

На правах рукописи

САВВИНА Александра Витальевна

**ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АРМИРОВАННЫХ
ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск

Научный руководитель: **Попов Савва Николаевич**
доктор технических наук, профессор,
Институт проблем нефти и газа СО РАН

Официальные оппоненты: **Москвичев Владимир Викторович**
доктор технических наук, профессор,
директор Красноярского филиала
Института вычислительных технологий СО РАН

Прохоров Валерий Афанасьевич
доктор технических наук, профессор,
Северо-Восточный федеральный университет
им. М.К. Аммосова,
Инженерно-технический институт,
заведующий кафедрой прикладной механики

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт физики прочности
и материаловедения Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Томск

Защита состоится «__» _____ 2017 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 003.054.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 15. Факс: (383)-333-16-12, e-mail: kurguzov@hydro.nsc.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, www.hydro.nsc.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук

В.Д. Кургузов

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В настоящее время одной из первоочередных задач для нефтегазовой отрасли является повышение надежности и долговечности газораспределительных сетей давлением до 1,2 МПа за счет внедрения полимерных труб. Для решения этой задачи изучаются возможности использования армированных полимерных труб (АПТ). Главным препятствием на пути внедрения полимерных труб в практику строительства и эксплуатации газопроводов высокого давления в регионах холодного климата и многолетнемерзлых грунтов является неисследованность механического поведения изделий в этих условиях и, как следствие, несовершенство соответствующей нормативной базы.

Оценка применимости материала для ПЭ трубопровода базируется на рассмотрении трех ключевых параметров: длительной прочности (MRS), стойкости к медленному распространению трещин (SCG) и стойкости к быстрому распространению трещин (RCP). Что касается ПЭ газопроводов, то учитывая необходимость прокладки трубы в грунте, определяющим является параметр RCP. Условия холодного климата и воздействие многолетнемерзлого грунта определяют актуальность задачи установления регламентных требований по допустимой нижней эксплуатационной температуре ПЭ газопровода и, соответственно, минимально приемлемой глубине заложения, определяющей существенную долю затрат в общей стоимости сооружения.

Целью работы является обоснование возможности сооружения подземных газопроводов из армированных полиэтиленовых труб в условиях холодного климата.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

- ▶ Исследование физико-механических свойств материала АПТ при температурах от 20⁰С до минус 60⁰С;
- ▶ Определение низкотемпературных пределов, ограничивающих применение АПТ;
- ▶ Разработка и обоснование более доступного метода определения температур, при которых возможно распространение быстрых трещин;
- ▶ Проведение мониторинга опытно-промышленного газопровода подземного заложения из армированных полиэтиленовых труб;
- ▶ Исследование деформационно-прочностных свойств АПТ после продолжительной эксплуатации в условиях опытно-промышленного участка газопровода.

Связь работы с крупными научными программами: Программа 5.2.1. Создание нового поколения материалов различного функционального назначения для использования в технике, в медицине, в химической технологии. Химия наночастиц и нанообъектов. Проект 5.2.1.1. Создание и прогнозирование изменений физико-механических свойств перспективных полимерных композиционных материалов для использования в технологических системах и технике нефтегазовой отрасли регионов холодного климата. (2007 – 2009гг.)

Программа V.45.2. Химические проблемы создания новых функциональных материалов, наноструктурированных покрытий и композитов для различных областей применения. Проект V.45.2.1. Исследование физико-механических особенностей формирования морозостойких композиционных материалов и прогнозирование их долговечности в условиях холодного климата. (2013-2016гг.)

Научная новизна работы состоит в следующем:

- Выявлены зависимости кратковременной прочности армированных полиэтиленовых труб при низких температурах от скорости деформирования и конструктивных особенностей трубы, заключающиеся в повышении температуры вязко-хрупкого перехода при повышении скорости деформирования и формировании быстрой трещины в трубах с технологическим (адгезионным) средним слоем из полиэтилена низкой плотности, содержащим армирующее волокно.
- Предложен способ оперативного определения температур возможного возникновения быстрых трещин в полиэтиленах различных марок, основанный на создании хрупкого слоя, инициирующего рост быстрой трещины. Показано, что результаты, полученные с использованием разработанного способа, соответствуют результатам стандартизованных методик.
- Впервые на основании результатов исследований образцов-свидетелей показана эффективность применения армированных полиэтиленовых труб в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Установлено, что в зависимости от геокриологических условий глубина заложения газопроводов может быть существенно уменьшена.

Практическая значимость результатов работы:

- ▶ Определены температурные ограничения эксплуатации многослойных армированных труб производства ОАО «Запсибтехнология»;
- ▶ Предложен метод определения допустимых величин нижней температурной границы эксплуатации полиэтиленовых труб, применение которого значительно сокращает продолжительность экспериментов и затраты на их проведение. Получен патент РФ на изобретение №2574735.
- ▶ Построен опытный участок газопровода, в течение 4 лет проведены мониторинговые исследования.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается применением современных методов испытаний, характеризующихся высоким уровнем точности измерений, и соответствием результатов опытно-промышленных и лабораторных испытаний.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- Совокупность результатов физико-механических испытаний модельных образцов армированных полиэтиленовых труб в диапазоне климатических температур, показывающая применимость и адекватность стандартизованных методик для исследования прочностных свойств многослойных труб.

- Механизм и условия возникновения быстрых трещин в армированных полиэтиленовых трубах различной конструкции, заключающиеся в зарождении трещины в адгезионно связанном слое и ее распространении в материал внешнего либо внутреннего слоя, что приводит к хрупкому разрушению многослойной трубы в целом.
- Способ оперативного определения температуры возникновения быстрой трещины в полиэтиленах различных марок, заключающийся в создании хрупкого слоя, который инициирует зарождение хрупкой трещины и ее распространение в материал заданной марки.
- Результаты мониторинга подземного газопровода из армированной полиэтиленовой трубы, заложенного в районе распространения многолетнемерзлых грунтов, показывающие перспективность применения армированных полиэтиленовых труб для газораспределительных сетей давлением до 1,2МПа в условиях Севера.

Апробация работы. Основные результаты работы и отдельные положения диссертации докладывались и обсуждались на Международной конференции «Проблемы и перспективы комплексного освоения месторождений полезных ископаемых криолитозоны» (г. Якутск, 2005); III, IV Евразийском симпозиуме по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата «EURASTRENCOLD-2006, 2013» (г.Якутск, 2006, 2013); Первом инновационном форуме РС(Я) «Научно-инновационный потенциал Республики Саха (Якутия)» (г.Якутск, 2006); Международной научно-технической конференции «Полимерные композиты и трибология. Поликомтриб - 2007» (г. Гомель, 2007); IV Всероссийском симпозиуме по проблеме «Механика композиционных материалов и конструкций» (г.Москва, 2013); Всероссийской молодежной конференции «Физико-технические проблемы добычи, транспорта и переработки нефти и газа в северных регионах» (г.Якутск, 2013), VIII международной научно-практической конференции. н.-и. ц. «Академический» (North Charleston, USA, 2016); XXIII Международной научной конференции Евразийского Научного Объединения (г.Москва, 2016).

Публикации. Основные положения и результаты исследований отражены в 14 публикациях: 3 статья в журналах рекомендованных ВАК РФ, 3 статья в периодических научных изданиях, 5 статья в сборниках трудов конференций, 2 тезиса докладов на научно-технических конференциях, получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных выводов, списка использованных источников и приложений.

Основное содержание работы

Во введении дано обоснование актуальности темы исследования, сформулированы цель работы и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе на основе анализа литературы рассматриваются перспективы использования полимерных труб при сооружении газопроводов, экономическая целесообразность их строительства и эксплуатации в условиях холодного климата. Подчеркивается необходимость повышения допустимого давления в газораспределительных сетях с применением полиэтилена до 1,2 МПа. Рассматриваются объекты и методы исследования.

Вторая глава посвящена исследованию физико-механических свойств армированных полиэтиленовых труб на модельных образцах в диапазоне температур эксплуатации от 20°C до минус 60°C. При этом важнейшими характеристиками, лимитирующими пределы применимости АПТ, являются температура вязко-хрупкого перехода и температура распространения быстрой трещины.

Исследованы АПТ производства ООО «Технология композитов» (г.Пермь, тип I) и ОАО «Запсибтехнология» (г. Тюмень, тип II). Трубы имеют отличительные конструктивно-технологические особенности. В случае АПТ производства «Технология композитов», армирующий каркас из высокопрочных синтетических нитей наматывается непосредственно на трубу из ПЭ80 или ПЭ100 (внутренний слой АПТ). Затем, также экструзионным методом, формируется внешний слой АПТ. Трубы производства «Запсибтехнология» состоят из трех слоев: внутреннего и внешнего из полиэтилена ПЭ80 и среднего – технологического, представляющего собой слой полиэтилена низкой плотности (ПЭНП), усиленный каркасом из высокопрочных синтетических нитей. Таким образом, в первом случае связь между внутренним и внешним слоями АПТ формируется при экструзии внешнего слоя на предварительно нагретый внутренний слой в промежутках между армирующими нитями. Во втором – связь между слоями АПТ обеспечивается адгезионным взаимодействием на границе раздела слоев с технологическим слоем.

Оценка несущей способности АПТ в условиях холодного климата проведена при квазистатических испытаниях на растяжение в диапазоне климатических температур модельных образцов-лопаток, вырезанных из армированных полиэтиленовых труб ($\varnothing 140$ мм). Образцы соответствуют ГОСТ 11262-80, тип 2, скорость движения захватов разрывной машины 25 мм/мин. Результаты экспериментов приведены на рис. 1а и 1б.

Как следует из рис. 1а разрушение модельных образцов АПТ типа I происходит вязко во всем температурном диапазоне. Вязкие разрушения модельных образцов характеризуются развитием необратимой деформации (переход в шейку и дальнейшее удлинение) отдельно в двух слоях: в поверхностном и внутреннем. На диаграммах растяжения ($\sigma - \varepsilon$) момент разрыва первой шейки отмечается явно выраженной «ступенькой», которая отсутствует на диаграммах растяжения гомогенных образцов.

Для модельных образцов АПТ типа II на температурной зависимости прочности, в диапазоне температур от минус 10°C до минус 15°C, выявлен вязко-хрупкий переход (ВХП), рис. 1б. При температуре испытаний $T > T(\text{ВХП})$, процессы деформирования во внешнем и внутреннем слоях модельных образцов АПТ происходят «раздельно» (условно не зависимы), что выражается в неодновременном переходе слоев в стадии потери устойчивости (шейкообразования) и разрушения. При $T \leq T(\text{ВХП})$ часть образцов разрушается хрупко, часть - вязко, успевая образовать шейку.

Таким образом, прочностные характеристики труб типа I выше. Поэтому для дальнейших испытаний выбрали трубы типа II.

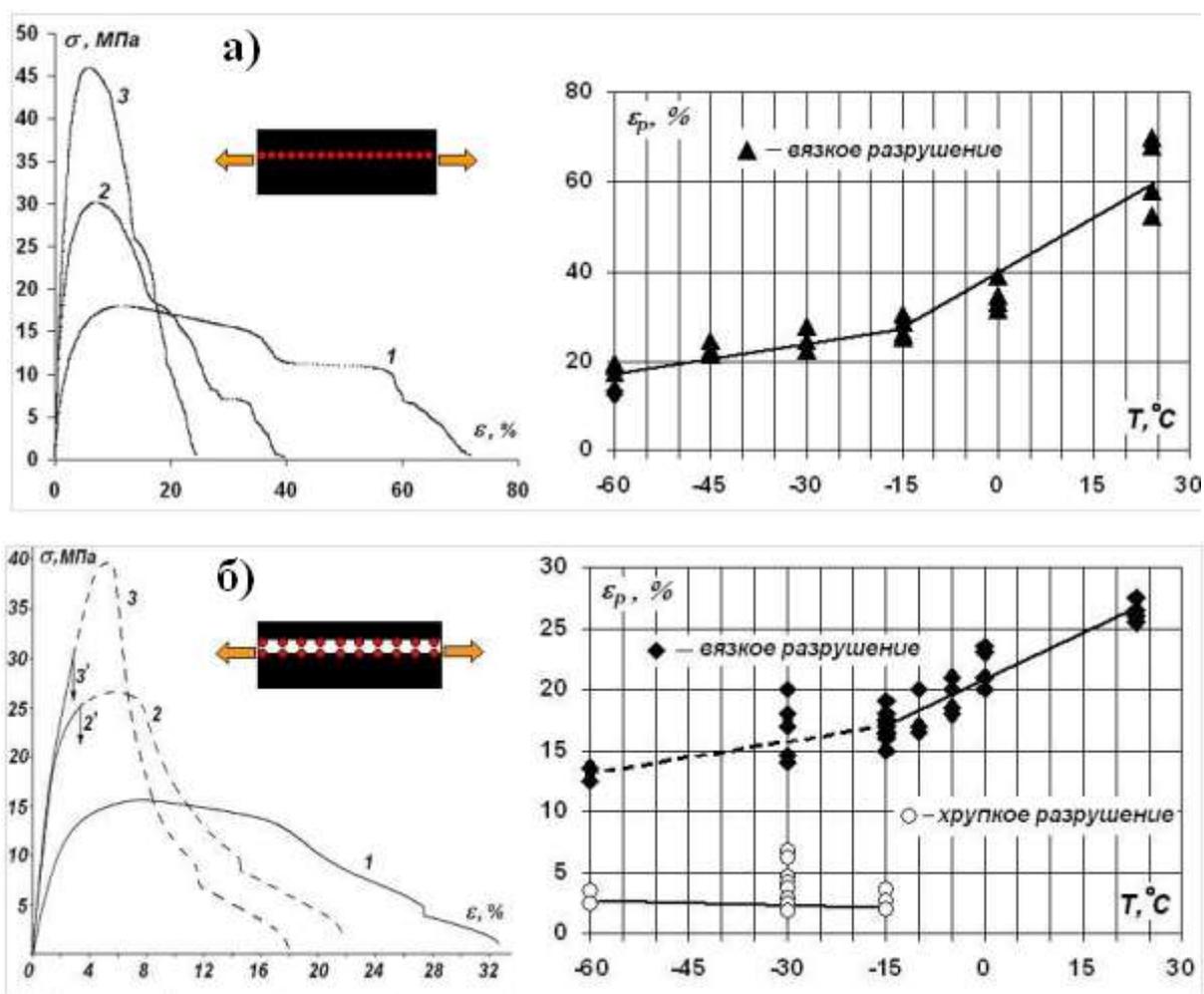


Рис 1. Деформационно-прочностные диаграммы, условные схемы образцов АПТ и температурные зависимости относительной деформации разрыва внешнего слоя трубы: а) тип I; б) тип II, где: 1- 20°C; 2, 2'- -15°C; 3, 3'- -60°C; 1, 2 и 3 – вязкий характер разрушения, 2' и 3' - хрупкий характер разрушения.

Наблюдаемый механизм разрушения заключается в растрескивании технологического слоя (либо границы раздела), адгезионно связанного с внутренним и внешним слоями АПТ. Переход от вязкого разрушения к хрупкому определяется ВХП в механизме разрушения полимерных (ПЭ80) слоев АПТ, а именно

переходом в состояние плоской деформации в вершине разрушающей трещины.

Таким образом, выявлена определяющая роль конструктивно-технологического фактора в обеспечении применимости армированных полимерных труб для сооружения трубопроводов в условиях холодного климата. Установлено, что средний технологический слой, связывающий армирующие нити и обеспечивающий конструктивную связь между внешним и внутренним полимерными слоями, может являться инициатором хрупкого разрушения трубы при температурах ниже минус 15°C. В трубах с иным конструктивным решением наблюдается исключительно вязкий характер разрушения во всем диапазоне климатических температур.

Для АПТ типа II были проведены эксперименты на кольцевых образцах внутренним диаметром $d_b=107$ мм, которые показали, что разрушение образцов происходит в горизонтальном сечении кольца в области зазора между полудисками.

Известно, что проблемы передачи растягивающей нагрузки на образец при испытании однонаправленных композитов с высокой анизотропией жесткости и прочности разрешается путем применения метода нагружения полудисками кольцевых образцов, изготовленных методом намотки (ГОСТ 25.603 – 82). Настоящее исследование проведено, в том числе, и с целью проверки применимости подобного метода для испытания на растяжение модельных образцов-колец АПТ.

Во всех случаях источником зарождения трещины, инициирующей разрушение образца, как и при испытаниях на одноосное растяжение образцов-лопаток, является промежуточный технологический слой образца.

Далее исследовали зависимость температуры вязко-хрупкого перехода (ВХП) от скорости испытаний на растяжение модельных образцов АПТ. Образцы изготовлены из АПТ тип II, диаметрами 140мм и номинальной толщиной стенки 17,5. Образцы лопатки - в соответствии с ГОСТ 11262-80, тип 2. Продольная ось образца совпадает с осью трубы. Испытательная машина — универсальная разрывная машина UTS-20К с температурной камерой. Температура испытаний: +20°C, +5°C, 0°C, -5°C, -10°C, -15°C, -30°C и -60°C, при скоростях движения захватов испытательной машины 25-1000 мм/мин. Сравнительные результаты испытаний (при скорости 25 и 100 мм/мин) приведены на рис. 2.

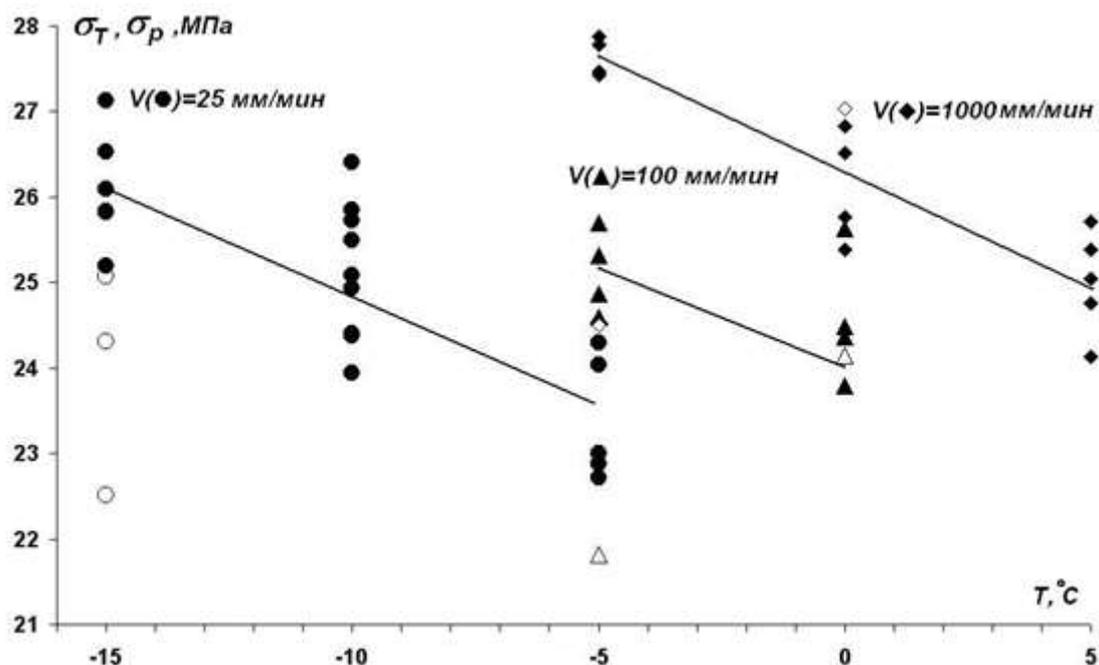


Рис. 2. Температурные зависимости прочности при разрыве внешнего слоя АПТ при скорости испытаний: 25, 100 и 1000 мм/мин. (●, ▲, ◆ – вязкие, ○, △, ◇ – хрупкие разрушения)

По результатам испытаний на кратковременную прочность при растяжении армированных синтетическими нитями полиэтиленовых труб, в конструкции которых предусмотрен адгезионный слой, связывающий армирующую и полиэтиленовые оболочки трубы, экспериментально установлена зависимость температуры вязко-хрупкого перехода (ВХП) в механизме разрушения модельных образцов от скорости испытаний, которая при увеличении скорости до 100 мм/мин достигает 0°C.

Третья глава. Полученные во второй главе результаты, показывают, что наличие технологического слоя, адгезионно связанного с внутренним и внешним слоями АПТ, при растяжении приводит к возникновению трещины, проникающей в слой трубного полиэтилена. Этот факт привел к идее оценки стойкости к быстрой трещине трубных марок полиэтилена, с помощью испытаний на растяжение модельных образцов с нанесенным хрупким слоем.

Полиэтилены марок ПЭ80 и ПЭ100 применяются в качестве наружных и внутренних слоев армированных полиэтиленовых труб, нарушение целостности хотя бы одного слоя ведет к потере работоспособности всей трубы. Эта глава посвящена стандартным квазистатическим испытаниям на растяжение модельных образцов полиэтиленовых труб из материалов ПЭ80 и ПЭ100 с хрупким поверхностным слоем.

Произведена предварительная оценка стойкости к быстрой трещине в диапазоне предполагаемых температур эксплуатации подземного трубопровода. Оценка показала, что нижняя допустимая температурная граница эксплуатации труб должна назначаться в диапазоне: минус 5 ÷ 0°C для ПЭ80 и минус 15 ÷ минус 20°C для ПЭ100.

В связи с тем, что существующие в настоящее время экспериментальные методики определения RCP признаются чрезмерно дорогими, технически сложными и трудоемкими в реализации, стоит задача разработки и обоснования более простых и оперативных методик. При очевидной актуальности задачи для природно-климатических условий России, сведения о соответствующих отечественных исследованиях и разработках в научной литературе отсутствуют.

Согласно требованиям трубной индустрии, задача сводится к разработке и научному обоснованию оперативного маломасштабного метода испытания модельных образцов трубного материала, изготовленных непосредственно из «тепла» трубы, который позволит получать экспериментальную информацию адекватную той, которая определяется при реализации известного за рубежом метода S4 (отечественный аналог – ГОСТ Р 50838-2009).

Была рассмотрена и апробирована следующая методика определения температур, при которых возможно распространение быстрых трещин. Суть методики сводится к испытаниям на растяжение в предполагаемом диапазоне температур эксплуатации трубопровода, модельных образцов трубных марок полиэтиленов с хрупкими поверхностными слоями. Главная особенность методики – быстрая трещина инициируется и распространяется из хрупкого поверхностного слоя. Таким образом, методика предполагает использование стандартного метода испытаний – испытания на прочность при растяжении, которое реализуется на стандартном оборудовании – разрывной машине, оснащенной термокриокамерой.

На рис. 3. представлены результаты оценки допустимой нижней температурной границы эксплуатации трубопровода из материала марки ПЭ100. Анализ результатов – фрактографических изображений изломов и диаграмм разрушения модельных образцов, показывает, что согласно предлагаемого метода испытаний, температура вязко-хрупкого перехода для ПЭ100 составляет $-20^{\circ}\text{C} < T_{\text{хр}} < -15^{\circ}\text{C}$. Для трубного материала ПЭ80 значение соответствующей температуры перехода составило $-5^{\circ}\text{C} < T_{\text{хр}} < 0^{\circ}\text{C}$. При этом необходимо отметить, что приведенные результаты получены на модельных образцах, изготовленных из ПЭ труб диаметром 63мм SDR11, при скорости испытаний 50мм/мин.

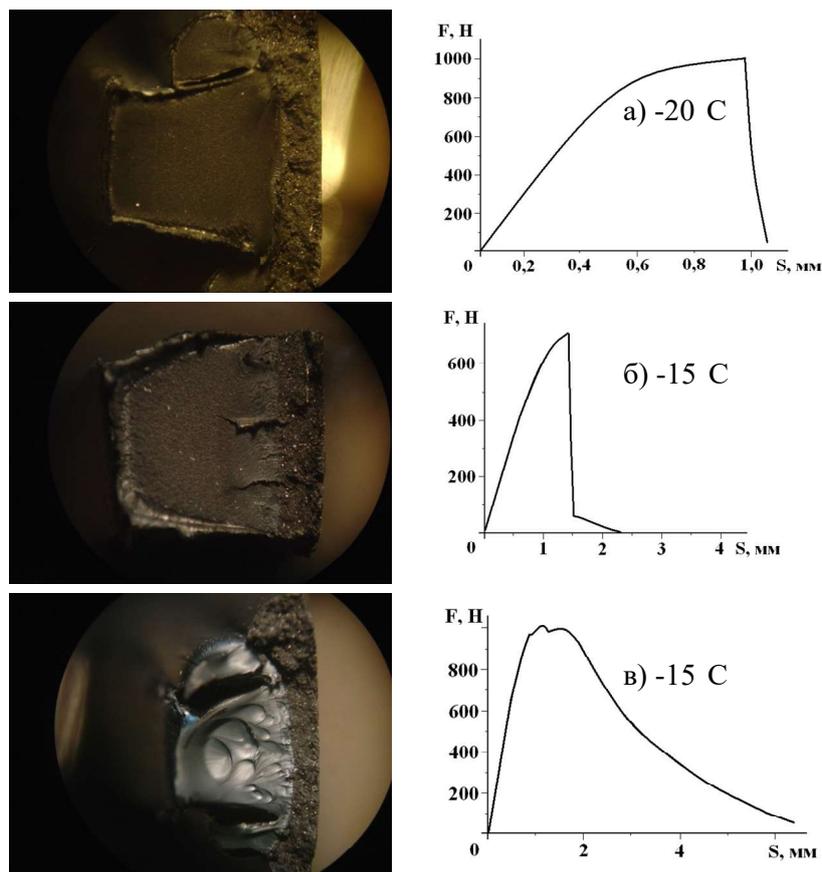


Рис. 3. Диаграммы деформирования и микрофотографии поверхностей разрушения модельных образцов полиэтилена трубной марки ПЭ100 с нанесенным хрупким слоем, при растяжении: а – при -20°C – хрупкое разрушение; б – при -15°C – хрупко-вязкое разрушение; в – при -15°C – вязкое разрушение.

Результаты проверочных испытаний ПЭ100 и ПЭ80, по предложенной методике определения температур, при которых возможно распространение быстрых трещин, соответствуют результатам испытаний ПЭ труб на стойкость к распространению быстрой трещины стандартизованным маломасштабным методом S4.

В четвертой главе представлены результаты мониторинга опытно-промышленного участка подземного межпоселкового газопровода Тулагино-Капитоновка-Кангалассы, изготовленного из армированных полиэтиленовых труб типа II. Проведение мониторинга действующего опытно-промышленного участка газопровода из АПТ было необходимо для получения экспериментальной информации, которая послужит основой для разработки нормативно-технической документации.

Строительство участка осуществлено согласно требованиям СНиП 42-01-2002 «Газораспределительные сети» (актуализированная редакция), глубина заложения труб 1,5 м.

При организации мониторингового исследования были проведены следующие мероприятия:

1. Разработаны и изготовлены зонды для исследования перемещений и температуры поверхности трубы на границе с грунтом.
2. Проведен монтаж пяти зондов для проведения мониторинга опытно-промышленного участка на объекте «МПП Тулагино-Капитоновка-Кангалассы».
3. Проведены измерительные работы по мониторингу опытно-промышленного участка на объекте «МПП Тулагино-Капитоновка-Кангалассы».

Вертикальные перемещения трубопровода, возникающие при воздействии пучения и просадки грунта, определяются относительно специально установленного репера. На рис. 4 приведена схема расположения контрольных точек на опытно-промышленном участке газопровода.

В ходе испытаний контролировалась температура окружающего воздуха и температура поверхности трубы на границе с грунтом.

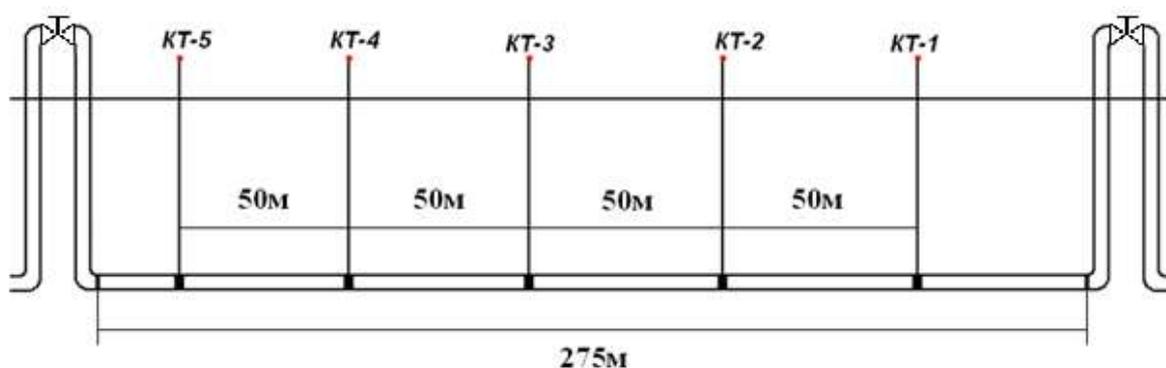


Рис. 4. Схема расположения контрольных точек на опытно-промышленном участке подземного газопровода

Температура поверхности трубы существенно отличается от значений температуры наружного воздуха, т.к. трубопровод находится под влиянием многолетнемерзлого грунта, имеющего относительно постоянную температуру по объему. Она также зависит от материала засыпки траншеи, который играет роль теплоизолятора и толщины снежного покрова, который тоже в свою очередь, выполняет роль теплоизолятора.

Амплитуда годовых колебаний температуры трубы (рис. 5) значительных изменений не имеет. Самая низкая температура минус $8 \pm 0,5^\circ\text{C}$ зафиксирована в марте 2009 г. По сравнению с предыдущими годами этот результат ниже примерно на 6°C . Это связано с погодными условиями зимы периода 2008-2009 гг.: длительные по времени низкие температуры наружного воздуха и малая толщина снежного покрова.

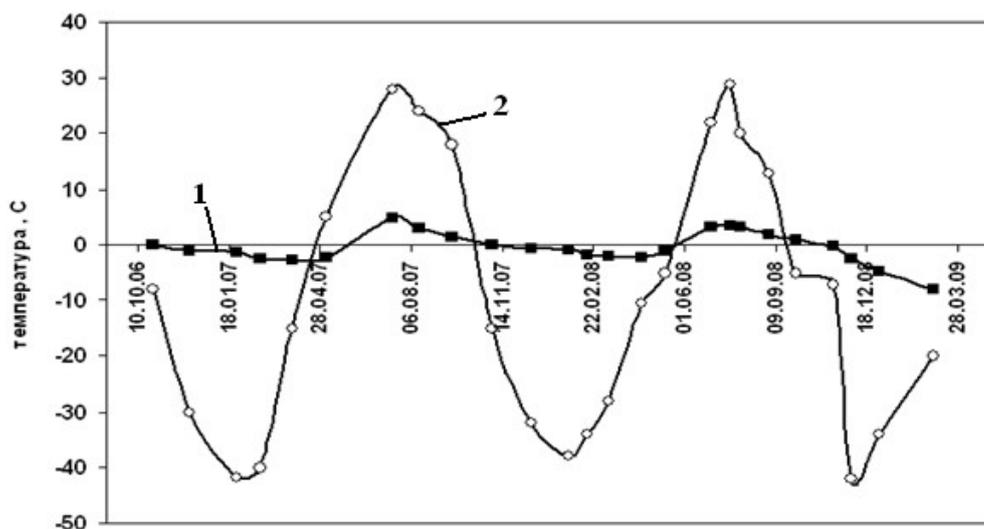


Рис. 5. Результаты замеров температур (1 – стенка газопровода и 2 - окружающий воздух) на опытно-промышленном участке подземного газопровода объекта «МПП Тулагино-Капитоновка-Кангалассы»

Результаты измерений вертикальных перемещений газопровода относительно реперной точки приведены на рис. 6. Когда отрицательные температуры достигают слоев уровня газопровода (рис. 5), труба вынуждена незначительно перемещаться вниз в более податливые слои грунта с положительной температурой. Обратное движение происходит в марте, начиная с этого времени происходит интенсивный нагрев земли с поверхности.

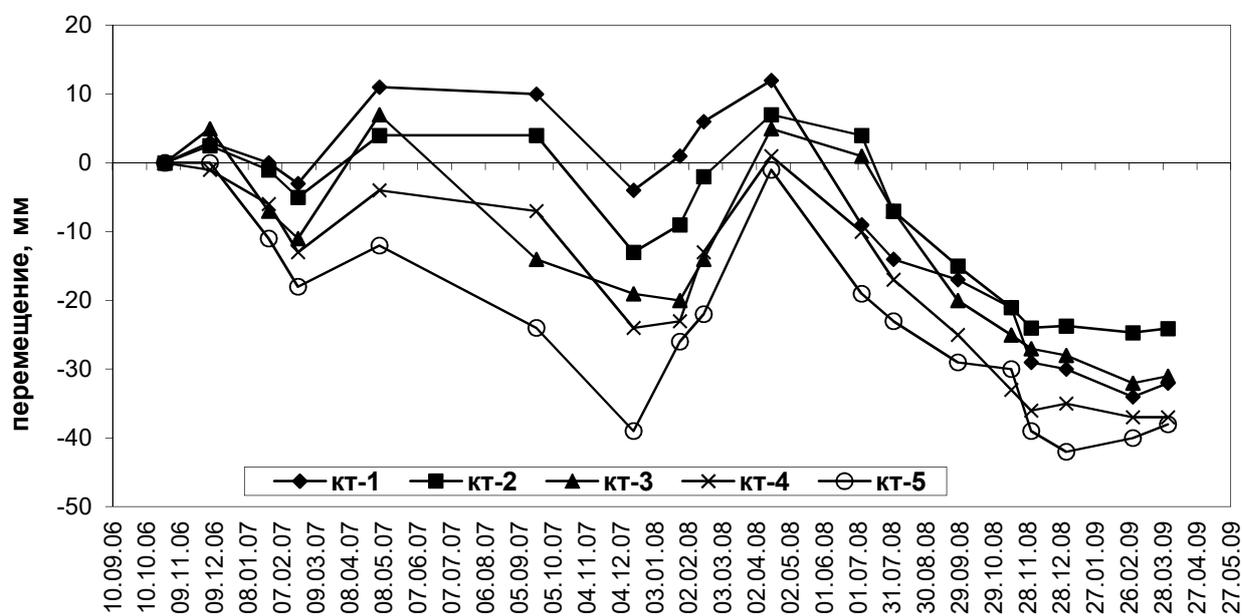


Рис. 6. Значения вертикальных перемещений подземного газопровода на опытно-промышленном участке объекта «МПП Тулагино-Капитоновка-Кангалассы»

За зимний период 2008–2009 гг. зафиксирована минимальная температура стенки газопровода, которая равна $-8^{\circ}\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ и зафиксирован максимум вертикальных перемещений, который равен 4 см. Полученные данные объясняются длительными морозами зимнего периода 2008–2009гг. и малой толщиной снежного покрова, что и привело к глубокому промораживанию грунта и следовательно большому по величине пучению.

Поведение уложенного в грунт опытного участка газопровода за период наблюдения характеризуется закономерными ожидаемыми перемещениями, величина которых соизмерима с ранее зафиксированными на аналогичных сооружениях на территории РС(Я).

На глубине заложения газопровода температура стенки трубы не опускается ниже температуры вязко-хрупкого перехода ($-10^{\circ}\div-15^{\circ}\text{C}$) и распространение быстрых трещин исключается. На основании результатов мониторинга, проведенного на газопроводе, изготовленном из труб типа II, следует, что для труб типа I с внутренним и внешним слоем из ПЭ100, у которых в диапазоне температур от минус 15°C до минус 20°C разрушения происходят вязко глубина заложения может быть существенно уменьшена. При этом величина заглубления должна определяться результатами геокриологических изысканий из условия превышения температурой грунта температуры ВХП минус $5^{\circ}\div 0^{\circ}\text{C}$ для труб из ПЭ80 и минус $15^{\circ}\div$ минус 20°C для ПЭ100, определенным по результатам главы 3.

Пятая глава посвящена результатам исследований образцов-свидетелей АПТ тип II, вырезанных из трубы, изъятый из опытно-промышленного участка газопровода через десять лет эксплуатации. Исследования деформационно-прочностных свойств образцов-свидетелей АПТ тип II показывают появление ВХП при температуре минус 15°C , результаты полученные по параметрам ε и σ остаются в пределах величин, полученных при испытаниях исходных образцов АПТ тип II до заложения газопровода.

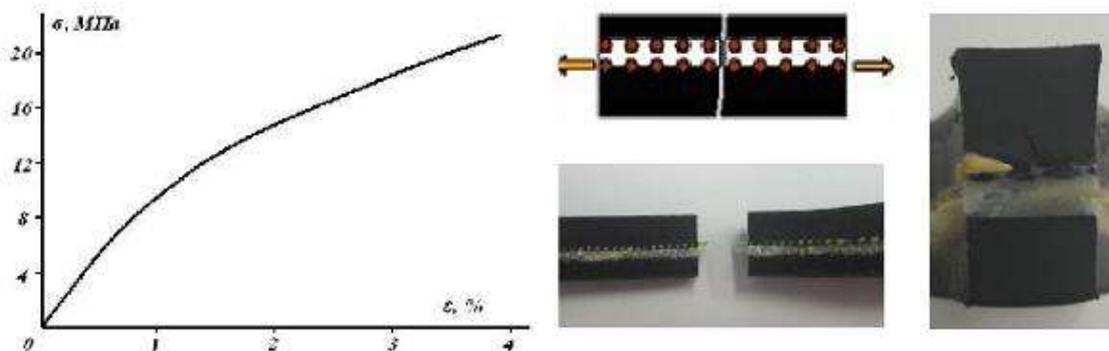


Рис.7. Диаграмма деформирования, модельная схема и фотографии поверхностей разрушения образцов-свидетелей АПТ разрушившихся хрупко в испытаниях при $T = -20$

Вид хрупкого разрушения во всех случаях одинаков. Нет образования двух коллинеарных поверхностей разлома, или разделения внешнего и внутреннего слоев одного образца на хрупкое и вязкое разрушение, как это происходило в ранее проведенных испытаниях. Характерная диаграмма, модельная схема и фотографии образца представлены на рис. 7.

Повышение температуры ВХП говорит об ухудшении адгезионной связи между внешними слоями из ПЭ80 и средним технологическим слоем, существование которого и приводило к зарождению хрупкой трещины.

Испытания проводились при двух скоростях движения захватов разрывной машины: 25мм/мин и 100мм/мин. В исходных образцах при повышении скорости испытаний температура ВХП повышалась с -15°C до 0°C . В проведенных испытаниях хрупкое разрушение при температуре -15°C появляется при скорости 25мм/мин, при скорости 100мм/мин разрушение образцов вязкое. Таким образом, хрупкое разрушение проявляется в образцах-свидетелях сохранивших хорошую адгезию между слоями.

Испытание на определение стойкости при постоянном внутреннем давлении АПТ проводились в соответствии с ГОСТ 24157-80. Схема испытаний представлена на рис. 8.

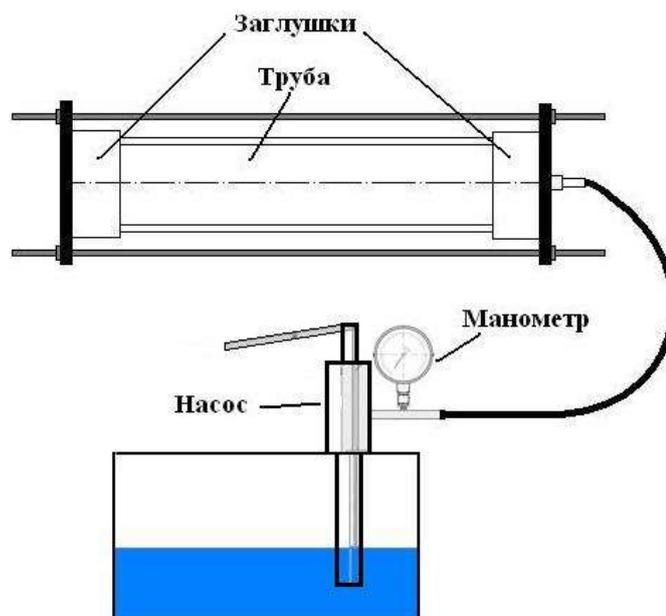


Рис. 8. Схема испытаний на определение стойкости при постоянном внутреннем давлении АПТ

Свободная длина образца $l_0 = 420$ мм, начальное напряжение в стенке трубы 12,4МПа, заданное время испытаний 100 ч. Среда испытаний – воздух, внутри образцы заполняли водой при положительной температуре испытаний и морозостойким маслом при отрицательной температуре.

Для испытаний при минус 15°C , образец в заглушках был размещен в помещении с температурой окружающего воздуха ниже температуры испытаний, постоянная температура поддерживалась с помощью программного регулятора

температуры Термодат 17Е3. Указанный прибор имеет универсальный вход, предназначенный для подключения термопар и может управлять нагревателем.

По результатам испытаний ни один образец не разрушился до истечения контрольного времени испытаний. Таким образом, результаты испытания образцов-свидетелей АПТ, изъятых из участка опытно-промышленного подземного газопровода, можно считать удовлетворительными.

Основные выводы

1. Экспериментально доказана применимость и адекватность проведения испытаний на модельных образцах в форме лопаток и колец для исследования деформационно-прочностных свойств армированных полиэтиленовых труб при растяжении в диапазоне климатических температур. При этом на температурной зависимости кратковременной прочности модельных образцов АПТ, в диапазоне температур от -10 до -15°C , выявлен вязко-хрупкий переход, который при повышении скорости испытаний до 100мм/мин достигает значения 0°C . Исследован и интерпретирован механизм разрушения модельных образцов, заключающийся в растрескивании технологического слоя, адгезионно связанного со слоями ПЭ80 (внутренняя и внешняя оболочки АПТ), способность которых к торможению трещины определяет переход от вязкого разрушения к хрупкому при понижении температуры испытаний.
2. Многослойные армированные трубы производства ОАО «Запсибтехнология» (тип II) при температурах ниже 0°C могут разрушаться хрупко и возможность их широкого применения ограничена. Трубы производства ООО «Технология композитов» (тип I) могут использоваться при строительстве газопроводов в условиях низких температур.
3. Предложена методика определения температур, при которых возможно распространение быстрых трещин. Главная особенность методики – быстрая трещина инициируется и распространяется из хрупкого поверхностного слоя и предполагает использование стандартного метода испытаний – испытания на прочность при растяжении. Результаты проверочных испытаний ПЭ100 и ПЭ80, по предложенной методике определения температур, при которых возможно распространение быстрых трещин, соответствуют результатам испытаний ПЭ труб на стойкость к распространению быстрой трещины стандартизованным маломасштабным методом S4.
4. Результаты мониторинга опытного участка газопровода показали возможность широкого применения армированных полиэтиленовых труб в системах газоснабжения. Глубина заложения труб в грунт может быть существенно уменьшена и определяться геокриологическими изысканиями.
5. Испытание образцов-свидетелей, находившихся в реальных условиях эксплуатации, дает надежную оценку применимости материала для арми-

рованного полиэтиленового газопровода. По результатам исследований АПТ тип II за десять лет эксплуатации на опытно-промышленном участке газопровода не ухудшили свои деформационно-прочностные свойства.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Бабенко Ф.И., Федоров Ю.Ю., Саввина А.В. Температурные ограничения по применению армированных полиэтиленовых труб для газопроводов в условиях холодного климата [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. – 2015. – №3 – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3102 (дата обращения: 15.06.2017).
2. Саввина А.В., Федоров Ю.Ю. Новый метод оценки стойкости к быстрой трещине полиэтиленовых труб при низких температурах // Справочник. Инженерный журнал. – 2016. – №11. – С.52–56.
3. Попов С.Н., Саввина А.В., Федоров Ю.Ю. Мониторинг опытно-промышленного подземного газопровода из армированных полиэтиленовых труб // Наука и образование. – 2017. – №1(85). – С.63–67.

Статьи в периодических научных изданиях

1. Исследование физико-механических свойств армированных полиэтиленовых труб в условиях холодного климата / Ф.И. Бабенко, С.П. Федоров, Ю.Ю. Федоров, А.И. Левин, В.И. Иванов, А.В. Посельская // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2007. – Том 4, №2. – С.10-14.
2. Вопросы оценки качества сварки армированных полиэтиленовых труб с применением муфт с закладными нагревателями в условиях низких температур / А.И. Левин, Ф.И. Бабенко, Ю.Ю. Федоров, С.П. Федоров, А.В. Посельская // Ползуновский альманах. – 2007. – №1-2. – С. 101-104.
3. Федоров Ю.Ю., Саввина А.В. Напряженно-деформированное состояние подземных газопроводов в условиях многолетней мерзлоты [Электронный ресурс] // Нефтегазовое дело. – 2008. – №1 – URL: http://ogbus.ru/authors/Fyodorov/Fyodorov_1.pdf (дата обращения: 15.06.2017).

Публикации в материалах научных мероприятий

4. Сравнительная оценка стоимости строительства полиэтиленовых и стальных газопроводов в условиях Республики Саха (Якутия) / В.И. Иванов, М.И. Слепцова, А.В. Посельская, С.П. Федоров // Научно-инновационный потенциал Республики Саха (Якутия): сборник научных трудов– Якутск: 2007. – С.168–171.

5. Бабенко Ф.И., Федоров Ю.Ю., Саввина А.В. Температурные ограничения по применению армированных полиэтиленовых труб для газопроводов в условиях низких температур // IV Всероссийский симпозиум по проблеме «Механика композиционных материалов и конструкций»: тезисы докладов. – Москва, 2012г. – С.16.
6. Саввина А.В., Бабенко Ф.И., Федоров Ю.Ю. Исследование эксплуатационной надежности армированных полиэтиленовых труб в условиях низких климатических температур // IV Евразийский симпозиум по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата: труды симпозиума. – Якутск, 2013. – Том 2. – 332с.
7. Попов С.Н., Федоров Ю.Ю., Саввина А.В. Упрощенный метод определения нижней температурной границы эксплуатации полиэтиленовых труб // [Наука в современном информационном обществе](#): материалы VIII международной научно-практической конф. – н.-и. ц. «Академический», 2016. – С. 102–107.
8. Саввина А.В., Федоров Ю.Ю. Мониторинг подземного газопровода из армированных полиэтиленовых труб в условиях многолетнемерзлых грунтов // Евразийское Научное Объединение. – 2017. – Т. 1., №1 (23). – С.35–39.

Тезисы докладов на конференциях

9. Методические аспекты и результаты прочностных испытаний модельных образцов армированных полиэтиленовых труб для условий холодного климата / Ф.И. Бабенко, С.П. Федоров, Ю.Ю. Федоров, А.И. Левин, А.В. Посельская // Полимерные композиты и трибология. Поликомтриб: тезисы докладов международной научно-технической конференции. – Гомель, 2007. – С. 106.
10. Саввина А.В., Бабенко Ф.И., Федоров Ю.Ю. Исследование разрушения армированной полиэтиленовой трубы при низких температурах // Физико-технические проблемы добычи, транспорта и переработки нефти и газа в северных регионах: электронный сборник материалов конференции. – Якутск, 2013.

Патент

11. Способ создания хрупкого слоя, для инициирования трещины в испытании на стойкость к быстрому распространению трещины в полиолефинах: пат. 2574735 Рос. Федерация / Бабенко Ф.И., Саввина А.В., Родионов А.К., Морова Л.Я, Рубанов П.А. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения Российской академии наук. – №2014146837; заявл. 20.11.14 ; опубл. 14.01.16.