

На правах рукописи



Серегина Нона Викторовна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННЫХ
ЛИФТОВЫХ ТРУБ ДЛЯ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ГАЗОВЫХ СКВАЖИН В
МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ**

25.00.17 – Разработка и эксплуатация нефтяных
и газовых месторождений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью
«Научно–исследовательский институт природных газов и газовых технологий –
Газпром ВНИИГАЗ» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)

Научный руководитель: доктор технических наук Нифантов Виктор Иванович.

Официальные оппоненты:

Насыбуллин Арслан Валерьевич, доктор технических наук, начальник отдела развития информационных технологий и моделирования пластовых систем, Татарский научно–исследовательский и проектный институт нефти «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина

Тупысев Михаил Константинович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геоэкологической и промышленной безопасности объектов нефтегазового комплекса, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем нефти и газа Российской академии наук (ИПНГ РАН).

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью «Волго–Уральский научно–исследовательский и проектный институт нефти и газа» (ООО «ВолгоУралНИПИгаз»)

Защита диссертации состоится «25» апреля 2018 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 511.001.01, созданного на базе ООО «Газпром ВНИИГАЗ», по адресу: 142717, Московская область, Ленинский район, сельское поселение Развилковское, пос. Развилка, Проектируемый проезд № 5537, владение 15, строение 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и на сайте <http://www.vniigaz.gazprom.ru>

Автореферат разослан «___»

2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
Д. Г.-М. Н.

Н.Н. Соловьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Перспективы развития газового комплекса России связаны с разработкой крупнейших газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал (Бованенковское, Харасавэйское, Новопортовское и др.), в геологическом разрезе которых распространены многолетнемерзлые породы (ММП). Эксплуатация скважин в сложных геокриологических условиях часто сопровождается протаиванием и разрушением мерзлых пород в околоствольном пространстве скважин, обвалами грунта на устье скважин, смятием обсадных колонн и перекосом фонтанных арматур, возникновением затрубных и межтрубных газопроявлений, образованием газогидратных пробок и т.д. Все это приводит к увеличению эксплуатационных расходов на ремонт и обслуживание скважин. Актуальными являются вопросы обеспечения термоизоляции обсадных и лифтовых колонн для эффективной надежной эксплуатации скважин на месторождениях, находящихся в районах залегания ММП.

Применение в конструкции скважин северных месторождений теплоизолированных обсадных и лифтовых труб (ТЛТ) позволяет замедлить оттаивание мерзлоты, образование гидратов и парафиновых отложений в скважинах, сократить расстояния между устьями теплоизолированных скважин в кустах, уменьшить температурные потери в термальных и нагнетательных скважинах, увеличить межремонтный период скважин. В настоящее время широкое распространение получило использование ТЛТ при закачке пара в скважину для повышения коэффициента нефтеотдачи на месторождениях с высоковязкой нефтью, а также при добыче используемых для отопления геотермальных вод.

Для эффективной длительной эксплуатации скважин в зонах мерзлоты необходимо в составе верхних секций лифтовой колонны использовать ТЛТ с различными типами и толщиной изоляции, с различным коэффициентом теплопроводности изоляции в зависимости от термодинамических условий. В связи с этим, разработка усовершенствованной конструкции теплоизолированных лифтовых труб является актуальной задачей исследований.

Степень разработанности темы

На основе анализа работ российских и зарубежных авторов по вопросам применения теплоизолированных конструкций скважин в ММП установлено, что не исследовались ТЛТ с теплоизоляцией в виде полых цилиндрических теплоизолирующих блоков из кварцевого или базальтового волокна, обладающих низкой теплопроводностью. В 1995 г. на Бованенковском НГКМ прошли испытания разработанной с участием автора усовершенствованной конструкции ТЛТ с теплоизоляцией из блоков кварцевого (скв. №6805) и базальтового (скв. №5602) волокна, которые показали эффективность применения этих труб.

Цель работы

Повышение эффективности эксплуатации газовых скважин в зонах мерзлоты с использованием теплоизолированных лифтовых труб.

Основные задачи исследований

1. Анализ отечественных, зарубежных технологий и технических решений по защите конструкций скважин от влияния ММП, в т.ч. конструкций теплоизолированных труб.

2. Анализ и обобщение мирового опыта эксплуатации теплоизолированных скважин в зонах ММП.

3. Усовершенствование конструкции ТЛТ, позволяющей эффективно длительно эксплуатировать скважины в мерзлоте.

4. Обоснование величины коэффициента теплопроводности теплоизоляции ТЛТ для обеспечения в течение 30 лет безопасной эксплуатации скважин северных месторождений (на примере Заполярного НГКМ).

5. Разработка методики определения коэффициента теплопроводности теплоизоляции ТЛТ в эксплуатируемой скважине на основе показаний температурных датчиков в установленных на направлении температурных трубках для контроля изменения теплотехнических характеристик теплоизоляции по всей длине теплоизолированной колонны.

6. Оценка технико-экономической эффективности применения ТЛТ при эксплуатации скважин северных месторождений (на примере Бованенковского НГКМ).

Научная новизна

Дано научное обоснование применению ТЛТ, обеспечивающих сохранность грунтов в мерзлом состоянии в околоствольном пространстве скважины при эксплуатации газовых месторождений в зонах ММП.

Усовершенствована конструкция ТЛТ за счет применения запатентованных конструкции вакуумного клапана и теплоизоляции в виде полых цилиндрических блоков из кварцевого или базальтового волокна, позволяющая эффективно длительно эксплуатировать скважины, расположенные в районах залегания мерзлых пород, выполненная на основе анализа, обобщения, систематизации исследований ТЛТ и опыта применения технических решений для защиты конструкций скважин от воздействия ММП.

Дано обоснование величины коэффициента теплопроводности теплоизоляции ТЛТ, обеспечивающей надежную длительную эксплуатацию скважин северных газовых месторождений (на примере Заполярного НГКМ).

Разработана методика определения коэффициента теплопроводности теплоизоляции ТЛТ в эксплуатируемой скважине, которая позволяет непрерывно контролировать теплотехнические свойства теплоизоляции по всей длине теплоизолированной колонны, что необходимо для эффективной эксплуатации скважины в зонах ММП.

Практическая ценность

Предложенная усовершенствованная конструкция ТЛТ включена в СТО Газпром 2–3.2–174–2007 «Технические требования к теплоизолированным лифтовым трубам», подготовленный с участием автора. Представленные в данной работе аналитические и промысловые исследования подтвердили эффективность применения разработанной конструкции ТЛТ на Бованенковском НГКМ и

возможность участия этой продукции в программе импортозамещения. Практическая ценность результатов работы подтверждается актом использования в ООО «Газпром ВНИИГАЗ».

На основании результатов работы обоснован коэффициент теплопроводности теплоизоляции лифтовых труб, обеспечивающий эффективную многолетнюю эксплуатацию скважин в условиях ММП (на примере Заполярного НГКМ), а также разработана и запатентована методика определения коэффициента теплопроводности теплоизоляции ТЛТ в эксплуатируемой скважине (патент РФ 2424420).

Методология и методы диссертационного исследования

При проведении исследований использовались методы системного анализа способов защиты конструкций скважин от воздействия многолетней мерзлоты и мирового опыта эксплуатации теплоизолированных скважин, математические методы для обоснования величины коэффициента теплопроводности теплоизоляции ТЛТ, метод экономического анализа движения денежных потоков для оценки экономической эффективности применения ТЛТ.

Основные защищаемые положения

1. Усовершенствованная конструкция ТЛТ, разработанная на основе экспериментальных исследований, заводских и промышленных испытаний теплоизолированных труб, обеспечивающая надежную длительную эксплуатацию скважин в зонах распространения ММП и экологическую безопасность сооружений на северных месторождениях.

2. Обоснование коэффициента теплопроводности теплоизоляции ТЛТ для обеспечения многолетней эффективной эксплуатации скважин Заполярного НГКМ без протаивания ММП.

3. Методика определения коэффициента теплопроводности теплоизоляции ТЛТ в эксплуатируемой скважине для мониторинга теплотехнических свойств теплоизоляции по всей длине теплоизолированной колонны, что позволяет обеспечить надежную продолжительную эксплуатацию скважины в многолетнемерзлых породах.

Степень достоверности результатов работы

Достоверность и обоснованность результатов работы определяется научно–обоснованными выводами, полученными на основе анализа научных публикаций о применении ТЛТ при эксплуатации скважин в зонах распространения ММП, результатами экспериментальных исследований и промышленных испытаний разработанной с участием автора ТЛТ.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались на следующих конференциях:

- XVII Международная научно–практическая конференция «Реагенты и материалы для технологических жидкостей, применяемых при строительстве и эксплуатации газовых, газоконденсатных и нефтяных скважин. Актуальные

вопросы сервисного сопровождения бурения и утилизации отходов» (г. Суздаль, 4 – 7 июня 2013 г.),

- Всероссийская научно–производственная конференция «Методы увеличения нефтеотдачи. Эффективная организация ГТМ на нефтяных месторождениях» (г. Ижевск, 23 – 24 октября 2013 г.),

- X и XI Всероссийские научно–технические конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (г. Москва, 10 – 12 февраля 2014 г. и 8 – 10 февраля 2016 г.),

- XVIII Международная научно–практическая конференция «Реагенты и материалы для строительства, эксплуатации и капитального ремонта нефтяных, газовых и газоконденсатных скважин: производство, свойства и опыт применения. Экологические аспекты нефтегазового комплекса» (г. Суздаль, 3 – 6 июня 2014 г.),

- XIX и XX Международные научно–практические конференции «Реагенты и материалы для строительства, эксплуатации и ремонта нефтяных, газовых и газоконденсатных скважин: производство, свойства и опыт применения. Экологические аспекты нефтегазового комплекса» (г. Суздаль, 2 – 5 июня 2015 г. и 7 – 10 июня 2016 г.),

а также на совещаниях в ПАО «Газпром» и научных семинарах в ООО «Газпром ВНИИГАЗ».

Публикации

Основное содержание работы изложено в 15 опубликованных работах, в том числе в пяти работах в журналах, входящих в «Перечень..» ВАК Минобрнауки РФ, и трех патентах.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (208 наименований) и одного приложения. Общий объем работы –131 страница. Текст работы содержит 37 рисунков и 13 таблиц.

Автор выражает глубокую благодарность за ценные советы и помощь в работе научному руководителю д.т.н. В.И. Нифантову, сотрудникам ООО «Газпром ВНИИГАЗ» к.т.н. В.С. Смирнову; д.т.н., профессору А.Г. Потапову; д.т.н. К.И. Джафарову; д.г.–м.н. Н.Н. Соловьеву; к.г.–м.н. В.Е. Кан; к.т.н. Ю.А. Перемышцеву; к.т.н. В.М. Пищухину; к.т.н. А.В. Полозкову; к.э.н. Н.М. Бачуриной; к.т.н. В.И. Шулятикову.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, определены цели и задачи исследований, сформулированы научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе проанализированы способы защиты конструкций скважин северных месторождений от воздействия многолетней мерзлоты, представлены конструкции теплоизолированных труб, а также приведен обзор отечественного и зарубежного опыта их применения.

Теоретическому и экспериментальному изучению данных вопросов посвящены труды российских и зарубежных специалистов: О.Ф. Андреева, А.Р. Александрова, А.И. Березнякова, С.Н. Бузинова, В.Ф. Буслаева, И.Ю. Быкова, Г.С. Грязнова, Б.В. Дегтярева, Б.А. Ерехинского, В.А. Истомина, Н.Н. Кохманской, В.Н. Коршунова, Ю.Ф. Макагона, А.В. Марамзина, Р.И. Медведского, Ю.А. Перемышцева, А.Г. Потапова, А.В. Полозкова, А.П. Попова, В.С. Смирнова, Г.К. Смолова, Е.А. Спиридовича, А.В. Федосеева, А.Г. Филиппова, Н.В. Черского, Н.А. Цытовича, Н.Д. Цхадая, W.G. Allen, P.A. Barber, E.M. Blount и др.

Строительство и эксплуатация скважин в зонах распространения ММП сопровождается чередующимися процессами растепления и промерзания прискважинной зоны, что приводит к приустьевым обвалам пород, разгерметизации обсадных колонн, образованию гидратов и т.д.

Автором проанализированы термические и механические способы защиты скважин от воздействия ММП: управляемое промораживание прискважинной зоны; закачка хладоносителя в затрубное пространство для охлаждения мерзлых пород; использование толстостенных, теплоизолированных обсадных труб и НКТ; покрытие поверхности колонн теплоизоляционными материалами и другие.

В настоящее время накоплен многолетний мировой опыт эксплуатации теплоизолированных скважин в мерзлоте.

При освоении месторождений в зоне ММП на Аляске (например, Прадхо–Бей) в конструкции скважин применяли теплоизолированные обсадные трубы и НКТ. В наши дни широко используются за рубежом теплоизолированные НКТ типа Thermocase.

В конце прошлого века устанавливали теплоизолированные трубы на скважинах отечественных северных месторождений (Медвежье, Возейское, Южно–Соленинское, Ярегское, Харьягинское, Усинское и т.д.).

В 1995 г. на Бованенковском НГКМ были проведены промысловые испытания: направления с теплоизоляцией из сферопластика (скв. №6403); ТЛТ с изоляциями ТЗМК (термозащитный материал кварцевый) и тизикулит (скв. №6805), а также ТЗМБ (термозащитный материал базальтовый) на скв. №5602. При использовании теплоизолированного направления и ТЛТ замедлилось оттаивание ММП в околоствольном пространстве скважины.

В 2001 г. на Бованенковском НГКМ в течение года проводили перепуск газа из скв. №6401 (апт-альбский горизонт) в скв. №6402 (сеноманский горизонт). Скважины были оборудованы ТЛТ–168х114 с вакуумно–многослойной изоляцией. Анализ результатов исследований показал, что применение ТЛТ предупреждает размораживание мерзлоты при длительной эксплуатации скважин.

Использование в конструкции скважин Хасырейского, Тэдинского и других нефтяных северных месторождений термоизолированных НКТ, а также на скв. №201350 НГДУ ООО «Газпром добыча Уренгой» опытной партии ТЛТ–114х73 обеспечило их устойчивую эксплуатацию, т.к. позволило увеличить время между работами по очистке от парафиногидратных отложений внутренней поверхности лифтовых труб.

В настоящее время для добычи нефти и газа в районах залегания ММП, а также закачки пара широко используются термоизолированные НКТ с экранно-вакуумной изоляцией и направления с теплоизоляцией из пенополиуретана. На Бованенковском НГКМ часть эксплуатационных скважин оборудована ТЛТ отечественного и зарубежного производства.

На основе анализа технологий и технических решений по защите конструкций скважин от влияния ММП, мирового опыта применения теплоизолированных труб на скважинах северных месторождений сделаны выводы о том, что разработка новых конструкций ТЛТ с различными типами низкотеплопроводной изоляции позволит надежно и эффективно эксплуатировать скважины в зонах мерзлоты.

Вторая глава посвящена разработке ТЛТ, которые могут применяться в конструкции эксплуатируемых скважин, расположенных в районах залегания ММП. Автором предложена усовершенствованная конструкция вакуумного клапана для ТЛТ. В главе приведены результаты испытаний (теплофизических, на герметичность и прочность) ТЛТ с различными типами изоляции, а также зависимости коэффициентов теплопроводности изоляции для ТЛТ в условиях вакуума от давления остаточных газов, полученные по результатам лабораторных исследований труб. На основе проведенных исследований разработаны основные требования к ТЛТ. Проведен расчет радиуса протаивания ММП в околоствольном пространстве теплоизолированной скважины при различных коэффициентах теплопроводности изоляции ТЛТ (на примере Бованенковского НГКМ).

Конструкция ТЛТ, разработанная с участием автора, состоит из следующих элементов (рисунок 1): кожух, труба несущая, теплоизоляция, втулка защитная, вакуумный клапан, муфта несущей трубы, патрубок торцевой, геттер, центрирующее кольцо, вкладыш муфтовый.

В кольцевом пространстве между коаксиально расположенными кожухом и трубой несущей с вакуумным клапаном находится теплоизоляция, коэффициент теплопроводности которой $\leq 0,009$ Вт/м·К при температуре $268 \div 303$ К (рисунок 2). Возможная температура применения теплоизоляции $-150 \div +700$ °С.

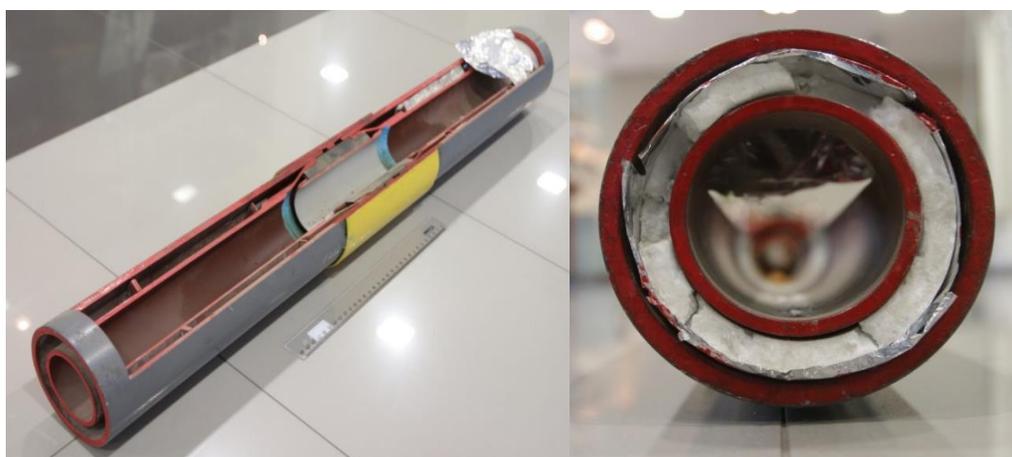
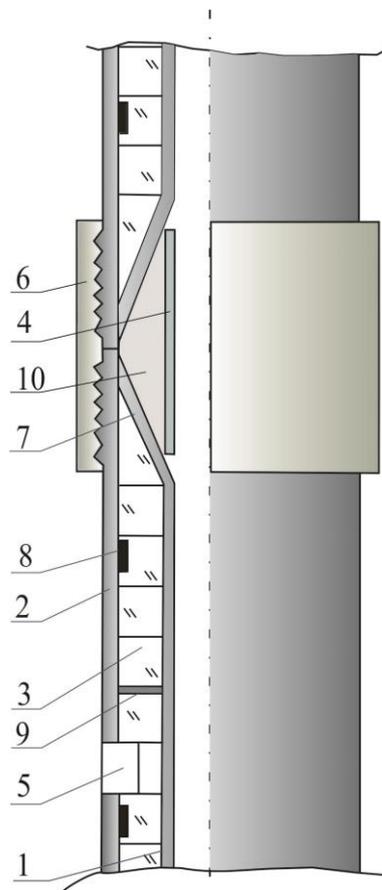


Рисунок 2 – Фрагмент ТЛТ-114x73



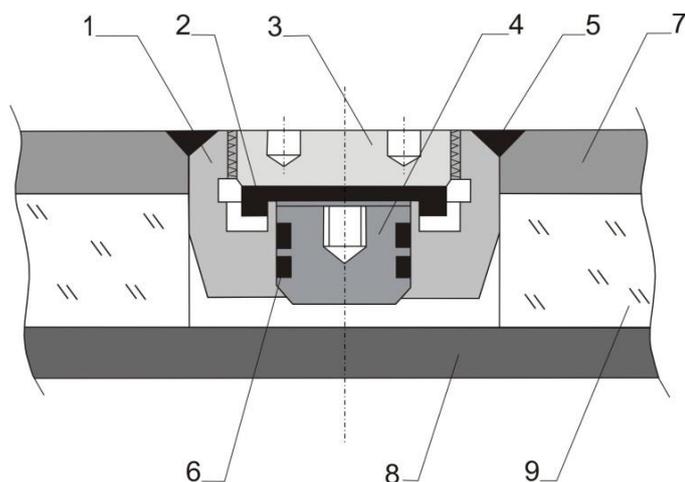
1 – кожух; 2 – труба несущая; 3 – теплоизоляция; 4 – втулка защитная; 5 – вакуумный клапан; 6 – муфта несущей трубы; 7 – патрубок торцевой; 8 – геттер; 9 – центрирующее кольцо; 10 – вкладыш муфтовый

Рисунок 1 – Теплоизолированная лифтовая труба

Труба несущая и кожух соединяются посредством патрубка из нержавеющей стали в виде конического раструба. Между защитной втулкой и патрубком находится вкладыш муфтовый, коэффициент теплопроводности которого не должен превышать $0,07 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$. Секции теплоизолированных труб соединяются в колонну при помощи муфты трубы несущей. Для поддержания вакуума в межтрубной полости ТЛТ размещены геттеры, которые поглощают выделяющийся из структуры металла газ.

Отличие разработанной конструкции ТЛТ от предложенных ранее конструкций заключается в том, что теплоизоляция выполнена в виде полых цилиндрических блоков из кварцевого или базальтового волокна (ТЗМК, ТЗМБ), которые обладают низкой теплопроводностью и устойчивостью к воздействию агрессивных сред.

На основе обобщения и анализа известных конструкций клапанов с участием автора разработана конструкция вакуумного клапана, предназначенного для вакуумирования кольцевой полости ТЛТ и последующей герметизации отверстия в несущей трубе (рисунок 3).



1 – седло с наружной и внутренней резьбой; 2 – упор из уплотнительного материала; 3 – крышка-гайка резьбовая; 4 – заглушка; 5 – сварной шов; 6 – кольца уплотнительные; 7 – несущая труба; 8 – кожух; 9 – теплоизоляционный материал

Рисунок 3 – Принципиальная схема вакуумного клапана

Разработанный автором вакуумный клапан выполнен в виде седла, которое приваривается в отверстие несущей трубы. Седло клапана имеет сквозное отверстие в центре и двухступенчатую цилиндрическую полость. Внутри седла установлена заглушка, снабженная резиновыми уплотнительными кольцами круглого сечения. На заглушку крепится упор из уплотнительного материала и затем завинчивается крышка-гайка, резьба которой заполнена герметичной уплотнительной смазкой. Вакуумирование повышает надежность ТЛТ.

Отличия разработанной автором конструкции вакуумного клапана для ТЛТ, обеспечивающей длительную герметичность трубы, заключаются в следующем:

- в седле клапана расположена двухступенчатая цилиндрическая полость для защиты от разгерметизации трубы,
- заглушка клапана с уплотнительными резиновыми кольцами устанавливается в отверстие седла клапана и дополнительно уплотняется кольцевым упором и крышкой-гайкой, на резьбу которой нанесена отверждающая смазка.

На предлагаемую автором конструкцию вакуумного клапана получен патент 2352750 РФ, опубликованный 20.04.2009, что свидетельствует о новизне предложенного технического решения.

Для работ по вакуумированию в несущей трубе ТЛТ делают откачное отверстие и на этом месте извлекают теплоизоляционный материал из межтрубного пространства. В откачное отверстие приваривают седло клапана и устанавливают в нем уплотнительную прокладку. Устройство для вакуумирования соединяется с вакуумным насосом и навинчивается на внутреннюю резьбу седла клапана. После завершения работ по вакуумированию в отверстие седла клапана опускают заглушку, отвинчивают устройство для

вакуумирования, убирают уплотнительную прокладку, устанавливают упор с крышкой–гайкой.

Разработанная с участием автора конструкция ТЛТ в 1995 г. более полугодом испытывалась на скв. №6805 Бованенковского НГКМ. Результаты исследований показали, что при применении ТЛТ заколонная температура скважины оставалась ниже нулевой, а темп ее роста имел затухающий во времени характер. На конструкцию ТЛТ получен патент 2410523 РФ, опубликованный 27.01.2011, что свидетельствует о новизне предложенного технического решения.

Созданная на основе проведенного анализа отечественных и зарубежных конструкций теплоизолированных труб усовершенствованная конструкция ТЛТ с низким коэффициентом теплопроводности теплоизоляции может быть использована на скважинах северных месторождений и участвовать в программе импортозамещения ПАО «Газпром».

С участием автора были проведены:

- стендовые испытания образцов ТЛТ–89х60 с вакуумно–многослойной изоляцией на герметичность и прочность в ООО «ВНИИГАЗ», а также теплофизические исследования этих труб в ЗАО «Экогермет–У» (г. Ижевск). Образцы ТЛТ–89х60 успешно прошли испытания на герметичность и прочность. Рассчитанный по результатам теплофизических исследований коэффициент теплопроводности изоляции ТЛТ соответствовал предъявляемым к этим трубам требованиям;

- стендовые теплофизические испытания ТЛТ–168х114 с блочно–цилиндрической изоляцией ТЗМБ в ООО «ВНИИГАЗ». Установлено, что длительное хранение (около 10 лет) не привело к потере вакуума в трубе;

- лабораторные исследования теплопроводности теплоизоляций ТЗМК–10, ТЗМБ и Альфоль–ЭВТИ–7 для ТЛТ в условиях вакуума. По оценочным расчетам при использовании ТЛТ с коэффициентом теплопроводности изоляции 0,01 Вт/м·К возможно замедление протаивания ММП в околоствольном пространстве теплоизолированной скважины в течение длительного срока ее эксплуатации. По результатам исследований установлено, что в интервале температур 268÷303К коэффициент теплопроводности изоляции ТЛТ 0,01 Вт/м·К обеспечивается при давлении остаточного газа в кольцевом пространстве между кожухом и трубой несущей 2 Па (ТЗМК), 20 Па (Альфоль–ЭВТИ –7), 30 Па (ТЗМБ). Теплоизоляция ТЗМБ рекомендуется для применения при изготовлении ТЛТ.

На основе результатов проведенных исследований разработан СТО Газпром 2–3.2–174–2007, в котором приведены основные требования к конструкции ТЛТ–168х114, коэффициенту теплопроводности теплоизоляции ТЛТ, надежности труб, транспортировке и хранению ТЛТ, а также описаны методики испытаний ТЛТ.

Автором проведена оценка влияния коэффициента теплопроводности изоляции ТЛТ на радиус протаивания ММП в околоствольном пространстве скважины через 30 лет ее эксплуатации при различных значениях льдистости мерзлой породы (на примере Бованенковского НГКМ).

Для расчетов использовано уравнение теплопроводности для мерзлой зоны из работы Г. Карслоу:

$$\frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 T_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_m}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где τ – время работы скважины, ч; r – подвижная граница фазовых переходов ($R_{np} \leq r < \infty$), м; R_{np} – радиус протаивания ММП, м; $T_m(r, 0) = T_0$ – начальная температура мерзлых пород, °С; $T_m(R_{np}, \tau) = 0$ – температура на границе фазовых переходов в момент времени τ , °С; $\alpha = \lambda_m / C_n$ – коэффициент температуропроводности ММП, м²/ч; λ_m – теплопроводность ММП, ккал/ч·м·°С; C_n – объемная теплоемкость пород, ккал/м³·°С.

Решением уравнения (1) в осесимметричной радиальной системе координат для непрерывно распределенного линейного источника является интегральная показательная функция Ei :

$$T_m = T_0 - \frac{T_0}{Ei(-z^2)} \cdot Ei\left(-\frac{r^2}{4 \cdot \alpha \cdot \tau}\right), \quad (2)$$

$$Ei\left(-\frac{r^2}{4 \cdot \alpha \cdot \tau}\right) = - \int_{\frac{r^2}{4 \cdot \alpha \cdot \tau}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du, \quad z = \frac{R_{np}}{2\sqrt{\alpha \cdot \tau}}, \quad (3)$$

Радиус протаивания ММП в околоствольном пространстве скважины Бованенковского НГКМ через 30 лет ее эксплуатации при изменении коэффициента теплопроводности изоляции ТЛТ от 0,02 до 0,16 Вт/м·К составил 1,14÷10 м, 1,11÷8,3 м, 1,07÷7,3 м при льдистости ММП 10, 20, 30%, соответственно (рисунок 4).

Расстояние между устьями эксплуатационных скважин Бованенковского НГКМ на кустовых площадках 20 м. Результаты расчетов показали, что через 30 лет эксплуатации возможно смыкание ореолов протаивания ММП между теплоизолированными скважинами на кустовой площадке при коэффициенте теплопроводности изоляции ТЛТ $\geq 0,16$ Вт/м·К и льдистости мерзлых пород $\leq 10\%$ (рисунок 4). В настоящее время на месторождении в конструкции части эксплуатационных скважин применяются ТЛТ с коэффициентом теплопроводности изоляции менее 0,012 Вт/м·К. Согласно проведенным расчетам радиус протаивания ММП при таком коэффициенте теплопроводности изоляции и льдистости ММП $\leq 30\%$ составляет ~ 1 м. В 2015 г. более 98% скважин с ТЛТ на месторождении работало без приустьевых осложнений.

Применение ТЛТ с низкотеплопроводной изоляцией в конструкции скважин Бованенковского НГКМ позволяет замедлить протаивание мерзлоты и эффективно эксплуатировать скважины до завершения разработки месторождения.

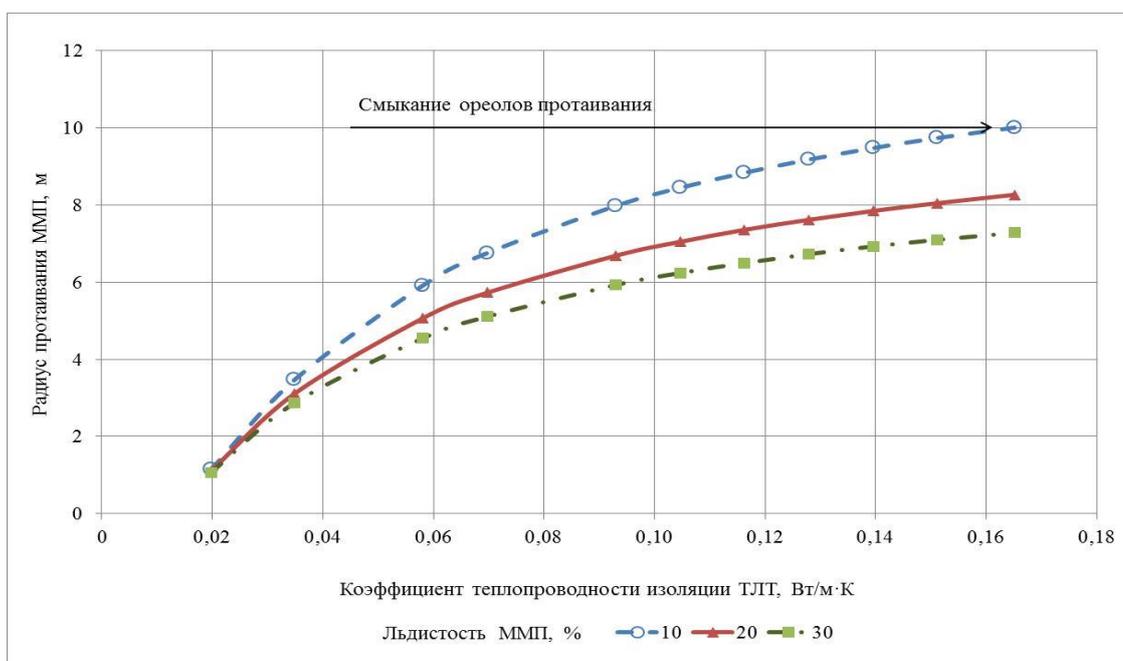


Рисунок 4 – Радиус протаивания ММП в околоствольном пространстве скважины с ТЛТ через 30 лет ее эксплуатации (Бованенковское НГКМ)

Третья глава посвящена разработке методики определения коэффициента теплопроводности теплоизоляции ТЛТ в эксплуатируемой скважине при использовании результатов замеров температуры ММП температурными датчиками в температурных трубках для обоснования технологии добычи флюида без протаивания мерзлоты.

Коэффициент теплопроводности теплоизоляции ТЛТ рекомендуется оценивать по результатам стендовых испытаний. Для этого необходимо ТЛТ установить на специальном стенде, закрепить на трубе тепломеры и термомпары, подать теплоноситель внутрь трубы, измерить температуру на трубе и внутри ее.

В скважине на величину коэффициента теплопроводности теплоизоляции ТЛТ влияют дополнительные факторы, которые необходимо учитывать при его расчете (например, характеристики цемента, свойства горных пород и др.).

С участием автора разработана методика определения коэффициента теплопроводности теплоизоляции ТЛТ в эксплуатируемой скважине, согласно которой необходимо: рассчитать радиус теплового влияния скважины; измерить температуру ММП за пределами радиуса теплового влияния скважины и на устье скважины, а также в закрепленных на направлении скважины термометрических трубках путем спуска в них температурных датчиков на различные глубины, соответствующие расположению ТЛТ; рассчитать коэффициент теплопроводности теплоизоляции ТЛТ в скважине по предложенной формуле.

При сравнении рассчитанного по предложенной методике и заявленного заводом изготовителем коэффициентов теплопроводности теплоизоляции ТЛТ делается вывод о дальнейшем использовании или замене исследуемой трубы.

Использование данной методики позволяет непрерывно контролировать свойства теплоизоляции ТЛТ в эксплуатируемой скважине по всей длине

теплоизолированной колонны. Расчетные коэффициенты теплопроводности теплоизоляции ТЛТ по предложенной методике соответствовали данным промышленных исследований скважины №6805 Бованенковского НГКМ.

На разработанную с участием автора методику определения коэффициента теплопроводности теплоизоляции ТЛТ в скважине получен патент 2424420 РФ (опубликован 20.07.2011).

В четвертой главе приведен расчет коэффициента теплопроводности теплоизоляции ТЛТ для надежной эффективной эксплуатации расположенной в зоне ММП скважины в течение 30 лет (на примере Заполярного НГКМ).

Принята следующая конструкция скважины: направление $\varnothing_{\text{нар}} 324$ мм, оснащенное теплоизоляцией толщиной $10 \div 75$ мм с коэффициентом теплопроводности теплоизоляции $0,035 / 0,058 / 0,116$ Вт/м·К; верхняя секция эксплуатационной колонны $\varnothing_{\text{нар}} 250,8$ мм (Япония); верхняя секция лифтовой колонны $\varnothing_{\text{вн}} 114$ мм составлена из ТЛТ, оснащенных теплоизоляцией толщиной 18, 20, 27 мм.

Результаты расчетов показали (рисунок 5), что может быть обеспечена безопасная эффективная эксплуатация в течение 30 лет скважин Заполярного НГКМ заданной конструкции при одновременном применении теплоизолированного направления и ТЛТ с коэффициентом теплопроводности теплоизоляции $0,019 \div 0,09$ Вт/м·К (сеноман) и $0,0055 \div 0,0096$ Вт/м·К (нижний мел).

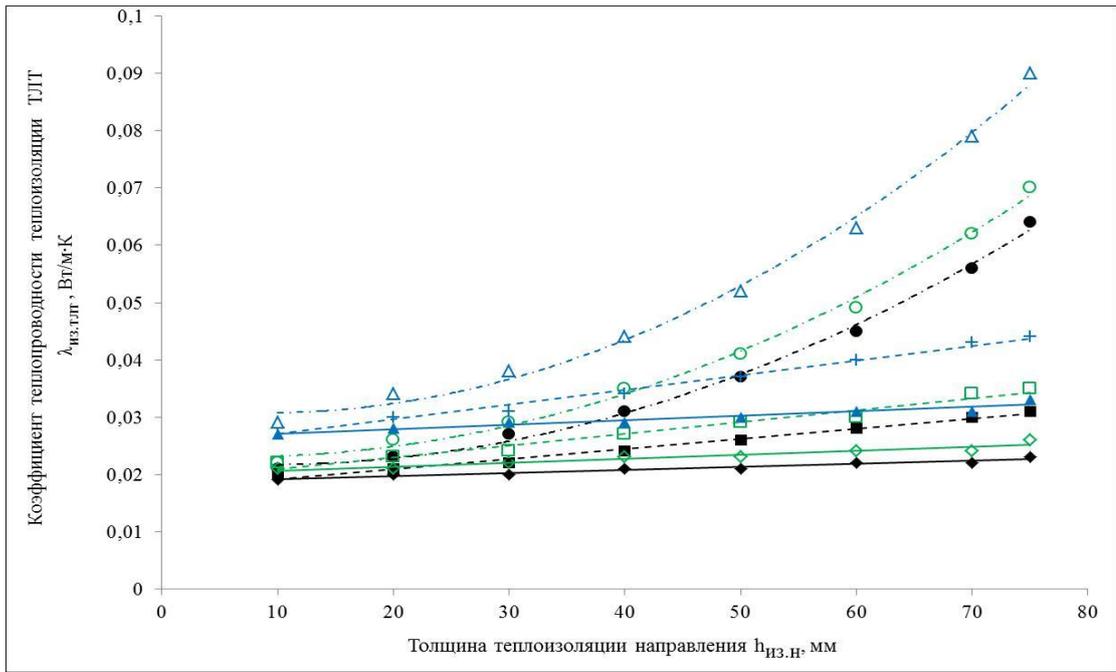
Получены зависимости коэффициента теплопроводности теплоизоляции ТЛТ от толщины теплоизоляции ТЛТ и направления, коэффициента теплопроводности теплоизоляции направления для скважин Заполярного НГКМ.

Увеличение толщины теплоизоляции ТЛТ и уменьшение коэффициента теплопроводности теплоизоляции ТЛТ увеличивает время многолетней эффективной эксплуатации скважин, расположенных в зонах распространения ММП.

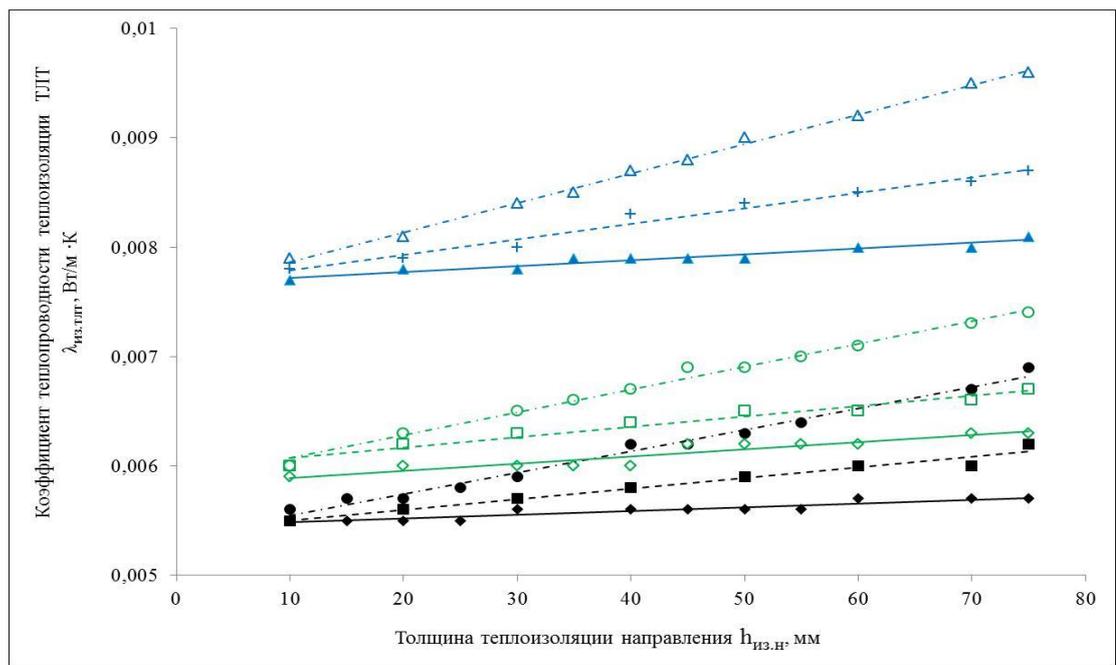
В пятой главе дана оценка технико-экономической эффективности применения ТЛТ для надежной безопасной эксплуатации скважин в зонах мерзлоты (на примере Бованенковского НГКМ). В соответствии с проектом разработки месторождения в конструкции части эксплуатационных скважин предусмотрено использование ТЛТ.

Бованенковское НГКМ введено в промышленную эксплуатацию в 2012 г. До 2016 г. на месторождении эксплуатировалось 39 скважин с ТЛТ и 165 скважин без ТЛТ. Более 90% скважин с ТЛТ и менее 50% скважин без ТЛТ работали без осложнений (газопроявления; просадки грунта в приустьевой зоне). Протаивание и разрушение ММП в околоствольном пространстве скважины может приводить к смятию обсадных колонн, разрушению их резьбовых соединений и т.д. В связи с этим межремонтный период эксплуатации скважин сокращается.

Для оценки эффективности применения ТЛТ на эксплуатационных скважинах Бованенковского НГКМ был выполнен расчет технико-экономических показателей двух вариантов с использованием принципа "с проектом"—"без проекта" для одной скважины: вариант "без проекта" предусматривает эксплуатацию скважины, в конструкции которой не используют ТЛТ; вариант "с



сеноман



нижний мел

- ◆ $\lambda_{из.н} = 0,116$ Вт/м·К, $h_{из.тлт} = 18$ мм
- $\lambda_{из.н} = 0,058$ Вт/м·К, $h_{из.тлт} = 18$ мм
- $\lambda_{из.н} = 0,035$ Вт/м·К, $h_{из.тлт} = 18$ мм
- ◇ $\lambda_{из.н} = 0,116$ Вт/м·К, $h_{из.тлт} = 20$ мм
- $\lambda_{из.н} = 0,058$ Вт/м·К, $h_{из.тлт} = 20$ мм
- $\lambda_{из.н} = 0,035$ Вт/м·К, $h_{из.тлт} = 20$ мм
- ▲ $\lambda_{из.н} = 0,116$ Вт/м·К, $h_{из.тлт} = 27$ мм
- + $\lambda_{из.н} = 0,058$ Вт/м·К, $h_{из.тлт} = 27$ мм
- △ $\lambda_{из.н} = 0,035$ Вт/м·К, $h_{из.тлт} = 27$ мм

Рисунок 5 – Зависимость коэффициента теплопроводности теплоизоляции ТЛТ ($\lambda_{из.тлт}$) от толщины изоляции ТЛТ ($h_{из.тлт}$) и направления ($h_{из.н}$), коэффициента теплопроводности теплоизоляции направления ($\lambda_{из.н}$) для эффективной эксплуатации скважины в течение 30 лет (Заполярье НГКМ)

проектом" предполагает применение ТЛТ в конструкции скважины. Расчетный период составляет 20 лет с 2016 по 2035 гг.

Экономический эффект обусловлен снижением затрат на отсыпку грунта в приустьевой зоне скважины при оттаивании ММП и увеличением межремонтного периода эксплуатации скважины.

Для расчета экономической эффективности по вариантам приняты проектные нормативы по капитальным вложениям в бурение скважин и затратам на капитальный ремонт. Налоги на имущество и прибыль рассчитывались в соответствии с налоговым кодексом РФ.

Эффективность использования ТЛТ на примере одной скважины Бованенковского НГКМ подтверждается расчетами, т.к. величина интегрального эффекта (чистого дисконтированного дохода) положительна и оценивается в 0,22 млн руб., а индекс эффективности больше 1 (таблица 1).

Таблица 1 – Суммарные показатели экономической эффективности варианта "с проектом" за расчетный период

Наименование показателей	Значение
Экономия затрат на капитальный ремонт скважины, млн руб.	4,6
Чистая прибыль, млн руб.	3,1
Чистый дисконтированный доход, млн руб.	0,22
Налоги в бюджет РФ, млн руб.	1,7
Дисконтированный доход в бюджет РФ, млн руб.	0,47
Индекс эффективности, отн. ед.	1,14
Срок окупаемости по денежному потоку, г.	6
Дисконтированный срок окупаемости, г.	12

В заключении приведены основные выводы и результаты работы:

1. В настоящее время актуальны вопросы обеспечения термоизоляции обсадных и лифтовых колонн для безопасной эксплуатации скважин на месторождениях, расположенных в районах распространения ММП. Разработка новых конструкций теплоизолированных труб позволит надежно и эффективно эксплуатировать скважины северных месторождений.

2. В работе проведен анализ мирового опыта по использованию способов защиты скважин от влияния ММП, на основании которого дано обоснование эффективности применения теплоизолированных труб при эксплуатации скважин.

3. На основе анализа теоретических, лабораторных, заводских, промысловых исследований и испытаний ТЛТ разработана и запатентована усовершенствованная за счет применения оригинальной конструкции вакуумного клапана и теплоизоляции в виде полых цилиндрических блоков из кварцевого или базальтового волокна конструкция ТЛТ, обеспечивающая высокую надежность и

эффективность эксплуатации скважин в мерзлоте. Предложенная конструкция ТЛТ прошла испытания на Бованенковском НГКМ.

4. Усовершенствованная с участием автора конструкция ТЛТ была использована при подготовке СТО Газпром 2–3.2–174–2007 «Технические требования к теплоизолированным лифтовым трубам», в котором приведены основные требования к конструкции и коэффициенту теплопроводности теплоизоляции ТЛТ, надежности труб и резьбовых соединений.

5. Анализ проведенных расчетов показал, что использование ТЛТ с коэффициентом теплопроводности изоляции менее 0,012 Вт/м·К в конструкции расположенных на кустовой площадке скважин Бованенковского НГКМ не приведет к смыканию ореолов протаивания мерзлоты в их околоствольном пространстве через 30 лет эксплуатации.

6. Разработана методика определения коэффициента теплопроводности теплоизоляции ТЛТ в эксплуатируемой скважине для непрерывного контроля теплотехнические свойства теплоизоляции по всей длине теплоизолированной колонны.

7. На основе проведенных исследований обоснован коэффициент теплопроводности теплоизоляции ТЛТ для заданной конструкции скважины, обеспечивающий ее надежную эффективную эксплуатацию в течение 30 лет (на примере Заполярного НГКМ).

8. Эффективность использования ТЛТ в конструкции скважины Бованенковского НГКМ подтверждена расчетами, согласно которым величина интегрального эффекта (чистого дисконтированного дохода) положительна и оценивается в 0,22 млн руб., а индекс эффективности больше 1.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Научно-технические журналы, входящие в «Перечень...» ВАК

1. Смирнов В.С., Серегина Н.В. Технологические условия бурения в многолетнемерзлой породе охлажденным буровым раствором // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2006. – №6. – С.16–18.

2. Смирнов В.С., Харитонов А.Н., Николаев О.В., Серегина Н.В. Оценка стабильности коэффициента теплопроводности блочно–цилиндрической изоляции труб лифтовых теплоизолированных (ТЛТ–168x114) по результатам стендовых и промысловых теплотехнических испытаний // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2006. – №10. – С.11–13.

3. Смирнов В.С., Серегина Н.В. Оценка влияния «теплового мостика» на эффективность теплоизолированных лифтовых труб // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2008. – №9. – С.2–4.

4. Серегина Н.В. Способ определения коэффициента теплопроводности теплоизоляции теплоизолированной лифтовой трубы в скважине // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2011. – №12. – С.34–36.

5. Серегина Н.В. Применение теплоизолированных лифтовых труб для эффективной эксплуатации скважин в зоне мерзлоты // Нефтепромысловое дело. – 2016. – № 10. – С. 58–60.

Патенты РФ на изобретение

6. Пат. 2352750 РФ, E21B17/00, F16L59/065. Теплоизолированная колонна / В.С. Смирнов, Б.А. Кумейко, Н.В. Серегина (РФ). – № 2007130867/03; Заявлено 13.08.2007; Оpubл. 20.04.2009, Бюл. №11.

7. Пат. 2410523 РФ, E21B17/00, F16L59/00. Теплоизоляционная колонна / В.С. Смирнов, Р.Г. Темиргалеев, В.Г. Антонов, Н.В. Серегина (РФ). – № 2008126687/03; Заявлено 30.06.2008; Оpubл. 27.01.2011, Бюл. №3.

8. Пат. 2424420 РФ, E21B36/00, G01N25/18. Способ определения коэффициента теплопроводности теплоизоляции теплоизолированной лифтовой трубы в скважине / Н.В. Серегина, В.И. Нифантов (РФ). – № 2010103283/03; Заявлено 01.02.2010; Оpubл. 20.07.2011, Бюл. №20.

Конференции и другие периодические издания

9. Смирнов В.С., Ю.А. Перемышцев, Н.В. Серегина Разработка и внедрение конструкций скважин с повышенной надежностью в зоне мерзлоты на месторождении Бованенково // Вопросы строительства, эксплуатации и капитального ремонта скважин: Сб. науч. тр. – М.: ООО «ВНИИГАЗ», 2008. – С. 26–33.

10. Серегина Н.В. Теплоизолированная колонна // XVII Международная научно–практическая конференция «Реагенты и материалы для технологических жидкостей, применяемых при строительстве и эксплуатации газовых, газоконденсатных и нефтяных скважин. Актуальные вопросы сервисного сопровождения бурения и утилизации отходов», г. Суздаль, 4 – 7 июня, 2013: материалы XVII Междунар. науч. – практ. конф. – Владимир: Изд–во ВлГУ, 2014. – С. 227–231.

11. Серегина Н.В. Теплоизолированная лифтовая труба // X Всероссийская научно–техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России», Москва, 10 – 12 февраля, 2014: Тез. докл. – М.: 2014. – С. 76.

12. Серегина Н.В. Вакуумный клапан для теплоизолированной лифтовой трубы // XVIII Международная научно–практическая конференция «Реагенты и материалы для строительства, эксплуатации и капитального ремонта нефтяных, газовых и газоконденсатных скважин: производство, свойства и опыт применения. Экологические аспекты нефтегазового комплекса», г. Суздаль, 3 – 6 июня, 2014: материалы XVIII Междунар. науч. – практ. конф. – Владимир: Изд–во ООО «Аркаим», 2014. – С. 151–154.

13. Серегина Н.В. Теплоизолированные лифтовые трубы (ТЛТ) // XIX Международная научно–практическая конференция «Реагенты и материалы для строительства, эксплуатации и ремонта нефтяных, газовых и газоконденсатных скважин: производство, свойства и опыт применения. Экологические аспекты нефтегазового комплекса», г. Суздаль, 2 – 5 июня, 2015: материалы XIX Междунар. науч. – практ. конф. – Владимир: Изд–во ВлГУ, 2015. – С. 67–73.

14. Серегина Н.В. К вопросу о теплоизолированных лифтовых трубах // XI Всероссийская научно–техническая конференция «Актуальные проблемы

развития нефтегазового комплекса России», г. Москва, 8 – 10 февраля, 2016: Тез. докл. – М.: 2016. – С. 118.

15. Серегина Н.В. О теплоизолированных лифтовых трубах // XX Международная научно–практическая конференция «Реагенты и материалы для строительства, эксплуатации и ремонта нефтяных, газовых и газоконденсатных скважин: производство, свойства и опыт применения. Экологические аспекты нефтегазового комплекса», г. Суздаль, 7 – 10 июня, 2016: материалы XX Междунар. науч. – практ. конф. – Владимир: Изд–во ООО «Аркаим», 2016. – С.158–160.

Подписано к печати «___» _____ 2018 г.

Заказ № _____

Тираж 100 экз.

1 уч. – изд.л, ф-т 60x84/16

Отпечатано в ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

По адресу: 142717, Московская область,

Ленинский район,

сельское поселение Развилковское, пос. Развилка,

Проектируемый проезд № 5537, владение 15, строение 1,

ООО «Газпром ВНИИГАЗ».