

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Бек Дина Доновна

**ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В ПОРОДАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ТЕПЛОВЫХ И
ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Специальность 25.00.08 - инженерная геология, мерзлотоведение и
грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

**Научные
руководители**

– **Комаров Илья Аркадьевич**,
доктор геолого-минералогических наук, доцент

Мясников Артём Вениаминович,
доктор физико-математических наук

**Официальные
оппоненты**

– **Якушев Владимир Станиславович**, доктор геолого-минералогических наук, ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина», факультет разработки нефтяных и газовых месторождений, кафедра разработки и эксплуатации газовых и газоконденсатных месторождений, профессор

Степанов Анатолий Викторович, доктор технических наук, доцент, ФГБУН «Институт физико-технических проблем Севера им. В.П.Ларионова Сибирского отделения РАН», главный научный сотрудник

Карпенко Федор Сергеевич, кандидат геолого-минералогических наук, ФГБУН «Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук», лаборатория изучения состава и свойств грунтов, ведущий научный сотрудник, и.о. зав. лабораторией

Защита диссертации состоится 20 декабря 2019 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.04.01 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, РФ, Москва, Ленинские горы, д.1, главное здание МГУ, корпус А, геологический факультет, аудитория 415.

E-mail: mgu.04.01@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/246184879/>

Автореферат разослан 14 ноября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук



Харитоновна Н.А.

Общая характеристика работы

Актуальность исследований. Тематика работы посвящена выявлению механизма и закономерностей возникновения и распространения трещин при высокоинтенсивных тепловых и гидромеханических воздействиях на породы различного состава и строения, а также разработке методики прогноза этих процессов.

Характер, кинетика и динамика процессов трещинообразования в породах в общем случае определяется взаимодействием полей: температуры, массы, напряжений и деформаций. Проблема многоплановая, находящаяся на стыке разных наук: инженерной геокриологии, гидрогеологии, механики грунтов. Это обуславливает крайнюю сложность создания и реализации единой методики прогноза этого процесса, даже с учетом возможностей современных ЭВМ. Анализ показал, что существенное упрощение проблемы и разработка на этой основе частных методик прогноза возможны, при рассмотрении случаев высокоинтенсивных тепловых и гидромеханических воздействий на массив пород, примеры которых рассматриваются в работе. Это, в частности, случай энергетического воздействия (тепловой удар), низкотемпературного хладоносителя контактирующего с массивом пород, приводящего к практически мгновенному возникновению больших градиентов температур в контактной зоне и, вследствие этого, образованию в ней трещин; случай гидромеханического воздействия (гидравлический удар), обуславливающего образование в массиве пород системы трещин.

Характерной особенностью рассматриваемых высокоинтенсивных процессов трещинообразования, является ощутимое различие в темпе релаксации указанных полей. Так, относительно высокая скорость промораживания пород позволяет, в первом приближении, пренебречь эффектом миграции влаги к фронту промерзания, т.е. исключить из рассмотрения уравнения описывающие процессы влагопереноса, а также, использовать в инженерных приложениях методологию решения несвязанных задач термоупругости. Использование решения несвязанной задачи при моделировании эволюции трещины гидроразрыва обусловлено различием скоростей нагнетания и продвижения жидкости, которые отличаются от скорости приращения трещины. Это позволяет рассмотреть динамику полей напряжений и деформаций в массиве автономно.

На сегодняшний день работ, посвященных выяснению механизма и закономерностей трещинообразования в грунтах под действием низкотемпературного хладоносителя (жидкий азот, жидкий хлористый кальций и т.д.) представлено мало. Они носят, как правило, фрагментарный характер, и касаются процессов, сопровождающих низкотемпературное промораживание

грунтов. В диссертации рассмотрены процессы теплового и механического взаимодействия массива грунта с низкотемпературным хладоносителем, которые могут привести к возникновению системы трещин.

Количество публикаций, посвященных трещинообразованию в породах под действием гидроразрыва достаточно велико, но многие вопросы механизма распространения трещин в породах до сих пор остаются не освоенными. В данной работе исследуется процесс образования вертикальных трещин при гидроразрыве пласта. Одной из малоизученных проблем гидроразрыва являются закономерности и механизмы роста трещин в среде, содержащей пластичные включения и прослойки. Актуальность вопроса связана с разработкой нетрадиционных коллекторов, в которых может содержаться значительное количество глинистых фракций и органического вещества. Таким коллектором являются сланцы баженовской свиты, занимающие порядка миллиона квадратных километров и содержащие около 18 триллионов тонн органического вещества. Кремнистая толща органического происхождения сложена переслаиванием глинистых, кремнистых и карбонатных отложений с включениями керогена, органического вещества и других минералов. При определенных условиях такие породы проявляют пластические свойства, а разрушение имеет вязкий характер и может сопровождаться значительными пластическими деформациями. Возникает вопрос о характере роста трещин в однородной среде с такими свойствами, а также в слоистой среде при большом контрасте прочностных и упругопластических свойств. Основное внимание уделено изучению характера роста трещины в породах различного состава, строения, свойств и выявлению условий ветвления трещин. В качестве основных факторов, влияющих на характер распространения и роста трещины, рассматривались: условия ее нагружения, а именно давление и скорость закачки, которые в итоге задают распределение давления в растущей трещине при заданной вязкости закачиваемого флюида; прочностные и упругопластические свойства пород; толщина и взаимное расположение слоев. В работе использовалась упругопластическая модель, для инициализации которой необходимо знать зависимость параметров, характеризующих, принятую гипотезу деформирования пород от их минералогического состава, содержания органического вещества, микротрещиноватости (оценивалась неявным образом по данным интерпретации керновых испытаний, за счет параметров когезии, упрочнения и разупрочнения), а также стратиграфической цикличности строения массива. Математическое моделирование осуществлялось при помощи пакета оригинальных программ, численно реализующих систему дифференциальных уравнений механики, включающую уравнения движения и

неразрывности и определяющие соотношения поведения среды, которые описывались в рамках модифицированной модели Друккера-Прагера с неассоциированным законом течения.

Актуальность практических приложений исследований, обусловлена тем, что последствия возникновения в массивах пород трещин различной формы и масштаба могут приводить как к положительным, так и к негативным последствиям. Так при использовании хладоресурса сжиженного природного газа и других низкотемпературных хладоносителей (жидкий азот) для термостабилизации грунтовых оснований, при строительстве сооружений по первому принципу, нужно избежать трещинообразования в около контактной зоне (массив породы-термостабилизатор), обеспечив максимально быстрое замораживание грунта, которое минимизирует эффект пучения и позволяет промораживать сильнообводненные и засоленные грунты. С другой стороны, технология направленного трещинообразования позволит оптимизировать мероприятия по увеличению нефтеотдачи при разработке нетрадиционных месторождений нефти и газа.

Объектом исследований являются осадочная толща баженовской свиты (Вынгайхинский и Салымский участки), как нетрадиционного месторождения нефти и газа и верхний горизонт сезонно-талых пород Южно-Тамбейского нефтегазоконденсатного месторождения.

Предметом исследований является процесс трещинообразования в породах в результате высокоинтенсивного теплового и гидромеханического воздействия на них.

Цель работы. Выявление закономерностей трещинообразования в породах различного состава, строения и свойств под действием высокоинтенсивных тепловых и гидромеханических воздействий и разработка методики прогноза процесса.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи**:

1. Провести анализ современного состояния проблемы изученности механизмов и закономерностей процессов трещинообразования в породах различного состава, строения и свойств под действием высокоинтенсивных низкотемпературных и гидромеханических воздействий, а также методов их математического моделирования.

2. Сформулировать основные положения теории прогноза процесса трещинообразования в породах под действием высокоинтенсивных тепловых и гидромеханических воздействий и обосновать допущения и предпосылки, позволяющие упростить исходные физические и математические модели процессов.

3. Предложить инновационную методику использования сжиженного природного газа для целей термостабилизации грунтовых оснований инфраструктуры Южно-Тамбейского нефтегазоконденсатного месторождения с учетом геокриологических условий, технологических и экологических норм эксплуатации.

4. Разработать методику прогноза процессов промораживания и трещинообразования в грунтах Южно-Тамбейского нефтегазоконденсатного месторождения при их тепловом и механическом взаимодействии с термостабилизатором, по которому движется низкотемпературный хладагент.

5. Разработать методику прогноза процессов трещинообразования в породах под действием гидроразрыва для целей оптимизации проектирования и проведения мероприятий гидроразрыва пласта.

6. Сделать прогноз процессов трещинообразования в породах под действием гидроразрыва для схематизированных разрезов (однослойного, двухслойного и многослойного) баженовских сланцев Вынгайхинского и Салымского месторождений нефти и газа, для которых характерно чередование хрупких и пластичных слоев с различными механизмами разрушения.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Предложена инновационная методика использования сжиженного природного газа для целей термостабилизации грунтовых оснований инфраструктуры Южно-Тамбейского нефтегазоконденсатного месторождения с учетом геокриологических условий и технологических норм эксплуатации.

2. Предложена новая методика прогноза процессов промерзания и потенциального возникновения трещин в грунте при тепловом и механическом взаимодействии с низкотемпературным термостабилизатором на базе использования разработанного комплекса программ реализации на ЭВМ связанной и несвязанной задачи термоупругости.

3. Выявлены механизм и закономерности динамики процессов промерзания и трещинообразования в породах различного состава, строения и свойств под действием низкотемпературного хладагента с учетом влияния изменения водно-ионного состава поровых растворов и криопэггов.

4. Разработана оригинальная методика математического моделирования процесса деформации и разрушения массива горных пород под действием гидроразрыва, которая реализована с помощью пакета программ, численной реализации системы уравнений равновесия движения и неразрывности и определяющих соотношений, которые описывают поведение среды в рамках модели Друккера-Прагера с неассоциированным законом течения. Предложена методика инициализации математической модели, заключающаяся в выборе подхода к обработке имеющихся экспериментальных данных.

5. Путем математического моделирования выявлен эффект ветвления трещин гидроразрыва, инициированных из горизонтальной скважины, а именно, возможность раскрытия трещины в направлении максимального напряжения при условии перераспределения соотношения горизонтальных и вертикальных напряжений в процессе трещинообразования за счет касательных напряжений. Проведен анализ возможности ветвления трещин в квазиоднородных геологических средах на примере литологических типов, выделенных в разрезе баженовской свиты. Данный эффект имеет экспериментальное подтверждение.

6. На примере схематизированных двухслойного и многослойного разрезов пород баженовской свиты с помощью математического моделирования оценено влияние конфигурации и последовательности расположения слоев на распространение трещин гидроразрыва.

7. Предложена методика оптимизации мероприятий гидроразрыва пласта, позволяющая контролировать направление и масштабы данного процесса в зависимости от экономических и экологических требований к результатам мероприятия применительно к реальным геологическим условиям Вынгайхинского и Салымского месторождений баженовской свиты.

Практическое значение работы. При проектировании и эксплуатации газоконденсатных месторождений, расположенных в районах распространения многолетнемерзлых пород, возникает проблема термостабилизации грунтовых оснований. Перспективным решением проблемы повышения надежности круглогодичного функционирования оснований инфраструктуры комплекса получения и хранения сжиженного природного газа, может являться потенциальная возможность частичного использования хладоресурса целевого продукта - сжиженного природного газа для целей термостабилизации грунтовых оснований сооружений. Это позволяет: обеспечить надежную эксплуатацию сооружения круглогодично и независимо от температурных условий.

Одним из способов, применяемых для повышения нефтеотдачи является гидроразрыв пласта. Предсказание и управление направлением роста трещины является серьезной проблемой для массивов пород, которые характеризуются неоднородным строением и сложным напряженным состоянием. Исследования влияния параметров закачки и проектирования мероприятия гидроразрыва пласта позволят применять данную технологию в управляемом и контролируемом режиме, регулировать в зависимости от выбранных целевых пластов и объемов закачки и сформулировать рекомендации по технологии разработки баженовской свиты.

Личный вклад автора является во многом определяющим: автором были проведены расчеты по сформулированным им задачам. Проведен анализ полученных результатов и разработаны рекомендации по оптимизации использования и дальнейшему совершенствованию рассмотренных технологий. Помимо используемых существующих программных продуктов автором были реализованы программы для моделирования процессов промораживания и последующего трещинообразования, а также для обработки и интерпретации данных моделирования.

На защиту выносятся следующие **защищаемые положения**:

1. Предложена инновационная методика, заключающаяся в использовании утилизируемого сжиженного природного газа для целей термостабилизации грунтовых оснований инфраструктуры Южно-Тамбейского нефтегазоконденсатного месторождения, которая позволяет обеспечить круглогодичную эксплуатацию независимо от температурных условий; значительно более высокий темп промораживания грунта с минимизацией эффекта пучения; промораживание сильнообводненных и сильнозасоленных грунтов, которые могут вмещать криопэги.

2. Предложена новая методика прогноза теплового и механического взаимодействия низкотемпературного хладагента с массивом пород различного состава, строения и свойств, заключающаяся в реализации связанной и несвязанной задач термоупругости, которая позволяет выявить закономерности процессов промерзания и потенциального трещинообразования; определить оптимальные значения входной температуры хладагента, позволяющие повысить интенсивность промораживания без реализации процессов трещинообразования; установить наиболее благоприятные периоды года для ввода в эксплуатацию низкотемпературных термостабилизаторов.

3. С помощью математического моделирования обнаружен, экспериментально подтвержден и качественно объяснен эффект ветвления вертикальных трещин в породах баженовской свиты. Природа этого эффекта обусловлена перераспределением соотношения вертикальных и горизонтальных напряжений в результате работы касательных напряжений на сдвиговых пластических деформациях.

4. Предложена новая методика проектировки и оптимизации проведения мероприятий гидроразрыва, которая заключается в управлении масштабами и направлением процесса проникновения трещины в массив отложений месторождения с помощью варьирования параметров гидроразрыва, и позволяющая учитывать экономические и экологические требования к проектируемому мероприятию.

Апробация работы проводилась на российских (Москва, июнь и октябрь 2016) и международных конференциях (Москва 2009, 2012, 2014, Аликанте, Испания, 2015; Потсдам, Германия, 2016; Саппоро, Япония, 2017, Шамони Мон-Блан, Франция, 2018, Зелёна Гора, Польша, 2019).

Основные результаты **опубликованы** в 13 печатных работах, в том числе в 3 публикациях в журналах, определенных по п. 2.3 Положение о присуждении ученых степеней в Московском государственном Университете имени М.В. Ломоносова.

Структура и объем диссертации. Данная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений общим объемом 158 страниц. Диссертация содержит 51 рисунок и 25 таблиц. Список использованной литературы включает 123 наименования.

Благодарности. Автор выражает искреннюю и глубокую благодарность своим научным руководителям, профессорам И.А. Комарову и А.В. Мясникову за помощь и поддержку на всех этапах работы. Автор крайне признателен д.ф.-м.н. Ю.П. Стефанову и главному инженеру ООО НПП «Ривсмаш» В.В. Ананьеву за плодотворное сотрудничество и консультации на протяжении всего времени выполнения работы. Автор благодарит профессора Л.Н. Хрусталёва, доцента С.Н. Булдовича и с.н.с. Г.П. Пустовойта за ценные советы и рекомендации, а также признателен сотрудникам кафедры геокриологии геологического факультета МГУ за содействие при выполнении работы. Так же автор выражает благодарность профессору кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых Г.А. Калмыкову и сотрудникам кафедры инженерной и экологической геологии доценту Ю.В. Фроловой и с.н.с. В.В. Фуниковой, за помощь, ценные советы и рекомендации, полученные в процессе написания и оформления диссертации.

Содержание работы

В первой главе представлен обзор истории формирования, подходов к изучению и основных возникающих проблем трещинообразования в породах. Разобраны основные понятия и теории трещинообразования и сопряженных с ними областей.

Работы, посвященные выяснению механизма и закономерностей трещинообразования в породах под действием низкотемпературного хладоносителя носят, как правило, фрагментарный характер и касаются процессов, сопровождающих замораживание пород. Ряд экспериментальных и натуральных наблюдений был проведен по исследованию и разработке режимов первоначального заполнения подземных ледопородных резервуаров сжиженным газом институтом ВНИИПромгаз ныне ОАО «Газпромпромгаз (Рачевский Б.С. и др.).

Вопрос распространения трещин гидроразрыва активно изучается лишь последние 30 лет. Проблема траектории распространения трещины гидроразрыва от своего первоначального направления при взаимодействии с естественными трещинами или разломами интенсивно изучалась как в лабораторных и в полевых условиях, так и численно. Существует также несколько аналитических приближений для описания условий пересечения трещиной разрывов, полученные при различных упрощениях. Однако на сегодняшний день полный анализ того, как различные параметры влияют на процесс и результат взаимодействия не выполнен. Это связано со сложностью данного анализа ввиду влияния на процесс множества факторов. В число этих факторов входят как физические условия, действующие на естественных трещинах и разломах, так и условия продвижения трещины, а также не всегда известные упругопластические, прочностные и фильтрационные свойства среды.

Во второй главе рассмотрены геокриологические условия территории Южно-Тамбейского нефтегазоконденсатного месторождения. Среднегодовая температура воздуха составляет около минус 9-10°C. Средняя температура воздуха остается отрицательной в течение 8 месяцев, с октября по май. Согласно инженерно-геологическому районированию территория расположена в самой северной части Западно-Сибирской плиты и входит в Восточно-Ямальскую геокриологическую область. В геологическом строении исследуемого района (на глубину воздействия сооружений) участвуют преимущественно верхнечетвертично-голоценовые лагунно-морские отложения I-II морских террас, местами перекрытые голоценовыми озёрно-болотными и болотными осадками, а также голоценовыми отложениями аллювиальных террас, пойм, приуслового вала и пляжа Обской губы. В структурно-гидрогеологическом плане территория относится к Прикарскому бассейну стока подземных вод. По соотношению с многолетнемерзлыми породами и положению в разрезе выделяются надмерзлотные и межмерзлотные воды. По химическому составу межмерзлотные воды имеют преимущественно хлоридно-натриево-магниевый состав с минерализацией, достигающей достаточно высоких значений 54–115 г/л.

Важнейшей особенностью природной обстановки полуострова Ямал является очень широкое распространение многолетнемерзлых пород (зона сплошного распространения), определяющей весь комплекс инженерно-геологических условий. Многолетнемерзлые породы встречены на всех геоморфологических уровнях в субэвральном и субквальных условиях. Даже отложения морских пляжей и кос, мелководий крупных озёр и островов в руслах рек находятся в многолетнемерзлом состоянии. Мощность их в пределах

полуострова Ямал изменяется в очень широком диапазоне: от 2-5 до 300-400 м. Среднегодовые температуры пород достигают значений минус 1°С - минус 7°С. Среднегодовая температура многолетнемерзлых пород, вмещающие криопэги, составляет минус 3.9°С - минус 5.7°С.

На территории района исследований практически повсеместно развит слой сезонного протаивания пород, его мощность изменяется в пределах от 0.3-0.5 м до 1-2 м. Из современных криогенных геологических процессов и явлений наибольшее распространение получили следующие процессы: рост повторно-жильных льдов; термоабразия и термоэрозия; образование солифлюкционных шлейфов и террас на склоновых участках; морозобойное растрескивание грунтов; термокарст; заболачивание.

В третьей главе рассмотрены вопросы замораживания и трещинообразования в породах за счет высокоинтенсивного теплового воздействия. При освоении территории со сложными инженерно-геокриологическими условиями, к которым относится территория Тамбейского нефтегазоконденсатного месторождения, взаимодействие сооружений с грунтами основаниями, находящимися в мерзлом состоянии, может приводить к оттаиванию грунтов с последующим снижением их прочностных свойств. Для предупреждения и предотвращения подобных последствий необходимо применять специальные мероприятия по термостабилизации. Перспективным решением проблемы повышения надежности круглогодичного функционирования оснований инфраструктуры на пластично-мерзлых и засоленных грунтах может оказаться частичное использование хладоресурса целевого продукта – сжиженного природного газа, имеющего низкую в отрицательном диапазоне температуру кипения. Технологическая норма хранения сжиженного газа в резервуарах оценивается значением величины суточной испаряемости в резервуаре хранения (около 0.1% от массы газа). Испарение происходит в верхней части резервуара за счет теплопритоков из окружающей среды, и паровая фаза отводится с целью недопущения повышения давления в резервуаре. Отводящийся поток затем возвращается в технологическую линию путем его последующего сжатия и сжижения. Предлагается использовать этот отводящийся газ, имеющий низкую отрицательную температуру, для целей термостабилизации грунтовых оснований, используя для этого низкотемпературный термостабилизатор «трубку Фильда», представляющий рекуперативное теплообменное устройство типа «труба в трубе».

Представленная технология позволяет: обеспечить надежную эксплуатацию сооружения круглогодично; обеспечить значительно более высокий темп промораживания грунта с минимизацией эффекта пучения,

промораживать сильно обводненные породы, линзы криопэггов высоких концентраций. Кроме очевидных плюсов, использование сжиженного природного газа в качестве хладагента может привести к проявлению негативных процессов: трещинообразования на границе стенка термостабилизатора-грунт, связанного с возникновением больших градиентов температуры («тепловой удар»). В связи с чем, требуется обратить особое внимание на выбор оптимального значения величины входной в низкотемпературный термостабилизатор температуры газа и конструктивных решений, с целью недопущения (минимизации) процессов трещинообразования. В работе оценен диапазон оптимальных температур хладагента и благоприятных условий введения низкотемпературного термостабилизатора в эксплуатацию, позволяющих обеспечить быстрый темп промораживания грунта без возникновения процессов пучения и трещинообразования в около контактной зоне термостабилизатор-грунт. По данной тематике подана заявка на патент.

Методика прогноза процессов теплового и механического взаимодействия массива пород с низкотемпературным термостабилизатором включала в себя разработку и реализацию связанной и несвязанной задачи термоупругости для однослойного и многослойного разрезов массива пород. В обоих случаях задача рассматривалась как осесимметричная. Для расчетов были рассмотрены массивы, сложенные незасоленным песком и засоленным суглинком. Выбор данных литологических разностей связан с тем, что в разрезе техногенных насыпей под объекты инфраструктуры разрабатываемых на п-ове Ямал месторождений широко представлены незасоленные сортированные пески, подстилаемые засоленным суглинком. Так же, достаточно распространенное явление на исследуемой территории представляют криопэги. Они залегают на разной глубине в виде изолированных линз, не имеющих связи друг с другом, поверхностными и подземными водами. Для расчетов скорости вымораживания криопэггов с использованием предложенного термостабилизатора были рассмотрены многослойные разрезы, представляющие собой переслаивание незасоленных песков с прослоями (линзами), сложенными песками с различной засоленностью и влажностью равной полной влагоемкости. Для расчетов были привлечены данные по термодинамическому моделированию процесса промораживания ряда криопэггов п-ова Ямал, полученные с помощью программы «FREEZEBRINE» (Комаров, Кияшко, 2017); теплофизические, прочностные и деформационные характеристики пород принимались согласно данным, приведенным в работах данных (Е.П. Шушерина, Б.С. Рачевский, Огрощенко, А.А. Ананян, Н.Н. Смирнова, И.А. Комаров, В.С. Исаев). Были рассмотрены варианты для

летнего и зимнего периода начала работы низкотемпературного термостабилизатора, а также случаи различной входной температуры хладагента в низкотемпературный термостабилизатор - минус 40, 60 и 80°C.

Однослойная схема массива. Для оценки напряженно деформированного состояния грунта была рассмотрена однослойная схема массива, сложенная в первом случае незасоленным песком, а во втором - засоленным суглинком. Для инженерных приложений, в первом приближении, задачу можно сформулировать как несвязанную, т.е. температурный профиль в каждый момент времени является установившемся, относительно изменения полей напряжений и деформаций. Тепловая часть задачи была реализована с помощью программы «Тундра» (Пустовойт и др., 2103). Механическая часть задачи, связанная с оценкой величины максимальных температурных напряжений, возникающих в около контактной зоне массив грунта-термостабилизатор, была реализована используя гипотезы теории тонких оболочек по соотношениям, представленным в работе (Коваленко, 1971). Учитываются следующие параметры грунта: модуль упругости, коэффициент линейного расширения, коэффициент Пуассона, перепад температур в мерзлом или промерзающем слое грунта (в зависимости от начала эксплуатации - в зимний или летний период), который расположен вблизи стенки низкотемпературного термостабилизатора.

Результаты динамики температурных полей вокруг термостабилизатора для летнего и зимнего периода начала эксплуатации приведены на рисунке 1. В окрестности около контактной зоны можно явно выделить участок, где температура будет изменяться по линейному закону и, таким образом, определить область максимального градиента температур, который будет являться причиной возникновения напряжений и возможного возникновения трещин на контакте термостабилизатор-грунт.

Оценка величины температурных напряжений показала, что в зимний период допустимая температура хладагента для незасоленных песков лежит в промежутке от минус 40 до минус 50°C. Для суглинистых сильнозасоленных грунтов допустима установка во всем рассмотренном диапазоне отрицательных температур. В летний период градиенты температур на границе термостабилизатор-грунт могут приводить к возникновению напряжений выше значения мгновенной прочности на разрыв для обоих рассмотренных грунтов во всем температурном диапазоне (Комаров И.А. и др., 2015).

Процесс промерзания грунта и возникающие в следствии этого напряжения можно описать в рамках связанной задачи, учитывающей взаимное влияние изменения напряженно-деформированного состояния и перераспределения температур в массиве.

Сравнивая, полученные при реализации связной и несвязной задачи распределения температур следует отметить, что они имеют аналогичный в качественном отношении характер, а в количественном отношении удовлетворительно сходятся (Век D. и др., 2019).

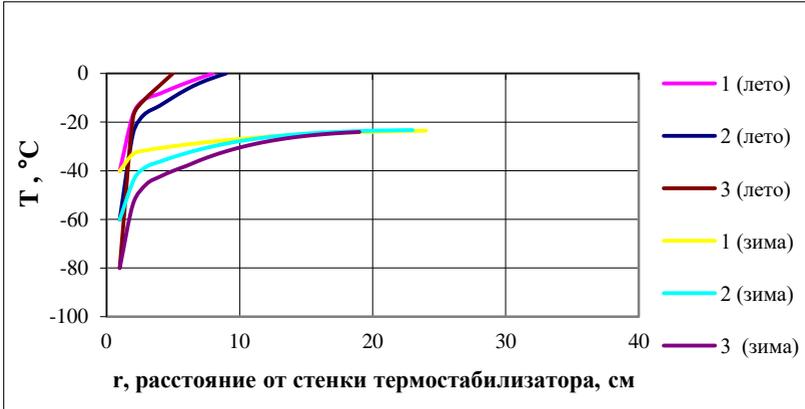


Рисунок 1. Профиль температуры (Т) вблизи границы термостабилизатор-грунт в периоды с отрицательными (зима) и положительными (лето) температурами для незасоленного песка при различных температурах хладоносителя (TG): 1 - минус 40°C, 2 – минус 60°C, 3 – минус 80°C

Многослойная схема массива. Задачей данного прогнозного расчета является оценка времени промерзания линзы криопэггов с различной степенью минерализации при промораживании грунта с помощью низкотемпературного термостабилизатора. Были рассмотрены разрезы, представляющие собой переслаивание незасоленных песков с прослоями (линзами), сложенными песками с различной засоленностью и влажностью равной полной влагоемкости. Для оценки периода промерзания в условиях отсутствия термостабилизации был решен ряд одномерных задач промерзания пород сверху, а для учета охлаждающего влияния низкотемпературного термостабилизатора решались двумерные задачи.

Результаты моделирования показывают, что использование этой технологии позволяет успешно промораживать линзы криопэггов высокой минерализации до 100 г/л и выше. По результатам прогноза, время промораживания криопэга на 1,5 м составило один месяц, а на радиус до 3 м составило менее 4 месяцев при самых высоких температурах подаваемого хладагента (Комаров И.А. и др., 2016).

В четвертой главе представлена геологическая характеристика баженовской свиты. Современная площадь распространения баженовской свиты составляет 1.2 млн км². Отметки подошвы колеблются по различным

источникам в интервале от 600 м до 1100-3850 м, мощность ее колеблется в интервале 20-30 м, реже достигает 60-80 м. Баженовская свита представляет собой один из самых перспективных объектов для добычи сланцевых нефти и газа в мире (Занин и др., 2013; Калмыков, 2016).

По текстурным особенностям все породы баженовской свиты относятся к двум типам - горизонтальнослоистым или к массивным. Аргиллиты – наиболее часто встречаемая в разрезе литофация. С точки зрения структурно-текстурных особенностей и состава, отложения баженовской свиты представлены породами тёмно-серого до чёрного цвета, иногда с буроватым оттенком, что связано, главным образом, с концентрацией в них органического вещества и степенью его катагенеза.

К наиболее продуктивным для добычи слоям относятся карбонатные и кремнистые разновидности. Породы баженовской свиты характеризуются высоким содержанием органического вещества. Органическая часть представлена двумя формами: жидкими углеводородами — легкой нефтью, являющейся продуктом генерации керогена, со средним содержанием 7,1% от объема породы и керогеном со средним содержанием 23,3% от объема породы. Отличительной особенностью упомянутых углеводородов, является то, что процесс преобразования органического вещества в ней еще не завершен.

В связи с существенной неоднородностью баженовской свиты по литологическому составу ключевым вопросом является учет свойств отдельных типов пород, входящих в ее состав. Отдельно следует отметить изменчивость упругих модулей (модуль Юнга E , коэффициент Пуассона ν , скорость упругих волн V) по вертикали. Анализ фактических данных показывает, что при увеличении горного давления до 40-50 МПа, происходило незначительное уплотнение и увеличение упругих свойств благодаря наличию естественной трещиноватости и дефектов строения. Также очевидна высокая степень неоднородности упругих и прочностных модулей в зависимости от напластования и ориентации в пространстве. Причем значения могут изменяться на порядок в отдельных случаях.

В пятой главе рассмотрен вопрос трещинообразования в породах за счет интенсивного гидромеханического воздействия. Наибольшую актуальность исследования данных вопросов имеют для сложно построенных неоднородных сред, какими являются породы нетрадиционных коллекторов, например, сланцевые породы баженовской свиты. Это обусловлено неоднородным строением, наличием хрупких и пластичных прослоек и включений и трещиноватостью. С точки зрения геомеханики, этим породам свойственна низкая проницаемость, стратиграфическая цикличность слоев различной литологии и минерального состава, что в свою очередь

предопределяет анизотропию фильтрационно-прочностных и емкостных свойств и чередование хрупких и пластических зон с различными механизмами разрушения.

В основе численного расчета лежит модель упруго-пластической среды Друккера-Прагера с неассоциированным законом течения. В данной модели скорость деформации $\dot{\varepsilon}_{ij}$ аддитивно раскладывается на упругую и пластическую части $\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p$. Пластическая (неупругая) деформация вычисляется на основе принципов теории пластичности сплошных сред, согласно которым напряженное состояние каждой материальной точки в пространстве ограничено предельной поверхностью $f(\sigma, \tau) = \tau - \alpha\sigma - Y$ (Рисунок 2), выше которой имеют место необратимые деформации, описываемые уравнением пластического потенциала $g(\sigma, \tau) = \tau - \Lambda\sigma$, который благодаря используемому в данной модели неассоциированному закону течения не зависит от предельной поверхности и позволяет оценить влияние дилатансии на процесс распространения трещины. Неупругая деформация определяется в соответствии с уравнениями предельной поверхности и пластического потенциала $f(\sigma_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}^p) = 0$ и $g(\sigma_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}^p) = 0$ соответственно.

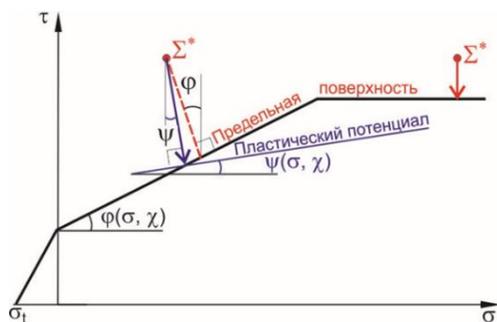


Рисунок 2. Предельная поверхность

Для расчетов были использованы данные по двум скважинам Салымского и Вынгайхинского месторождений. На примере Салымской скважины был построен схематический разрез участка и выделено 9 литологических разностей в соответствии с минералогическим составом,

прочностными и упругими свойствами: песчаник, алевролито-глинистая, карбонатно-глинисто-кремнистая, карбонатно-кремнистая, глинисто-кремнистая, керогено-кремнистая, керогено-глинисто-кремнистая и кремнисто-глинистая. Для вынгайхинской скважины было произведено деление на пачки и на данном этапе схематизация разреза заключалась в том, что каждой выделенной по разрезу пачке был присвоен преобладающий в ней литотип и его упруго-пластические свойства. Мощности слоев были приняты в соответствии с мощностями выделенных пачек баженовской свиты. Параметры, определяющие каждый из слоев более детально описаны в тексте диссертации. В качестве изменяемых параметров выступили начальное распределение

напряжений (горизонтальная и вертикальная компоненты), давление закачки, литологический состав и конфигурация слоев.

Однослойная схема массива. В средах, соответствующих различным литологиям мы наблюдаем различные конфигурации и закономерности распространения трещин (Рисунок 3). Левый столбец иллюстрирует конфигурацию трещин в правом столбце представлена интенсивность пластических деформаций, соответствующая развитию трещины и указывающая на направление ее дальнейшего распространения.

В более хрупких материалах наблюдается минимальное ветвление или его отсутствие, когда с увеличением пластичности можно отметить увеличение интенсивности ветвления трещины в различных направлениях. С увеличением глинистости материала и содержания органического вещества наблюдается

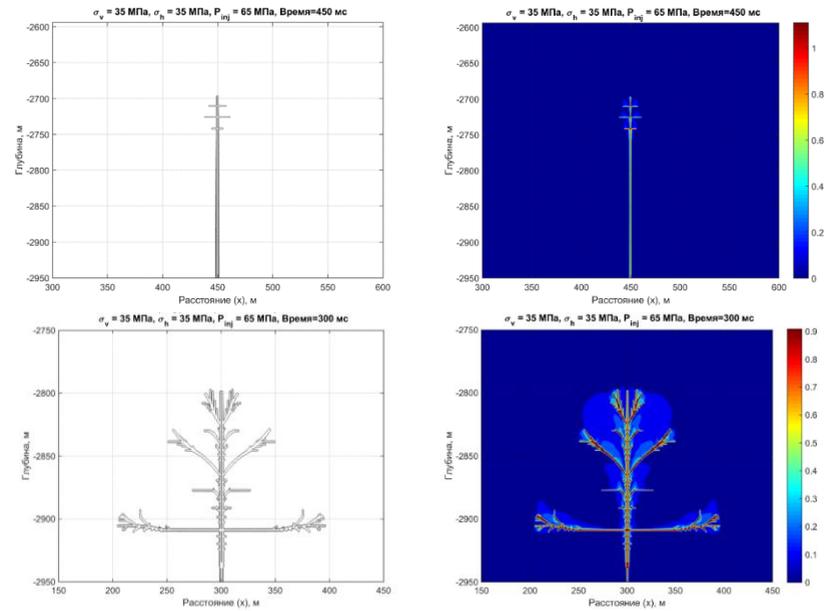


Рисунок 3. Конфигурация трещин (слева) и интенсивность пластических деформаций (справа) в однослойном массиве, сложенном песчаником (верхняя строка) и алевроито-глинистым (нижняя строка) литологическими типами

увеличение интенсивности пластических деформаций, что приводит к накоплению напряжений и ветвлению, переходу от хрупкого механизма разрушения к пластическому.

Применительно к реальным условиям баженовской свиты возникает вопрос возможности возникновения горизонтальных трещин на глубинах порядка 3000 м, где давление вышележащих слоев может составлять порядка 70 МПа. Такая ситуация может реализоваться, когда различие между горизонтальными и вертикальными напряжениями крайне мала, более того, горизонтальные напряжения могут превосходить вертикальные. Соответственно в таком случае следует ожидать именно горизонтального роста трещин (Рисунок 4), т.к. они стремятся развиваться перпендикулярно наименьшему сжатию. На глубине значения горизонтального и вертикального напряжения могут приближаться друг другу по своей величине, что делает возможным открытие и распространение трещин в горизонтальном направлении. На рисунке 4 можно видеть, что на кончике трещины, распространяющейся в горизонтальном направлении соотношение вертикального к горизонтальному напряжению меньше единицы, а на конце распространяющейся вертикально трещины обратная картина. Перераспределение напряжения в зоне пластической деформации происходит вследствие совершения работы сдвиговых напряжений на пластических деформациях, в результате которой и их вклад в общее напряжение уменьшается (Stefanov Y.P., Bek D.D., Myasnikov A.V., Akhtyamova A.I., 2016).

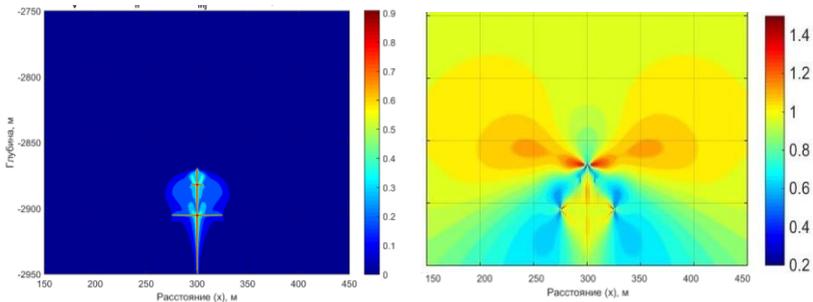


Рисунок 4. Интенсивность пластических деформаций (справа) и отношение вертикального напряжения к горизонтальному (слева). При $\sigma_v = \sigma_h = 30$ МПа, $P_{ini} = 120$ МПа

Двухслойная схема массива. Как было сказано выше, баженовская свита представляет собой слоистое месторождение. Для оценки влияния смены слоев с различными упруго-пластичными и прочностными свойствами была рассмотрена двухслойная среда с песчаником, перекрывающим алевролитоглинистые породы, и наоборот. Эти литологические различия были выбраны как породы с наиболее контрастными характеристиками. В песчанике трещина соответствует трещине при распространении в однослойной среде: трещина прямая и не ветвится в обоих случаях. Вторичная трещина в алевроито-

глинистой породе образуется при приближении к границе слоев и не проникает в песчаник. Изменение давления нагнетания в широком диапазоне не выявило никаких эффектов, связанных с перекрывающим песчаником, что можно считать подтверждением сделанных выше выводов о том, что поведение трещин в алеврито-глинистых породах определяется интенсивностью пластических деформаций. С другой стороны, поведение трещины в двуслойной среде может сильно отличается от характера распространения в однослойной. В этом случае, в связи с влиянием границы слоев вдоль нее возникает дополнительная пластическая деформация, степень влияния которой на общее решение определяется выбором конфигурации параметров в системе.

Многослойная схема массива. Распространение трещин в слоистой среде зависит от соотношения упруго-пластических характеристик слоев и их мощности. Пластическая деформация ограничивает роль растягивающего напряжения, что увеличивает вероятность возникновения ветвления. После преодоления пластичного слоя трещина может распространяться дальше. Сопоставляя решение с различной интенсивностью закачки, можно видеть, что, изменяя этот параметр можно влиять на степень воздействия того или иного прослоя на характер распространения трещины в толще резервуара.

Полученные в результате численного моделирования конфигурации трещин можно подтвердить и лабораторными экспериментами (Roberto Suarez-Rivera, 2013), в которых при испытании образцов сланцевых формаций были получены конфигурации трещин аналогичные полученным в результате моделирования. Представленные численные расчеты качественно повторяют полученные в этой работе экспериментальные данные для гидроразрыва пласта из горизонтальной скважины (Рисунок 5).

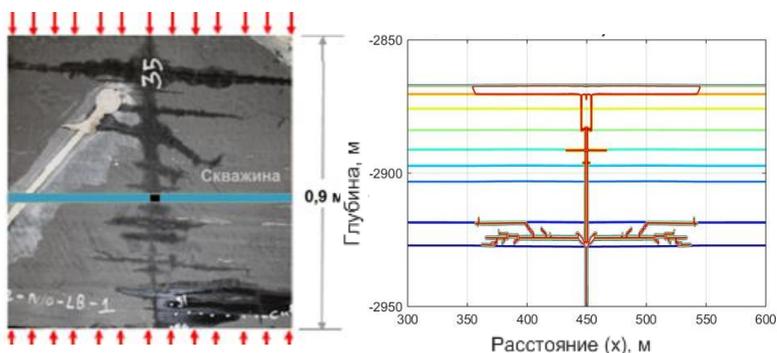


Рисунок 5. Конфигурация трещины гидроразрыва в образце сланцевой формации. Эксперименты (Suarez-Rivera et al. 2013) (слева), конфигурация трещины гидроразрыва в многослойном массиве (справа)

Оптимизация мероприятий гидроразрыва пласта. Непосредственно параметры закачки выбирались в соответствии с технологическими и экологическими ограничениями. Определяющими режим закачки параметрами выступили давление нагнетания и время закачки, ограничением для которых являются технологические возможности проведения мероприятий гидроразрыва. Дополнительным ограничением выступило то, что трещина не должна прорывать верхнюю пачку, но при этом максимально охватить все подстилающие, в особенности пачку, являющуюся целевым интервалом моделирования развития трещин - нефтеносным интервалом баженовской свиты Вынгаяхинского месторождения. В качестве количественных характеристик эффективности закачки были выбраны длина трещины и удельная доля интенсивности пластической деформации во второй пачке.

На схеме (Рисунок 6) видно, что из всех рассмотренных выделяются варианты 55/50, 55/65, 65/50 и 65/65, в которых суммарная длина трещины во второй пачке превышает 200 м. Во втором «семействе» решений находятся варианты 45/50, 45/65, 55/100 и 65/100, в которых суммарная длина трещины во второй пачке превышает 150 м, но не более 200 м. Все варианты второго семейства отличаются проникновением трещины в пятую пачку, кроме варианта 65/100. Этот же вариант дает максимальное из второго семейства значение удельной доли интенсивности пластической деформации, с которой может сравниться лишь один вариант из первого семейства – 55/65. Однако, поскольку псевдостационарное решение варианта 55/65 ближе приближается к

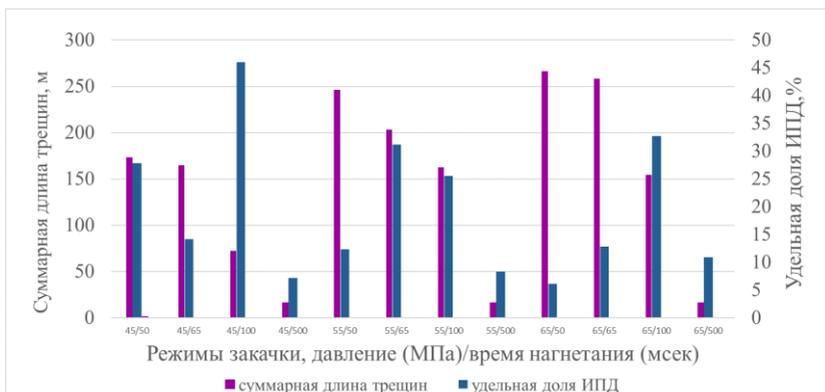


Рисунок 6. Суммарная длина трещин и доля интенсивности пластической деформации в зависимости от режима нагнетания флюида в трещину пятой пачке, чем псевдостационарное решение варианта 65/100 (Рисунок 7), предпочтение отдается последнему. Этот вариант и считается реализующим оптимальную закачку (Бек Д.Д. и др., 2017).

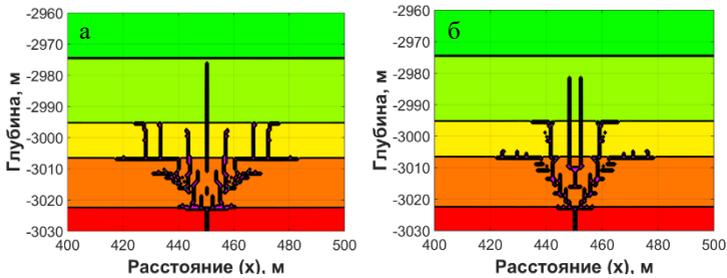


Рисунок 7. Конфигурации трещин гидроразрыва в многослойном разрезе при различных соотношениях давления и времени нагнетания флюида. Начальное распределение эффективных стрессов $\sigma_v = 30$, $\sigma_h = 16$. Варианты 55/65 (а) и 65/100

Основные выводы работы:

1. Работ, посвященных исследованиям механизмов и закономерностей процесса трещинообразования в породах под действием высокоинтенсивных тепловых и гидромеханических воздействий достаточно много, но ряд вопросов требует дополнительных исследований: отсутствуют общепринятые представления о механизме теплового и механического взаимодействия между массивом грунта и низкотемпературным хладагентом; недостаточно проработан механизм распространения трещин в упругопластических слоистых средах, которыми представлены нетрадиционные сланцевые месторождения углеводородов.

2. Характер, кинетика и динамика процессов трещинообразования в породах в общем случае определяется взаимодействием массовых полей, полей температуры, напряжений и деформаций. Это обуславливает крайнюю сложность создания единой комплексной методики прогноза этого процесса, даже с учетом возможностей современных ЭВМ. Однако характерной особенностью рассматриваемых высокоинтенсивных процессов трещинообразования является осязательное различие в темпе релаксации этих полей, что позволяет существенно упростить методику прогноза.

3. Территория Тамбейского нефтегазоконденсатного месторождения располагается в зоне распространения многолетнемерзлых пород с сложными инженерно-геокриологическими условиями. В разрезе исследуемого участка характерны включения сильнозасоленных пород (криопэгов) и сильнольдистых прослоев. Так же на территории широко распространены такие опасные геокриологические процессы, как рост повторно-жильных льдов, термоабразия и термоэрозия, образования солифлюкционных шлейфов и террас на склоновых участках, морозобойное растрескивание грунтов, термокарст, заболачивание.

4. Применительно к технологическим нормам и геокриологическим условиям Южно-Тамбейского нефтегазоконденсатного месторождения

предложена инновационная методика использования жидкого природного газа для целей термостабилизации грунтов основания, что позволяет: обеспечить их функционирование по первому принципу круглогодично и независимо от климатических условий; обеспечить высокий темп промораживания грунта и, следовательно, минимизацию эффекта пучения; промораживать сильнообводненные и засоленные породы, а также криопэги с очень высокой степенью минерализации.

5. Разработана новая методика прогноза процессов промерзания и трещинообразования в грунте при тепловом и механическом взаимодействии с термостабилизатором на базе использования разработанного комплекса программ реализации на ЭВМ связанной и несвязанной задачи термоупругости. Проведенное сопоставление результатов моделирования по обеим методикам, показало их удовлетворительную сходимость. Для характерного разреза Южно-Тамбейского нефтегазоконденсатного месторождения, который включает насыпь, засоленные породы и криопэги, сделан прогноз динамики процессов промораживания и потенциального трещинообразования в грунтах.

6. С помощью разработанных моделей выявлены закономерности процессов промораживания и трещинообразования под действием низкотемпературного хладагента в породах различного состава, строения и свойств, включая сильно засоленные, вмещающие криопэги. Получены оптимальные значения входной в термостабилизатор температуры хладагента, позволяющие обеспечить быстрый темп промораживания грунта без возникновения процессов пучения и трещинообразования в около контактной зоне; предложены рекомендации по благоприятному периоду запуска термостабилизатора (лето, зима); проведены расчеты для оценки эффективности промораживания сильнозасоленных грунтов – криопэгов - в диапазоне допустимых входных температур хладагента, рассматриваемого термостабилизатора. Дано сравнение эффективности применения термостабилизатора на основе сжиженного природного газа по сравнению с используемым на практике типовым термостабилизаторами.

7. Разработка нетрадиционных месторождений сланцевой нефти, к которым относится Баженовское месторождение, с применением мероприятий гидроразрыва является одним из основных способов увеличения проницаемости и площади отбора углеводородосодержащих флюидов. Баженовская свита отличается высокой неоднородностью литолого-фациального состава, и в настоящее время рассматривается как материнская толща для основной массы углеводородного сырья Западной Сибири. Она является, с одной стороны, региональным флюидоупором, с другой - продуктивной на нефть и газ, причем потенциальные возможности ее в этом

отношении изучены далеко не полностью. Трещина, образующаяся в результате гидроразрыва, контролируется множеством параметров, что делает сам процесс и возможность точных расчетов каждого из параметров крайне сложным. Неоднородность литологического состава обуславливает необходимость учета свойств отдельных типов пород, входящих в ее состав. Наибольшую актуальность исследования данных вопросов имеют для сложнопостроенных неоднородных сред, какими являются породы баженовской свиты.

8. Предложенная в работе модель процесса деформирования и разрушения породы крайне чувствительна к выбору упруго-пластических параметров среды, что приводит к необходимости создания соответствующей методики выбора этих параметров. Разработана методика инициализации используемой модели, в которой численно решается система уравнений механики, включающая уравнения движения, неразрывности и определяющие соотношения поведения среды, в рамках модели Друккера-Прагера с неассоциированным законом течения.

9. С помощью численного моделирования обнаружен и косвенным образом экспериментально подтвержден и качественно объяснен эффект ветвления вертикальных трещин в отдельно взятых литологических типах пород баженовской свиты. Природа этого эффекта обусловлена перераспределением напряжений в результате работы касательных напряжений на сдвиговых пластических деформациях.

10. Выявлены закономерности влияния слоистости, конфигурации и последовательности расположения слоев на распространение трещин гидроразрыва на примере двухслойного и многослойного разрезов пород баженовской свиты.

11. Предложены научные рекомендации по оптимизации мероприятий гидроразрыва пласта, позволяющие управлять направлением и масштабами данного процесса в зависимости от экономических и экологических требований к результатам мероприятия применительно к реальным геологическим условиям Вынгайхинского и Салымского участков Баженовского месторождения.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение», опубликованные автором по теме диссертации:

1. Комаров И. А., Ананьев В. В., Бек Д. Д. К проблеме использования хладоресурса сжиженного природного газа для целей термостабилизации грунтов // Криосфера Земли. – 2015. – № 2. – С. 75-81. (*Импакт-фактор РИНЦ (2015) 0.505*).

2. Комаров И. А., Ананьев В. В., Бек Д. Д. Использование хладоресурса сжиженного природного газа для промораживания засоленных грунтов,

вмещающих криопэги // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2016. – № 2. – С. 31-36. (*Импакт-фактор РИНЦ (2016) 0.648*).

3. Бек Д. Д., Ахтямова А. И., Мясников А. В., Стефанов Ю. П., Стенин В. П., Альчибаев Д. В., Оптимизация высокоскоростной закачки при ГРП горизонтальных скважин формаций баженовской свиты на примере Вынгайхинского разреза // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 4. – С. 90–95. (*Импакт-фактор РИНЦ (2017) 1.199*).

Публикации в иных научных изданиях:

1. Мясников А.В., Стефанов Ю.П., Стенин В.П., Бек Д.Д., Ахтямова А.И., О возможном решении задачи дизайна многостадийного ГРП в баженовских формациях // Недропользование XXI век. - 2016. - №6. - С. 62-78.

2. Stefanov Y.P., Bek D.D., Myasnikov A.V., Akhtyamova A.I., Modelling of Hydraulic Fractures Propagation in the Layered Elastoplastic Media / Proceedings - SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition, 24-28 Oktober 2016, Moscow, Russia – Vol.3 – Moscow, 2016. – pp.1756-1782.

3. Комаров И.А., Ананьев В.В., Бек Д.Д., Исаев В.С., Проблемы термостабилизации грунтовых оснований инженерных сооружений / Материалы V конференции геокриологов России. – 2016. - том 1. - С. 266-279.

4. Бек Д.Д., К проблеме использования хладоресурса сжиженного природного газа для целей термостабилизации грунтов оснований / Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2014», МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, 2014 г.

5. Komarov I.A., Ananyev V.V., Bek D.D., Application problems and potential for utilization of industrial outage of liquid natural gas for foundation soil thermostabilization//Journal of Earth Science, Springer Verlag. – 2015. - Vol 6, Issue 5. – pp. 9-10.

6. Комаров И.А., Ананьев В.В., Бек Д.Д., Обеспечение устойчивости грунтовых оснований инженерных сооружений в криолитозоне с помощью низкотемпературных хладоносителей / Материалы конференции - VII международная научно-техническая конференция "Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке", Санкт-Петербург. – 2015. - Часть 1. - С. 424 – 429.

7. Komarov I.A., Ananyev V.V., Bek D.D., Application problems and potential for utilization of industrial outage of liquid natural gas cooling capacity for foundation soil thermostabilization as in the case of freezing of lenses of cryopegs with different salt content rage / XI International Conference on Permafrost, Books of abstracts, Potsdam, Germany. – 2016. – pp. 39-40.

8. Komarov I.A., Ananyev V.V., Bek D.D., The methodology of the assessment of the thermal and mechanical interaction of a low-temperature coolant with the salted soils containing cryopegs / The 2nd Asian Conference on Permafrost, Book of abstracts, Sapporo, Japan. – 2017. – pp. 125-126.

9. Komarov I.A., Ananyev V.V., Bek D.D., Thermal resistance of engineering constructions soil foundation / Deline P., Bodin X. and Ravanel L. (Eds.): 5th European Conference On Permafrost, Book of Abstracts, Chamonix, France. – 2018. – pp. 170-171.

10. Bek D., Komarov I., Myasnikov A., Comparison of coupled and uncoupled thermo-elastic models in te range of low temperature below zero / Proceedings of the Third International Conference Challenges in Geotechnical Engineering, Zielona Gora, Poland. – 2019. – p. 7.