

На правах рукописи

КОРОБОВ Станислав Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕФТЕГАЗОВЫХ
СКВАЖИН С ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДОЙ С ЦЕЛЬЮ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИХ КОНСЕРВАЦИИ
В СЕВЕРНЫХ РЕГИОНАХ**

Специальность 25.00.36 - «Геоэкология»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Апатиты
2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте экологических проблем Севера Архангельского научного центра УрО РАН.

Научный руководитель

Доктор геолого-минералогических наук, профессор

Губайдуллин Марсель Галиулович

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор

Золотухин Анатолий Борисович

Кандидат технических наук, доцент

Дорфман Михаил Борисович

Ведущая организация

Горный институт УрО РАН

Защита состоится «9» октября 2009 года в 14.30 часов на заседании диссертационного совета Д002.105.01 при Учреждении Российской академии наук Институте химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева КНЦ РАН по адресу: 184209, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана, 26а, Академгородок.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева КНЦ РАН.

Автореферат разослан «8» сентября 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат технических наук



Громов П. Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований

На Европейском Севере России в пределах территории Ненецкого автономного округа (НАО) природные условия в разной степени оказывают влияние на объекты нефтяной инфраструктуры. В условиях распространения вечномерзлых пород нарушение их термического режима при эксплуатации нефтяных месторождений приводит к серьезным осложнениям. Тепловое воздействие со стороны скважины и других объектов нефтедобывающего комплекса сопровождается растеплением льда, содержащегося в отложениях, и формированием оттаявших заколонных пространств.

Консервация и ликвидация отработанных скважин влечет за собой процессы обратного промерзания пород вокруг обсадных колонн, в результате чего может повышаться давление в заколонных пространствах. Рост давления в ряде случаев ведет к развитию в конструкциях многосекционных скважин критических напряжений, к смятию колонн и разгерметизации скважин, что в свою очередь может привести к выбросам углеводородов в атмосферу, то есть к созданию аварийных ситуаций.

Актуальность исследований определяется необходимостью оценки и учета теплового воздействия объектов нефтедобывающей инфраструктуры на геологическую среду в условиях развития многолетней мерзлоты. Диссертационная работа посвящена исследованию теплофизических процессов, происходящих в многолетнемерзлых породах (ММП), на примере освоения северной части Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (ТПНГП). Знание этих процессов позволит разработать комплекс мероприятий, направленных на снижение риска возникновения аварийных ситуаций с отрицательными экологическими последствиями при интенсификации добычи нефти на Европейском Севере России.

Целью работы является исследование процессов теплофизического взаимодействия в системе «скважина – мерзлая толща» с учетом физических и геологических факторов при освоении нефтяных месторождений северной части ТПНГП, а также разработка новых методических и технических решений при консервации и ликвидации нефтяных скважин в зонах распространения ММП, направленных на предупреждение их смятия и разгерметизации.

Основные задачи исследований

В соответствии с поставленной целью, в работе решались следующие задачи:

1. Проведение анализа природно-климатических условий НАО и их влияния на строительство, эксплуатацию и консервацию нефтяных скважин.

2. Изучение свойств, состава и температурного режима мерзлых пород при фазовых переходах в условиях атмосферного и избыточного давлений.

3. Определение температуры флюида в скважине на произвольной глубине в зависимости от дебита и теплофизических свойств пластовой продукции и прилегающих к скважине пород.

4. На основе анализа различных аналитических и численных методов обоснование и реализация адаптированного к реальным средам алгоритма для расчета движения границы фазового перехода в ММП.

5. Разработка нового технического способа, обеспечивающего безаварийную консервацию и ликвидацию нефтяных скважин в зонах распространения ММП.

Объект исследований

Геологическая среда вокруг ствола скважины, находящейся в зоне распространения многолетнемерзлых пород.

Предмет исследований

Термический режим мерзлых пород и процессы теплофизического взаимодействия, сопровождающие фазовые переходы в системе «скважина – мерзлая толща».

Фактический материал и методы исследований

При написании работы были использованы данные, полученные в процессе многолетнего мониторинга за термическим состоянием мерзлых грунтов на Ардалинском нефтегазодобывающем комплексе и на метеорологических станциях АЦГМС-Р, результаты гидродинамических исследований на скважине, выполнявшихся в Лаборатории гидродинамики НПЦ ООО «Лукойл-Север», а также материалы, полученные автором в результате обработки данных лабораторных исследований. Методы исследований заключались в использовании широкого комплекса средств, включающего анализ и обобщение фондовых и литературных источников, аналитическую и статистическую обработку данных, математическое моделирование и компьютерную реализацию численных алгоритмов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Исследованы процессы, происходящие в ММП в районах нефтедобычи на территории НАО. Для этих условий впервые реализован численный метод, позволяющий определить температуру флюида по стволу с учетом геометрии и строения скважины, теплофизических параметров

околоскважинных пород, дебита, температуры флюида на забое и ряда других параметров.

2. Разработана и реализована математическая модель взаимодействия мерзлой толщи с источниками теплового воздействия для случая горизонтально-слоистого строения геологической среды (двухполовиномерный случай) с применением комплекса численных алгоритмов, таких как метод энтальпии, метод переменных направлений, метод прогонки и другие.

3. Выполнено модельное исследование различных вариантов растепления мерзлых пород. На основе многолетнего мониторинга за термическим состоянием почв, с учетом изменения климата на рассматриваемой территории проведены расчеты по оценке радиуса растепления мерзлых пород вокруг ствола скважины.

4. Разработан и запатентован способ, направленный на предотвращение смятия и разгерметизации нефтяных скважин при их консервации в зонах распространения ММП.

Защищаемые научные положения

1. Метод, позволяющий определять температуру флюида в скважине на произвольной глубине без проведения трудоемких и дорогостоящих внутрискважинных измерений и выполнять расчет граничных условий для проведения исследований по оценке радиуса зоны растепления.

2. Решение двухполовиномерной задачи растепления мерзлых пород, основанной на применении предложенного комплекса численных алгоритмов, который позволяет оценивать радиус оттаявших пород вокруг ствола скважины.

3. Способ, направленный на предупреждение смятия и разгерметизации нефтяных скважин при их консервации и ликвидации в зонах распространения ММП, позволяющего снизить угрозу возникновения аварийных ситуаций с неблагоприятными экологическими последствиями для природной среды.

Практическая ценность работы

1. Предложенный метод определения температуры флюида по стволу скважины позволяет без проведения трудоемких и дорогостоящих внутрискважинных измерений определять физико-механические параметры пластовой продукции по стволу скважины в произвольный момент времени.

2. Реализованная двухполовиномерная модель взаимодействия мерзлой толщи с источниками теплового воздействия позволяет получать удовлетворяющие реальной физической картине данные о состоянии прилегающих к стволу скважины мерзлых пород.

3. Разработанный способ, направленный на предупреждение смятия и разгерметизации нефтяных скважин, позволит повысить рентабельность освоения нефтяных месторождений и снизить риск возникновения аварийных ситуаций, приводящих к загрязнению окружающей среды.

Верификация результатов исследований с производственными данными, имеющимися в Лаборатории гидродинамики НПЦ ООО «Лукойл-Север» и на Ардалинском нефтегазодобывающем комплексе, показывает их хорошую сходимость и возможность практического применения разработанных автором численных алгоритмов и технологий их реализации.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертации докладывались: на IV научно-практической конференции «Экологическое образование и экологическая наука: сотрудничество и проблемы» (Архангельск, 2004), на региональных научно-технических конференциях в Архангельском государственном техническом университете (2005, 2006, 2007), на конференции «Академическая наука и ее роль в развитии производительных сил в северных регионах России» (Архангельск, 2006), на международной молодежной конференции «Экология 2007» (Архангельск, 2007), на IV научно-практической конференции с международным участием «Экологические проблемы. Взгляд в будущее» (Ростов-на-Дону, 2007), на XVII Международной конференции (Школе) по морской геологии «Геология морей и океанов» (Москва, 2007).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 3 работы – в изданиях, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, содержит 162 страницы машинописного текста, 32 рисунка, 16 таблиц, библиографию из 145 наименований.

Автор глубоко благодарен научному руководителю доктору геолого-минералогических наук, профессору М.Г. Губайдуллину, признателен кандидату технических наук А.В. Конюхову за полезные консультации при выполнении исследований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, сформулированы цели и поставлены задачи, изложены защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость результатов работы.

В главе 1 охарактеризованы климатические условия НАО с учетом географического положения нефтегазовых месторождений, приведены основные сведения о геологическом строении среды и ресурсах нефтегазовых месторождений севера ТПНГП, дана геокриологическая характеристика региона и рассмотрено влияние природно-климатических условий на строительство, эксплуатацию, консервацию и ликвидацию нефтегазовых скважин.

Север ТПНГП характеризуется сложными природными условиями. Большую часть года территория покрыта снегом, а на море, реках и водоемах сохраняется ледяной покров. Климатические условия неблагоприятны для проживания населения и ведения хозяйственной деятельности. Среднегодовая температура воздуха повсеместно ниже 0°C . Густая речная сеть, большое количество озер и болот в некоторых районах занимают более половины их площадей. Все эти факторы в совокупности создают повышенные трудности для промышленного освоения территории.

На территории северной части провинции выделяются следующие нефтегазоносные области (НГО): Малоземельско-Колгуевская, Печоро-Колвинская, Хорейверская, Варандей-Адзвинская, Северо-Предуральская. Некоторыми исследователями еще выделяются Ижма-Печорская и Косью-Роговская нефтегазоносные области (рис. 1). По сумме углеводородов наибольшие ресурсы сосредоточены в Печоро-Колвинской НГО, по нефти наибольшие запасы сосредоточены в трех областях – Хорейверской, Варандей-Адзвинской и Печоро-Колвинской НГО.

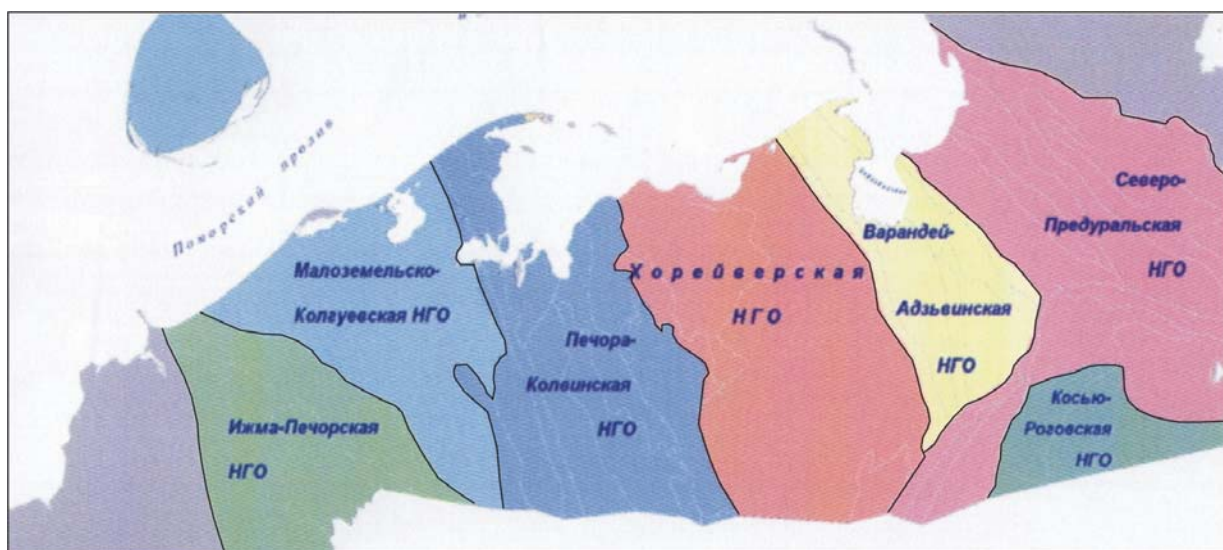


Рис. 1. Схема нефтегазоносного районирования НАО

Основу запасов углеводородного сырья северной части ТПНГП составляют нефтяные месторождения. Газ и газоконденсат в настоящее вре-

мя значительной роли не играют. Всего разведанные геологические запасы нефти категории C_1+C_2 на суше и море оцениваются в 4.7 млрд. т, а извлекаемые – в 1.4 млрд. т (Губайдуллин, 2003). По состоянию на 1 января 2009 года на территории Ненецкого автономного округа нефть добывалась из 18 месторождений (при общем количестве выявленных здесь к этому времени 80 нефтегазовых месторождений). Таким образом, на севере ТПНГП создана мощная сырьевая база для развития нефтегазодобывающей промышленности.

Разработка нефтяных месторождений НАО, добыча и транспортировка нефти будут сопровождаться усилением техногенной нагрузки на природную среду, представляющую собой многокомпонентную экосистему. В условиях Крайнего Севера, характеризующегося высокой уязвимостью природы, под воздействием окажется большинство ее компонент. Среди них особое место занимает геологическая среда, которая представляет собой совокупность отдельных элементов - рельеф, горные породы с почвенным покровом, подземные воды, многолетняя мерзлота, а также происходящие в ней природные и техногенные процессы.

Уровень опасности аварий на сооружениях добывающего комплекса в криолитозоне значительно выше, чем в центральных районах России, вследствие специфических свойств мерзлых пород, теряющих прочность и связность при растеплении и оттаивании [9]. Технологические режимы строительства, эксплуатации и консервации скважин протекают при сопряженном термомеханическом и массообменном взаимовлиянии компонентов системы скважина-порода друг на друга. Особенности перераспределения тепла, массы и прочности приводят к комплексу специфических для криолитозоны осложнений при строительстве, эксплуатации, консервации и ликвидации скважин. Впервые систематизированное описание этих осложнений было дано в публикациях А.В. Марамзина (1959, 1963), а предложения по расчету параметров осложнений были изложены в работах Г.С. Грязнова (1969, 1978), Б.Б. Кудряшова (1983) и др. Эти работы получили свое продолжение в исследованиях по проектированию и технологическому обеспечению процессов нефтедобычи в криолитозоне, проводимых отраслевыми научно-исследовательскими институтами, такими как ВНИИБТ, ВНИИ, ВНИИГАЗ, ПНИИС, ВНИИГ, ЗапСибНИГНИ, СибНИИНП, ТюменНИИГипрогаз и др. Параллельно с исследованиями, проводимыми в нашей стране, работа в данном направлении велась и за рубежом. Среди работ иностранных авторов наиболее известными являются работы Гудмана (Goodman, 1975, 1977, 1978) и Вуда (Wood, 1975).

В настоящее время для обеспечения надежности консервации скважин в зонах распространения ММП проводятся многочисленные мероприятия: сокращают сроки бурения скважин, снижают объемы кавернообразований в процессе бурения ММП, исключают применение в заколонных и межколонных пространствах замерзающих материалов и жидкостей, завышают расчетные толшины, прочностные характеристики стенок труб и цементного камня (Быков и др., 2005). Но эти и другие решения, как показала практика, при значительных дополнительных затратах не исключают развития на законсервированных скважинах аварийных ситуаций.

Нефтяные углеводороды, попадая в окружающую среду, оказывают негативное влияние на все ее компоненты. В северных и полярных регионах это воздействие усугубляется тем, что в условиях низких температур восстановление экосистем происходит значительно медленнее, чем на расположенных южнее территориях. Разливы нефти, происходящие непосредственно на скважинах вследствие смятия колонн мерзлыми породами, имеют серьезные последствия. Во-первых, если своевременно не провести комплекс работ по рекультивации загрязненных участков, загрязнение станет долговременным, а во-вторых, при определенных обстоятельствах загрязнение может распространиться на значительные территории. Основные моменты воздействия углеводородов на компоненты окружающей среды включают в себя воздействие на атмосферный воздух, поверхностные и подземные воды, грунт и почвенный покров, на растительный покров, на животный мир и на человека (Бояршинов, 1999; Кормак, 1989; Пиковский, 1993; Глазовская, 1979 и др.).

Таким образом, воздействие на окружающую среду нефтяных разливов в северных регионах весьма существенно и в случае аварий на промыслах может привести к тяжелым экологическим последствиям, особенно при попадании нефти в водные объекты. Поэтому проблемам безопасности при эксплуатации нефтяных месторождений требуется уделять одно из приоритетных значений.

Во **2-й главе** проведен обзор использованных при написании диссертации методов исследования. Для выполнения задач, поставленных в данной работе, необходимо изучение природных условий и экологической ситуации в регионе, обработка результатов наблюдений и экспериментальных данных, моделирование естественных и техногенных температурных полей, а также применение численных методов решений дифференциальных уравнений.

С целью получения общих представлений о процессах и явлениях, происходящих в природе, и для характеристики природно-климатических

и экологических условий изучаемого региона, в работе применялся *описательный метод*. Кроме этого использовались тематические геологические, климатические карты, а также обзорные и распределения растительности (*картографический метод*).

При изучении природных и экологических условий в работе были использованы *основные статистические* характеристики окружающей среды – средние значения и, при необходимости, дисперсии, содержащиеся в режимно-справочных пособиях и научных публикациях, усредненные за длительные промежутки времени.

Чтобы найти закономерность зависимости исследуемой величины от некоторой переменной, необходимо найти соответствующую функцию, аппроксимирующую наилучшим образом имеющиеся данные. В диссертации *регрессионный анализ* использовался при обработке экспериментальных данных, полученных в результате выполнения лабораторных исследований по изучению прочностных характеристик замораживаемого льда.

При исследовании температуры почвы с целью задания граничных условий в моделях растепления и обратного смерзания, в работе проводился *тренд-анализ*, а для восстановления пропущенных значений температуры почв на различных глубинах, полученных в процессе мониторинга за их состоянием на метеорологических станциях, применялась *интерполяция*.

Математические модели физических полей используются не только для теоретических исследований, но и для решения сугубо прикладных задач. В диссертации при разработке и реализации численных алгоритмов расчета температуры флюида по стволу скважины, а также для исследования температурных полей горных пород применялись *интегральные и дифференциальные модели*. При выводе уравнений зависимости прочностных характеристик замораживаемого льда и диаметра центрального ядра от давления, при котором он формировался, использовались *статистические модели*.

Глава 3 посвящена разработке математической модели взаимодействия нефтегазовой скважины с геокриологической средой. В ней приводится обоснование региональной информационной модели по геоэкологической оценке состояния природной среды, исследуются физикомеханические свойства пород при фазовых переходах в условиях вечной мерзлоты и описывается математическая модель теплового взаимодействия в системе скважина-порода в зоне распространения ММП.

В связи с усилением техногенной нагрузки на природные компоненты актуальной является задача по экологической оценке и прогнозу по-

следствий освоения геологических ресурсов. В качестве инструмента выполнения такой оценки может быть использована территориальная информационная модель, представляющая собой информационно-компьютерную систему, которая, адекватно отображая результаты геоэкологических исследований, позволяет выполнить их системный анализ с целью оценки, прогноза состояния природной среды и обоснования мероприятий по ее защите при освоении минерально-сырьевых ресурсов рассматриваемого региона. В основу модели положен блочный принцип [1, 2, 4]. Такой подход позволяет независимо разрабатывать отдельные компоненты системы и использовать их сразу в нескольких целях, как внутри системы, так и при решении других задач.

Одним из блоков предлагаемой информационной модели является блок, отвечающий за прогнозирование состояния геологической среды. Он предназначен для выполнения исследований по оценке уязвимости, устойчивости и рисков, связанных с разработкой недр. Проводимые в рамках настоящей диссертационной работы исследования можно отнести непосредственно к этому блоку. В практическом отношении он имеет наибольшее значение для северных регионов.

В процессе фазовых превращений воды в поровых пространствах дисперсной среды формируется мелко-, средне- и крупнокристаллический лед. Размеры кристаллов льда в промерзающих породах, наряду с физико-химическими, термодинамическими показателями жидкости и геологической среды, существенно зависят от исходного и последующих значений напряженно-деформированного состояния геологической среды и образуемого льда. Ввиду отсутствия данных по промерзанию жидкостей в натурных условиях, были использованы результаты ранее проведенных исследований по формированию льда в замкнутой полости [7]. В процессе экспериментов изучались закономерности изменения давления в незамерзшей части воды, кристаллической структуры, текстуры и прочностных характеристик образуемого в замкнутых или ограниченных объемах льда.

Опыты проводились в морозильной камере, обеспечивающей охлаждение поверхностей каждой из установок от $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сначала изучался процесс промерзания воды при отсутствии и частичной возможности деформирования образуемого льда в вертикальной плоскости. Затем проходило изучение процесса замораживания воды при отсутствии и возможности деформирования образуемого льда только в горизонтальной плоскости. Замораживание воды в замкнутом или ограниченном объемах приводило к повышению в ней давления, понижению на $1...5\text{ }^{\circ}\text{C}$ температуры

фазовых превращений воды и соответственно к упрочнению льда при формировании его в экспериментальных установках.

После замораживания проводились прочностные испытания на сжатие (σ_c) образцов упрочненного льда, и изменения диаметра центрального ядра (d) в зависимости от величины избыточного давления (p). В интервале избыточных давлений от 0 до 20 МПа значения σ_c и d удовлетворительно описываются следующими регрессионными уравнениями:

$$\sigma_c(p) = 1.39 + 0.33 \cdot p \quad (1)$$

$$d(p) = 61.5 - 7.95 \cdot \ln(15 \cdot p) \quad (2)$$

Установленная опытами практически линейная зависимость резкого упрочнения льда при замораживании воды в замкнутом объеме подтверждает возможность формирования в замкнутых пространствах напряженного состояния упрочненного льда, превышающего прочностные критические давления труб нефтяного сортамента на смятие, т.е. свыше 19...40 МПа.

При численном моделировании процесса протаивания мерзлых пород обычно используют предположение о чисто кондуктивной передаче тепла в пористой среде в пределах талой и мерзлой зон. Такое предположение основано на том, что лед занимает поры пласта целиком и в исходном состоянии мерзлая порода имеет нулевую проницаемость, а инфильтрация промывочной жидкости в пределах уже оттаявшей зоны незначительно влияет на величину кондуктивного теплового потока. В рассмотренной нами модели также пренебрегается перетоками энергии в породе вдоль оси скважины.

Для расчета температурного поля заколонных пространств использованы теплофизические характеристики пресного льда, поскольку соленый лед в течение одного-двух лет становится практически пресным (Доронин, Хейсин, 1975; Фролов, 2005), а нами рассматриваются временные интервалы до 25 лет.

Классической задачей по расчету теплового потока, сопровождающегося изменением агрегатного состояния вещества, является задача плавления или затвердевания, которая впервые была сформулирована Стефаном. Для каждой из фаз должно выполняться уравнение теплопроводности

$$c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(k(T) \text{grad } T) + f(r, t) \quad (3)$$

где $T=T(r, t)$ – температура в точке с радиус-вектором $r(x_1, \dots, x_p)$ в момент времени t ; $c(T)$ – коэффициент теплоемкости; $k(T)$ – коэффициент тепло-

проводности; $f(r, t)$ – плотность тепловых источников. На границе раздела фаз должно выполняться следующее условие:

$$Q_2 \Big|_{r=X(t)} - Q_1 \Big|_{r=X(t)} = \lambda \frac{\partial X(t, r)}{\partial t} \quad (4)$$

где Q_1 и Q_2 – тепловые потоки со стороны твердой и жидкой фазы соответственно; λ – скрытая теплота фазового перехода; $X(t)$ – закон движения границы раздела фаз. Граничные условия могут быть первого или второго рода. В диссертационной работе задача Стефана была решена с использованием метода энтальпии (Самарский, Моисеенко, 1965) [6].

В главе 4 приведены результаты исследований процессов изменения температурного режима флюида в скважине и разработке алгоритма теплового взаимодействия в системе «скважина – мерзлая порода».

Замеры температуры по стволу скважины – процесс трудоемкий и относительно дорогостоящий. К тому же не всегда представляется возможным и целесообразным производить натурные замеры. Возникает необходимость в разработке теоретической модели, которая позволила бы получать достоверные данные, удовлетворяющие реальным физическим условиям.

Из-за разницы в температурах начинаются процессы обмена энергией между прокачиваемым углеводородным сырьем и мерзлой породой, в результате которого происходит охлаждение флюида. Температуру флюида на любой глубине в произвольный момент времени можно определить при помощи выражения:

$$T_f = T_e + g_G (1 - \exp(-\frac{z-L}{A})) A \quad (5)$$

где T_f – температура флюида на глубине z ; T_e – температура породы на той же глубине; g_G – геотермический градиент вдоль ствола скважины; L – глубина скважины; A – величина, обратная параметру релаксации L_R . Параметр релаксации L_R можно рассматривать как некий обобщенный коэффициент теплопередачи в системе «скважина-порода». Он измеряется в обратных единицах длины и рассчитывается по формуле:

$$L_R = \frac{2\pi}{c_p w} \left(\frac{r_{to} U_{to} k_e}{k_e + r_{to} U_{to} T_D} \right) \quad (6)$$

где c_p – теплоемкость флюида; w – дебит; r_{to} – внешний радиус трубы; U_{to} – обобщенный коэффициент теплопередачи; k_e – теплопроводность породы; T_D – безразмерный параметр температуры.

Безразмерный параметр температуры T_D характеризует процесс потери скважиной энергии и зависит от времени. Он включает в себя некоторые теплофизические характеристики породы и используется для упроще-

ния проведения расчетов. Обобщенный коэффициент теплопередачи U_{io} характеризует процесс потери энергии при прохождении потока тепла сквозь стенки скважины и содержит информацию о ее строении.

Компьютерная реализация приведенного выше алгоритма была проведена при помощи пакета Mathcad. Для тестирования алгоритма были использованы данные гидродинамических исследований по скважине № 11 Варандейской площади НАО. Результаты, полученные при помощи реализованной модели расчета, достаточно хорошо согласуются с натурными данными, что говорит о высокой точности рассмотренного теоретического метода [12].

Рассчитываемые при помощи алгоритма результаты можно также использовать для определения температуры породы на контакте со скважиной, которая в свою очередь является граничным условием в задаче Стефана. Поскольку в данном случае рассматривается плоскорадиальная задача растепления, симметричная относительно оси скважины, то для ее решения можно воспользоваться полярной системой координат. В полярных координатах нестационарное уравнение теплопроводности имеет вид

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \quad (7)$$

Оно решается при помощи метода контрольных объемов и приводится к следующему дискретному аналогу:

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (8)$$

Здесь T_P – значение температуры в середине контрольного объема; T_E , T_W , T_S , T_N – значения температуры в смежных контрольных объемах. Коэффициенты a_i и b находятся из следующих выражений:

$$\begin{aligned} a_E &= \frac{k_e \Delta r}{r_e (\delta \theta)_e} & a_W &= \frac{k_w \Delta r}{r_w (\delta \theta)_w} & a_N &= \frac{k_n r_n \Delta \theta}{(\delta r)_n} \\ a_S &= \frac{k_s r_s \Delta \theta}{(\delta r)_s} & a_P^0 &= \frac{c \Delta V}{\Delta t} & b &= a_P^0 T_P^0 \\ a_P &= a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^0 \end{aligned} \quad (9)$$

где k_e , k_w , k_s , k_n – коэффициенты теплопроводности на гранях контрольного объема; T_P^0 – значение температуры в середине контрольного объема, полученное на предыдущей итерации; Δt – шаг по времени. Параметры ΔV , Δr , $\Delta \theta$, $(\delta r)_i$, $(\delta \theta)_i$, приведенные на рис. 2, определяют размеры контрольных объемов.

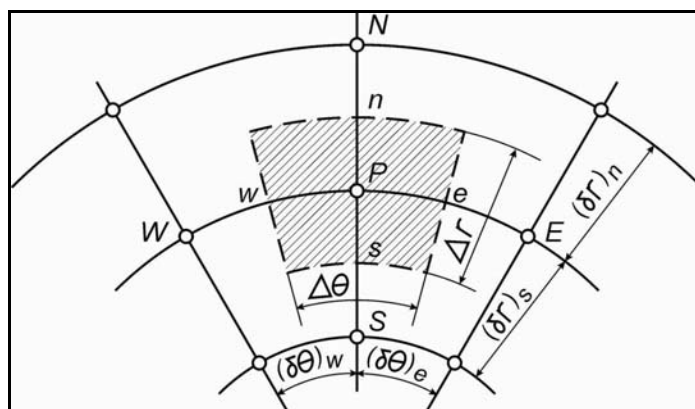


Рис. 2. Сетка и контрольный объем в полярных координатах

Для решения дискретного аналога автором была применена неявная численная схема в сочетании с методом переменных направлений [10]. Такая схема удовлетворяет требованиям простоты и физически обоснованного поведения модели, что может не наблюдаться при использовании явной схемы или других методов.

Компьютерная реализация выбранного численного алгоритма была произведена в среде программирования Visual C++. Программа позволяет получить в табличном и графическом виде значения температуры пород вокруг ствола скважины и оценить радиус зоны оттаивания. Была реализована двух-половиномерная задача растепления. Суть данного подхода заключается в том, что строение осадочной толщи полагается слоистым и однородным в пределах каждого слоя. Такое допущение вполне приемлемо, учитывая исследование ограниченного объема пород в околоскважинном пространстве. По результатам расчетов программа автоматически строит графики, по которым можно проследить за процессом изменения термического режима осадочных толщ вокруг ствола скважины на протяжении некоторого заданного промежутка времени. Исходные данные задаются по результатам обработки керна, извлеченного из исследуемой скважины. В случаях отсутствия кернов необходимые сведения можно получить по находящимся в геолфондах геологических отчетов по бурению глубоких скважин.

Для верификации реализованной численной схемы были использованы данные многолетнего мониторинга за состоянием мерзлых пород на Ардалинском нефтегазодобывающем комплексе. Подставив в программу данные мониторинга по фоновым и добывающим скважинам, были получены следующие графики зависимости радиуса зоны растепления и температуры околоскважинных пород (рис. 3).

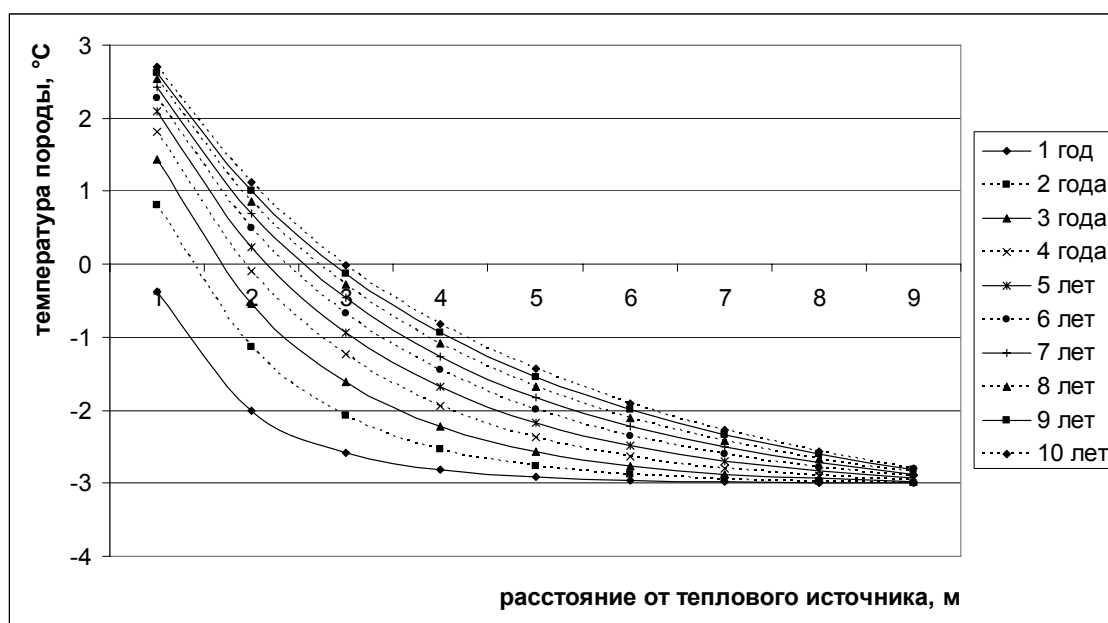
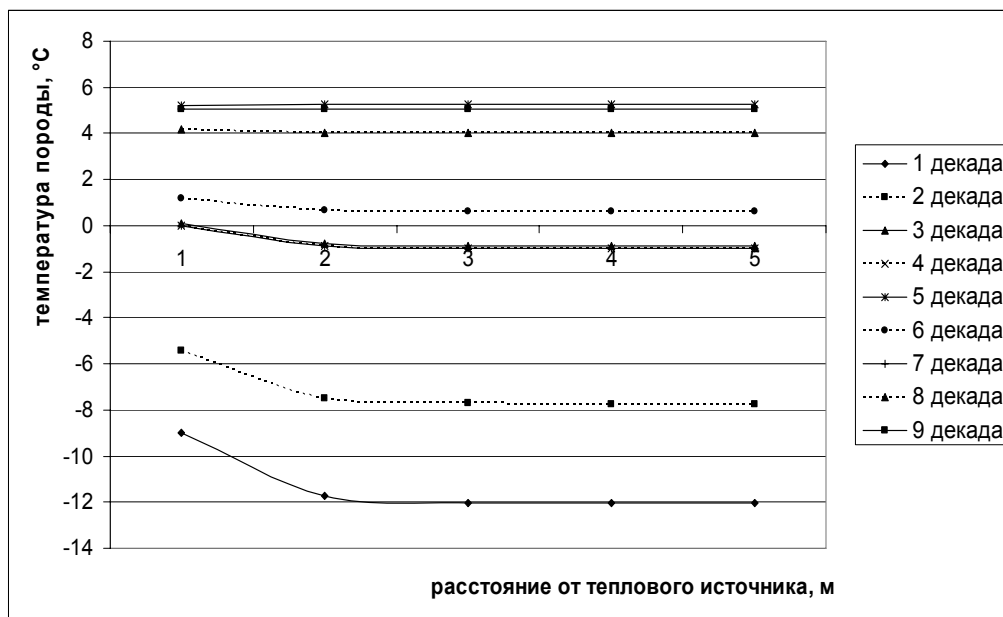


Рис. 3. Динамика распределения поля температур на Ардалинском нефтегазодобывающем комплексе за 1994-2003 гг. Глубина 10 м

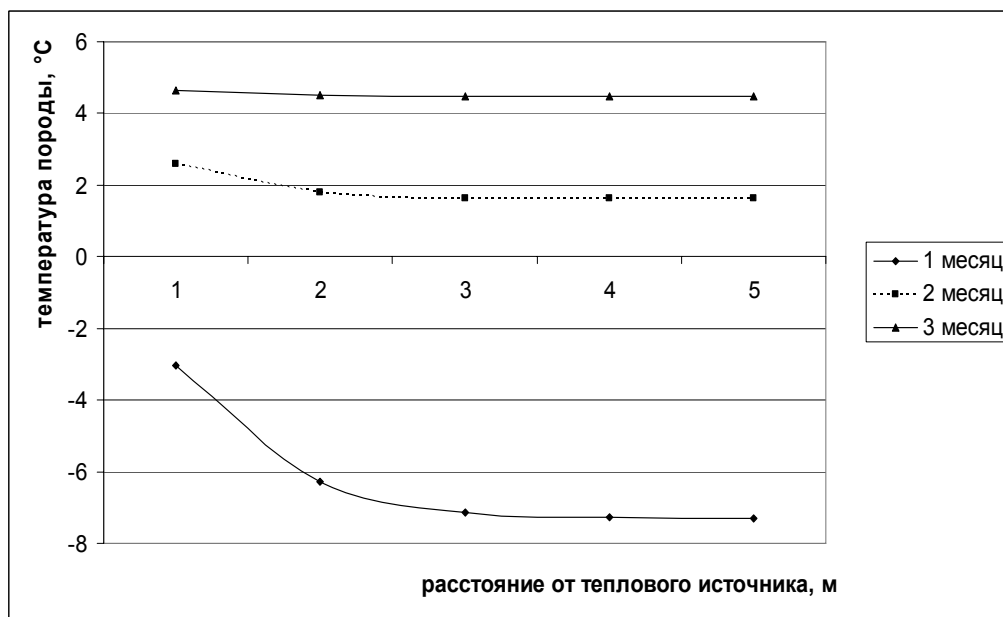
На графике по горизонтальной оси отложено расстояние от внешней стенки скважины, по вертикальной оси указана температура породы. Линии графика построены через временной промежуток, равный одному году. Как видно из графиков, в течение всего периода наблюдений происходит повышение температуры породы и увеличение радиуса зоны оттаивания. Рассчитываемые при помощи алгоритма результаты не противоречат данным, полученным с наблюдательных термометрических скважин [11].

После этого было проанализировано, как период усреднения начальных и граничных данных влияет на точность проводимых расчетов. В качестве граничных условий были взяты результаты наблюдений за температурой почвы на метеорологической станции Коткино, расположенной в НАО, для глубины 0,2 метра. В данном случае мы рассматриваем приповерхностный почвенный слой, который сильно подвержен сезонным колебаниям температуры. В зимний период почва промерзает на глубину в несколько метров, при этом ее температура может опускаться до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Летом же, когда происходит сезонное оттаивание, температура почвы в верхних слоях может достигать $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Расчеты показали, что влияние теплового поля скважины на приповерхностный слой почвогрунтов происходит только в весенние и осенние периоды, и проявляется оно в ускорении процессов оттаивания и замедлении промерзания почвы. При этом граничные значения температуры почвы были усреднены сначала по декадам, а потом по месяцам. Полученные по результатам расчетов данные о величине зоны

влияния скважины на тепловое поле вокруг ствола в период сезонного разогревания представлены на рис. 4.



а



б

Рис. 4. Динамика распределения поля температур для данных, полученных на метеорологической станции «Коткино» на глубине 0,2 м.
Усреднение температуры почвы по декадам (а) и по месяцам (б)

Сравнив полученные результаты, нетрудно заметить, что при более грубом усреднении данных получаются не настолько плавные, с достаточно большими разрывами зависимости температуры породы и радиуса зоны влияния при прочих равных условиях [8].

Глава 5 посвящена анализу технологий строительства, эксплуатации и ликвидации скважин в зонах распространения ММП, а также описанию нового способа безаварийной консервации скважин в зонах распространения ММП [3, 5].

Предлагаемое техническое решение предназначено для предотвращения смятия обсадных колонн нефтяных, газовых и нагнетательных скважин при их консервации и ликвидации в районах распространения многолетнемерзлых пород. При строительстве и эксплуатации скважин известны различные способы регулирования тепловых процессов взаимодействия скважин с мерзлыми породами. Бурение скважин для добычи углеводородного сырья с применением «холодных» промывочных и тампонажных растворов, а также эффективной теплоизоляции их конструкций позволяет уменьшить радиус зоны оттаивания мерзлых пород в заколонном пространстве. Размещение жидкостных и парожидкостных охлаждающих устройств непосредственно у «горячих» скважин также приводит к снижению чаши оттаивания ММП. Однако приведенные выше решения, несмотря на значительные затраты, при длительных периодах консервации и ликвидации скважин не исключают обратного промерзания пород в растепленной зоне, что приводит к развитию процессов смятия и разгерметизации обсадных колонн.

Предлагаемое техническое решение направлено на исключение условий, приводящих к развитию в зонах залегания ММП процессов смятия и разгерметизации законсервированных или ликвидированных нефтегазовых скважин при обратном промерзании растепленных пород. Сущность решения заключается в следующем (рис. 5).

В ходе выполнения работ по консервации или ликвидации скважины (1) на глубине залегания мерзлых пород (2) внутри обсадных колонн размещают гидropескоструйный перфоратор (3) и производят прорезку отверстий (4) в стенках скважины. В результате создаются полости в горной породе. После этого в зонах контакта наружной колонны с верхней и нижней границами ММП (5-6), а также непосредственно в скважине, с использованием цементных растворов устанавливают изоляционные мосты (7-8) и исключают внутрискважинные и заколонные перетоки жидкости и газа из массивов пород, залегающих выше и ниже границ ММП. В перфорированные полости за обсадной колонной, ограниченные в верхних и нижних частях цементными мостами, под напором, превышающим пластовое давление, подают высоковязкую жидкость, например, «тяжелую» нефть. Затем из растепленных вокруг скважины пород (9) адсорбционно не связанную с минеральным скелетом воду под давлением, превышающим пласто-

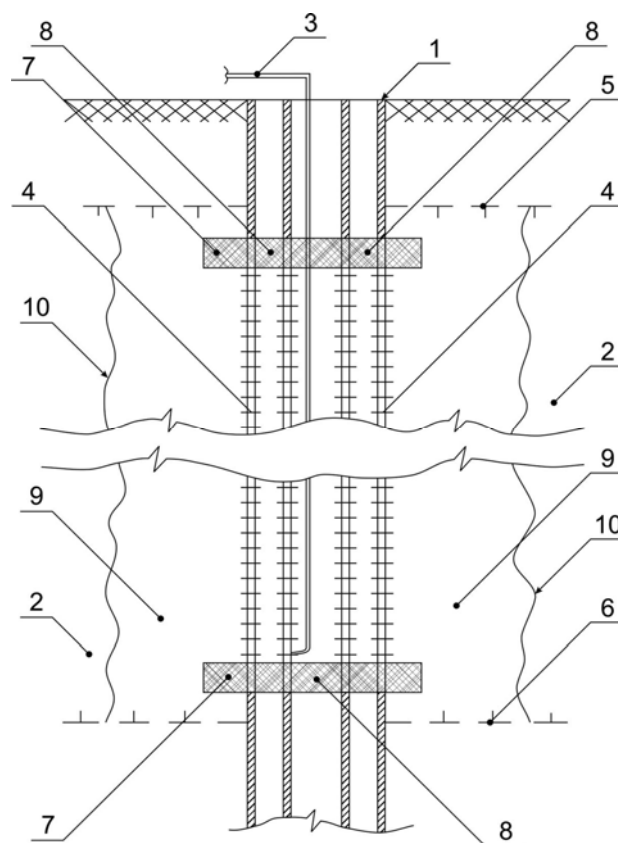


Рис. 5. Принципиальная схема проведения технических мероприятий по обеспечению безаварийной консервации и ликвидации нефтяных скважин
 1 – внешняя стенка скважины; 2 – толщина ММП; 3 – гидropескоструйный перфоратор; 4 – отверстия в стенках скважины; 5 – верхняя граница ММП; 6 – нижняя граница ММП; 7 – внешние изоляционные мосты; 8 – внутренние изоляционные мосты; 9 – оттаявшие породы; 10 – граница зоны оттаивания.

вое, перемещают к границе чаши оттаивания ММП (10). В результате практически обезвоженные породы при обратном промерзании в зоне ММП будут содержать минимальную льдистость и соответственно не приведут к смятию и разгерметизации стенок обсадных колонн при консервации или ликвидации скважин.

Совокупность предлагаемых технических решений позволяет при консервации и ликвидации скважин исключить затраты на приготовление и применение «холодных» промывочных и тампонажных растворов, теплоизолирующих материалов, расходы на приобретение, монтаж и эксплуатацию различных по принципу действия холодильных установок, обеспечивающих замораживание или поддержание пород вокруг скважины в мерзлом состоянии, а также затраты на ликвидацию негативных последствий, вызванных смятием скважин при их длительной консервации или ликвидации.

Нами были даны оценки эколого-экономических затрат, направленных на устранение последствий аварийного разлива флюида при наиболее

вероятных сценариях – муниципальный масштаб, от 100 до 500 тонн (О неотложных мерах..., 2002). В качестве преобладающих грунтов были выбраны торфяники, с влажностью для относительно жаркого лета 20%, и для умеренно дождливой осени 60%. Такие грунты могут поглощать флюид до 40% и 20% от собственного объема соответственно. Глубину проникновения будем считать равной 30 см. Поверхность, на которой растекается флюид, принята плоско-наклонной. Увеличение загрязненной площади за счет небольших неровностей рельефа, главным образом кочек, которые флюид будет обтекать, можно принять равным 20%. Для расчета параметров разлива нефти использовано предположение о том, что на наклонной плоскости пятно имеет форму капли. В таблице приведена эколого-экономическая оценка затрат на ликвидацию последствий аварий и рекультивацию территории.

Таблица - Геометрические характеристики загрязненного нефтью участка и затраты на ликвидацию аварий

Показатели	Сценарий № 1	Сценарий № 2	Сценарий № 3	Сценарий № 4
Объем флюида, м ³	100	100	500	500
Объем загрязненного грунта, м ³	250	500	1 250	2 500
Идеальная площадь загрязненного грунта, м ²	830	1 670	4 170	8 330
Реальная площадь загрязненного грунта, м ²	996	2 004	5 004	9 996
Длина пятна макс., м	55	78	123	173
Ширина пятна макс., м	25	35	55	79
Затраты на ликвидацию и рекультивацию, млн. руб.	43,4	44,9	48,9	55,8

При этом учитывались расходы на обследование территории, разработку проекта рекультивации, аренду транспорта, прокладку временной дороги (зимника) для вывоза загрязненного грунта, заработную плату работников. Приведенные расчетные затраты следует рассматривать как минимальные размеры возможного ущерба в случае разливов нефти из аварийных скважин.

Таким образом, разработанный способ позволит не только снизить риск возникновения аварийных ситуаций, приводящих к загрязнению окружающей среды, но и повысить рентабельность освоения нефтяных месторождений.

Выводы

1. Исследование свойств, состава и температурного режима мерзлых пород при фазовых переходах в условиях атмосферного и избыточного давлений на примере природно-климатической обстановки НАО, позволило выявить эмпирические закономерности возрастания прочностных показателей формируемого льда в зависимости от внешнего давления, сопровождающего процесс фазового перехода воды в лед в приустьевой части скважины. В интервале избыточных давлений p от 0 до 20 МПа значение прочности льда σ_c удовлетворительно описывается следующим регрессионным уравнением:

$$\sigma_c(p) = 1.39 + 0.33 \cdot p$$

2. Реализован метод, позволяющий в зависимости от дебита и теплофизических свойств извлекаемой пластовой продукции и прилегающих к скважине пород определять температуру флюида в скважине на произвольной глубине. При расчете температуры флюида учитываются геометрия и строение скважины, материалы обсадных колонн, теплофизические параметры пород, окружающих скважину, дебит, температура флюида на забое и ряд других параметров. Метод позволяет без проведения трудоемких и дорогостоящих натурных замеров определять теплофизические параметры пластовой продукции по стволу скважины в произвольный момент времени. Максимальная величина отклонений расчетных данных от наблюдаемых значений не превышает 5%, что говорит о достаточно высокой точности реализованного теоретического метода.

3. На основе анализа различных аналитических и численных методов расчета движения границы фазового перехода в многолетнемерзлых породах разработан и реализован адаптированный к реальным средам алгоритм, позволяющий оценить радиус чаши оттаивания вокруг ствола скважины, величина которого для рассматриваемых условий не превышает 10 м. Реализованная двухполовиномерная модель взаимодействия мерзлой толщи с источниками теплового воздействия позволяет получать удовлетворяющие реальным условиям данные о температурном режиме пород для временного интервала от нескольких недель до 25 лет.

4. При участии автора разработан способ, направленный на предупреждение смятия и разгерметизации нефтяных скважин в зонах распространения ММП, который позволяет обеспечить их безаварийную консервацию и ликвидацию. Путем проведения ряда технических мероприятий исключается возможность создания условий, ведущих к смятию колонны ликвидированной нефтяной скважины. Запатентованный способ позволит повысить рентабельность освоения нефтяных месторождений и снизить

риск возникновения аварийных ситуаций, приводящих к загрязнению окружающей среды.

Публикации по теме диссертации

в изданиях по списку ВАК

1. Губайдуллин М.Г., Коробов С.В., Затульская Т.Ю., Ружников А.Г. Информационно-компьютерная система экологической оценки геологической среды при освоении нефтяных месторождений севера Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Вестник Поморского университета. Серия «Естественные и точные науки», 2005. № 2(8). С. 4-11.
2. Коновалова Н.В., Коробов С.В. Выбор метода создания поверхностей в ГИС // Проблемы региональной экологии, 2007, № 4. С. 131-134.
3. Коробов С.В., Губайдуллин М.Г. Новая технология экологически безопасной ликвидации нефтегазовых скважин северных регионов // НТЖ Нефтепромышленное дело. М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2009, № 3. С. 42-44.

в других изданиях

4. Губайдуллин М.Г., Коробов С.В. Информационная модель геоэкологических исследований на нефть и газ в условиях Европейского Севера России // Материалы науч.-тех. конф. Архангельск: АГТУ, 2005.
5. Калашников А.В., Губайдуллин М.Г., Конюхов Д.А., Коробов С.В. Способ предотвращения смятия обсадной колонны скважины в зоне многолетнемерзлых пород. Решение о выдаче патента на изобретение. Заявка № 2006128661/03(031129), 2006.
6. Коробов С.В. Оценка теплового воздействия на вечноммерзлые грунты при освоении Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции с применением метода энталпии // Материалы Всерос. конф. с межд. участием «Академическая наука и ее роль в развитии производительных сил в северных регионах России». [Электронный ресурс]. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2006.
7. Губайдуллин М.Г., Коробов С.В., Конюхов А.В. Исследование процессов смятия законсервированных скважин при обратном промерзании многолетнемерзлых пород // Вестник Архангельского государственного технического университета. Серия «Строительство», 2007. Вып. 69. С. 40-44.
8. Коробов С.В. Влияние граничных данных на точность предсказания состояния геологической среды // Материалы IV науч.-практ. конф. с межд. уч. «Экологические проблемы. Взгляд в будущее». Ростов-на-Дону, 2007. С. 186-191.
9. Коробов С.В. Оценка воздействия добычи нефти на криолитозону в прибрежной зоне арктических морей // Материалы XVII межд. науч. конф. по морской геологии «Геология морей и океанов». Т. 2. М.: ГЕОС, 2007. С. 240-242.
10. Коробов С.В. Решение уравнения теплопроводности для двумерного случая с применением метода переменных направлений // Материалы межд. молодеж. конф. «Экология 2007». Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2007. С. 50-52.
11. Макарский Н.А., Коробов С.В. Результаты мониторинга термического режима грунтов на Ардалинском нефтедобывающем комплексе // сборн. науч. трудов Проблемы освоения нефтегазовых месторождений Европейского Севера России. вып. 2 Архангельск: АГТУ, 2007. С. 61-65.
12. Морев В.В., Коробов С.В. Исследование температурного режима при эксплуатации нефтяных скважин в районах Крайнего Севера // Сборн. науч. трудов Проблемы освоения нефтегазовых месторождений Европейского Севера России. вып. 2 Архангельск: АГТУ, 2007. С. 65-71.