивалась на 0,05 мм. Износ уменьшился за счет того, что в точках контроля 4.1; 4.2; 4.3 материал поверхности не полиуретан, армированный ровингом, а более износостойкий стеклопластик на эпоксидном связующем. Суммарный средний износ после двух циклов испытаний составил 0,5 мм, что на порядок выше, чем у СП трубы.

Для определения износостойкости полиуретана, армированного ровингом, с внутренней поверхности трубы был срезан слой толщиной 1,5 мм. Из рисунка видно, что средний износ СП ПУ трубы без покрытия в течение первого цикла составил 0,3 мм, при этом слой полиуретана, армированный ровингом, полностью стерся с внутренней поверхности стеклопластиковой трубы и дальнейшее продолжение испытаний было прекращено.

В заключение отметим, что стойкость к гидроабразивному износу стеклопластиковых труб значительно выше, чем у модифицированных полиуретановым покрытием. Несмотря на высокую износостойкость чистого полиуретана, его армировка стекловолокном приводит к резкому ухудшению абразивостойкости. Возможной причиной является низкая адгезия полиуретана к стекловолокну и его отрыв от ровинга при воздействии частиц абразивной среды.

Литература и источники

1. Кузнецов В.Л., Кузнецов И.В., Очиллов Р.А. Ремонт крупных осевых и центробежных насосов: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1996. 240 с.
2. Поветкин В.В., Лем В.П. Гидроабразивный износ грунтовых и песковых насосов // Вестник КазНТУ. Алматы, 2008. №6. С.51–54.
3. Бранзбург А.Б., Коверига В.В., Пуце. Пульпопроводы: от дармштадтского метода к дармштадтскому ресурсу // Полимерные трубы. 2015. № 1. С. 52–53.
4. ГОСТ 11012-69. Пластмассы. Метод испытания на абразивный износ. М.: Издательство стандартов, 1989.
5. ГОСТ Р 55877-2013. Трубы и детали трубопроводов из реактопластов, армированных стекловолокном. Методы испытаний. Определение износостойкости внутренней поверхности. М.: Стандартинформ, 2014.
6. DIN EN 295-3:2012-03. Vitriified clay pipe systems for drains and sewers. Part 3: Test methods.
7. Stein D., Brauer A. Abrasion resistance / Guide to selection of tube-based materials for municipal drainage systems. Bochum, 06 December 2004. 12 p.
8. ГОСТ Р 55068-2012. Трубы и детали трубопроводов из композитных материалов на основе эпоксидных связующих, армированных стекло- и базальтоволокнами. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014.
9. Антонец К.П., Заровняев Б.Н., Христофорова А.А. Исследование стойкости стеклопластиковых труб к гидроабразивному износу // Материалы докладов VIII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные науки сегодня» – н.-и.ц. «Академический», 2016. С. 72–77.
10. ГОСТ 6507-90. Микрометры. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1990.

Поступила в редакцию 05.10.2016