

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА  
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

*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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Научные руководители:  
доктор геолого-минералогических наук,  
доцент Комаров Илья Аркадьевич;  
доктор физико-математических наук  
Мясников Артём Вениаминович

Москва – 2019

## Оглавление

Оглавление .....	2
Введение.....	4
Глава 1. Природа, механизм и методы прогноза процесса трещинообразования в породах под действием температурных и гидромеханических воздействий.....	12
1.1. Напряженно-деформированное состояние массива .....	12
1.2. Возникновение трещин, связанных с интенсивными тепловыми воздействиями .....	15
1.3. Возникновение трещин, связанных с интенсивными гидромеханическими воздействиями .....	31
Глава 2. Геокриологические условия Южно-Тамбейского нефтегазоконденсатного месторождения .....	43
2.1. Орорафия.....	43
2.2. Геологическое строение .....	46
2.3. Гидрогеологические условия .....	47
2.4. Геокриологические условия и криогенные процессы .....	48
Глава 3. Трещинообразование в породах за счет высокоинтенсивных тепловых воздействий .....	56
3.1. Методы обеспечения несущей способности грунтов оснований с помощью регулирования температурного режима.....	56
3.2. Методика прогноза процессов промораживания и трещинообразования в породах при взаимодействии с низкотемпературным хладоносителем .....	62
3.3. Выбор теплофизических и механических характеристик пород. Инициализация расчетной модели .....	67
3.4. Прогноз температурного режима и динамики промерзания с помощью низкотемпературного хладагента .....	69
Глава 4. Геологическая характеристика Баженовского месторождения.....	76
4.1. Литологические и геохимические особенности баженовской свиты .....	77
4.2. Нефтегазоносная характеристика баженовской свиты .....	79
4.3. Геомеханические характеристики пород баженовской свиты .....	83
Глава 5. Трещинообразование пород за счет высокоинтенсивных гидромеханических воздействий.....	85
5.1. Методика применения мероприятий гидроразрыва пласта для повышения нефтеотдачи пород в приложении к слоистым сланцевым формациям.....	86
5.2. Методика прогноза процессов трещинообразования в результате высокоинтенсивных гидромеханических воздействий.....	88

5.3. Выбор прочностных параметров пород. Инициализация расчетной модели .....	98
5.4. Прогноз процесса ветвления трещин при применении мероприятий по гидроразрыву пласта.....	106
Основные выводы работы .....	125
Список сокращений .....	128
Список литературы .....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Программный продукт, используемый для моделирования температурных полей и ореолов промерзания пород.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Программный продукт, используемый для моделирования водно-ионного режима пород.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Программный продукт, используемый для моделирования распространения трещин .....	147
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Список рисунков, приведенных в основном тексте работы .....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Список таблиц, приведенных в основном тексте работы.....	158

## Введение

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 осязаемое 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 бажендовской 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 упруго-пластическая 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 нефтегазоконденсатное месторождение.

**Предметом исследований** является процесс трещинообразования пород 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 грунтов 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 пород 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 Вынгаяхинского 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 позволит 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; установить оптимальные значения входной температуры хладагента, позволяющие повысить интенсивность промораживания без реализации процессов трещинообразования; определить 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.

**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 Вынгаяхинского 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 outgate 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.

#### **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.

# **Глава 1. Природа, механизм и методы прогноза процесса трещинообразования в породах под действием температурных и гидромеханических воздействий**

## **1.1. Напряженно-деформированное состояние массива**

Горные породы являются средами с ярко выраженной неоднородной структурой. Их механические свойства зависят от напряженного состояния, от давления при котором они находятся, а также от температуры. В зависимости от условий нагружения, а также структуры материала (пористости, трещиноватости, минерального состава и размера зерен) развитие деформации за пределом упругости в геологических средах сопровождается различными явлениями. При растяжении в таких материалах быстро развиваются магистральные трещины, а разрушение, как правило, имеет хрупкий характер. В условиях сдвига поведение становится более сложным, часто сопровождается объемными изменениями и сильно зависит от давления. При умеренном давлении горные породы хрупки, в них разрушаются зерна и связи между ними. С ростом давления они ведут себя как упругопластические тела и разрушаются вязким образом.

При нормальной температуре неупругая деформация развивается, в первую очередь, путем смещений по границам имеющихся микротрещин, происходит разрушение межзеренных контактов. В этом случае возможно образование крупных трещин, которым, как правило, предшествует разрыхление, рассеянное накопление микротрещин с увеличением объема и локализация деформации. В высокопористых породах при давлениях в десятки и сотни МПа происходит разрушение зерен. Их обломки забиваются в поры, поровое пространство сокращается, снижается проницаемость среды.

Несмотря на хрупкий характер разрушения при обычной температуре образование трещин в условиях сжатия не приводит к полной потери прочности для большинства геологических материалов. Поведение тела зависит от траектории роста, возможности слияния и образования магистральных трещин. В свою очередь, это определяется условиями взаимодействия поверхностей несплошностей и величиной сжимающих напряжений, от которых зависят как условия контакта внутренних поверхностей, так и предельная длина трещин. В условиях бокового сжатия трение на поверхностях микротрещин обеспечивает достаточную прочность и для приращения деформации необходимо приложить дополнительные усилия. Лишь при формировании протяженных, магистральных трещин или разломных зон наблюдают заметный сброс напряжений до остаточной прочности. Таким образом, макроскопическое поведение за пределом упругости пород в условиях сжатия подобно пластическому, поэтому общепринято рассматривать их поведение с использованием теории пластичности.

Лишь при больших давлениях, характерных для глубин в десятки километров, пористость среды становится пренебрежимо малой, неупругая деформация начинает развиваться на уровне кристаллической решетки зерен, т.е. происходит переход к дислокационному механизму пластичности, этому способствует также высокая температура.

Экспериментальные данные о механических свойствах пород, кроме упругих характеристик и плотности, содержат традиционные прочностные параметры: сцепление и угол внутреннего трения. В связи с тем, что геологические и другие материалы подобного типа обычно находятся в условиях сжатия, экспериментальные исследования осуществляют на образцах породы при неравноосном сжатии. Предварительно их подвергают действию определенной обжимающей нагрузке, а затем деформируют в направлении наибольшей оси образца до полного разрушения, сохраняя на боковых поверхностях постоянное значение давления. Размеры образцов обычно составляют несколько сантиметров, а соотношения сторон от 1:1.5 до 1:2.75. Чаще всего с этой целью используют цилиндрические образцы, реже — прямоугольной формы.

В настоящее время предложено большое количество различных форм предельных поверхностей. В некоторых из них применяются сложные уравнения функции текучести, в которые входит третий инвариант тензора напряжений, или параметр Лоде–Надаи. Однако применение таких моделей пока не нашло большого распространения ввиду их сложности и ограниченности экспериментальных данных, кроме того, остался открытым вопрос о целесообразности использования сложных форм предельной поверхности.

### **Условия разрушения**

Расчет напряженно-деформированного состояния вблизи одиночных трещин и описание их поведения осуществляется, как правило, с описанием поверхностей трещин, для чего используются отработанные методики механики разрушения.

В качестве условия разрушения в зависимости от рассматриваемого процесса, используемого метода расчета и полноты описания применяют различные критерии. Существует ряд статических и кинетических моделей разрушения. Статические модели и их варианты, в которых предполагается мгновенное разрушение при достижении некоторым параметром своей критической величины (Атлури С., 1990; Никифоровский В.С., Шемякин Е.И, 1979; Нотт Дж.Ф., 1978; Партон В.З., Борисковский В.Г., 1988; Партон В.З., Морозов Е.М., 1974; Поль Б, 1975), широко используются при решении задач как статического, так и динамического разрушения (Ахмадеев Н.Х. 1988; Бураго Н.Г., Кукуджанов В.Н., 2003; Кукуджанов В.Н., 1988; Gulidov A.I и др., 1999). В другом классе моделей учитываются временные характеристики процесса, например, термофлуктуационные (Журков С.Н., 1968; Регель В.Р. и др., 1979), и критерии, основанные на принципе накопления повреждений среды (Гриднева В.А. и др., 1977;

Качанов Л.М., 1974; Работнов Ю.Н., 1987). Подробный обзор критериев, используемых при решении различных задач, можно найти в работах (Ахмадеев Н.Х., 1988; Бурого Н.Г., 2003).

Один из способов расчета механического поведения среды при разрушении заключается в связанном учете повреждаемости среды в ходе пластической деформации (Бажант З., 1983; Драгон А., Мруз З., 1983; Стефанов Ю.П., 2002, 2005; Черепанов О.И., 1999). При таком подходе континуальной механики разрушения часто используются соотношения теории пластичности, а разделение на пластическую и хрупкую деформацию становится условным. В этом случае объемные изменения, связанные с образованием микротрещин, учитываются без перехода на макроуровень, а соответственно и без применения специальных процедур описания трещин. Такой подход оказывается оправданным в случае множественного разрушения без формирования магистральных трещин. Его применение особенно эффективно в задачах, связанных с деформированием горных пород в условиях сжатия и сдвига, а также в задачах геомеханики.

Другая проблема заключается в расчете напряженно-деформированного состояния в разрушенной области в случае образования небольшого количества трещин. В этом случае необходимо описание возникающих разрывов и пустот масштаба, соответствующего рассматриваемому мезо- или макроуровню. С этой целью используются различные способы учета разрушения. Первый, наиболее простой из них, состоит в коррекции напряжений и даже удалении расчетных ячеек в зоне разрушения (Белов Н.Н и др., 1992; Гриднева В.А и др., 1977; Гулидов А.И., 1987; Керрен Д. и др., 1981; Майчен Дж. и др., 1967; Шоки Д. и др., 1981; Johnson G.R. и др., 1990), т.е. без явного введения поверхностей конкретных трещин. Здесь необходимо отметить одну из основополагающих работ (Гриднева В.А., Немирович-Данченко М.М., 1983; Майчен Дж. и др., 1967), в которой при этом принимаются во внимание ориентация и раскрытие неявно введенных трещин. Второй способ заключается в создании свободных поверхностей (Немирович-Данченко М.М., 1998; Гулидов А.И., Шабалин И.И., 1994; Gulidov A.I., 1999; Wilkins M.L., 1972, 1999), в этом случае дальнейшие изменения напряженно-деформированного состояния, связанные с разрушением, будут учитываться автоматически. Создание поверхностей осуществляется также различными способами: это либо развитие первого подхода с перестройкой сетки вблизи вершины, например, (Гулидов А.И., Шабалин И.И., 1994), либо описание разрывов по границам ячеек путем разделения узлов (Гриднева В.А., Немирович-Данченко М.М., 1985; Немирович-Данченко М.М., 1998; Wilkins M.L., 1972, 1999).

Расчет напряженно-деформированного состояния вблизи одиночных трещин и описание их поведения осуществляется, как правило, с описанием поверхностей трещин, для чего используются отработанные методики механики разрушения. Причем существуют различные схемы описания роста трещины как путем перестройки сетки вблизи вершины, так и смещением

координаты вершины по ячейкам либо по их границам. Используются различные процедуры расчета — от скачкообразного (метод стационарной сетки) до плавного смещения вершины трещины по расчетной сетке, либо ее постоянной перестройки. Построению алгоритмов расчета роста трещин произвольной конфигурации посвящены работы (Belytschko T., Black T., 1999; Song J.-H., 2006). Обзор основных способов численного моделирования разрушения и роста трещин выполнен в работах (Бураго Н.Г., Кукуджанов В.Н., 2003; Атлури С., 1990; Партон В.З., Борисковский В.Г., 1988; Сиратори М и др., 1986).

## **1.2. Возникновение трещин, связанных с интенсивными тепловыми воздействиями**

Мерзлые породы и лед подвержены воздействию температурных напряжений, что приводит к образованию трещин в мерзлой толще. Указанное явление необходимо учитывать в инженерной практике, при проектировании низкотемпературных хранилищ сжиженных газов, строительстве дорожных и аэродромных покрытий, а также при исследовании ряда природных явлений таких как морозобойное растрескивание и образование повторно жильных и клиновидных льдов.

Одним из основных параметров, необходимых для определения величины температурных напряжений, развивающихся в мерзлых горных породах, является коэффициент температурной деформации  $\alpha$ , выражающий относительную деформацию (расширение или сокращение) при изменении температуры на 1°С.

Данных о коэффициенте температурной деформации мерзлых пород достаточно мало, но существует ряд исследований, посвященных коэффициенту температурной деформации льда. В работах Т. Бутковича, Н. Дорсея и Yamaji был рассмотрен диапазон температур от 0 до -35°С, Р. Повелл проводил исследования от 0 до минус 195°С. Почти все исследования (Т. Буткович, Якоб и Эрк, Н. Дорсей, Yamaji) показали, что с понижением температуры  $\alpha$  понижается, и зависимость  $\alpha$  от температуры носит почти линейный характер.

Температурные деформации мерзлых грунтов изучал И.Н. Вотяков. Им были проведены измерения коэффициента температурной деформации на образцах пород различного гранулометрического состава при повышении температуры. Диапазон температур, рассматриваемый Вотяковым составил 27°С: повышение температуры с минус 30 до минус 3°С. Во всех случаях отмечалось расширение мерзлых пород, при этом коэффициент линейного расширения увеличивался с ростом дисперсности, с уменьшением влажности и с повышением средней температуры интервала перепада температур. Автор показал, что температурные деформации мерзлых пород происходят не только за счет фазовых переходов воды, расширения льда и скелета грунта. Если бы эти деформации обуславливались только лишь указанными факторами, то в связи с тем, что при повышении температуры уменьшение объема льда в

результате частичного его таяния происходит соответственно кривой зависимости незамерзшей воды от температуры и может превысить температурные деформации расширения льда и скелета, по мере приближения интервала температур к  $0^{\circ}\text{C}$  температурное расширение должно было бы уменьшаться, а затем могло происходить и сокращение. С уменьшением влажности (и соответственно льдистости) должно было происходить уменьшение температурного расширения мерзлых пород, так как для льда температурные деформации значительно больше ( $\alpha = 50 \cdot 10^{-6}$  1/град), чем для скелета ( $\alpha = 10 \cdot 10^{-6}$  1/град). Экспериментальные данные продемонстрировали иные зависимости, что объясняется автором некоторыми физико-химическими процессами, сопровождающими фазовые переходы в мерзлых породах. Так, по Вотякову, при повышении температуры в результате частичного плавления льда происходит гидратация и пептизация коллоидных агрегатов, что приводит к увеличению объема.

Также экспериментальные исследования температурных деформаций мерзлых пород проводились на кафедре геокриологии МГУ совместно с ВНИИПРОМГАЗом (Шушерина, Рачевский, Отрощенко, 1970). В отличие от исследований, проведенных Вотяков, в данном случае опыты проводились в условиях охлаждения мерзлых пород. В рамках данных исследований количественно оценивались все основные составляющие мерзлых пород: скелет, лед, незамерзшая вода и газообразная составляющая, для чего наряду с влажностью определялась и степень их влагонасыщения.

Опыты проводились с тремя типами пород: песок естественного состава (песок 1), фракция аналогичного песка 0.25-0.10 мм (песок 2) и суглинок. Начальная температура образцов составляла порядка минус  $5^{\circ}\text{C}$ , а конечная около минус  $20^{\circ}\text{C}$ .

Следует отметить, что при охлаждении характер процесса деформирования мерзлых пород зависит от их дисперсности. Для песков деформации прекращались, как только образцы принимали температуру окружающей среды, для суглинка деформации продолжались и после этого, причем период стабилизации температуры у них был больше.

Результаты испытаний показывают, что во всех рассматриваемых породах и состояниях при понижении температуры в наблюдаемом интервале (от минус 3-5 до минус  $20^{\circ}\text{C}$ ) отмечается сокращение размеров мерзлых пород. Коэффициент температурного линейного сокращения существенно зависит от степени водонасыщения и гранулометрического состава.

Для мерзлых песков зависимость от влагонасыщения имеет нелинейный характер: при малых значениях (0.55-0.6) коэффициент  $\alpha$  практически не меняется, когда при больших значениях влагонасыщения отмечается существенное возрастание  $\alpha$ .

Для мерзлого суглинка изменения  $\alpha$  с температурой в зависимости от влагонасыщения имеет по сравнению с песками принципиально иной характер: с ростом степени влагонасыщения отмечается уменьшение величины коэффициента  $\alpha$ .

Сравнивая коэффициент  $\alpha$  песков и суглинка можно отметить, что гранулометрический состав значительно влияет на величину их температурных деформаций. С ростом дисперсности величина коэффициента линейного температурного сокращения значительно возрастает, причем влияние дисперсности уменьшается с увеличением водонасыщенности породы.

Для инженерной практики, как уже было упомянуто выше, необходимы данные о температурных деформациях мерзлых грунтов для более низких отрицательных температур. В работе (Рачевский, Шушерина, Отрощенко, Макарец, 1972) описаны результаты исследований температурных деформации мёрзлых грунтов начаты в (Шушерина и др., 1970) для более широкого диапазона температур до минус 165°C.

Испытания проводились с двумя разновидностями дисперсных пород – с песком и суглинком, а также со льдом. Рассматриваемый песок в отличие от суглинка отличался однородностью гранулометрического и минерального состава. Важно отметить, что данные литологические разности значительно отличаются по фазовому составу воды в диапазоне отрицательных температур.

Начальная температура образцов в рассматриваемом диапазоне была минус 20°C. опыты проводились в диапазоне температур от минус 4 до минус 170°C.

В результате были получены дилатометрические кривые для испытуемых образцов (Рисунок 1.1) при охлаждении, на графиках отражена деформация образцов при понижении температуры. У льда и у песка наблюдается понижение интенсивности роста деформации с понижением температуры на всем рассматриваемом диапазоне. Характер кривых для мерзлых суглинков значительно отличается от кривых для песков. В данном случае в ходе деформации наблюдаются аномальные участки, которые начинаются при температурах минус 20 – минус 40°C и отражают деформации расширения. Характер развития и величина температурных деформации несколько отличаются в зависимости от водонасыщения. Наибольшая интенсивность развития деформаций расширения отмечается при температурах минус 40 – минус 60°C, после чего наблюдается период незначительных линейных изменений, происходящих при температуре минус 40 – минус 70°C. При более низкой температуре вплоть до минус 165°C, происходят деформации сокращения, но с меньшей интенсивностью, чем при температурах до 30°C.

С уменьшением водонасыщения характер деформирования суглинка приближается по своему ходу к аналогичным кривым для льда и песка, хотя аномальная зона, соответствующая деформациям расширения в диапазоне температур минус 45 – минус 50°C также присутствует.

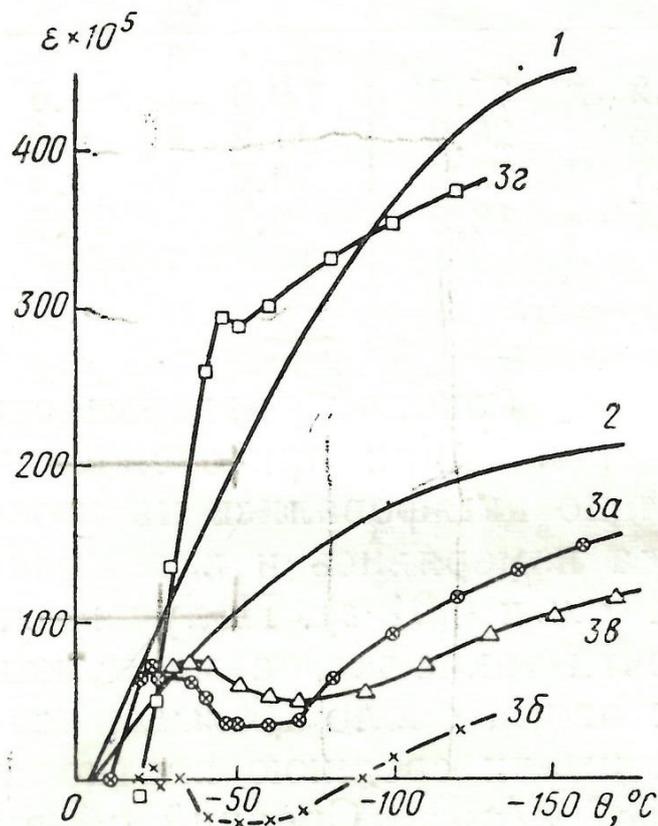


Рисунок 1.1 Развитие температурных деформаций  $\epsilon$  льда (1), мерзлого песка (2) и мерзлого суглинка (3) при понижении температуры  $\theta$  и различной степени водонасыщения: 3а – 0.98, 3б – 0.90, 3в – 0.82, 3г – 0.47 (Рачевский и др., 1972)

Как видно на графиках, с увеличением водонасыщения деформация сокращения образцов мерзлого суглинка понижается.

Значения коэффициента линейного расширения  $\alpha$  (Рисунок 1.2) для песка при различной степени водонасыщения имеют практически линейный характер зависимости от температуры в диапазоне от минус 25 до минус 150°C. Несколько изменяются значения  $\alpha$  для мерзлого песка в зависимости от степени заполнения пор льдом, по мере понижения водонасыщенности значения  $\alpha$  для песка уменьшаются, однако при температурах ниже минус 110°C, картина полностью меняется и наибольшее значение  $\alpha$  наблюдается у образцов с наименьшим водонасыщением.

Зависимость  $\alpha$  от температуры для мерзлого суглинка, как и зависимость интенсивности температурных деформации имеет существенно отличный характер. До температуры минус 35-минус 55 °C наблюдается резкое уменьшение  $\alpha$  мерзлого суглинка. При дальнейшем понижении температуры до минус 70 - минус 100°C (в зависимости от степени водонасыщения) наблюдается повышение  $\alpha$ , а при более низких температурах вновь наблюдается понижение  $\alpha$ . При этом в диапазоне температур минус 20 - минус 45°C значение  $\alpha$  мерзлого суглинка значительно выше, чем у песка и льда, а в диапазоне минус 100 – минус 150°C величины коэффициента  $\alpha$  у всех рассматриваемых пород очень близки.

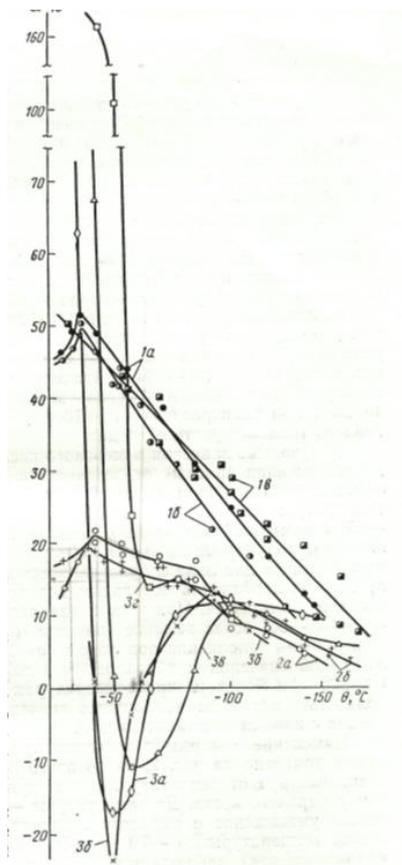


Рисунок 1.2 Зависимость коэффициента линейного температурного расширения  $\alpha$  льда (1), мерзлого песка (2) и мерзлого суглинка (3) от температуры  $\Theta$ : 1а – слоистый лед (измерения перпендикулярно слоистости), 1б – слоистый лед (измерения  $\parallel$  слоистости), 1в – массивный, 2а – песок, степень водонасыщения 0.86, 2б – песок 0.56, 3а – суглинок 0.98, 3б – суглинок 0.90, 3в – суглинок 0.47 (Рачевский и др., 1972)

### Механизм и закономерности процесса морозобойного растрескивания

Криогенное (морозобойное) растрескивание является одним из наиболее распространенных в регионах с суровым холодным климатом процессом. Обусловленные им полигональные формы широко развиты как в области распространения многолетнемерзлых пород, так и в районах глубокого сезонного промерзания (Григорян, Красс, Гусева, Георгиевич, 1987), наиболее четко этот процесс выражен на территориях с резко континентальным климатом, суровой зимой и небольшими мощностями снежного покрова (Гречищев, Чистотинов, Шур, 1980).

Физическая природа данного процесса связана с напряжениями, возникающими в грунтах при температурных воздействиях. Гречищев (Гречищев и др., 1980) выделяет два вида подобных трещин: возникающих в процессе промерзания грунта и после его промерзания. Первый вид трещин возникает при температурах близких к температуре начала замерзания в результате сложного многофакторного процесса, включающего фазовые переходы, миграцию влаги к фронту промерзания, усадку грунтов, фильтрационно-консолидационные процессы, и сложно описывается количественно. Во втором случае при дальнейшем понижении температуры миграция влаги, фазовые переходы и фильтрационно-консолидационные процессы становятся

незначительными и можно рассматривать грунтовый массив как однофазную среду, а рост трещин считать результатом температурного сокращения объема при понижении температуры.

Морозобойные трещины, как правило имеют протяженность от десятков до сотен метров и глубину от десятков сантиметров до нескольких метров и образуют системы параллельных трещин, располагающихся примерно на одном и том же расстоянии одна от другой (Гречищев, Чистотинов, Шур, 1984). Часто перпендикулярно им развивается аналогичная система трещин образуя выраженные в рельефе полигональные структуры. В арктических условиях в результате возникновения криогенных трещин в грунтах могут формироваться повторно-жильные льды и такие формы рельефа, как полигональные тундры.

В природе морозобойные трещины часто определяют основные черты рельефа, благоприятствуют эрозионным и оползневым явлениям, способствуют глубокому промерзанию грунта и неравномерному распределению влаги, способствуют разрушению и сносу материала, тем самым увеличивая интенсивность выветривания. Формирующиеся по криогенным трещинам повторно жильные льды, при своем последующем протаивании, способствуют развитию оврагообразования и термокарста. Но необходимость изучения этого процесса обусловлена не только тем фактом, что он является очень важным рельефообразующим природным процессом, но и фактом воздействия морозобойных трещин на инженерные сооружения. Последствиями развития морозобойных трещин могут стать повреждения фундаментов зданий, подземных хранилищ, автодорожных и железнодорожных полотен, насыпей, земляных дамб и плотин, откосов и насыпей, аэродромных покрытий, трубопроводов, кабелей связи и других линейных сооружений (Григорян и др., 1987).

Первые упоминания об исследованиях морозобойных трещин датируются началом XIX века и носят чисто описательный характер. В 20-е годы был организован ряд экспедиций, направленных на освоение и изучение Сибири, по результатам которых было положено начало исследований вечномёрзлых грунтов. В отчетах и описаниях таких великих исследователей как А.Е. Фигурин, П.А. Шумского, Ф.П. Врангеля, К.М. Бэра встречаются описания «трещин льда» на поверхности земли, которые некоторые из исследователей уже связывают с сжатием почвы от мороза и неустановившимся температурным режимом. Подводят итоги данного периода исследований морозобойных трещин результаты экспедиции Миддендорфа.

Следующим этапом исследований можно выделить 80-е годы, связанные с экспедициями, посвященными промышленному освоению Сибири: активным поискам, разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых, строительству дорог и сооружений, и прочим свидетельствам освоения территорий. Одним из горных инженеров И.А. Лопатиным было отмечено широкое распространение криогенных трещин и в низовьях Енисея и Бреховских островах и установлено верное происхождение ледяных жил, таким образом, можно сказать, что

своими исследованиями Лопатин положил начало инженерной геокриологии. Последователи Лопатина, исследователи мерзлоты, А.А. Бунге и Э.В. Толль в конце XIX века значительно продвинулись в исследовании морозобойных трещин и внесли большой вклад в развитие контракционной теории формирования трещин. Согласно А.А. Бунге трещины образуются в результате сжатия грунта при его охлаждении, а затекающая в трещины вода замерзает и образует там жилы льда. Так же А.А. Бунге описывает и влияние скорости промерзания на трещинообразование, отмечая что оно происходит при быстром и резком понижении температуры воздуха. Подобные наблюдения были отмечены в работах иностранных ученых только в начале XX века. Чаще всего возникновение контракционной теории связывают с трудом Левингвелла, опубликованном почти через тридцать лет после работ А.А. Бунге и практически не отличающимся от них по содержанию.

Впервые воздействие трещин на инженерные сооружения были отмечены в начале XX века, в 40-е. Н.И. Быковым были описаны трещины на проезжей части в Забайкалье, а В.Ф. Жуковым трещины в ленточном фундаменте и строительном котловане, явившиеся последствием морозобойного растрескивания. На территории Якутска последствия криогенного растрескивания наблюдаются практически на всех строительных площадках и улицах. Необходимость учета вызываемых криогенным растрескиванием последствий, возникала при проектировании новых и нестандартных на тот момент сооружений Севера. В 70-е Кузьминым были проведены экспериментальные исследования по оценке дополнительных растягивающих напряжений, для проектирования холодного трубопровода подземного заложения. Так же трещины оказывают значительный эффект на такие сооружения как плотины и покрытия дорог и аэродромов, что отражено в исследованиях Славуцкого, Шестакова и Щербакова (1970).

Огромное количество исследований было посвящено региональным закономерностям распространения морозобойных трещин. На протяжении всего XX века такие исследователи как П.Ф. Швецов, Н.Г. Бобов и Б.И. Втюрин, В.Г. Кондратьев, Г.Ф. Гравис и И.В. Климовский, Н.В. Шарапова, Е. А. Втюрина, В.Л. Суходворский, Н.С. Данилов, Фотиев, Шевелева, Г.И. Дубиков, В.Т. Трофимов посвятили свои труды исследованию распространения морозобойных трещин на территории бывшего СССР.

Натурные наблюдения за закономерностями распространения и динамикой развития морозобойных трещин немногочисленны, что обусловлено достаточно сложными условиями их проведения. Это связано с суровыми климатическими условиями, удаленностью регионов наблюдения и отсутствием надежного способа измерений. Количественные методы исследования морозобойных трещин при промерзании грунтов впервые были использованы М.Н. Гольштейном в 1948 году, им было сделано предположение, что трещинообразование связано с неравномерностью пучения грунтов. Так же обширными натурными наблюдениями

занимались А.В. Паталеев, Ю.Г. Куликов и Е.А. Втюрина – всеми была выдвинута гипотеза о том, что помимо температурных деформаций процессу морозобойного растрескивания сопутствуют деформации усыхания.

Продолжительными стационарными наблюдениями за морозобойным растрескиванием занимался Дж.Р. Маккей. Результатом его исследований стала эмпирически выведенная зависимость вероятности растрескивания ледяной жилы от ее ширины. В рамках задач инженерной геокриологии производились натурные наблюдения за влиянием прочности дорожного покрытия на размер полигонов, формирующихся при морозобойном растрескивании (О.А. Славуцкий) и за динамикой температурных деформаций грунтов и растягивающих усилий, возникающих в подземных стальных трубопроводах в результате их взаимодействия с криогенными трещинами (Г.П. Кузьмин).

Гречищевым и Шешиним в 70-х годах была проведена серьезная исследовательская работа, посвященная сопоставлению количественных исследований и натурных наблюдений за криогенным растрескиванием. Данные исследования были направлены на изучение зависимости зимней динамики температурных деформаций грунтов от периодичности колебаний температуры воздуха и грунта и его терморезологических свойств. То есть ученым были проведены натурные наблюдения за температурой воздуха и грунта, деформациями грунта по глубине и лабораторные испытания по определению коэффициента температурного расширения мерзлых грунтов, модулей деформации и прочности на растяжение.

Помимо распределения температурных полей, приводящих к температурным деформациям морозобойное растрескивание, определяется еще и механическими свойствами мерзлых пород (Гречищев и др., 1984). Так как воздействие температурного поля можно рассматривать как статическое, то и рассматривать имеет смысл механические свойства пород, характеризующие сопротивление мерзлых грунтов статическим нагрузкам и определяющиеся зависимостью деформаций от напряжений, времени действия нагрузки и условиями прочности (Гречищев и др., 1980). Исследованиями механических свойств и их зависимости от различных факторов занимались такие ученые как С.С. Вялов, Н.А. Цытович, С.Э. Городецкий. Ими было выявлено, что зависимость деформаций и напряжений для мерзлых грунтов не линейна (1.1):

$$\varepsilon = [\sigma/E(\tau)]^m, (1.1)$$

где  $\varepsilon$  – относительная деформация,  $\sigma$  – напряжение,  $E(\tau)$  – переменный во времени модуль деформации,  $m$  – эмпирический показатель нелинейности. Для расчётов приближенно принимается  $m = 1$  и зависимость рассматривается как линейная. Зависимость  $E$  от времени выражается в его изменении от условно мгновенного значения  $E_0$  в момент времени  $\tau = 0$  до длительного  $E_\infty$  при  $\tau \rightarrow \infty$ , причем величина  $E_0$  может превышать  $E_\infty$  в несколько раз.

Так же была установлена эмпирическая зависимость модуля деформации, связывающего деформации и напряжения от температуры (Цытович, Сумгин, 1937):

$$E = E'(\beta_E t^k) \quad (1.2)$$

где  $\beta_E, E', k$  – эмпирические величины,  $t$  – абсолютное значение отрицательной температуры, °С, а также представлены различные виды зависимостей деформаций и напряжений (Вялов, Ржаницкий, Городецкий) при различных условиях протекания процесса (соотношения предела длительной прочности и нагрузки). Предел длительной прочности мерзлых грунтов по (Городецкий, 1969; Цытович, 1973) грунтов:

$$\sigma_\infty = \sigma'_\infty(1 + \beta_0 t)^k \quad (1.3)$$

где  $\sigma'_\infty, \beta_0, k$  – эмпирические характеристики.

Помимо деформационных свойств немаловажную роль играют прочностные свойства мерзлых грунтов, которые могут быть охарактеризованы экспериментально получаемой кривой зависимости времени до разрушения с величиной приложенного постоянного напряжения или кривой длительной прочности. При анализе условия начала криогенного растрескивания грунтов важное значение приобретает вопрос об их прочности при изменяющихся во времени нагрузках. В случае одноосного переменного во времени напряжения условие прочности может быть описано одним из следующих выражений, предложенных С.С. Вяловым (1.4), Ю.К. Зарецким (1.5) и С.Е. Гречищевым (1.6):

$$\int_0^{\tau^*} \exp[-\beta/\sigma(\tau)] d\tau = B, \quad (1.4)$$

$$\int_0^{\tau^*} \frac{\sigma(\tau) - \sigma_\infty}{\sigma_0 - \sigma(\tau)} d\tau = T, \quad (1.5)$$

$$\int_0^{\tau^*} [\sigma(\tau) - \sigma_\infty] k(\tau^* - \tau) d\tau = \sigma_0 - \sigma(\tau^*), \quad (1.6)$$

где  $\beta, B$  и  $T$  – эмпирические константы,  $k(\tau)$  – константа или эмпирическая возрастающая функция от времени,  $\tau^*$  – время до разрушения,  $\sigma_0$  – мгновенная прочность.

Так же, наряду с деформационными и прочностными характеристиками, для перехода к количественной оценке размера морозобойных трещин необходимо знать коэффициент вязкости разрушения  $K_{IC}$  – величину, характеризующую прочность в вершине трещины. Этот параметр имеет значение для решения вопросов прочности материалов. По результатам экспериментальных исследований в условиях релаксирующей нагрузки рост трещины происходит до определенной нагрузки, а потом прекращается. Это говорит о том, что коэффициент вязкости разрушения  $K_{IC}$  в мерзлых грунтах во времени изменяется от некоторого начального – условно мгновенного – значения  $K_{IC}^0$  до предельно длительного  $K_{IC}^\infty$ .

Во многом возможность криогенного растрескивания и размеры трещин определяются термореологическими свойствами грунтов в мерзлом состоянии. То есть важно иметь представление об изменении напряженно-деформированного состояния грунта под влиянием

изменения его температуры. Зависимость напряженно-деформированного состояния грунтов от температуры определяется зависимостью их механических свойств от температуры и объемными температурными деформациями.

Исследования, посвященные температурным деформациям, проводились такими авторами как А.Е. Федосова, И.Н. Вотяков, Гречищев, Шушерина, В.М. Левин. По данным экспериментов в диапазоне температур от минус 1 до минус 10°C значения коэффициента температурной деформации дисперсных пород на порядки превышает значения этого коэффициента у слагающих их минералов. Из чего можно сделать вывод, что процесс температурных деформаций и напряжений в мерзлых породах гораздо сложнее, чем в других материалах. Вероятно, это обусловлено сложным многокомпонентным строением мерзлых пород, физическими особенностями фазовых составляющих: минеральных частиц, льда и незамерзшей влаги, наличием фазовых переходов. Можно предположить, что температурные деформации определяют несколько разнонаправленных процессов: температурное расширение компонентов породы и непрерывные равновесные фазовые переходы лед – незамерзшая вода, с которыми связана деформация внутренних структур. Отдельно стоит обратить внимание на влияние наличия шлиров льда и льда, заполняющего поры. Температурные деформации и напряжения будут неодинаковы в направлениях параллельных и перпендикулярных шлирам льда и границе фазовых переходов, что впервые было отмечено В.П. Швецовым. Так же авторами был выявлен так называемый эффект последствия температурных деформаций, в соответствии с которым температурные деформации развиваются во времени до некоторого значения стабилизации с некоторым запозданием относительно температурных изменений, и во много этот эффект определяется температурой и влажностью грунта.

Исследования температурных напряжений в породах так же показали значительный эффект температурного последствия, вероятно связанный с медленным перераспределением незамерзшей влаги в породах: в песках напряжения в породе с понижением температуры возрастает, а при выходе температуры на стационарное значение начинает затухать; в суглинках же с понижением температуры напряжения сначала возрастают, что соответствует сжимающим напряжениям, а затем, после стабилизации температуры начинают развиваться растягивающие напряжения.

### **Специфика прогноза процессов деформирования пород под действием температурных напряжений**

Одним из первых, попытка количественно описать процесс криогенного растрескивания была предпринята Б.Н. Достоваловым (Достовалов, 1952, Кудрявцев, Достовалов, Кондратьева, Меламед, 1978). По его представлениям, криогенному растрескиванию подвергаются монолитные массивы мерзлых пород, в которых в результате колебаний температуры возникают

разрушающие напряжения в верхних слоях массива, когда температура грунтов в них ниже среднегодовой. В этой модели предполагается наличие у массива свободной вертикальной поверхности (берег реки, обрыв и т.д.), которая определяет направление распространения трещин. В данной модели изменение температуры по глубине задается по линейному закону, а в построенном решении стационарной задачи термоупругости от нуля отлична только компонента касательного напряжения.

Полученные в рамках этой теории достаточно простые формулы расчета расстояния от свободной поверхности  $x$  (1.7), на которой произойдет разрыв, приближенное значение глубины трещины  $\Delta z$  (1.8) и величины разрывающих напряжений  $\tau_b$  (1.9), имеют ряд недостатков и в большей степени дают скорее близкую к качественной оценку размера полигонов и глубины распространения трещин.

$$x = \frac{2\tau_b}{\alpha G \Delta t / \Delta z}, \quad (1.7)$$

$$\Delta z = \frac{G}{\tau_b} \cdot \frac{c}{2} = \frac{Ec}{4(1+\mu)\tau_b}, \quad (1.8)$$

$$\tau_b = \frac{1}{2} k \alpha G \frac{\Delta w}{\Delta z}, \quad (1.9)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $G$  – модуль сдвига,  $c$  – ,  $\mu$  – коэффициент Пуассона,  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения,  $k$  – коэффициент линейной усадки при усыхании,  $\Delta t$  – охлаждение,  $w$  – влажность ( $\Delta w / \Delta z$  – градиент влажности).

Последователем модели Достовалова можно считать Н.Н. Романовского. Но, по его мнению, температура, соответствующая минимальным напряжениям, вызывающим развитие трещин, определяется не среднегодовой температурой, а физико-механическими и теплофизическими свойствами пород. Более усовершенствованной моделью Б.Н. Достовалова можно считать модель, разработанную Ш.Ш. Гасановым. В данном случае, в отличие от Б.Н. Достовалова Гасанов связывает образование криогенных трещин с действием не касательных, а нормальных растягивающих напряжений. Данная модель не решает задачу термоупругости, а напряжения, действующие на поверхности массива, определяются с учетом только деформаций сдвига, что является значительным ограничением данной модели. Указанные упрощенные полуэмпирические соотношения, были получены при применении гипотезы упругого деформирования массива пород под действием температурной неоднородности, для естественных условий реализации процесса морозобойного растрескивания, когда породы проявляют пластические свойства. В работе И.А. Комарова (Комаров, Исаев, 2010), исследующего процесс при низких отрицательных температурах, характерных для верхних широт Марса, указывается, что гипотеза об образовании трещин в результате развития касательных (сдвиговых) напряжений, вполне правомочна. При наличии одновременного действия в массиве растягивающих и сжимающих напряжений в нем возникают местные

разрывы, обусловленные различного рода дефектами. Именно эти слабые места — зародыши будущих трещин разрыва и являются причиной возникновения опасных касательных напряжений, которые, таким образом, и надо рассматривать как основную причину разрыва. Это обуславливается тем, что, при низких отрицательных температурах величины мгновенной и длительной прочности на сдвиг в несколько раз меньше, чем аналогичные величины на разрыв. Следовательно, образование трещин можно приписать действию растягивающих напряжений, однако в таком объемно-напряженном состоянии массива наряду с растягивающими и сжимающими напряжениями действуют и критические касательные напряжения. Возникновение локальных разрывов за счет действия касательных сил приводит к их дальнейшему развитию, поскольку «залечивания» микротрещин не происходит из-за вырождения пластических свойств породы, которая в сильнейшей степени «охрупчена», и при совместном воздействии с нормальными напряжениями растяжения (разрыва) происходит образование макротрещин.

Для диапазона относительно высоких и средних отрицательных температур, более обоснованной моделью, можно считать модель, предложенную А. Лахенбрухом. В ней автор задает связь между напряжениями и деформациями в виде реологического уравнения общего вида. В рамках этой модели не решается задача для мерзлого грунта и предполагается, что деформации в горизонтальном направлении находятся в линейной зависимости от температуры. Автор рассматривает поле температурных напряжений в сплошном массиве мерзлого грунта, представленного в виде вязкоупругого полупространства. Изменение температуры на поверхности массива задается по гармоническому закону. Опираясь на известные решения механики для полуплоскости с одной или двумя краевыми трещинами и критерий распространения трещин по Ирвину, автор определяет условия развития трещин в мерзлой толще. По мнению С.Е. Гречищева трещинообразование вызывается короткопериодными температурными колебаниями большой амплитуды и должны понижать значения предела временной прочности мерзлых грунтов. Но этот подход так же не позволяет полноценно количественно оценить рост морозобойных трещин.

С.Е. Гречищевым была разработана феноменологическая модель, учитывающая зависимость коэффициента температурного расширения (сжатия) от температуры и эффект временного температурного последствия. По модели С.Е. Гречищева целесообразно разделить процесс трещинообразования на три этапа:

1. Этап возникновения температурных напряжений в ненарушенном массиве, до образования первой трещины;
2. Этап возникновения первой трещины и возникновения в ее окрестности зоны разгрузки при превышении напряжений в грунте предела прочности;

3. Дальнейшая динамика температурных напряжений после образования начальных полигонов и установления возможности их повторного растрескивания.

Разделение процесса трещинообразования позволяет на каждом отдельно взятом этапе расчета применять методы механики сплошной среды, поскольку каждый раз определяется поле напряжений в ненарушенной сплошной части массива (на первой стадии – в сплошном массиве – полупространстве, на втором и третьем этапе – в массиве с трещинами) (Гречищев и др., 1984).

Для количественного описания морозобойного трещинообразования можно использовать уравнения механики сплошных сред (более детальное описание данной модели дано в (Гречищев и др., 1980)). В общем случае это следующие уравнения:

1. Система уравнений совместности напряжений и деформаций. При малых деформациях допустимо использовать тождество Генки-Мизеса с учетом температурных деформаций:

$$\begin{cases} \varepsilon_i = \sigma_i \varepsilon_{cp} / \sigma_{cp} - (\Gamma / 2S - \varepsilon_{cp} / \sigma_{cp}) \sigma_{cp} + \delta(t) \\ \gamma_{ik} = 2\tau_{ik} \Gamma / 2S \end{cases}, (i, k = x, y, z), (1.10)$$

где  $\gamma_{ik}, \sigma_i, \varepsilon_i, \tau_{ik}$  – компоненты напряжений и деформаций,  $\Gamma$  и  $S$  – интенсивность деформаций и напряжение сдвига,  $\varepsilon_{cp}, \sigma_{cp}$  – средняя деформация и напряжение,  $\delta(t)$  – температурная деформация,  $t$  – абсолютное значение отрицательной температуры;

2. Уравнения состояния, описывающие связь между компонентами напряжений, деформаций и их скоростями, с учетом температурных деформаций по принципу Дюамеля-Неймана:

$$\varepsilon(\tau) = \frac{1}{E_0(\tau)} \left[ \sigma(\tau) + \int_0^\tau \sigma(\xi) K(\tau, \xi) d\xi \right] + 3\delta(t), (1.11)$$

где  $E_0$  – модуль деформации,  $\tau$  – время,  $\xi$  – момент времени,  $K$  – коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины;

3. Условия прочности мерзлых пород;

$$\sigma_0 - \sigma(\tau^*) = \frac{1}{\tau_p^1} \int_0^{\tau^*} [\sigma(\tau) - \sigma_\infty], (1.12)$$

где  $\sigma_0$  и  $\sigma_\infty$  – мгновенная и предельно длительная прочность,  $\tau_p^1$  – время релаксации,  $\tau^*$  – время до разрушения;

4. Уравнение теории трещин. В случае, когда к берегам трещины приложена нормальная нагрузка, то напряжения  $\sigma_y$  и перемещения  $v$  в окрестности конца трещины можно описать следующими выражениями:

$$\begin{cases} \sigma_y = -K / \sqrt{s_1} \\ v = \pm \frac{4(1-\nu^2)K}{E} \sqrt{s_2} \end{cases}, (1.13)$$

где  $s_1, s_2$  – малые расстояния вокруг окрестности трещины,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $E$  – модуль деформации.

Рассматривая теплоперенос в упруго деформируемом массиве можно рассмотреть несвязанные задачи (Комаров, 2003). При выводе уравнения теплопроводности работой внешних сил пренебрегают. В тоже время, при протекании геокриологических процессов теплоперенос, как правило, реализуется в условиях существования объемно-напряженного состояния массивов. Однако величины этих напряжений, как правило, относительно их существенного влияния на энергетику процессов, незначительны. Обычно при проведении тепловых расчетов не учитывают также деформацию массивов за счет объемного расширения. Строго говоря, это не совсем корректно, поскольку при деформировании выделяется или поглощается теплота, которая влияет на распределение температуры. В случаях, когда учет механических сил необходим, решается либо связанная задача, либо не связанная задача. Определенный учет воздействия механических сил может быть осуществлен путем введения перекрестных кинетических коэффициентов. Связанность совместного рассмотрения уравнений теплопереноса и механики во многом обуславливается соотношением скоростей релаксации полей температуры, полей напряжений и деформаций, когда инерционность полей температуры значительно ниже, чем полей напряжений, а, следовательно, и деформаций, то такую задачу часто рассматривают как несвязанную, а поля температуры относительно установившимися.

Рассмотрим вопрос о возникновении напряжений и деформаций в неоднородном температурном поле для случая несвязанной задачи. Тогда сначала автономно решается тепловая задача, а затем, в рамках определенной гипотезы о типе деформирования (термоупругость, термопластичность) по найденным профилям изменения температуры в пространстве и во времени, оцениваются величины деформаций и напряжений. Для наиболее простого случая, когда деформирование описывается в рамках линейной термоупругости, выделяется несколько случаев:

1. Если элементы массива одновременно и в одинаковой степени изменяют свою температуру, то возникающая в нем деформация (при отсутствии сопротивления) не вызывает появления напряжений. В этом случае деформации по трем осям координат равны

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \alpha(T - T_0), \quad (1.14)$$

где  $\alpha$  - коэффициент линейного расширения,  $T_0$  - исходная температура массива.

2. Если реализуется одноосное напряженное состояние, с учетом закона Гука, то:

$$\varepsilon - \alpha \Delta t = \sigma / E, \quad (1.15)$$

где  $E$  - модуль упругости (модуль Юнга),  $\varepsilon_{xx}$  - относительная одноосная деформация.

3. Для случая пространственно-напряженного состояния, описываемого обобщенным законом Гука. Связь между относительными деформациями (линейными  $\varepsilon_{xx}$ ,  $\varepsilon_{yy}$ ,  $\varepsilon_{zz}$ ) и напряжениями ( $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ ,  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_{yz}$ ,  $\sigma_{zx}$ ) определяется следующими выражениями:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} - \alpha \Delta t &= \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]; \varepsilon_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E} \sigma_{xy}, \\ \varepsilon_{yy} - \alpha \Delta t &= \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \mu(\sigma_z + \sigma_x)]; \varepsilon_{yz} = \frac{2(1+\mu)}{E} \sigma_{yz}, \\ \varepsilon_{zz} - \alpha \Delta t &= \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]; \varepsilon_{zx} = \frac{2(1+\mu)}{E} \sigma_{zx},\end{aligned}\quad (1.16)$$

где  $G = E / 2(1 + \mu)$  - модуль сдвига,  $\mu$  - коэффициент Пуассона,  $\mu(\sigma_y + \sigma_z) / E$  - "добавка" к величине относительной деформации по оси  $x$  за счет действия напряжений по осям  $y$  и  $z$ , а  $[\mu(\sigma_y + \sigma_z)/E]$  и  $[\mu(\sigma_x + \sigma_y)/E]$  соответственно по  $z$  и  $x$  и по  $x$  и  $y$ .

Зная зависимость  $\Delta t = f(x, y, z)$  по соотношению (1.16) можно оценить возникающие напряжения. Цытович и Тер-Мартirosян предложили использовать уравнения вышеприведенного типа для оценки напряжений в набухающих и усаживающихся породах. Используя температурно-влажностную аналогию, предполагается уподобить процесс набухания процессу температурного расширения. Тогда, вследствие неравномерного распределения влажности, в массиве возникнут напряжения, которые можно посчитать по уравнениям (1.16) заменяя слагаемое  $\alpha \Delta t$  на  $\beta \Delta W$ . Здесь  $\beta$  - коэффициент объемного расширения (усадки),  $\Delta W$  - приращение влажности по сравнению с исходным значением.

4. Для общего случая неравномерной температурной деформации напряжение и деформации связаны между собой следующими соотношениями термоупругости:

$$\sigma_{ij} = \gamma \omega \delta_{ij} + 2\nu \varepsilon_{ij} - (3\gamma + 2\nu) \alpha (T - T_0) \delta_{ij}, \quad (1.17)$$

где  $\gamma, \nu$  - постоянные Ламэ для изотермической деформации, причем

$$\nu = E / 2(1 + \mu); \quad \gamma = E\mu / (1 + \mu)(1 - 2\mu), \quad (1.18)$$

$\alpha = \alpha_m / 3$  - коэффициент линейного термического расширения;  $\delta_{ij}$  - символ Кронекера

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} 0, & i \neq j, \\ 1, & i = j, \end{cases} \quad (1.19)$$

$$\omega = (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}), \quad (1.20)$$

$\omega$  - объемное расширение, при этом  $\sigma_{ij} = d\omega / d\varepsilon_{ij}$ , а величины  $\sigma_{ij}$  ( $i, j = x, y, z$ ) и  $\varepsilon_{ij}$  - компоненты тензора напряжений и деформаций.

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}, \quad (1.21)$$

В случае, когда скорости изменения деформации и температуры одного порядка возникает необходимость рассматривать задачу как связанную, учитывая в уравнении теплопроводности дополнительный поток тепла, связанный с деформацией. Когда деформации и перепады

температур относительно малы,  $[(T-T_0)/T] \ll 1$ , то связанное уравнение теплопроводности можно записать в виде (Комаров, 2003):

$$C_p \frac{\partial t}{\partial \tau} + (3\gamma + 2\nu) \alpha_m t \omega(x, y, z, \tau) = \lambda \nabla^2 t + f(x, y, z, \tau), \quad (1.22)$$

В отличие от обычного вида уравнения теплопроводности, это уравнение содержит слагаемое, связывающее приращение температуры со скоростью изменения объема деформируемого тела  $\omega$ . Преобразуя уравнение (1.22) для случая отсутствия источников (стоков) тепла, можно записать, что:

$$C_p \frac{\partial t}{\partial \tau} \left[ 1 + \delta_o \left( \frac{\gamma + 2\nu}{3\gamma + 2\nu} \right) \left( \frac{\omega}{\alpha_m t} \right) \right] = \lambda \nabla^2 t, \quad (1.23)$$

Здесь  $\delta_o = (3\gamma + 2\nu)^2 \alpha_m^2 T_0 / \rho C_p V_e^2$  - безразмерный параметр;  $V = [(\gamma + 2\nu) / \rho]^{1/2}$  - скорость распространения волн расширения в упругой среде;  $C_p$  - объемная теплоемкость.

Анализ уравнения (1.23) показывает, что выражение в квадратных скобках левой части уравнения будет близко к единице в случае, когда величина  $\delta_o$  параметра, отражающего влияние связанности, будет много меньше единицы  $\delta_o \ll 1$ . Естественно, что скорости изменения деформации  $(\partial W / \partial \tau)$  и температуры  $(\partial t / \partial \tau)$ , соотношение которых также определяет необходимость учета связанности, имеют в этом случае значения одного порядка. Это условие предполагает, что изменение деформаций во времени происходит непосредственно вслед за изменением температуры. Уравнения, описывающие связанную задачу линейной термоупругости в векторной форме, имеют вид:

$$\begin{cases} \nu \nabla U + (\gamma + \nu) \text{grad}(\text{div} \bar{U}) - (3\gamma + 2\nu) \alpha_m \text{grad}(t) = \rho \bar{U}, \\ \frac{\partial t}{\partial \tau} + (3\gamma + 2\nu) \left( \frac{\alpha_m}{C_p} \right) t_o \text{div} \bar{U} = a \nabla^2 t, \end{cases} \quad (1.24)$$

где  $\omega = \text{div} U$ ,  $U$  - вектор перемещения, возникающего вследствие деформирования.

Из первого уравнения системы (1.24) может быть определена деформация (перемещение) при произвольно заданной температуре, а затем подстановка во второе уравнение полученного выражения для  $\text{div} U$  позволяет определить распределение температуры. Для мерзлых пород абсолютные величины и скорость изменения температуры контролируются изменением фазового состава и поэтому оценки с помощью соотношений (1.24) возможны для диапазона относительно низких отрицательных температур, где фазовые переходы практически отсутствуют.

### 1.3. Возникновение трещин, связанных с интенсивными гидромеханическими воздействиями

Основная сложность описания развития трещин при гидроразрыве заключается в том, что это сложный процесс с множеством параметров и эффектов, которые взаимосвязаны между собой. Можно выделить нескольких определяющих процесс факторов: деформирование и разрушение горной породы под действием внутреннего давления в трещине, течение жидкости и перемещение проппанта в трещинах гидроразрыва (Рисунок 1.3).

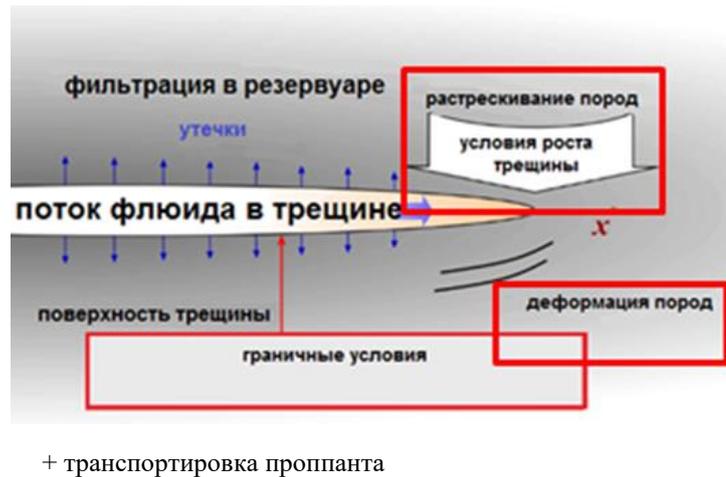


Рисунок 1.3 Схематичное представление основных физических процессов трещины гидроразрыва

Для относительно простых условий, проблема решается с удовлетворительной точностью. Простыми в данном случае можно назвать условия, когда нет больших неоднородностей среды, включений и трещин, структура породы имеет достаточно регулярное строение так, что на масштабе трещины может быть представлена однородной, а поведение среды близко к упругому. Кроме того, необходимо, чтобы начальное напряженное состояние было однородным, а вокруг трещины напряженное состояние приближенно описывается в рамках теории трещин.

Обычно предполагается, что трещина растет перпендикулярно направлению минимального сжимающего напряжения. Однако, такое предположение справедливо только при определенных условиях, приблизительно соответствующих однородным резервуарам. В этом случае важнейшими управляющими факторами, а соответственно, и задачами исследований являются транспорт проппанта внутри трещины и утечки жидкости через проницаемые стенки, т.к. эти факторы определяют раскрытие трещины. Сама геометрия трещины, направление ее роста может быть описано в рамках моделей линейной или квазилинейной механики трещин. Проблема может осложняться, если меняется ориентация и величина главных напряжений. Направление развития такой трещины определяется напряженным состоянием, действующим вокруг вершины (Рисунок 1.4, Рисунок 1.5). Напряженное состояние меняется по мере удаления

от стенок скважины или перфорации, что приводит к изменению геометрии трещины на начальных этапах. В конечном итоге трещина вытягивается поперек наименьшего сжатия, т.е. в направлении максимальных главных напряжений.

Направление и характер развития трещины может меняться не только при изменении напряженного состояния, но и из-за неоднородной структуры среды. Трещина может отклоняться или даже останавливаться вследствие взаимодействия с другими поверхностями, разломами и включениями с другими механическими свойствами, что в значительной степени зависит от масштабов неоднородности или трещиноватости в среде. Вследствие активизации природных трещин также может наступить разрушение скважины. Несмотря на активное изучение проблемы взаимодействия трещины гидроразрыва с природными разломами на протяжении последних 30-ти лет, современные средства проектирования трещин по-прежнему неспособны точно предсказывать реальную траекторию трещины гидроразрыва для заданных параметров закачки жидкости и свойств резервуара. Проблема взаимодействия трещин очень сложна и содержит много параметров, полное исследование их влияния на поведение трещины к настоящему времени еще не сделано.

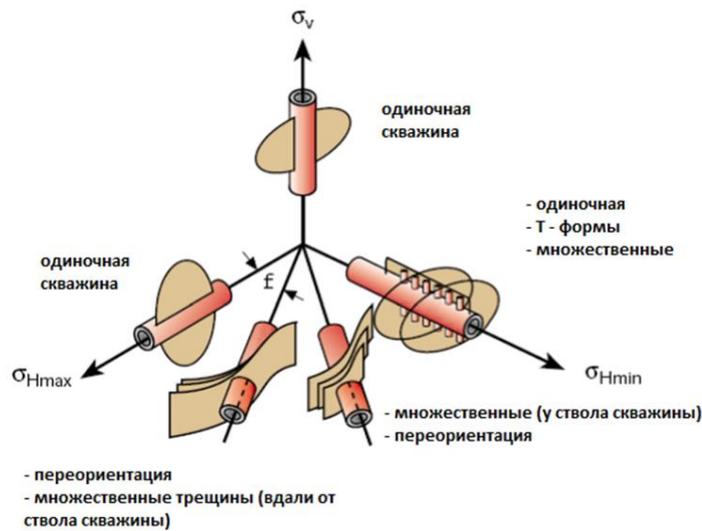


Рисунок 1.4 Возможная конфигурация трещин гидроразрыва в зависимости от ориентации скважины и главных напряжений (Leem J., Reyna J., 2014)

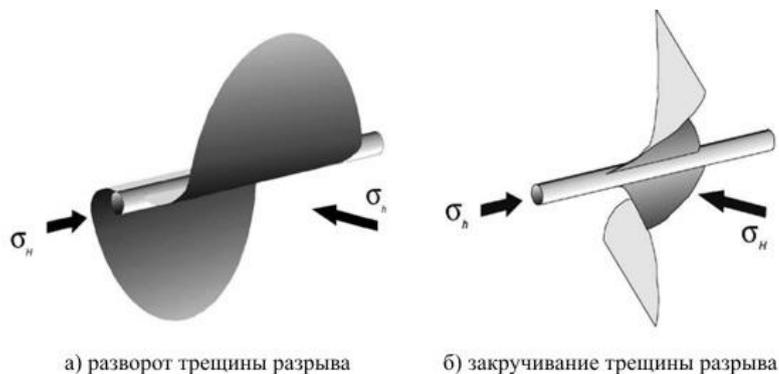


Рисунок 1.5 Разворот плоскости трещины в зависимости от ориентации главных напряжений (Rahman, 2002)

Разрушение среды происходит по двум механизмам: отрыв и сдвиг. Реализация того или иного механизма для трещины гидроразрыва определяется напряженным состоянием и структурой среды. Наиболее простым механизмом, который обычно рассматривается в решении задач гидроразрыва и оценке требуемых условий является отрыв. Трещины отрыва развиваются под действием растягивающих напряжений, которые возникают в вершине вследствие раскрытия-расклинивания трещины закачиваемым флюидом. Очевидно, что раскрытие трещины осуществляется в направлении минимального сжатия, что определяет направление роста трещин. Такие трещины вытягиваются в направлении максимального сжатия – поперек минимальному. Для описания роста трещин широко используются теории трещин, в основе которых лежит решение Снедона. В качестве критерия могут быть использованы силовые критерии напряжений, которые означают достижения напряжений в вершине (на фиксированном расстоянии) трещины предельного уровня растягивающих напряжений или  $K_c$  критерии. Для упругой среды этот критерий можно переписать в терминах деформации, что для упругой среды эквивалентно вводу линейной связи между напряжениями и деформациями.

Существует ряд теорий и критериев, базирующихся на гипотезах о зонах сцепления и пластичности, в которых задается определенный характер распределения напряжений. Но данные гипотезы и критерии необходимы при построении аналитических решений и оценок. При численном моделировании нет необходимости введения дополнительных гипотез, т.к. рассчитываются непосредственно напряжения на определенном расстоянии от вершины. Эти напряжения могут быть использованы для принятия решения о состоянии среды вокруг трещины и возможности ее дальнейшего роста.

Раскрытие трещины определяется балансом поступающего флюида и его утечек сквозь проницаемые стенки трещины, а также прочностью породы. Как правило, прочность пород на отрыв мала даже при условии, что среда не содержит трещин и однородна. Однако чаще всего это не так, среда содержит множество ориентированных и хаотически расположенных трещин разного масштаба, от микрометров до разломных простирающихся на сотни метров. Кроме того, порода может содержать включения с другими механическими характеристиками, пластичными и вязкими. Все это может привести к формированию зоны неупругих деформаций и затуплению вершины трещины. В отдельных случаях для продолжения прямолинейного роста требуется более высокое давление в трещине, в других случаях возможно ветвление трещины и/или смена механизма роста на сдвиговой, а в некоторых случаях возможно полная остановка трещины. В этих случаях упругие решения линейной теории трещин перестают работать. Необходимо принимать во внимание пластическую деформацию. Все это осложняется неоднородной структурой породы. Наличие трещин разного масштаба в породе также могут привести к изменению направления, ее ветвлению и изменению механизма роста на сдвиговой.

В напряженной среде рост трещин сдвига, тем более в уже трещиноватой среде может происходить без ее раскрытия. Достаточно понизить трение на берегах трещины чтобы вызвать проскальзывание. Снижение трения на поверхностях имеющих трещин может быть вызвано как изменением сжимающих напряжений окружающей среды, так и поступлением флюида внутрь трещины, без заметного ее раскрытия. Рост таких трещин чаще всего не приведет к изменению проницаемости среды. В этом случае направление роста трещин может не совпадать с направлением наибольшего сжатия.

С механической точки зрения гидроразрыв пласта представляет собой развитие трещины в неоднородной упругой, упруго-пластичной или пороупругой, поро-упругопластичной среде под действием давления, создаваемого вязкой жидкостью, закачиваемой через скважину. Задача нахождения зависимости параметров трещины гидроразрыва от времени по известным свойствам пласта, жидкости разрыва и расписанию закачки, называется задачей дизайна трещины гидроразрыва, или просто задачей гидроразрыва. В общем случае для решения задачи гидроразрыва необходимо привлечение аппарата механики жидкости и газа для описания многофазного течения жидкости разрыва с расклинивающим реагентом (проппантом) внутри трещины и утечек из нее, механики деформируемого трещиновато-пористого тела для описания напряженно-деформированного состояния породы и раскрытия трещины под действием давления жидкости, механики разрушения и теории пластичности для описания процессов деформации и разрушения породы, роста трещины. В некоторых случаях необходим также учет термодинамики для описания обмена теплом между жидкостью разрыва и окружающей породой и выделения тепла в результате разрушения породы. Построение таких термодинамически согласованных моделей является одной из основных проблем при описании гидроразрыва пласта.

Важнейшей проблемой при моделировании гидроразрыва является сложность получения точных данных о породе, ее механических свойствах, внешних условиях, расположении имеющихся в ней трещин и разломов. Проблема усложняется тем, что среда может быть существенно неоднородной и усредненные свойства могут меняться на расстояниях меньших размера трещины. Меняться может также и напряженное состояние, причем не только за счет наличия скважины и уже имеющейся трещины, но и за счет неоднородности окружающего пространства.

Зачастую анализ распространения трещины гидроразрыва на основе механической модели, построенной при минимальных предположениях и позволяющей учитывать большое количество специальных случаев, сопряжен со сложными вычислениями и требует наличия специалиста для получения и интерпретации результатов. Такие модели давно используются в некоторых симуляторах дизайна трещин (Fan, Economides, 1995), (Lam и др., 1986), (Dean,

Schmidt, 2008); (Ji и др., 2009), но их область применения – исследование сложных процессов, возникающих, например, в начале роста трещины гидроразрыва, или моделировании самосогласованных процессов в системе трещина-резервуар с учетом определяемых историей разработки нелинейных утечек и сложной реологии горной породы. Математическое моделирование с использованием таких моделей может привести не к повышению точности предсказания результатов операции, а лишь к неоправданной трате времени, если получение качественных данных и их интерпретация невозможны. Кроме того, из-за большой вычислительной сложности, решение задачи гидроразрыва в полной трехмерной постановке для оценки эффективности предстоящей операции гидроразрыва невозможно проводить прямо на месторождении.

Учитывая, что имеющиеся данные о свойствах среды и напряженном состоянии в пласте чаще всего имеют высокую погрешность и не полностью соответствуют природным, получение точных решений для реальной трещины невозможно. Тем более, что любые решения получают в рамках некоторых моделей и идеализаций. Более важным является определение важнейших факторов, влияющих на развитие трещины, а также определение характерных особенностей роста. Очевидно, что эти факторы и особенности связаны со свойствами конкретной среды и конкретными условиями.

Одним из важнейших вопросов гидроразрыва является предсказание и управление направлением роста трещины. Расчет траектории роста трещины гидроразрыва является серьезной проблемой в гетерогенных резервуарах, которые характеризуются неоднородным строением и сложным напряженным состоянием. Границы разделов наслоений, а также включения могут останавливать или изменять направление трещины, (Cook и др., 1964; Keer, Chen, 1981; Blanton, 1982; Lam, Cleary, 1984; Renshaw, Pollard, 1995; He, Hutchinson, 1989; Potluri и др., 2005). Геологические естественные разрывы, такие как природные стык или разломы также могут влиять на распространение трещины гидроразрыва (Beugelsdijk и др., 2000; Cooke и Underwood, 2001; Jeffrey и др., 1987). Большинство сланцевых формаций характеризуются большим количеством естественных разрывов (Gale и др., 2007). Поэтому, путь распространения трещины может быть весьма сложным и неоднозначным (Warpinski, Teufel, 1987; Thiercelin, 2009). Однако, при определенных условиях трещины могут распространяться лишь с незначительными отклонениями, сохраняя первоначальное направление даже пересекая многочисленные предсуществующие разрывы (Zhang, Jeffrey, 2008; Jeffrey и др., 2009). В значительной степени это определяется влиянием границ на напряженное состояние, которое формируется вблизи носика трещины, а также прочностными свойствами разрывов. Выделяют четыре различных типа взаимодействия распространяющейся трещины с имеющимися нарушениями (Cooke, Underwood, 2001), (Thiercelin и др., 1987): трещины гидроразрыва могут

пересекать сильно связанные заранее существующие трещины без изменения направления; трещина гидроразрыва может быть заперта или остановлена природной трещиной с низким сопротивлением сдвигу; трещина гидроразрыва может отклониться в сторону заранее существующих трещин и распространяться вдоль них; ветвление или продолжение роста из имеющихся повреждений, образуя ступенчатую конфигурацию. Таким образом, в зависимости от параметров трещины, давления жидкости на ее стенки, свойств породы, ориентации и параметров естественных разломов искусственная трещина может объединиться с естественными дефектами породы, поменять свое направление или остановиться (Рисунки 1.6, 1.7)



Рисунок 1.6 Возможные сценарии поведения трещины гидроразрыва после достижения ею природного разлома.

Проблема отклонения трещины гидроразрыва от своего первоначального направления при взаимодействии с естественными трещинами или разломами интенсивно изучалась как в лабораторных, так и в полевых условиях (Blanton, 1982), (Renshaw, Pollard, 1995), (Warpinski, Teufel, 1987), (Beugelsdijk и др., 2000), (Zhou и др., 2008); (Chalivendra, Rosakis, 2008), так и численно (Thiercelin и др., 1987), [He, Hutchinson, 1989), (Zhang, Jeffrey, 2006), (Zhang и др., 2007a, 2007b, 2008), (Thiercelin, Makhayu, 2007), (Акулич, Звягин, 2008ab), (Chuprakov и др., 2011). Существует также несколько аналитических приближений для описания условий пересечения трещиной разрывов, полученные при различных упрощениях (Blanton, 1986), (Renshaw, Pollard, 1995), (Warpinski, Teufel, 1987), (Potluri и др., 2005). 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.



Рисунок 1.7 Варианты взаимодействия трещины ГПП с естественными разломами (Morgan W.E., 2014).

Ряд лабораторных и полевых исследований (Anderson, 1981), (Teufel, 1984), (Warpinski, Teufel, 1987), (Daneshy, 2003), (Jeffrey и др., 1992) показал ветвление траектории и развитие неплоской геометрии трещины. Потенциальные образцы трещин, для которых рассматривается пересечение с уже существующей трещиной, сложны и многообразны как в плане геометрии, так и напряжений на бесконечности (Cooke, Underwood, 2001), (Thiercelin и др., 1987), (Wu и др., 2004). Существующие нарушения вызывают перераспределение полей напряжений. Кроме того, нарушения могут трансформироваться во вторичные трещины гидроразрыва, если в них проникнет жидкость гидроразрыва. Рост таких нарушений в сформировавшуюся трещину гидроразрыва происходит сначала за счет сдвиговых смещений, а затем за счет нагнетания в него давления. Исследования обнажений пород показали, что вторичные нарушения могут существовать на природных трещинах или вдоль плоскостей наслоений (Underwood и др., 2003).

Был представлен ряд экспериментальных, теоретических и численных подходов для количественного описания взаимодействия между трещиной гидроразрыва и другими разрывами. В работе (Renshaw, Pollard, 1995) был выдвинут критерий для проникания или остановки трещины при наличии ортогональной поверхности разрыва с трением на основе упругих решений для трещины и силы трения сдвига на заранее существующей трещине. Задача о течении жидкости в трещине гидроразрыва и эффект скольжения вдоль разлома не рассматривалась. В работе (Blanton, 1982) было предложено разделить заранее существующую трещину на открытую, скользящую с трением и закрытую части, чтобы объяснить ограниченную силу сдвига и проникновение жидкости в природную трещину. Однако, эти критерии основаны на решениях линейно-упругой механики трещин без рассмотрения взаимодействия трещин, и вопрос о соответствующих критериях по-прежнему открыт. Эффект скольжения вдоль существующей трещины во время взаимодействия был изучен теоретически в работах (Weertman, 1980), (Blanton, 1982), (Keer L., Chen, 1981), (Lam, Cleary, 1984), (Cooke, Underwood, 2001) на основе теории упругости. В (Lam, Cleary, 1984) была рассмотрена гипотеза, что повторное возникновение трещины на уже существующей трещине зависит от размеров, имеющих на ней повреждений.

Численное исследование на тему отклоненных или ветвящихся трещин гидроразрыва было проведено в (Jeffrey и др., 1987), где было обнаружено, что для распространения субпараллельной ветвящейся трещины необходимо увеличить давление разработки. Рост давления разработки является неотъемлемой чертой, в частности, проблемы взаимодействия трещин гидроразрыва с природными трещинами (Medlin, Fitch, 1983). Когда трещина гидроразрыва приближается к уже существующей трещине, расстояние между ними имеет величину порядка размера зоны процесса, и для исследования этого этапа взаимодействия необходим нелинейный анализ. Такой анализ для трещины, пересекающей разлом с трением или разлом, разделяющий два материала, был проведен в (Thiercelin и др., 1987). Важно заметить, что процесс пересечения трещины гидроразрыва является задачей, объединяющей течение жидкости и распространение трещины, но большинство первых численных результатов были получены в предположении, что трещина находится под равномерным давлением или механически вызвана внешними нагрузками и распределением описанного заранее сдвигового напряжения вдоль трещин с трением (Weertman, 1980), (Keer, Chen, 1981), (Lam, Cleary, 1984), и что эти трещины остаются закрытыми. Недавно вопрос возникновения скольжения вдоль природной трещины был рассмотрен снова (Lecampion, Zhang, 2005), а также было проведено экспериментальное и численное исследование воздействия скоростей закачки жидкости на траектории трещин (de Pater, Beugelsdijk, 2005). В работе (Zhang и др., 2005) рассмотрена способность заранее существующих трещин притуплять трещины гидроразрыва или изменять их направление. Моделирование было осуществлено путем решения объединенной гидроупругой задачи путем суперпозиции решений сингулярных дислокационных диполей.

В работе (Thiercelin, Makkhyu, 2007) была разработана полуаналитическую модель, основанная на теории дислокаций, которая была использована для предсказания параметров активизации природного разлома вследствие приближения к нему трещины гидроразрыва. В частности, модель позволяет провести анализ поля напряжений вдоль разлома, чтобы определить наиболее вероятное место вторичного возникновения трещины гидроразрыва. Показано влияние угла трения разлома и его ориентации, а также давления в трещине гидроразрыва. Также показано, что в отсутствии сцепления разлома трещина гидроразрыва в большинстве случаев не может пересечь разлом без отклонения. Разработанная модель предсказывает положение и размеры зон раскрытия и скольжения разлома как функции свойств разлома и его угла наклона, напряжений на бесконечности и характеристик приближающейся трещины гидроразрыва. В работе не учитывается обратное влияние разлома на трещину гидроразрыва и «история» скольжения вдоль разлома; профиль давления жидкости в трещине не вычисляется, а задается.

В работе (Lecampion, Zhang, 2005) были исследованы ключевые параметры, влияющие на начало взаимодействия между природным разломом и приближающейся трещиной

гидроразрыва для случая непроницаемой среды. Момент возникновения взаимодействия определялся как момент, когда на природной трещине происходит первый необратимый сдвиг (т. е. пластическая деформация), который моделируется с помощью критерия типа Кулона. Иногда необратимый сдвиг на разломе не происходит, и тогда считается, что взаимодействие начинается, когда трещина гидроразрыва касается разлома, так что жидкость гидроразрыва может затекать в разлом. В работе представлены результаты для случаев, когда трещина гидроразрыва распространяется в двух предельных режимах: режиме, определяемом трещиностойкостью породы и режиме, определяемом вязкостью жидкости. Пока критерий не выполнен, трещина не чувствует присутствия разлома, и ее распространение моделируется по (Detournay, 2004): поведение трещины в гомогенной непроницаемой среде определяется вязкостью жидкости (ньютоновская реология), модулем Юнга для плоской деформации, трещиностойкостью породы и начальным напряжением; расход жидкости постоянен; задача решается в отсутствие отставания жидкости от края трещины. Чтобы узнать, началось ли взаимодействие (выполнен ли критерий), необходимо вычислить общее напряжение в любой точке природной трещины. Для режима доминирования трещиностойкости давление в трещине считается постоянным, и напряжение в среде известно из аналитического решения (Sneddon, 1946). Для случая доминирования вязкости трещиностойкость считается равной нулю.

## Модели трещин

### Аналитические модели

Основными аналитическими моделями, используемыми при решении задачи гидроразрыва, являются модель KGD (Geertsma, De Klerk, 1969; Khristianovic, Zheltov, 1955), и модель PKN (Nordgren, 1972; Perkins, Kern, 1961) (Рисунок 1.8).

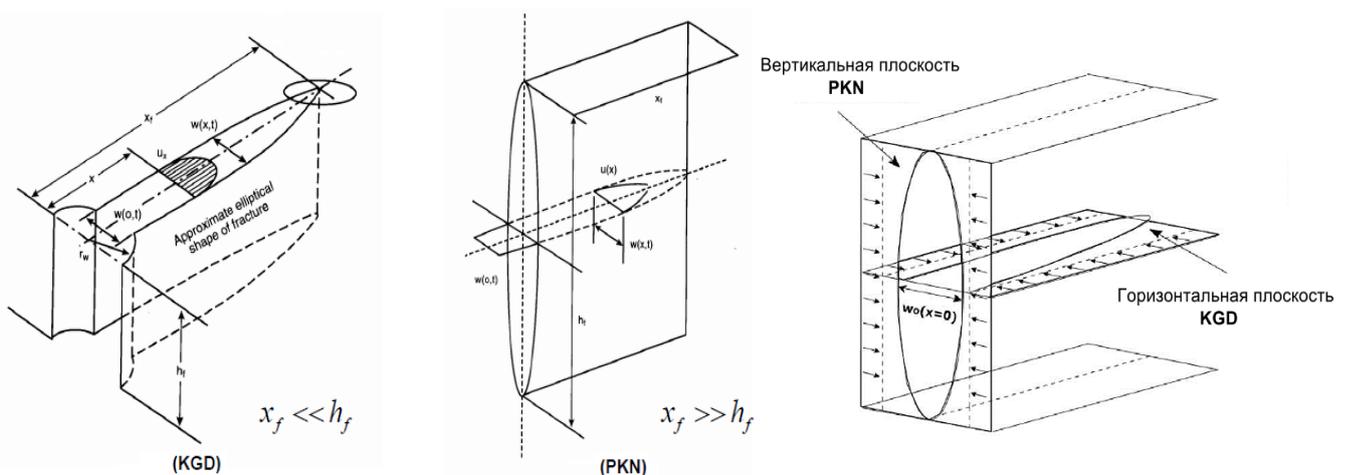


Рисунок 1.8 Аналитические модели трещин гидроразрыва в приближении плоской деформации (KGD-модель) и в рамках гипотезы плоских сечений (PKN-модель).

Обе модели применимы только к полностью запертой трещине. В обоих случаях предполагается, что трещина плоская (т.е. что она распространяется в определенном

направлении, перпендикулярном минимальному напряжению). Также предполагается, что течение жидкости одномерно вдоль ее длины. В описанных моделях рассматривался случай ньютоновской жидкости (РКН допускает также решение и для жидкостей со степенной реологией), поведение утечки определяется простым выражением, выведенным из однофазной одномерной теории фильтрации (Carter, 1957). Порода, в которой распространяется трещина, полагается непрерывным, гомогенным, изотропным линейно упругим твердым телом. Различаются модели в одном главном предположении — в способе, которым они сводят трехмерную задачу механики трещин и твердого тела к двумерной, т. е. плоско-деформированной. В KGD сделано предположение о плоской деформации в горизонтальном направлении: все горизонтальные поперечные сечения действуют независимо друг от друга и все они идентичны, что эквивалентно предположению, что ширина трещины меняется много медленнее в вертикальной плоскости, чем в горизонтальной. На практике это верно, если высота трещины много больше ее длины, или если на границах нефтеносного слоя имеет место полный сдвиг. В РКН в свою очередь сделано предположение, что каждое вертикальное сечение действует независимо, что эквивалентно предположению, что давление в каждом сечении определяется в большей степени высотой сечения, чем длиной трещины. Это верно, если длина трещины много больше ее высоты. Это различие - одно из главных предположений моделей, которое ведет к двум различным путям решения задачи и может давать различные оценки геометрии трещины. В случае РКН-модели механика трещин и эффекты в крае трещины не рассматриваются; внимание фокусируется на течении жидкости в трещине и соответствующих градиентах давления. В KGD-модели, наоборот, окрестность края трещины играет гораздо более важную роль, а градиенты давления в трещине могут быть найдены приближенно. В основе данных моделей лежит решение Снеддона о линейной трещине поддерживаемой внутренним давлением в условиях плоской деформации.

### ***Псевдотрехмерные модели ГРП***

Ограничения простых моделей, описанных выше, заключаются в том, что они требуют от инженера определить высоту трещины или предположить, что будет развиваться радиальная трещина. Однако на основе наблюдений разреза буровой скважины и других данных не всегда очевидно, где трещина будет заперта и будет ли она заперта вообще. Также высота трещины обычно меняется от скважины (где давление максимально) к краю трещины. Эти ограничения могут быть сняты путем введения трехмерных, псевдотрехмерных и плоских трехмерных моделей.

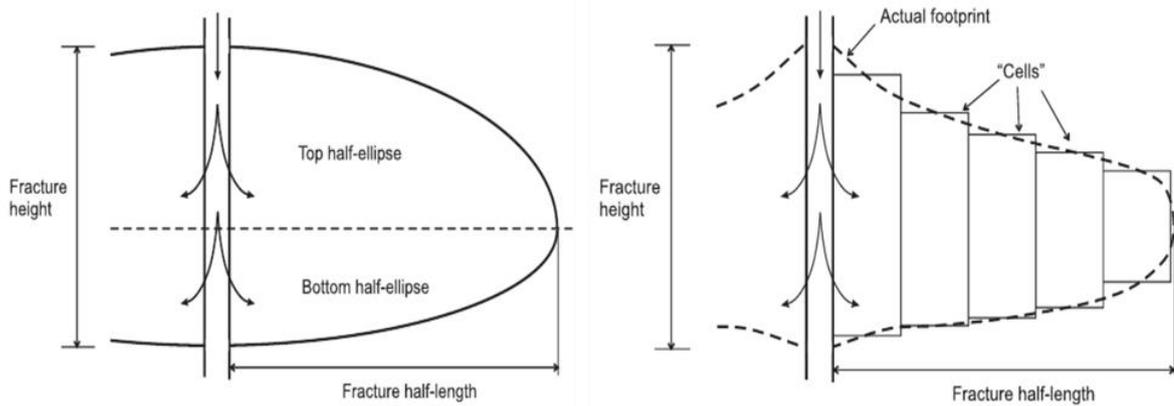


Рисунок 1.9 Схематическое представление псевдотрехмерного представления геометрии трещины: «лампообразная» (слева) и ячеистая (справа) (Adachi, Siebrits, Peirce, Desroches, 2007)

Плоские трехмерные и псевдотрехмерные модели были исторически инициированы в 80-е годы прошлого века как попытка учесть важные пространственные эффекты развития трещин гидроразрыва в неоднородных средах за счет приемлемых по тем временам вычислительных затрат.

Псевдотрехмерные модели пытаются учесть важные черты трехмерных моделей и при этом избежать вычислительной сложности. Две главные модели, упоминаемые здесь, это «лампообразная» и «ячеистая». В «лампообразных» (или эллиптических) моделях предполагается, что вертикальный профиль трещины состоит из двух полу-эллипсов, соединенных в центре, как показано на рисунке 1.9, а горизонтальная длина и ширина вертикального конца скважины рассчитываются на каждом шаге по времени, и предполагаемая форма трещины подбирается на основе этих результатов. Эти модели предполагают, что течение жидкости происходит вдоль линий потока от перфораций к ребру эллипса и что линии потока имеют особую форму, выведенную из простых аналитических решений. «Ячеистые» модели рассматривают трещину как ряд связанных ячеек (Рисунок 1.9 б). Они не предполагают форму трещины заранее, но в общем случае предполагают наличие плоской деформации (каждая ячейка действует независимо) и не связывают окончательно расчет течения жидкости в вертикальном направлении с вычислением геометрии трещины. Примером псевдотрехмерного (ячеистого) моделирования могут быть работы (Eekelen, 1982; Гордеев, 1995), в которых вертикальная трещина разрыва распространялась в нескольких слоях, отличающихся величинами упругих модулей, трещиностойкостью и величиной горного давления. Данные модели являются гибридами моделей PKN и KGD, поскольку горизонтальный рост трещины описывается в рамках PKN, а вертикальный рост в каждом вертикальном сечении на основании KGD. В работе (Advani, Lee, Lee, 1990) геометрическая модель трещины PKN была использована одновременно с рассмотрением двумерного течения жидкости, такая модель, по сути, является промежуточной

между плоскими трехмерными и псевдотрехмерными моделями. Таким образом, с помощью таких моделей делаются попытки учесть ширину и раскрытие трещины, изменения давления вдоль трещины и транспорт проппанта в зависимости от геометрии трещины.

Плоские трехмерные модели основаны на предположении, что трещина плоская и ориентирована перпендикулярно минимальному напряжению на бесконечности. В таких моделях не делается никаких попыток объяснить процессы, вызывающие отклонение трещины от такого плоского поведения. Основанные на этих моделях методы расчета вычислительно требовательны и обычно не используются для повседневных разработок, поскольку, даже при предположении плоского развития трещины, на каждом шаге по времени необходимо решать до нескольких раз трехмерную задачу теории упругости или пороупругости используя либо подвижные треугольную дискретизацию (Ben Naceur, Thiercelin, Touboul, 1990; Clifton, Abou-Sayed, 1981; Clifton, Wang, 1991; Vandamme, Curran, 1989); либо неподвижную прямоугольную (Siebrits, Peirce, 2002), что сопряжено с большими вычислительными затратами, если необходимо учитывать утечки жидкости разрыва в пласт. Раздел написан по материалам статьи (Стефанов Ю.П., 2002, 2010).

## Глава 2. Геокриологические условия Южно-Тамбейского нефтегазоконденсатного месторождения

Рассматриваемые территории расположены в Ямальском районе Ямало-Ненецкого автономного округа Тюменской области Российской Федерации. В физико-географическом отношении участок исследований находится на севере Западно-Сибирской низменности, за Полярным кругом, в северо-восточной части полуострова Ямал и расположен на левобережье Обской губы бассейна Карского моря (Рисунок 2.1).

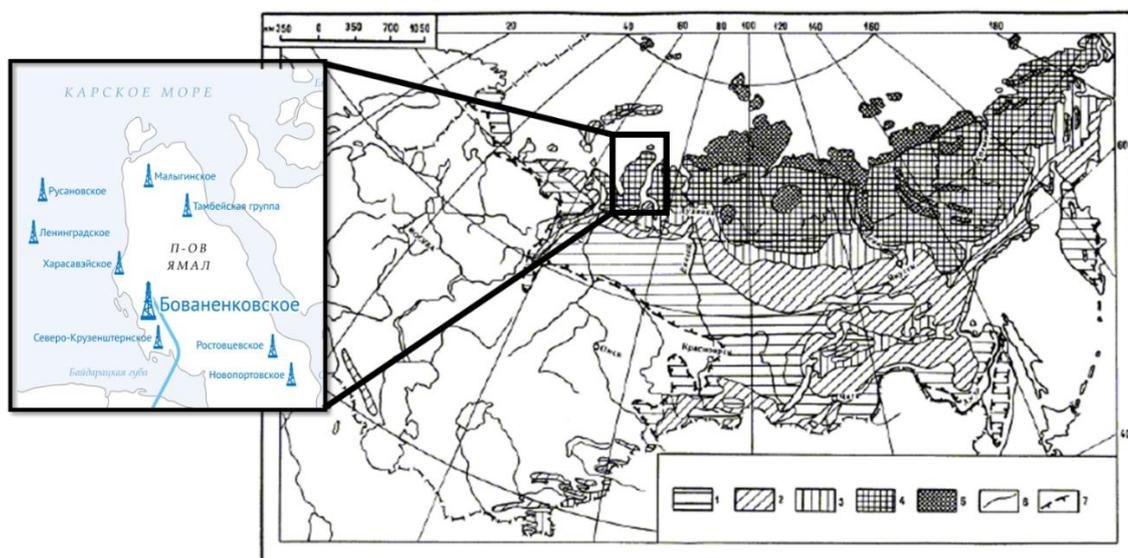


Рисунок 2.1 Схема местоположения района (составленная на основании карты распространения ММП К.А. Кодратьева, 1976), 1-зона редкоостровного и массивно-островного распространения ММП со среднегодовыми температурами( $t_{cp}$ ) от 3 до минус 1°С и мощностью мёрзлой толщи (М) от 0 до 100 м; 2-5-зона сплошного распространения ММП: 2 -  $t_{cp}$  от минус 1 до минус 3, М от 50 до 300 м; 3 -  $t_{cp}$  от минус 5 до минус 9°С, М от 200 до 600 м; 5 -  $t_{cp}$  от ниже минус 9°С, М от 400 до 900 м и более; 6 - граница зон ММП; 7 южная граница криолитозоны.

### 2.1. Орография

Район исследований представляет собой равнинную, заболоченную и заозёрную тундру, покрытую моховой растительностью, плоскую, в разной степени расчлененную речной и овражной сетью аккумулятивную низменную равнину. Рельеф спокойный, без выраженного уклона. Наиболее низкие высотные отметки характерны для лайд и пойм рек (до 3-6 м). Лайды прослеживаются вдоль всего побережья. В их тыловой части более высокие элементы рельефа представлены склонами и останцами лагунно-морских террас голоцен-плейстоценового возраста (Ершов, 1989) с высотными отметками до 12 м (I терраса), до 20 м (II) и до 30-33 м (III терраса). В западном направлении, господствующим элементом рельефа является казанцевская прибрежно-морская равнина, высотные отметки которой находятся в пределах 49-65 м.

Климат рассматриваемого района определяется его географическим положением в Западной Арктике на северной широте  $71^{\circ}$ - $73^{\circ}$ , возле холодного ледовитого Карского моря, в зоне влияния Северного Ледовитого океана, Северной Атлантики и материка. Рассматриваемый район подвержен частому воздействию меридиональных воздушных потоков, что способствует резким переходам от тепла к холоду и наоборот. Среднегодовая температура воздуха над северной частью полуострова Ямал составляет около минус  $9$ - $10^{\circ}\text{C}$ . В термическом режиме можно выделить суровую продолжительную зиму, прохладное лето и очень небольшие переходные периоды – весну и осень.

Таблица 2.1 Средняя месячная температура воздуха,  $^{\circ}\text{C}$

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
<b>ГМС Тамбей</b>	-24.6	-26.2	-24.2	-16	-7.3	0.7	5.2	6.2	2.5	-6.1	-15.5	-20.7

Средняя температура воздуха остается отрицательной в течение 8 месяцев (Таблица 2.1), с октября по май во всем рассматриваемом районе. Она понижается от минус  $5$ - $6^{\circ}\text{C}$  в октябре до минус  $24$ - $25^{\circ}\text{C}$  в феврале, а затем увеличивается до минус  $7$ - $8^{\circ}\text{C}$  в мае. Положительные средние температуры воздуха на побережье составляют в июле-августе плюс  $4$ - $6^{\circ}\text{C}$ . Абсолютный годовой максимум температуры воздуха в районе отмечается в июле и достигает в Тамбее  $30^{\circ}\text{C}$ . Абсолютный годовой минимум отмечается в январе-феврале и достигает минус  $50$ - $52^{\circ}\text{C}$ . В любые зимние месяцы могут наблюдаться оттепели с повышением температуры до слабо положительных значений в разгар зимы и до  $2$ - $5^{\circ}\text{C}$  в ее начале.

Переход температуры воздуха к положительным значениям весной осуществляется в первой половине июня. Наиболее ранняя дата устойчивого перехода через  $0^{\circ}\text{C}$  весной отмечена в Тамбее в середине мая, наиболее поздняя – в конце июня.

Продолжительность периода с положительными среднесуточными температурами воздуха составляет от 100 дней. В отдельные годы продолжительность периода с положительными температурами воздуха может уменьшаться до 80 дней и менее или увеличиваться до 120 дней и более. Число дней с температурой плюс  $5^{\circ}\text{C}$  и выше составляет около месяца. В отдельные дни температура воздуха летом может превышать плюс  $10^{\circ}\text{C}$ , но устойчивого перехода через этот предел не наблюдается.

Средняя за год абсолютная влажность воздуха составляет 3.6 мб, относительная - 86%.

Режим ветра в течение года складывается в зависимости от циркуляционных факторов и местных условий. В соответствии с расположением барических полей и распределением суши и водной поверхности в годовом ходе ветра отчетливо проявляется муссонообразный характер с преобладанием зимой ветров южной составляющей, летом – северной. Средняя годовая скорость ветра  $6.5$  м/с, максимальная за весь период наблюдений (декабрь) до 40 м/с.

Суммы осадков, выпадающие в районе, невелики. Это связано с низким влагосодержанием воздуха, поступающего сюда с акватории ледовитых морей. Годовая сумма осадков составляет 320 мм. Внутригодовое распределение осадков характеризуется летне-осенним максимумом в августе - сентябре, когда за месяц выпадает в среднем 35-40 мм. За год выпадает около 41% жидких, 48% твердых и 11% смешанных осадков.

Количество приходящей к земле солнечной радиации и световой климат района зависит от широты места, высоты солнца и облачности. Для высоких широт характерна как относительно малая высота солнца, так и наличие полярного дня и полярной ночи.

Летом, в связи с увеличением продолжительности дня, число часов солнечного сияния возрастает до 240-260 (в июле). Зимой в районе наблюдается полярная ночь и сумерки, солнечное сияние в декабре вообще отсутствует.

Годовой приход суммарной солнечной радиации при средних условиях облачности составляет 2700-2900 МДж/м<sup>2</sup>. При этом примерно 64% составляет рассеянная и 36% – прямая солнечная радиация. В годовом ходе максимум суммарной радиации (600-610 МДж/м<sup>2</sup>\*мес.) наблюдается в мае, минимум – в декабре - январе (Таблица 2.2).

Таблица 2.2 Суммарная солнечная радиация, МДж/м<sup>2</sup>, при средней облачности

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
<b>ГМС Тамбей</b>	0	20	122	200	172	182	240	153	64	25	1	0	1179

Поглощенная радиация составляет около 1500 МДж/м<sup>2</sup> в год или 48.5% от суммарной. Эта величина зависит от отражательной способности подстилающей поверхности альбедо. Альбедо зимой для снежного покрова равняется около 80%, летом для тундры 15-17%, а для воды 10-12%. В годовом ходе максимум поглощенной радиации приходится на июль, около 480 МДж/м<sup>2</sup> мес.

Радиационный баланс подстилающей поверхности за год положительный (430-508 МДж/м<sup>2</sup>). В годовом ходе радиационный баланс отрицательный с октября по апрель и положительный с мая по сентябрь (Таблица 2.3).

Таблица 2.3 Радиационный баланс подстилающей поверхности станции, МДж/м<sup>2</sup>

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
<b>ГМС Тамбей</b>	-65	-67	-50	0	70	280	320	155	42	-46	-65	-66	508

Устойчивое образование снежного покрова на побережье происходит в первой декаде октября. Разрушение устойчивого снежного (Таблица 2.4) покрова осуществляется во второй декаде июня. В отдельные годы появление снежного покрова на побережье наблюдалось в начале сентября или середине - конце октября, а полный сход его – в конце июня и позже. Нарастание толщины снежного покрова происходит с осени довольно быстро и к январю он достигает на открытых местах суши 20-30 см.

Таблица 2.4 Даты образования, разрушения и число дней со снежным покровом

Станция	Даты образования устойчивого снежного покрова			Даты разрушения устойчивого снежного покрова			Число дней со снежным покровом
	средняя	ранняя	поздняя	средняя	ранняя	поздняя	
Тамбей	8.1	19.09	11.11	15.06	31.05	30.06	256

## 2.2. Геологическое строение

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 - 15 м) участвуют преимущественно верхнечетвертично - голоценовые лагунно-морские отложения I - II морских террас (m1 Q III-IV), местами перекрытые голоценовыми озёрно-болотными (lb Q IV) и болотными (b Q IV) осадками, а также голоценовыми отложениями (a Q IV) аллювиальных террас, пойм, прируслового вала и пляжа Обской губы.

Разрез отложений верхнечетвертичных морских террас на рассматриваемой территории имеет однотипное строение. В нижней части толщи преобладают песчаные породы морского генезиса, залегающие на денудированных салехардских отложениях, а в верхней – озёрно-болотные, лагунно-морские, озёрные и аллювиальные песчано-супесчаные породы. Голоценовые отложения развиты на морском побережье (пляжи и лайды), в котловинах спущенных озёр и в долинах рек. Они представлены озёрно-морскими и аллювиальными образованиями песчано-супесчаного состава, местами, обогащёнными органикой, а также биогенными отложениями, представленными торфом.

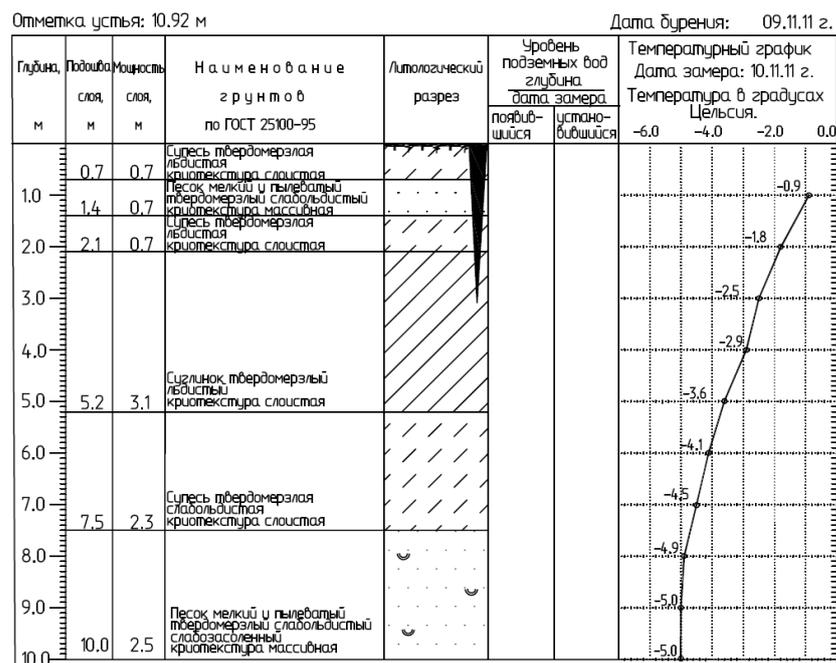


Рисунок 2.2 Колонка отложений лайды на рассматриваемом участке п-ова Сабетта

Верхнечетвертичные лагунно-морские отложения с размывом залегают на породах казанцевской свиты, реже они подстилаются непосредственно образованиями салехардской свиты. Абсолютные отметки от 3.0 до 24.0 м.

Лагунно-морские отложения террас представлены переслаиванием песков (Рисунок 2.2, 2.3) супесей и суглинков с преобладанием песчаных разностей. Пески преимущественно пылеватые, реже - мелкие кварцевые серые с жёлтым оттенком, имеют чёткую горизонтальную или волнистую слоистость.

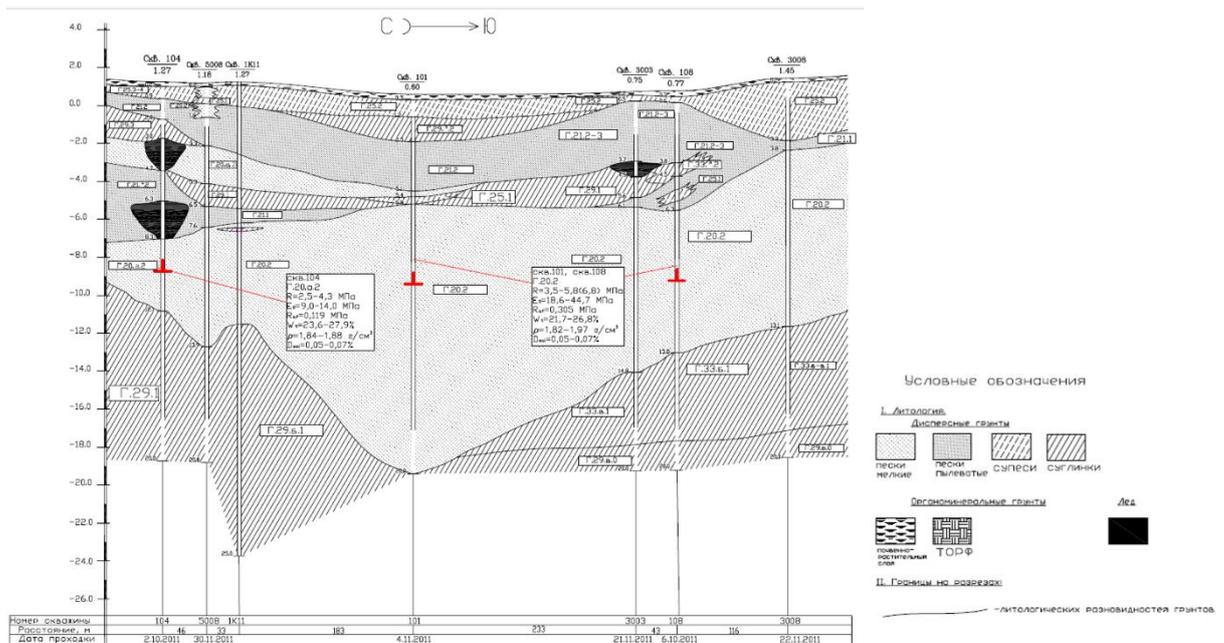


Рисунок 2.3 Типовой литологический разрез отложений, слагающих рассматриваемый участок п-ова Сабетта (масштаб 1:1000/100).

В различных частях разреза часто встречаются включения органики или очень тонкие прослой торфа. Супесчано-суглинистые разности имеют обычную серую или более тёмную окраску. В них встречаются включения органического материала.

Аллювиальные отложения представлены террасами, пойменными отложениями рек, лайдами, пляжами и косами Обской губы. Сложены они разномерзлыми песками и супесями, зачастую сильно заилованными. Абсолютные отметки от 0.0 до 3.0 м.

Озёрные отложения представлены пылеватыми слоистыми песками, супесями, редко суглинками, обычно содержащими значительную примесь органики. Мощность озёрных отложений от первых десятков сантиметров до 1-3 м.

### 2.3. Гидрогеологические условия

В структурно-гидрогеологическом плане исследуемая территория относится к Прикарскому бассейну стока подземных вод. По соотношению с многолетнемерзлыми породами (ММП) и положению в разрезе выделяются надмерзлотные и межмерзлотные воды.

**Подземные надмерзлотные воды.** Этот тип подземных вод подразделяется на воды сезонно – деятельного слоя и воды несквозных таликов.

Подземные воды сезонно-талого слоя (СТС) в летний период находятся в безнапорном состоянии. При зимнем промерзании они могут приобретать напор.

Области питания и распространения этих вод в летний период совпадают между собой. Питание осуществляется, в основном, за счёт атмосферных осадков.

Разгрузка осуществляется в пониженных частях рельефа, что приводит к обводнению и заболачиванию поверхности.

По химическому составу воды пресные гидрокарбонатные, хлоридно-гидрокарбонатные, кальциево-натриевые с минерализацией 0.32-16.03 г/дм<sup>3</sup> и общей жёсткостью до 2.4-4.4 мг/экв.

Подозёрные и подрусловые талики несквозного типа формируются практически под всеми озёрами и реками в районе изысканий. Исследованная мощность талых грунтов при глубине озёр 0.3-1.6 м составляет 2.0-6.1 м.

**Подземные межмерзлотные воды.** Результаты буровых работ показывают, что в верхнечетвертичных и голоценовых отложениях морского типа встречаются внутримерзлотные линзы и слои высокоминерализованных, преимущественно напорных подземных вод (криопэггов), залегающих на глубинах 4.0-6.0 м и 10.0-13.0 м на лайдах и поймах.

Формирование таких межмерзлотных вод (криопэггов) связано с промерзанием осадков, отлагавшихся в морских условиях. Пропитанные морской водой породы выходили из-под уровня, регрессировавшего Ямальского бассейна, промывались пресными поверхностными водами, но начавшееся промерзание привело к замораживанию как опресненных, так и соленых вод. Однако часть наиболее охлажденных тяжелых рассолов просачивалась вниз, где фиксировалась мерзлотой в виде линз близ водоупоров. Для этих вод характерна высокая минерализация, которая более чем в 6 раз превышает минерализацию воды Карского моря. Они имеют преимущественно хлоридно-натриево-магниевый состав с минерализацией 54.1-115.8 г/дм<sup>3</sup>.

Среднегодовая температура многолетнемерзлых пород, вмещающие криопэги, составляет минус 3.9°С-минус 5.7°С.

#### **2.4. Геокриологические условия и криогенные процессы**

Важнейшей особенностью природной обстановки полуострова Ямал является очень широкое распространение многолетнемерзлых пород, определяющей весь комплекс инженерно-геологических условий. Температура пород, криогенное строение, мощность толщ, мощность слоя сезонного протаивания и промерзания формировались и развивались под влиянием

климатических факторов, природных условий и истории геологического развития территории в верхнечетвертичном и голоценовом периодах.

### ***Распространение и мощность многолетнемёрзлых пород***

Исследуемая территория расположена в зоне сплошного распространения ММП. ММП встречаются на всех геоморфологических уровнях в субаэральных и субаквальных условиях. Даже отложения морских пляжей и кос, мелководий крупных озёр и островов в руслах рек находятся в многолетнемёрзлом состоянии.

Мощность ММП в пределах полуострова Ямал изменяется, как свидетельствуют данные буровых и геофизических исследований, в очень широком диапазоне: от 2-5 до 300-400 м.

Районы с наибольшей мощностью ММП расположены в осевой, наиболее возвышенной части полуострова. Они образуют широкую, практически меридиональную полосу, протягивающуюся от широты пос. Тамбей через северный и центральный Ямал. Эти районы практически со всех сторон окружены территориями, в пределах которых мощность ММП изменяется от 150 до 300 м и типичны для казанцевской морской равнины, лагунно-морских и надпойменных террас и многих районов лайды Обской губы. Меньшие по величине мощности мёрзлых толщ (от 50 до 150 м) характерны для районов, примыкающих к Обской губе. Наименьшие мощности (менее 50 м) мёрзлых пород характерны для лайды и приустьевых частей пойм рек, впадающих в Обскую губу. Такие же небольшие мощности отмечены и в пределах морских террас в их узкой полосе, непосредственно прилегающей к берегу моря, а также на многих участках лайды р. Обь.

Двухслойное строение ММП отмечается в пределах, промерзающих хасыреев, а также в долинах крупных рек. Мощность верхнего слоя мёрзлых пород в хасыреях от 3 до 7 м, а кровля второго слоя залегает на глубине 5-10 м.

Сквозные талики занимают незначительный процент площади, исследуемой территории и приурочены, в основном, к акваториям Обской губы, крупных рек и озёр. Под большинством термокарстовых озёр формируются несквозные талики, мощность которых зависит от площади и глубины водоёмов.

### ***Температура ММП***

В процессе полевых исследований и изучения материалов прошлых лет был собран достаточный материал о температурах ММП в различных зональных, геоморфологических и ландшафтных условиях на глубинах 10-30 м. Основными факторами, формирующими температурный режим пород на исследуемой территории, являются: состав поверхностных отложений, положение участка в рельефе и его микрорельеф (определяют дренированность и условия снегонакопления), характер растительного покрова. Роль этих факторов в формировании температурного режима пород существенно меняется в разных природных комплексах.

В области сплошного распространения ММП положение участка в рельефе – одно из наиболее важных условий, определяющих его геокриологические особенности. Наиболее “тёплыми” здесь оказываются породы, слагающие пониженные формы рельефа, где имеются благоприятные условия для снегонакопления. Минимальная мощность снежного покрова (0.2 – 0.3 м) характерна для выпуклых и плоских поверхностей водоразделов, занятых мохово-лишайниковыми тундрами на минеральных породах. Для заболоченных и обводненных поверхностей водоразделов мощность снежного покрова увеличивается до 0.3-0.5 м. На крутых и пологих безлесных склонах, в долинах мелких водотоков мощность снежного покрова составляет 0.4-1.0 м.

Максимальные значения температуры пород под снегом отмечаются в логах, долинах малых рек и краевых частях хасыреев, т.е. там, где условия особенно благоприятны для накопления снежного покрова.

Минимальные значения температуры массива пород отмечаются на повышенных элементах рельефа, откуда сдувается снежный покров.

Существенное влияние на тепловое состояние пород оказывает растительный покров. Располагаясь на поверхности раздела атмосферы и литосферы, растительный покров регулирует количество тепла, поступающего в почву в летний период, существенное влияние на влагообмен в верхних слоях почвы и определяет характер снегонакопления (а значит, условия зимнего охлаждения почвы).

Таким образом, растительность воздействует на гляциальные процессы, в основном, тем, что формирует изолирующую прослойку и укрепляет породы.

Угнетенная кустарниковая и кустарничковая растительность на обследованном участке слабо способствует накоплению снега и практически не влияет на процессы теплообмена, за исключением склонов долин рек и ручьёв, а также бортов котловин спущенных озёр (хасыреев).

Травяной и мохово-лишайниковый покров играет роль теплоизолятора, изменяя амплитуду колебания температуры поверхности, а также регулирует влагообмен почвы с атмосферой. Наибольшее влияние на температуру пород оказывает моховой покров из сфагновых мхов: увлажненный сфагнум имеет большую теплопроводность в мёрзлом состоянии и потому способствует интенсивному охлаждению почвы. Летнее нагревание под мощными подушками из сфагновых мхов практически отсутствует, поскольку вследствие потери тепла на испарение влажного мха тепловая волна полностью гасится в теплоизоляционном слое.

Среднегодовые температуры пород, на глубине нулевых годовых колебаний 8-15 м, из-за неравномерного накопления снега и влияния поверхностных вод на различных элементах рельефа достигают значений минус 1°C - минус 7°C.

### ***Криогенное строение многолетнемёрзлых пород***

Генезис отложений в значительной степени определяет их криогенное строение и льдистость. Основные криолитологические особенности:

- а) сравнительно монотонное распределение и высокое содержание льда-цемента в пылеватых песчаных породах, широкое развитие тонкослоистых текстур с равномерным вертикальным распределением слоёв льда;
- б) высокая льдистость суглинистых пород, преобладание слоистых, сетчато-слоистых и сетчатых криогенных текстур;
- в) довольно частая встречаемость в супесчано-суглинистых разрезах морфологической дифференциации криогенных текстур, прямо указывающей на генетическую неоднородность мёрзлой толщи (синкриогенных пород сверху и эпикриогенных - внизу);
- г) широкое распространение сингенетических полигонально-жильных льдов (ПЖЛ).

Одной из наиболее специфических криолитологических особенностей Восточно-Ямальной области является широкое распространение сингенетических реликтовых ПЖЛ в верхнечетвертичных отложениях и развивающихся ПЖЛ в образованиях хасыреев, пойм и лайд. Глубина залегания колеблется от 1-3 м в отложениях лагунно-морских террас до 0.5-1.5 м в более молодых отложениях. Ширина их поверху составляет 0.5-2 м, высота - от 4-6 м до 2-4 м соответственно.

Важной особенностью являются пластовые (очень сильнольдистые породы) залежеобразующие льды, которые залегают в виде прослоев и линз, мощностью 0.3-2.2 м.

Исследованные отложения представлены генетически неоднородными толщами, сложенными сингенетическими породами на небольшой глубине и подстилаемые генетически однородными эпикриогенными толщами в пределах водораздельных равнин. Для них характерно наличие двух разных по льдистости горизонтов: верхнего – более льдистого и менее льдистого нижнего.

В составе этих отложений выделяются практически все типы пород - от песков до глин. Криогенное строение песков характеризуется, преимущественно, массивными криотекстурами. Линзовидно-слоистая криогенная текстура встречается в песках, содержащих органику.

Породы, представленные дисперсными отложениями, существенно льдонасыщены. Криогенные текстуры в супесчаных породах, преимущественно, линзовидные и горизонтально-слоистые, реже - косослоистые и сетчато-слоистые. В суглинистых – горизонтально-слоистые и сетчатые. Толщина слоёв изменяется от долей мм до 1-2 см, преобладают слои в 1-3 мм, расстояние между ними - от долей мм до 3-4 см (иногда 5-7 см). Частослоистые криогенные текстуры и повышенная льдистость верхнего горизонта (наблюдаются отдельные прослои

минерализованного льда толщиной до 10 см) характерны для суглинков в органоминеральных отложениях.

Сингенетически промерзшими являются отложения подстилающей регрессивной песчаной пачки казанцевской свиты, фрагментарно встречающейся в пределах области. В них отмечается криогенная текстура массивного типа, что существенно затрудняет криогенетическую индикацию.

В хасырях встречаются отложения с криотекстурой сингенетического типа. Эти отложения прослеживаются обычно до 2-5 м. В этом интервале для суглинков характерны частые и тонкие ледяные слои, образующие, преимущественно, линзовидно-слоистую криогенную текстуру. Супеси имеют типичную линзовидно-слоистую и слоисто-сетчатую криогенные текстуры. Пески имеют массивную криогенную текстуру, а содержащие органику – тонкослоистую.

Озёрно-болотные голоценовые отложения представлены, как правило, супесями и суглинками с большим количеством растительных остатков или заторфованными.

В органоминеральных породах озёрного генезиса обычно наблюдается высокая льдистость. Криогенные текстуры преимущественно линзовидные, горизонтально-косослоистые, реже – мелкосетчатые. Толщина слоев изменяется от долей мм до 1-3 мм, расстояние между ними, как правило, не превышает 1-3 мм. В низах более мощных озёрных горизонтов прослеживается слоистая и сетчатая криогенные текстуры.

Биогенные отложения слагают участки торфяников и представлены торфом средней и слабой степени разложения. Криогенная текстура биогенных отложений линзовидно-слоистая (толщина слоёв 1-3 мм), слоистая или порфировидная, реже - сетчатая.

Голоценовые аллювиальные отложения представлены песками и супесями, реже - суглинками. В разрезе аллювия выделяются два различных горизонта по типу промерзания: верхний, сингенетически промёрзший, и нижний, промёрзший эпигенетически.

Криогенное строение песчаных отложений характеризуется преобладанием массивных криотекстур с редкими единичными линзами льда толщиной до 1 мм. Микротонкослоистая, частослоистая криогенные текстуры наблюдаются в отдельных верхних горизонтах песков пойменной фации (до глубины 1-3 м).

Аллювиальные дисперсные породы представлены супесями и суглинками. В супесчаных горизонтах отмечается большое количество включений растительных остатков, иногда образуются прослойки детрита. Супесчано-суглинистые породы имеют хорошо выраженную тонкослоистую и слоистую криогенные текстуры. Толщина слоёв льда - от долей мм до 1-3 мм, расстояние между ними - от 2-3 мм до 5 мм, редко – до 1 см, в более мощных супесчаных горизонтах (мощностью до 5-6 м) расстояние между слоями увеличивается до 3-5 см.

### *Сезонное протаивание и промерзание пород*

На территории района исследований, расположенной в зоне сплошного распространения ММП, практически повсеместно развит слой сезонного протаивания пород. Факторы, определяющие СТС:

- *Литологический состав и влажность пород.* Известно, что полная влагоёмкость пород уменьшается в ряду торф – суглинок – песок. При изменении влажности изменяются затраты тепла на фазовые переходы воды в лёд и обратно, что оказывает решающее влияние на глубины СТС. Наименьшее изменение мощности СТС при изменении влажности наблюдается в торфах и колеблется в пределах 10-15 см. Наибольшее изменение мощности СТС при изменении влажности наблюдается в песках и колеблется в пределах нескольких десятков см.

- *Растительный покров* оказывает не меньшее влияние на мощность СТС, чем влажность отложений, как правило, предохраняет почву от летнего прогревания и зимнего охлаждения и тем самым сокращает амплитуду колебания её температуры. В силу более продолжительной зимы растительность сильнее влияет на зимние теплообороты, сокращая их. Мёрзлые толщи и растительные покровы развиваются обычно параллельно, реагируя на изменения, друг друга. Поэтому растительность, в известной мере, является индикатором при мерзлотной съёмке.

- *Температурный режим.* Немаловажным фактором, влияющим на глубину СТС, является температура ММП. Чем ниже температура мёрзлых пород, тем большая часть тепла идет на их прогрев, следовательно, меньше СТС.

- *Снежный покров* влияет на мощность СТС сложно и многогранно. С одной стороны, сказывается его охлаждающее воздействие на породы СТС (высокое альbedo, таяние снега) поглощением солнечной радиации и сокращением приходной части теплового баланса на поверхность почвы. С другой стороны, в зимний период почва отдает полученное летом тепло и снег как теплоизолятор, предохраняет почву от зимних теплопотерь, отепляя её. Если снег имеет малую мощность, то преобладает его роль как отражателя солнечных лучей, и он играет охлаждающую роль. При увеличении мощности снега преобладает теплоизолирующая роль, что приводит к отеплению почвы и увеличению мощности СТС. Отепляющее (охлаждающее) влияние снежного покрова зависит от экспозиции склонов и их крутизны, участков с различным растительным покровом и характером проявления зимней температурной инверсии, то есть от всего комплекса природной обстановки.

Различные сочетания этих факторов обуславливают пространственную неоднородность характеристик СТС и СМС, различие в их режимах как в годовом, так и в многолетнем периодах. На территории района исследований мощность СТС изменяется в пределах от 0.3-0.5 до 1-2 м.

Наименьшая мощность СТС (0.2-0.6 м) характерна для торфяников плоских заболоченных поверхностей междуречий. В составе СТС на таких поверхностях преобладает торф разной

степени разложения. Для дренированных поверхностей, где мохово-лишайниковый покров более сухой и мощностью не более 10 см, характерны максимальные СТС (0.8-1.5 м). В обводненных понижениях, где мощность сфагнома достигает 20 см с высокой влажностью, мощность СТС минимальная (0.3-0.8 м). В данном случае термическое сопротивление сырого мха значительно ниже, чем термическое сопротивление воздушно-сухой моховой подушки.

Различия в напочвенном покрове и в литологическом составе пород СТС, а также в степени увлажненности поверхности, обуславливают резкую неоднородность глубин оттаивания по площади. Для супесчано-суглинистых пород зоны СТС характерна высокая тиксотропность, а при промерзании – неравномерное площадное пучение.

Наибольшими мощностями СТС характеризуются дренированные поверхности, где породы СТС представлены песками и супесями, реже - суглинками, с пониженной влажностью, а также косы и прирусловые валы. Диапазон изменения СТС на косах объясняется только влажностным режимом песчаных пород.

Глубокое сезонное протаивание отмечается и на крутых супесчано-песчаных склонах, а также в днищах долин мелких водотоков, поросших кустарником.

Особенности геологического развития области в верхнечетвертичное и голоценовое время обусловили формирование здесь сплошного комплекса сильнольдистых мёрзлых толщ значительной мощности. Криогенные процессы и формы их проявления отличаются большим разнообразием. Разнообразие форм осложняется в результате одновременных или последовательных воздействий нескольких различных криогенных процессов.

Из современных *криогенных геологических процессов и явлений* наибольшее распространение получили следующие процессы: рост повторно-жильных льдов; термоабразия и термоэрозия; образования солифлюкционных шлейфов и террас на склоновых участках; морозобойное растрескивание пород; термокарст; заболачивание.

ПЖЛ присуще всем районам области. ПЖЛ в разрезах занимают достаточно разнообразные позиции. Наиболее мощные жилы секут дренированные озёрно–морские террасы, где они имеют ступенчатое строение, что указывает на сингенез жил. На плоских обводненных поверхностях встречаются маломощные эпигенетические жилы. Они залегают самостоятельно или в парагенезе с реликтовыми сингенетическими жилами (Ершов, 1989).

Морское побережье, берега рек и оврагов области интенсивно разрушаются процессами термоабразии и термоэрозии, развивающимися по полигонально–жильным и пластовым льдам. На поверхности лагунно–морской террасы представляющей, в целом, денудируемые элементы поверхности рельефа, достаточно активно протекают процессы морозобойного растрескивания пород.

Термокарст распространен на исследуемой территории очень широко на всех геоморфологических уровнях. Он представлен как мелкими термокарстовыми образованиями, преимущественно по ПЖЛ, так и озёрным термокарстом. Термокарстовые озёра имеют размеры в поперечнике от несколько десятков метров до 1.0 км, при глубине 0.3-1.6 м. В развитии термокарстовых озёрных котловин существенную роль играет термоэрозия берегов. В процессе своего развития термокарстовые озёра могут либо дренироваться, либо заполняться минеральными породами за счёт термоэрозии берегов или сноса с прилегающих водоразделов. В этом случае образуются хасыреи. Заболачивание приурочено к пониженным местам в рельефе. и последующей эксплуатации применительно к объектам инфраструктуры НГКМ.

### **Глава 3. Трещинообразование в породах за счет высокоинтенсивных тепловых воздействий**

Тепловое взаимодействие грунтов с инженерными сооружениями в районах распространения ММП приводит к уменьшению несущей способности грунтовых оснований за счет перехода грунтов в пластично-мерзлое состояние или их оттаивания. Существенное негативное влияние на этот процесс оказывает засоленность грунтов, которые могут вмещать криопэги, что характерно для районов шельфа северных морей, приморских равнин (п-ов Ямал и др.).

Интенсивное развитие районов Сибири, распространения вечномерзлых грунтов, привело к необходимости освоения сложных с инженерно-геокриологической точки зрения территорий, строительство на которых зачастую невозможно без проведения специальных мероприятий по инженерной подготовке. Задачей данных мероприятий является повышение строительных свойств грунтов, в первую очередь их прочностных характеристик, за счет изменения их температурного режима, теплового состояния и обеспечения оптимальных условий эксплуатации. Известно, что понижение температуры грунта с минус 1°С до минус 3°С улучшает прочностные характеристики грунта в 4-5 раз (Максимов, 1979).

#### **3.1. Методы обеспечения несущей способности грунтов оснований с помощью регулирования температурного режима**

При проектировании и эксплуатации объектов инфраструктуры газоконденсатных месторождений, расположенных в районах распространения ММП одним из способов минимизации такого негативного влияния, является использование устройств, для термостабилизации грунтов. Для термостабилизации оснований сооружений при способе строительства с сохранением его в мерзлом состоянии, используются: хладопотенциал атмосферного воздуха в зимний период на базе сезонных охлаждающих парожидкостных устройств вертикального и горизонтального типа естественной циркуляции и машинные методы охлаждения с принудительной вентиляцией хладагента (Рисунок 3.1).

Говоря о термостабилизаторах (ТС), использующих хладопотенциал атмосферного воздуха, к недостаткам их использования следует отнести: сезонность работы и периода проведения установки в массив пород; относительно невысокую скорость промораживания, проблемы с промораживанием сильнозасоленных пород и криопэгов. К преимуществам следует отнести: отсутствие энергетических затрат и необходимости обслуживания в процессе эксплуатации. В таблице 3.1 приведен краткий обзор используемых в отечественной практике ТС на базе циркуляции атмосферного воздуха в зависимости от их технических характеристик.

К преимуществам методов машинного охлаждения грунтов с принудительной вентиляцией хладагента можно отнести: всесезонность термостабилизации грунтовых оснований; возможность вымораживания сильнозасоленных пород и криопэггов; большая хладопроизводительность - 500 кВт и температура хладоносителя минус 25°С; компактность; установки полностью автоматические и не требуют присутствия квалифицированного персонала; быстрое развертывание при ликвидации форс-мажорных ситуаций. К недостаткам методов машинного охлаждения следует отнести: высокую стоимость агрегатов и существенные экономические затраты на функционирование в течении больших временных диапазонов; высокие требования к плотности рассольных трубопроводов; не в полной мере адаптированы к Северу; необходима индивидуальная адаптация установок к каждому району Севера (Полевой, Умрихин, 2008).



Рисунок 3.1 Холодильная установка ТНТ-200/WTE-200 контейнерного типа российско-чешского производства

Еще в 70-х годах прошлого века возник интерес к жидкому азоту, как к хладагенту для промораживания грунтов. Данная технология использовалась в тоннелестроительстве в Петербургской метростроительной компании «Метрострой» для преодоления аварийных участков, герметизации стыков между секциями, сооружения ледовых и льдогрунтовых стен котлованов и герметизации окон в шпунтовых ограждениях. В 1984 году азотное замораживание было применено в рамках строительства Северо-Муйского тоннеля БАМ, а в 1986 было использовано для ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС.

Сжижение добываемого природного газа является важной технологией при его использовании и транспортировке. При проектировании и эксплуатации объектов инфраструктуры газоконденсатных месторождений, расположенных в районах распространения ММП возникает проблема термостабилизации грунтовых оснований. 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 СПГ в резервуарах Южно-Тамбейского НГКМ оценивается значением величины суточной испаряемости в резервуаре хранения (около 0.1% от массы сжиженного газа). Испарение происходит в верхней части резервуара, в котором находится сжиженный природный газ при температуре минус 163°C, 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 (по оценкам суточный расход СПГ должен быть несколько увеличен до 0.15-0,18% от массы сжиженного газа в емкости), имеющий низкую отрицательную температуру, для целей термостабилизации грунтовых оснований (Рисунок 3.2), используя для этого низкотемпературный термостабилизатор (НТС), «трубку Фильда» (Рисунок 3.3), представляющий рекуперативное теплообменное устройство типа «труба в трубе».

В отличие, от обычно применяемых сезонных термостабилизаторов, использование холодильного потенциала комплекса СПГ позволяет: обеспечить надежную эксплуатацию сооружения круглогодично и независимо от температурных условий; утилизировать отбираемый газ для охлаждения грунтового основания путем его последующего сжатия и сжижения; обеспечить значительно более высокий темп промораживания грунта с минимизацией эффекта пучения грунта, за счет уменьшения величины мигрирующего к фронту промерзания подтока воды; проморозить линзы криопэгов любых концентраций. Возможно использование хладоресурса СПГ для локальных целей термостабилизации грунтовых оснований при ликвидации форс-мажорных ситуаций. Использование отходящих потоков испарения СПГ с последующей их утилизацией, по сравнению с методами машинного охлаждения грунта, даст экономический эффект. Источником повышения эффективности применения СПГ, является потенциальная возможность введения в технологическую схему термостабилизации грунтовых оснований дополнительного контура для целей извлечения из газообразного потока редких инертных газов (ксенон или др.). Соответствующие установки в РФ имеются (Комаров, Ананьев, Бек, 2015).

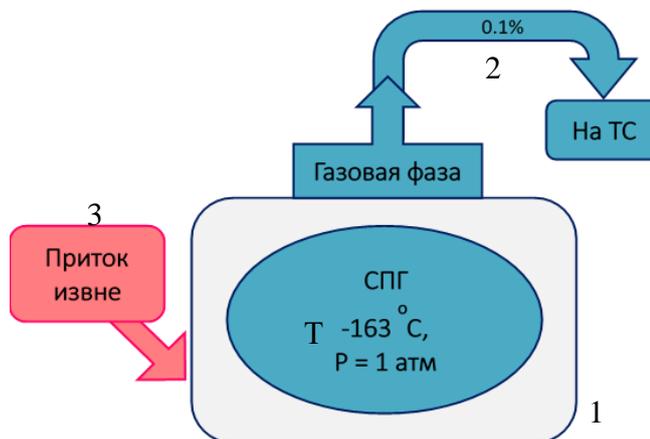


Рисунок 3.2 Схема резервуара для хранения сжиженного природного газа. 1-резервуар, 2-технологический отбор газа, 3-приток тепла извне.

Кроме очевидных плюсов, использование СПГ в качестве хладагента в конструкции устройства низкотемпературного термостабилизатора (НТС) (Рисунок 3.3) может привести к проявлению негативных процессов:

1. Трещинообразования на границе стенка термостабилизатора – грунт, связанного с возникновением больших градиентов температуры (тепловой удар);
2. Морозобойного растрескивания грунта в междусвайном пространстве при различной в плане и по глубине геометрии компоновки кустов НТС и свай. В связи с чем, требуется обратить особое внимание на выбор оптимального значения величины входной в НТС температуры газа и конструктивных решений, с целью недопущения (минимизации) процессов трещинообразования (Жомаров, Ананьев, Бек, 2016).

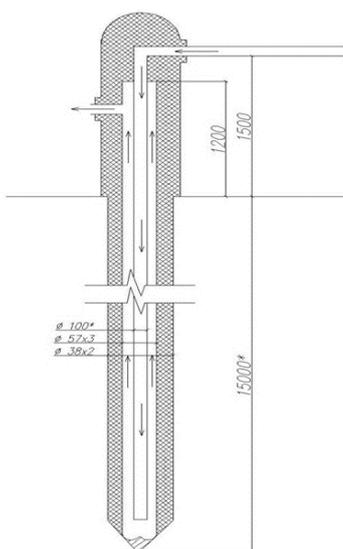


Рисунок 3.3 Схема трубки Фильда. Стрелки – направление движения хладоносителя в НТС; заштрихованные участки – материал стенки НТС, диаметр приемно-выпускной камеры 100 мм, диаметр внешней трубки 57 мм при толщине стенки 3.5 мм, диаметр внутренней трубки 38 мм при толщине стенки 3 мм.

В отечественной практике отсутствует опыт применения рекуперативных охлаждающих устройств на сжиженном природном газе. Как было упомянуто выше, имеется опыт применения жидкого азота для замораживания грунтов (Рачевский, 2009). Поэтому необходима разработка методики количественной оценки теплового взаимодействия такой системы с грунтом основания. Эта методика позволит минимизировать, или исключить влияние трещин, возникающих на границе грунт - охлаждающая система, за счет повышенных хладонагрузок (температурных перепадов). Методика прогноза должна включать также оценку водно-ионного режима грунтов основания, поскольку он определяет температуру начала замерзания, содержание незамерзшей воды и во многом величину теплофизических и механических характеристик мерзлого грунта.

Таблица 3.1 Радиусы замораживания ТС различных производителей общей длиной 10 метров (*Сравнение эффективности замораживания грунтов термостабилизаторами различных производителей, n.d.*).

Основные показатели	ООО «Ньюфрост» г.Протвино Московская обл.	ООО НПФ «Проект-стабилизатор» г.Москва	ООО «Таис-С» г.Салехард	ОАО «Фундаментпроект» г.Москва	ООО «ИнжГеоСервис-Норд» г.Москва	ЗАО «Интер Хит Пайп» г.Москва	ООО НПО «Север» г.Москва	ООО НПО «Полнос» г.Тюмень	ООО НПО «Фундаментстройаркос» г.Тюмень
Марки ТС	НФ	ОГВА	ТМД	ТСГ.В	СТС	ТСГ-ВАС	ТСГ.В	ТС-33,7-54L	ТК32/L.M5-03
Хладагент	Хладон 22	Хладон 22	Хладон 22	Хладон 22	Аммиак	Хладон 22	Хладон 22	Хладон 22	Аммиак
Размер оребрения, конденсатора, материал, шаг, толщина ребер, покрытие	66 мм алюминий 5 мм 1 мм нет	61 мм алюминий 5 мм 1 мм нет	100 мм сталь 15 мм 2 мм лакокрасочное	140 мм сталь 15 мм 2 мм лакокрасочное	68 мм алюминий 4.5 мм 1 мм нет	126 мм алюминий звездообразное 1 мм нет	140 мм сталь 15 мм 2 мм лакокрасочное	65 мм алюминий 2.5 мм 0.5 мм нет	67 мм алюминий 2.5 мм 0.5 мм нет
Длина оребрения конденсатора, мм	1045	750	880	900	880	800 (принято)	900	900	784
Площадь оребрения конденсатора, м <sup>3</sup>	0.85	0.9	1.17	1.71	1.71	1.04	1.6	1.6	1.57
Диаметр корпуса испарителя, м	38	32	38	38	32	54	38	33.7	33.7
Толщина стенки корпуса, мм	2	нет данных	2	3	нет данных	2.5	нет данных	3.5	3.5
Длина испарителя, м	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	5.9
Длина теплоизоляции на испарителе, м	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	нет	3.0
Радиус замораживания (м) талого песка плотностью 1.6 т/м <sup>3</sup> влажностью 20% температура песка +1° температура начала замерзания -0.1 ° установленных на:									
Ванкорском месторождении	1.1	1.02	1.01	1.17	1.17	1.24	1.17	1.25	1.33
Бованенковском месторождении	1.1	1.03	1.010	1.13	1.15	1.21	1.13	1.22	1.28
Чаяндинском месторождении	0.9	0.82	0.83	1.01	0.98	1.05	1.01	1.06	1.16
Варандейском месторождении	0.96	0.9	0.88	0.99	1.01	1.07	0.99	1.08	1.13

### 3.2. Методика прогноза процессов промораживания и трещинообразования в породах при взаимодействии с низкотемпературным хладоносителем

#### Система решаемых уравнений

Постановка задачи математического моделирования промерзания для нахождения температурных полей в породах (Рисунок 3.4) сводится к следующему. В начальный момент времени температура на поверхности низкотемпературного термостабилизатора (НТС) радиусом  $R_S$  и длиной  $L_S$ , находящегося в массиве пород с температурой поверхности  $T_{GS}$ , скачком понижается до величины  $T_G$  – температуры газа и поддерживается постоянной во времени  $\tau$ . При условии  $T_G$  ниже температуры начала замерзания поровой воды  $T_{bf}$  начинается процесс образования зоны промерзания, мощность которой во времени возрастает. Фазовый переход влаги в лед здесь начинается на условно выделенной подвижной границе – фронте промерзания  $R_\xi = f(\tau)$ , который разделяет массив на талую и мерзлую зоны и продолжается в последней, где действуют равномерно распределенные источники (стоки) тепла. Это означает, что рассматривается случай, когда в породах образуется массивная криогенная текстура. Тепло на фазовые переходы транспортируется через мерзлую и талую зоны чисто кондуктивным путем.

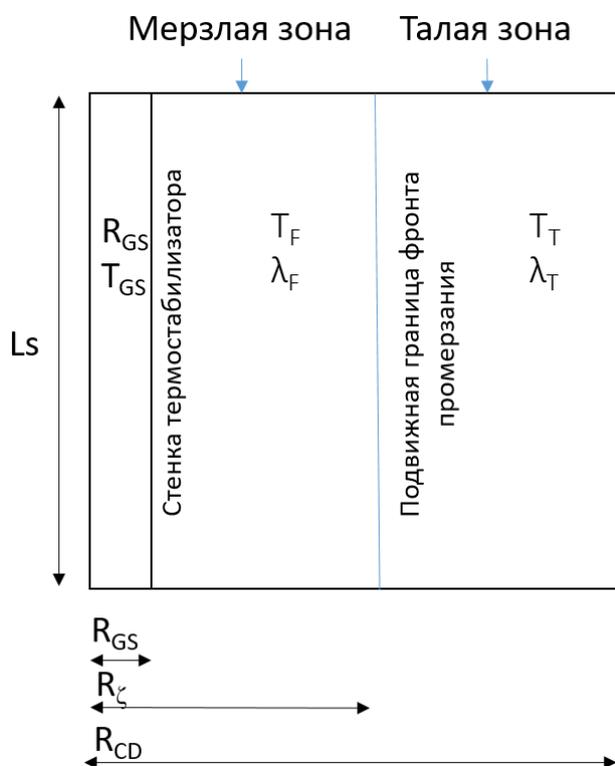


Рисунок 3.4 Постановка задачи о температурном распределении в процессе промерзания

Теплофизические характеристики в выделенных зонах кусочно-постоянны и скачком изменяются на границе раздела зон:  $\lambda_T \neq \lambda_F$ ,  $C_T \neq C_F$  и  $a_T \neq a_F$ , где  $\lambda_T$  и  $\lambda_F$  - коэффициенты теплопроводности соответственно талых и мерзлых пород;  $C_T$  и  $C_F$  - объемные теплоемкости. Принимается, что условия вокруг ТС одинаковы, поэтому задача может формулироваться, как двумерная (осевая симметрия). Уравнение теплопроводности в энтальпийной постановке, где величина энтальпии (теплосодержания)  $H$  представляет непрерывную функцию во всем спектре температур и может включать тепловой эффект фазовых переходов, имеет вид:

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + \left( \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \tau > 0, z \in (0, L_S), r \in (R_S, R_{CD}), \quad (3.1)$$

$$C_{\text{эф}}(T) = \begin{cases} C_{EC}(T), & T < T_{bf} \\ C_T, & T > T_{bf} \end{cases}, \quad (3.2)$$

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_F(T), & T < T_{bf} \\ \lambda_T, & T > T_{bf} \end{cases}, \quad (3.3)$$

$$T = \begin{cases} T_F, & T < T_{bf} \\ T_T, & T > T_{bf} \end{cases}, \quad (3.4)$$

$$H(T) = \begin{cases} H_F(T), & T < T_{bf} \\ H_T, & T > T_{bf} \end{cases}, \quad (3.5)$$

где  $H = \int_0^T C dT$  ;

$$C_{EC} = C_F + \psi \left( \frac{\partial \rho_o W_{UW}}{\partial t} \right), \quad (3.6)$$

$Oz$  – направлена вниз по оси термостабилизатора,  $Or$  – по поверхности массива пород вдоль радиуса,  $L_S$  и  $R_{CD}$  – расчетная область.

### 3.2.1. Граничные условия

Начальные условия:

$$T(r, z, 0) = T(z),$$

$$T(r, 0, 0) = T_{GS},$$

$$z \in [0, L_S];$$

Граничные условия:

$$T(r, 0, \tau) = T_{GS}(\tau), \quad \tau > 0;$$

$$r \in (R_S, R_{CD});$$

$$T(R_S, z, \tau) = T_G, \quad \tau > 0, \quad z \in [0, L_S];$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=R_{CD}} = 0 \quad ; \quad \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z=L_S} = 0$$

Особые условия на подвижной границе раздела зон  $R_\xi = f(\tau)$  запишутся в виде условия неразрывности температуры на фронте и уравнения баланса тепла на подвижной границе:

$$T_F(R_\xi, \tau) = T_m(R_\xi, \tau) \equiv T_{bf};$$

$$\lambda_F \frac{\partial T_F}{\partial r} \Big|_{r=R_\xi(\tau)} - \lambda_T \frac{\partial T_T}{\partial r} \Big|_{r=R_\xi(\tau)} = q_{PT} \frac{dR_\xi}{d\tau},$$

где:  $q_{PT}$  – теплота, идущая на фазовые переходы, пропорциональная объемной влажности породы.

В качестве исходных данных для задания верхних граничных условий используются климатические характеристики, полученные по м/с Тамбей. Среднегодовое значение месячных температур воздуха приведен в таблице 3.2, строка 1. Для определения хода температур на дневной поверхности для летних месяцев была вычислена радиационная поправка для поверхности искусственно возводимых под объекты ГКМ насыпей (Таблица 3.2, строка 6).

Таблица 3.2 Верхние граничные условия на естественной поверхности и на поверхности насыпей

Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1. Температура воздуха $t_v$ , $^{\circ}\text{C}$	-24,6	-26,2	-24,2	-16,0	-7,3	0,7	5,2	6,2	2,5	-6,1	-15,5	-20,7
2. Радиационный баланс $R$ , $\text{Вт}/\text{м}^2$	-25	-26	-19	0	27	107	122	59	16	-18	-25	-26
3. Турбулентный теплообмен $P$ $\text{Вт}/\text{м}^2$						30	30	30	15			
4. Скорость ветра $V$ , м/с						5,6	5,3	5,7	5,8			
5. Коэффициент турбулентного теплообмена, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{K}$						21,9	20,8	22,3	22,6			
6. Радиационная поправка для насыпи $\Delta t$ , $^{\circ}\text{C}$						4,42	5,20	2,19	0,40			
7. Температура поверхности на насыпи $t_n$ , $^{\circ}\text{C}$	-24,6	-26,2	-24,2	-16,0	-7,3	5,12	10,4	8,39	2,9	-6,1	-15,5	-20,7
8. Высота снежного покрова $h_{\text{сн}}$ , м	0,27	0,29	0,33	0,37	0,29					0,12	0,17	0,23
9. Плотность снежного покрова $\rho_{\text{сн}}$ , $\text{кг}/\text{м}^3$	285	295	300	310	360					210	240	260
10. Теплопроводность снежного покрова $\lambda_{\text{сн}}$ , $\text{Вт}/\text{мK}$	0,31	0,32	0,32	0,33	0,38					0,23	0,26	0,28
11. Термическое сопротивление снежного покрова $R_{\text{сн}}$ , $\text{м}^2\text{K}/\text{Вт}$	0,88	0,91	1,02	1,11	0,75					0,52	0,65	0,81

Радиационная поправка принималась только для летних месяцев, в зимний период ее величина невелика, и температура поверхности снега принималась равной таковой воздуха. Определение месячных радиационных поправок осуществлялось на основе известной зависимости

$$\Delta t_R = P / \alpha, P = R - LE - B, (3.7)$$

где  $\Delta t_R$  - среднемесячная радиационная поправка (разница между температурой дневной поверхности и воздуха), °С;  $P$  - турбулентный теплообмен поверхности с атмосферой, Вт/м<sup>2</sup>;  $R$  - радиационный баланс поверхности (Таблица 3.2, стр.2), Вт/м<sup>2</sup>;  $LE$  - затраты тепла на испарение, Вт/м<sup>2</sup>;  $B$  - количество тепла, поступающее в породу, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  - коэффициент турбулентного теплообмена, Вт/м<sup>2</sup>К, определяемый согласно работе (Хрусталеv, 2005) по зависимости

$$\alpha = 3.7V + 1.16, (3.8)$$

где  $V$  - среднемесячная скорость ветра, м/сек (Таблица 3.2, стр.4).

Поскольку данные по ряду характеристик, входящих в зависимость (3.8), отсутствуют ( $LE$ ,  $P$ ), приняты некоторые упрощения. Так, для нахождения температуры поверхности на естественных участках использовались обобщенные данные о непосредственно величинах летнего турбулентного теплообмена  $P$  для рассматриваемого региона из работы (Гарагуля, Кудрявцев, Кондратьева, 1974).

Для насыпи величину летнего теплооборота (количества тепла, проходящего в породу через ее поверхность в течение всего лета) в первом приближении можно оценить значением порядка 35000 Вт·час/м<sup>2</sup>, т.е. средняя за лето плотность теплового потока в породу  $B$  составляет около 12 Вт/м<sup>2</sup>. Учитывая весьма невысокую среднелетнюю температуру воздуха (около 3,7°С), испарение с поверхности сухих дренированных насыпей можно не учитывать и считать, что все избыточное радиационное тепло  $R$  за летний период за вычетом затрат тепла на сезонное оттаивание и нагревание пород  $B$  идет на турбулентный теплообмен дневной поверхности с атмосферой. Тогда, согласно (3.8) могут быть найдены радиационные поправки и определен ход летних среднемесячных температур на поверхности насыпи (Таблица 3.2, строки 7, 10).

### Условия разрушения

Высокая скорость промерзания пород вокруг термостабилизатора, связанная с низкими температурами хладагента, приводит к возникновению больших градиентов температур в мерзлом слое вблизи его поверхности. Это может привести к возникновению трещин и отразиться на несущей способности грунтовых оснований. В силу низких значений температуры хладагента задача, в общем случае, может рассматриваться в рамках теории линейной термоупругости и модели массива в виде деформирующихся в неоднородном температурном

поле слоев. Для рассматриваемого случая, ее в первом приближении, можно сформулировать как несвязанную, т.е. температурный профиль в каждый момент времени является установившемся, относительно изменения полей напряжений и деформаций. Анализ условия связанности уравнений термоупругости дан в работе (Комаров, 2003). На основании основных гипотез теории тонких оболочек величину максимальных температурных напряжений  $\sigma$  («тепловой удар») приближенно можно оценить по формуле (Коваленко, 1971):

$$\sigma = -\frac{E \alpha_T \Delta T}{2} \left[ 1 + \frac{\sqrt{1-\nu^2}}{\sqrt{3} (1-\nu)} \right], \quad (3.9)$$

где:  $E$  – модуль упругости,  $\alpha_T$  - коэффициент линейного расширения,  $\nu$  - коэффициент Пуассона,  $\Delta T$  - перепад температур в мерзлом или промерзающем слое породы (в зависимости от начала включения НТС - в зимний или летний период), который расположен вблизи стенки НТС.

В соответствии с принятой теорией, вблизи поверхности теплового источника, тонкой оболочке, температура будет изменяться по линейному закону. Возникающий в этой окрестности градиент температур и будет являться причиной возникновения напряжений и возможного распространения трещин на контакте источник-порода.

При решении вопроса о возможности образования трещины, надо сопоставить величину  $\sigma$ , рассчитанную из уравнения (3.9), с величиной равной пределу мгновенной прочности на разрыв  $\sigma_{TS}$ , а для пород, подвергающихся сезонным колебаниям температур - с величиной равной пределу длительной прочности на разрыв  $\sigma_{LS}$ .

Задача реализована с помощью программного продукта TUNDRA (Пустовойт, Венкстерн, Барке, 2014), предназначенная для моделирования методом конечных разностей процессов промерзания и оттаивания в дисперсных горных породах (грунтах), взаимодействующих с окружающей средой и инженерными сооружениями, в том числе термостабилизаторами, с учетом фазовых переходов влаги в диапазоне отрицательных температур (кривых незамерзшей воды). Используются явная конечно-разностная схема с регуляризацией, что позволяет в несколько раз увеличить шаг во времени и во столько же раз сократить время счета, а также энтальпийная форма представления и метод балансов. Это приводит к наглядной физической интерпретации результатов и существенно повышает точность определения положения границ промерзания-оттаивания. Настоящая версия программы решает двумерные задачи в декартовых или в цилиндрических координатах (в последнем случае задача является трехмерной осесимметричной).

### 3.3. Выбор теплофизических и механических характеристик пород. Инициализация расчетной модели

Для расчетов напряженно деформированного состояния породы в случае температурного воздействия НТС, была рассмотрена однослойная схема массива, сложенная в первом случае незасоленным песком, а во втором - засоленным суглинком, водно-физические и теплофизические свойства рассмотренных пород приведены в таблице 3.3, с учетом данных, приведенных в СП 25.13330.2012. Выбор данных литологических разностей связан с тем, что большинство техногенных насыпей под объекты инфраструктуры разрабатываемых на п-ове Ямал месторождений представлены незасоленным отсортированным песком, подстилаемым засоленным суглинком (Рисунок 2.2, 2.3).

Таблица 3.3 Водно-физические и теплофизические свойства пород

наименование породы	плотность скелета $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	суммарная влажность $W_{tot}$ , д.е.	степень засоленности $D_{sol}$ , %	температура начала заморзания $T_{бз}$ , °C	теплоемкость $C$ , МДж/(м <sup>3</sup> ·К)		теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)		теплота фазовых переходов $Q_f$ , МДж/м <sup>3</sup>
					талого	мерзлого	талого	мерзлого	
песок незасоленный	1880	0.23	0.07	- 0.02	2.58	1.95	1.7	2.5	144.9
суглинок засоленный	1320	0.3	2.1	- 4.3	0.657	0.492	1.2	1.4	70.3

Как было сказано ранее, криопэги представляют собой достаточно распространенное явление на исследуемой территории, а также значительно усложняют процесс строительства и эксплуатации сооружений. Для расчетов скорости вымораживания криопэгов с использованием всепогодного термостабилизатора были рассмотрены разрезы аналогичные первому случаю (Таблица 3.3), но с линзой песка (криопэгом) различной минерализации (Таблица 3.4).

Таблица 3.4 Теплофизические свойства линз криопэгов

наименование грунта	минерализация $M$ , %	плотность скелета $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	суммарная влажность $W_{tot}$ , д.е.	степень засоленности $D_{sol}$ , %	температура начала заморзания $T_{бз}$ , °C	теплоемкость $C$ , МДж/(м <sup>3</sup> ·К)		теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)		теплота фазовых переходов $Q_f$ , МДж/м <sup>3</sup>
						талого	мерзлого	талого	мерзлого	
песок незасоленный	81.1	1530	0.454	0.037	- 4.8	3.59	2.94	2.5	2.7	4.65
	83.8	1530	0.455	0.038	- 5.0	3.58	2.97	2.5	2.7	4.66
	86.4	1530	0.456	0.040	- 5.1	3.58	2.98	2.5	2.7	2.34
	91.9	1530	0.458	0.043	- 5.4	3.58	2.99	2.5	2.7	2.35

Таблица 3.5 Механические свойства пород

наименование породы	температура хладагента $T_G$ , °C	модуль упругости $E$ , МПа	коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^5$ , 1/К	коэффициент Пуассона $\nu$	мгновенная прочность на разрыв $\sigma_r$ , МПа
незасоленный песок	- 40	25 000	2.2	0.15	3.3
	- 60	25 000	2.2		3.5
	- 80	25 000	2.3		3.6
засоленный суглинок	- 40	5 000	2.4		6.2
	- 60	5 000	2.6		7
	- 80	5 000	1.6		7

Прочностные и деформационные свойства пород для широкого диапазона отрицательных температур приведенные в таблице 3.5 выбирались согласно данным по прочностным и деформационным характеристикам, полученным в лабораторных условиях (Рисунок 3.5, 3.6, 3.7), которые представлены в работе (Комаров, Исаев, 2010). Величина коэффициента Пуассона  $\nu$  принималась равной 0.15.

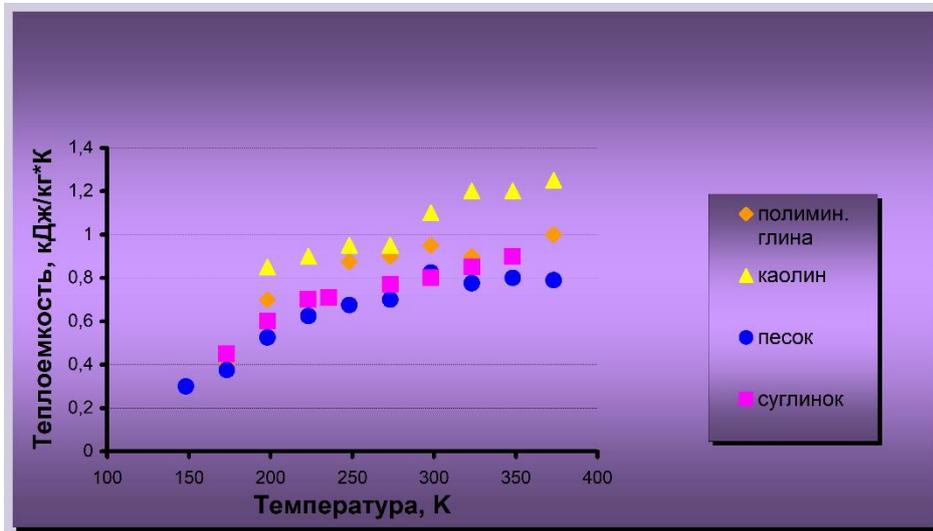


Рисунок 3.5 Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры пород различного состава (Комаров, Исаев, 2010)

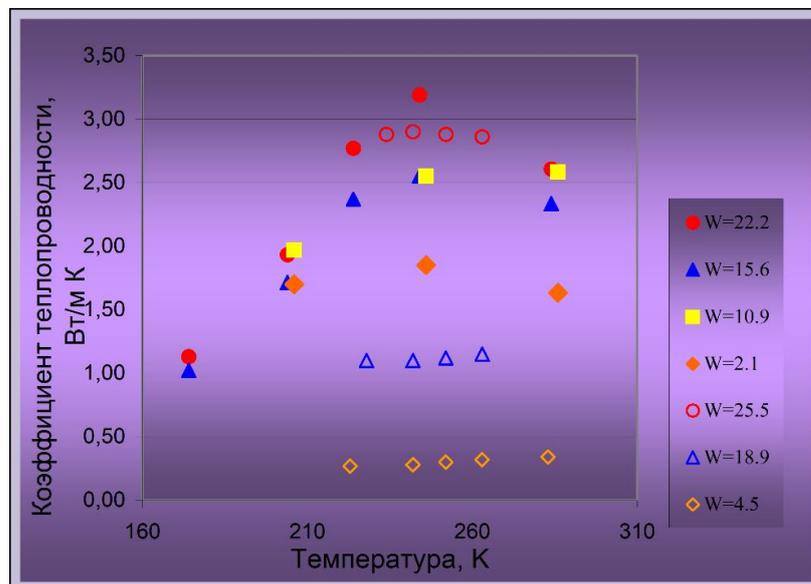


Рисунок 3.6 Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для пород различной влажности (Комаров, Исаев, 2010)

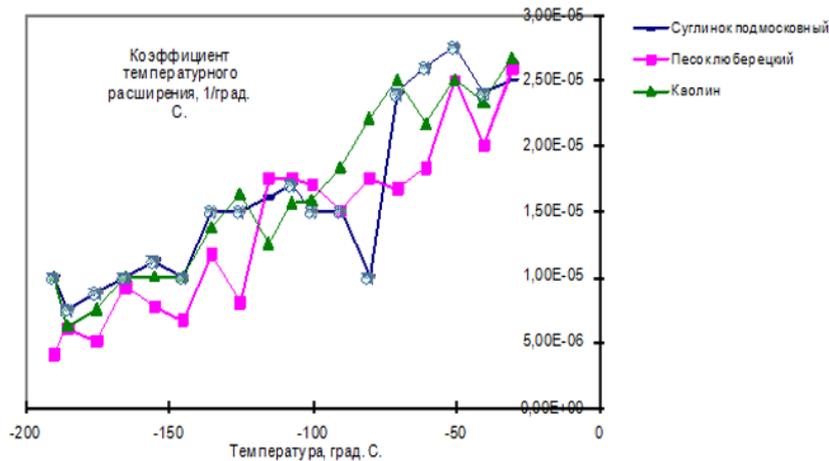


Рисунок 3.7 Зависимость коэффициента температурного расширения от температуры для пород различного состава (Комаров, Исаев, 2010)

### 3.4. Прогноз температурного режима и динамики промерзания с помощью низкотемпературного хладагента

#### Прогноз промораживания однослойного массива. Несвязная модель.

В качестве НТС принято рекуперативное теплообменное устройство (трубка Фильда). Схема которого приведена на рисунке 3.3.

Климатические данные были приняты по данным метеостанции для района Марре-Сале. Для оценочных расчетов была рассмотрена однослойная схема массива, сложенная незасоленным песком и засоленным суглинком, водно-физические и теплофизические свойства, которых приведены в разделе 3.3.

Начальное распределение температуры выбиралось на основании предварительных расчетов, моделирующих изменение температурного профиля пород в рассматриваемом сечении при использовании низкотемпературного термостабилизатора. В каждый момент времени температурное поле в породах рассматривается как квазистационарное. Были рассмотрены варианты для летнего и зимнего периода начала работы НТС. Данное условие задавалось путем установления различного начального распределения температур в массиве в соответствии с температурными профилями, полученными по данным наблюдений. Так же были рассмотрены случаи различной входной температуры СПГ в термостабилизаторе  $T_{ex}$  (минус 40, 60 и минус 80 °С). Результаты динамики температурных полей вокруг НТС для летнего и зимнего периода начала эксплуатации, приведены на рисунках 3.8, 3.9 для песка и суглинка соответственно. На графиках мы видим, что в окрестности ТС можно явно выделить зону, где температура изменяется линейно и таким образом определить область максимального градиента температур,

который мы будем рассматривать в соответствии с принятой для оценки возникающих температурных напряжении теорией (п. 3.3).

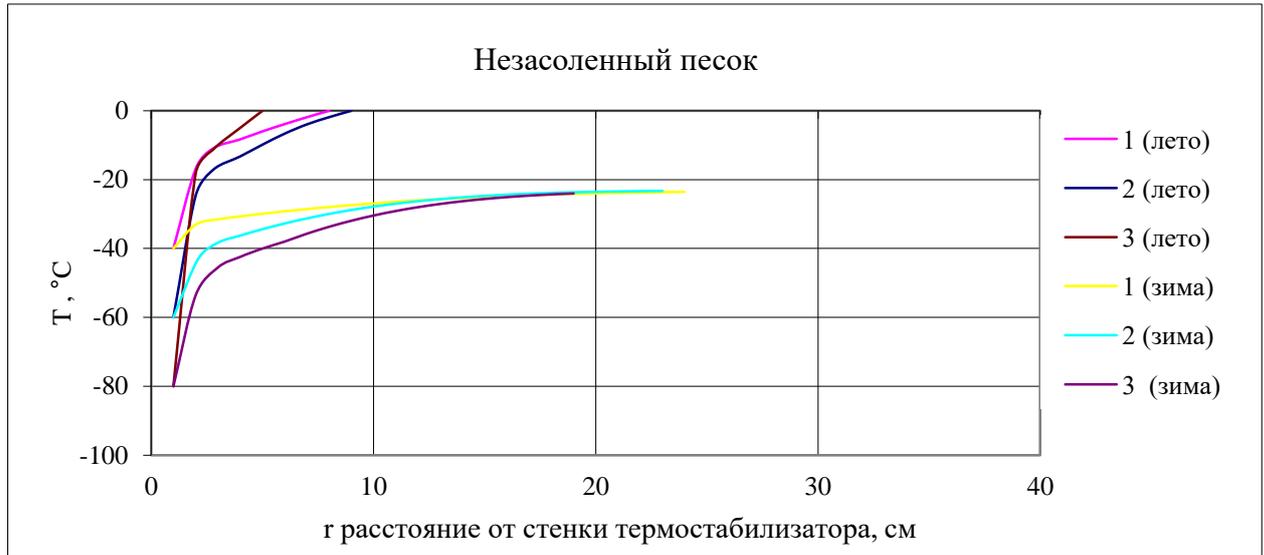


Рисунок 3.8 Профиль температуры (Т) вблизи границы термостабилизатор-грунт в периоды с отрицательными (зима) и положительными (лето) температурами для незасоленного песка при различных температурах хладагента ( $T_G$ ): 1 - минус 40°C, 2 – минус 60°C, 3 – минус 80°C

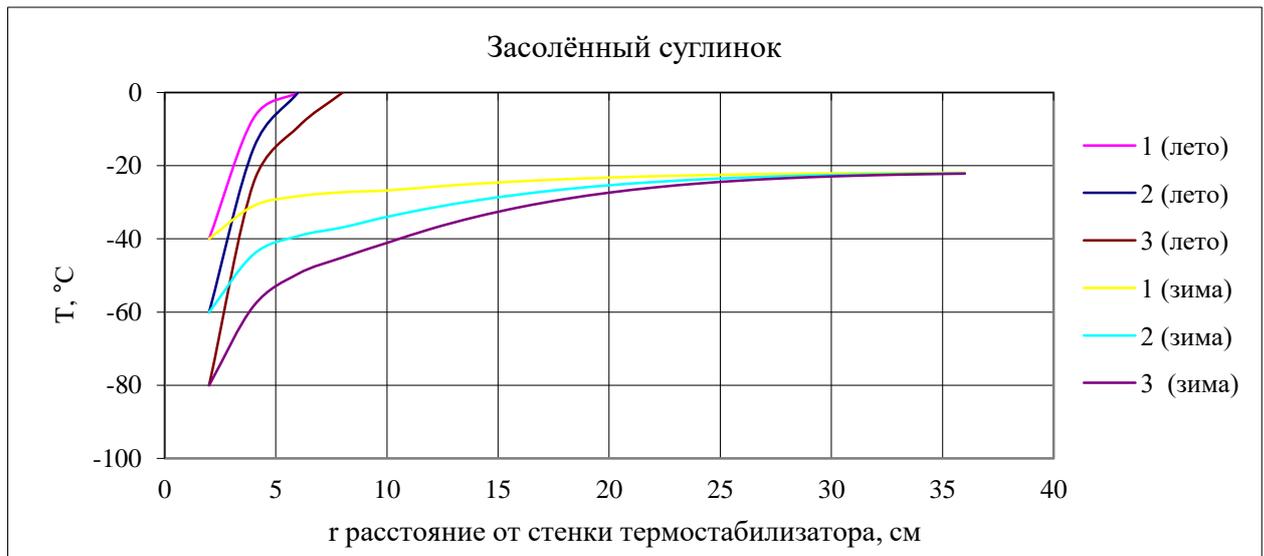


Рисунок 3.9 Профиль температуры (Т) вблизи границы термостабилизатор-грунт в периоды с отрицательными (зима) и положительными (лето) температурами для засоленного суглинка при различных температурах хладагента ( $T_G$ ): 1 - минус 40°C, 2 – минус 60°C, 3 – минус 80°C

Оценив значение градиента температур были вычислены, возникающие в грунте температурные напряжения, которые в свою очередь сравнивались с известными значениями предельной прочности на отрыв для мерзлых грунтов в диапазоне низких отрицательных температур. По результатам оценки напряжений, были определены диапазоны допустимых

входных температур хладагента и рекомендованное время начала эксплуатации термостабилизаторов для соответствующих грунтов (Таблица 3.6).

Таблица 3.6 Сопоставление расчетных и экспериментальных прочностных и деформационных свойств пород

		Температура хладагента в трубке	Градиент температур на границе ТС-грунт, ΔT	Максимальные температурные напряжения σ*, МПа	Прочность на разрыв σ, МПа	Возможность трещинообразования
Пески незасоленные	лето	-40	26	10.34	3.3	√
		-60	39	14.83	3.5	√
		-80	62	23.59	3.6	√
	зима	-40	8	3.18	3.3	
		-60	19	7.23	3.5	√
		-80	30	11.4	3.6	√
Суглинок засоленный	лето	-40	32	7.98	6.2	√
		-60	45	12.1	7	√
		-80	56	9.3	7	√
	зима	-40	7.5	1.9	6.2	
		-60	20	5.4	7	
		-80	30.5	5.06	7	

Оценка величины температурных напряжений показала, что в зимний период допустимая температура хладагента для незасоленных песков лежит в промежутке от минус 40 до минус 50 °С. Для суглинистых сильнозасоленных грунтов допустима установка ТС во всем рассмотренном диапазоне отрицательных температур. В летний период градиенты температур на границе ТС-грунт могут приводить к возникновению напряжений выше значения мгновенной прочности на разрыв для обоих рассмотренных грунтов во всем температурном диапазоне. Ввод в эксплуатацию ТС в летний период времени целесообразно проводить при более высоких температурах хладоносителя, хорошо известных из практики эксплуатации сезонных охлаждающих устройств (Хрусталеv, 2005).

### Прогноз промораживания однослойного массива. Связная модель.

Промерзание грунта и возникающие впоследствии напряжения можно сформулировать в рамках связной задачи, что позволяет учесть взаимное влияние изменения НДС и перераспределения температур в массиве. Связанная система уравнений термоупругости в краткой форме записывается в виде (Omlin S., 2010):

$$\frac{dT}{dt} = \left( -\nabla_k q_k + \alpha T \frac{dP}{dt} \right) / (\rho C_p),$$

$$\frac{dP}{dt} = \left( \alpha \frac{dT}{dt} \right) / \beta,$$

где  $q$  – плотность теплового потока,  $T$  – температура,  $P$  – девиаторная часть тензора напряжений,  $t$  – время,  $C_p$  – теплоемкость,  $\rho$  – плотность,  $\lambda$  – теплопроводность,  $\alpha$  – коэффициент температурного расширения,  $\beta$  – коэффициент сжимаемости. Скорости перераспределения полей напряжений и температур различаются на порядки, поэтому в данном случае целесообразно рассмотреть изменение напряжений в массиве только за счет интенсивных температурных воздействий. Изменение температурного поля в данной постановке учитывает, как тепловой поток, так и изменения НДС массива.

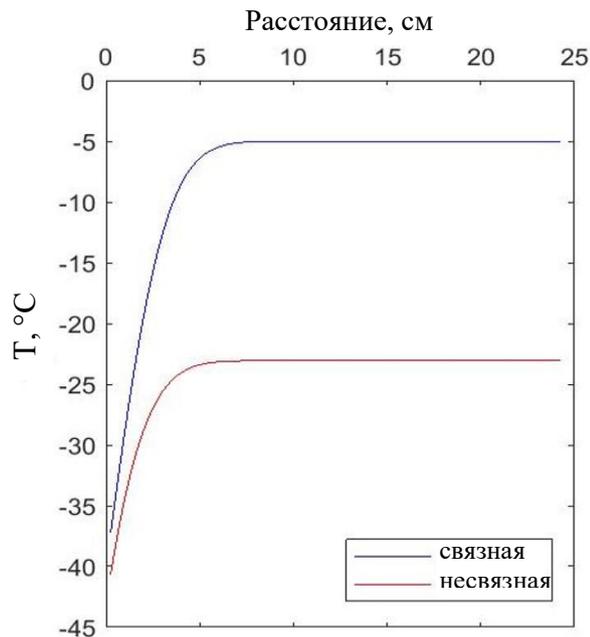


Рисунок 3.10 Сравнение результатов расчета изменения температуры связной и несвязной задач

Расчет показал, что в рассматриваемые промежутки времени в малой окрестности НТС температура изменяется линейно, что соответствует допущениям, принятым в теории тонких оболочек. Сравнивая, полученные при реализации связной и несвязной задач распределения температур (Рисунок 3.10) следует отметить, что они имеют аналогичный качественный характер, а в количественном отношении имеет удовлетворительное расхождение. Разницу в рассчитанных значениях температур можно объяснить тем, что во втором случае учитывалась: динамика температурной зависимости фазового состава влаги; зависимость изменения теплопроводных свойств пород от температуры и фазового состава, а также водно-солевой состав поровых растворов. При реализации связной задачи теплофизические характеристики принимались кусочно - постоянными для талой и мерзлой зоны массива, но было рассмотрено взаимное влияние изменения температурных полей и полей напряжений и деформаций.

### Прогноз промораживания многослойного массива

Криопэги это линзы природных высокоминерализированных вод, находящиеся при отрицательных температурах. Область повсеместного распространения засоленных мерзлых грунтов и криопэгов Западной Сибири располагается севернее широты пос. Новый Порт на Ямале. Криопэги характерны для всей криолитозоны полуострова Ямал. Они залегают на разной глубине в виде изолированных линз, не имеющих связи друг с другом, поверхностными и подземными водами. По своему химическому составу криопэги близки к морским водам, их минерализация составляет 10-250 г/л, состав хлоридно-натриевый с незначительным количеством сульфатов.

Задачей данного прогнозного расчета является оценка времени промерзания линзы криопэгов с различной степенью минерализации (М) при промораживании грунта с помощью НТС. Были рассмотрены разрезы, представляющие собой переслаивание незасоленных песков с прослоями (линзами), сложенными песками с различной засоленностью и влажностью равной полной влагоемкости. Для оценки времени промерзания в условиях отсутствия НТС был решен ряд одномерных задач промерзания пород сверху, а для учета охлаждающего влияния НТС решались двумерные задачи постановка, которых детально рассмотрена в пункте 3.2.

Таблица 3.7 Результаты моделирования зависимости времени промораживания криопэгов от температуры хладагента и степени минерализации

Молярность раствора, М	Температура хладагента Т, °С	Время вымораживания криопэга, дни					
		НТС на базе СПГ			сезонные ТС (-18 °С)		
Радиус промораживания, м		1.5	3	12	1.5	3	12
81.1	-40	34.00	130.00	974.00	100	300	1610
	-60	28.00	86.00	670.00			
	-80	22.00	66.00	620.00			
	-100	18.00	54.00	588.00			
83.8	-40	34.00	130.00	972.00	100	310	1940
	-60	26.00	108.00	668.00			
	-80	22.00	66.00	616.00			
	-100	18.00	54.00	584.00			
91.9	-40	40.00	136.00	968.00	120	530	2290
	-60	28.00	88.00	668.00			
	-80	22.00	68.00	610.00			
	-100	18.00	56.00	574.00			

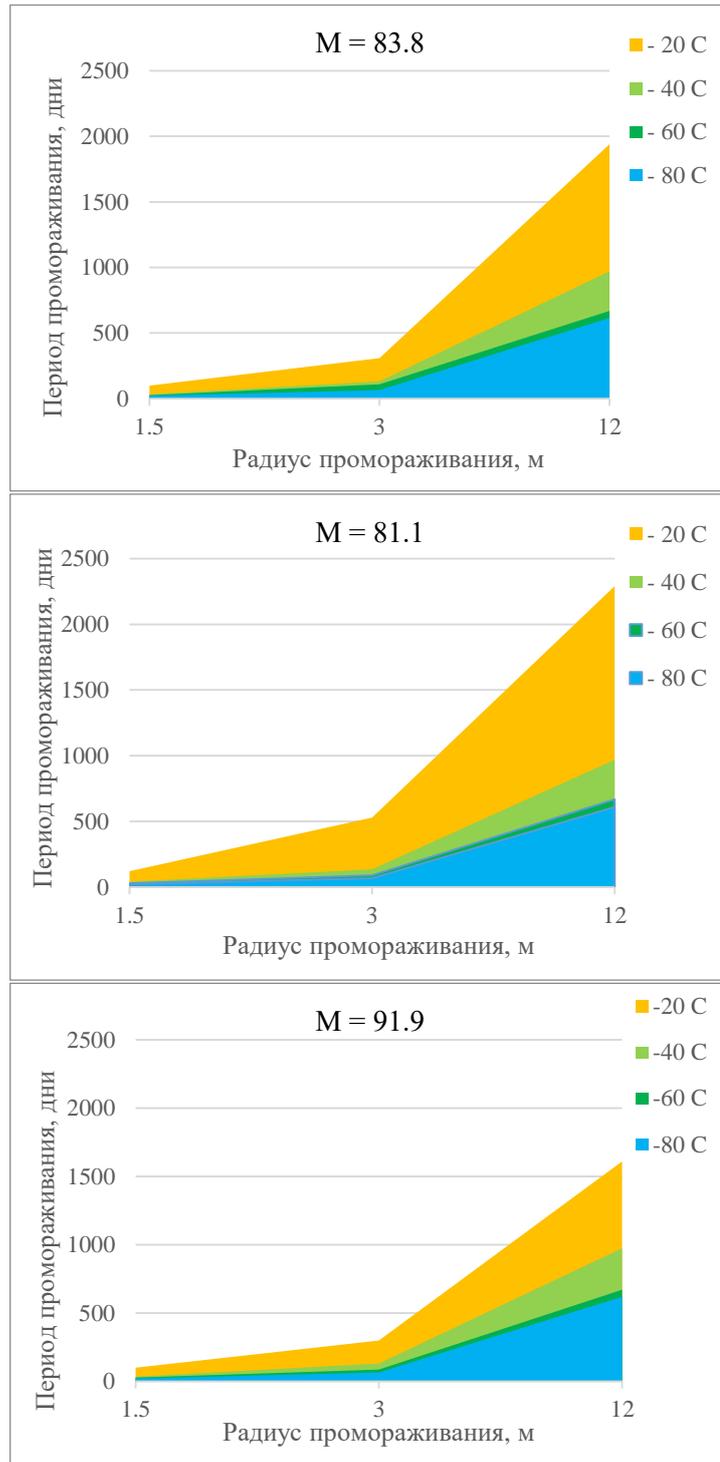


Рисунок 3.11 Период промерзания массива грунта с различной М - минерализацией (г/л) при различных значениях температуры хладагента (°С).

Результаты моделирования, приведенные в таблице 3.7 показывают, что, в случае использования термостабилизатора на базе сжиженного газа, время промораживания линзы криопэга мощностью 2 м, с минерализацией, меняющейся в диапазоне от 81,1 до 91,9 г/л, практически не зависит от ее величины, но значительно увеличивается с понижением температуры подаваемого хладагента. Радиус промерзания в 1,5 метра достигается за 34-40 дней

при температуре хладагента минус 40 градусов, а при понижении температуры до минус 60 и 80 градусов за 26-28 и 22 дня соответственно. При температурах хладагента минус 60 градусов и ниже, полное по мощности промораживание линзы криопэга на радиус 3 м происходит в течении одного зимнего сезона после установки стабилизатора.

Оценка скорости вымораживания криопэга (Рисунок 3.11) явно демонстрирует, что использование хладоресурса сжиженного природного газа для термостабилизации грунтов представляется очень перспективной технологией в сложных геокриологических условиях. Это достигается за счет круглогодичного функционирования, высокой интенсивности промораживания и потенциальной возможности вымораживания криопэгов предельной минерализации. Так же данная технология позволяет частично утилизировать технологические утечки газа.

Результаты моделирования показывают, что использование этой технологии позволяет успешно промораживать линзы криопэгов высокой минерализации до 91, 1 г/л. 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, Ананьев, Бек, Исаев, 2016).

## Глава 4. Геологическая характеристика Баженовского месторождения

Баженовская свита (БС) располагается на огромной территории (более 1 млн. км<sup>2</sup>) Западно-Сибирской нефтегазовой провинции и простирается от восточного берега полуострова Ямал до Омской области (Рисунок 4.1). Отложения Бажен-Абалакской свиты залегают на глубине от 600 до 3500-3800 метров.

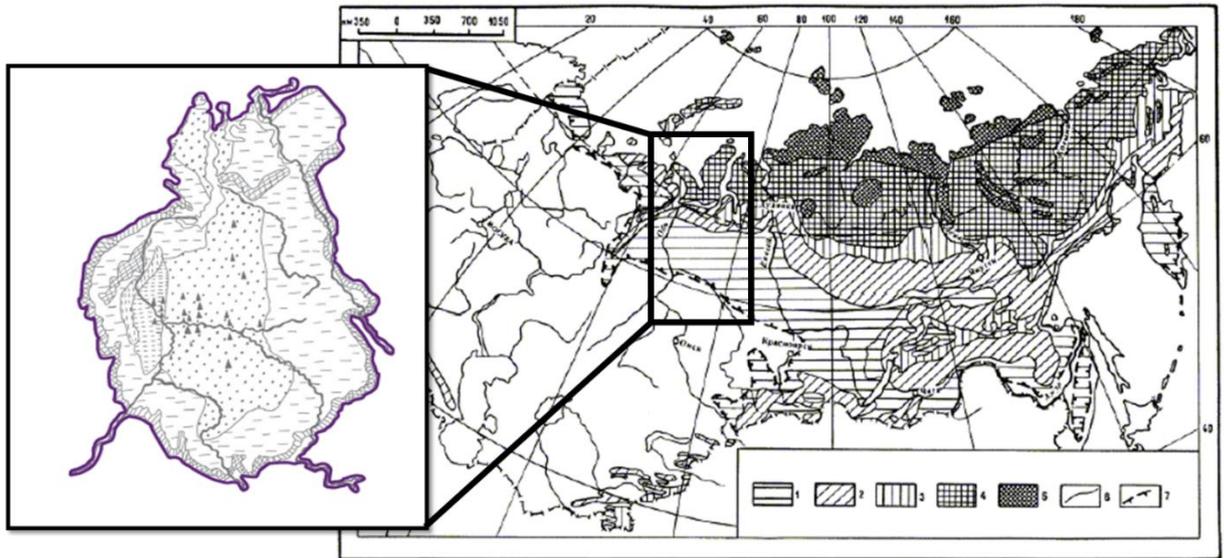


Рисунок 4.1 Схема местоположения района (на основании карты распространения ММП К.А. Кодратьева, 1976), 1 - зона редкоостровного и массивно-островного распространения ММП со среднегодовыми температурами( $t_{cp}$ ) от 3 до минус 1°С и мощностью мёрзлой толщи (М) от 0 до 100 м; 2-5-зона сплошного распространения ММП: 2 -  $t_{cp}$  от минус 1 до минус 3, М от 50 до 300 м; 3 -  $t_{cp}$  от минус 3 до минус 5°С, М от 100 до 400 м; 4 -  $t_{cp}$  от минус 5 до минус 9°С, М от 200 до 600 м; 5 -  $t_{cp}$  от ниже минус 9°С, М от 400 до 900 м и более; 6 - граница зон ММП; 7 южная граница криолитозоны

В аспекте стратиграфии Западно-Сибирской плиты геологи используют два понятия: баженовская свита и баженовский горизонт. Последний имеет более широкое значение и включает в себя отложения баженовской, верхов лангурской, лопсинской, марьяновской, максимоярской, яновстанской свит, средних частей разреза шаймской и ярротинской, а также низы федоровской и тутлеймской свит.

Баженовская свита (J3v) развита на громадной территории Западно-Сибирской плиты от Омска на юге до Тарко-Сале на севере и от Вахска на востоке до Малого Атлыма на западе. Свита представлена высокоуглеродистыми глинисто-кремнистыми черными или с коричневатым оттенком породами повышенной битуминозности, плитчатыми, листоватыми, массивными, с прослоями радиоляритов, глинистых известняков и большим количеством рыбного детрита по поверхностям напластования (Осипова, 2015). Современная площадь распространения БС

составляет 1.2 млн км<sup>2</sup>. Возраст свиты определяется фауной аммонитов. Отметки подошвы БС колеблются в интервале 1100-3850 м, при этом мощность свиты уменьшается в западном направлении. Мощность ее колеблется в интервале 20-30 м, реже достигает 60-80 м. БС представляет собой одним из самых перспективных объектов для добычи сланцевых нефти и газа (Занин, Замирайлова, Эдер, 2013; Калмыков, 2016).

Мощности слоев (пластов) аргиллитов и глинисто-кремнистых пород колеблются в широком диапазоне от сантиметров до метров, а иногда — и до нескольких десятков метров. Аргиллиты, занимающие в свите подчиненное положение, могут наблюдаться как в нижней, так и в средней и верхней ее частях, а в некоторых разрезах вообще отсутствуют. В разрезе встречаются аномальные пачки, характеризующиеся глинисто-алевритово-мелкопесчаными породами мощностью 2.55 и 8.25 м (Занин и др., 2013).

В рамках исследований (Эдер, Замирайлова, Занин, Жигульский, 2015) было выделено шесть типичных разрезов БС: Пермьяковский, Салымский, Западно-фаинский, Северонивагальский, Толпаровский и Первомайский. Для исследований в данной работе были рассмотрены данные двух скважин Салымского типа разреза.

#### **4.1. Литологические и геохимические особенности баженовской свиты**

Битуминозные, преимущественно глинистые отложения баженовской свиты занимают внутреннюю депрессионную зону Западно-Сибирской плиты (Филина, Корж, Зонн, 1984). Эта территория ограничена западными склонами Нурминского и Медвежьего мегавалов, юго-западным склоном Демьянского мегавала, южным бортом Омской впадины, юго-восточными и восточными склонами Александровского, Тагринского и Уренгойского мегавалов. Кровля отложений баженовской свиты вскрыта на глубинах 2100-3400 м. Глубина залегания кровли увеличивается к осевой зоне Мансийской синеклизы и на севере Западно-Сибирской плиты. Наиболее резкое изменение глубин от 2400 до 2700 м происходит в западной и северной частях Нижневарттовского свода.

По текстурным особенностям все породы БС относятся к двум типам - горизонтальнослоистым или к массивным. Горизонтально-слоистые текстуры, развитые в глинистых породах БС, являются их неотъемлемым свойством. Слоистые, нередко микрослоистые текстуры характерны для всех тонкозернистых пород, сложенных пластинчатыми глинистыми минералами, осаждающимися в спокойной гидродинамической обстановке параллельно друг другу. Седиментационная слоистость обусловлена осаждением на плоскостях наслоения фосилизованного органического материала и его неравномерной концентрацией в различные моменты накопления осадка. Массивные текстуры характерны для

кремнистых и карбонатных типов пород. Наблюдаются они также в глинистых породах по мере развития процессов их окремнения и карбонатизации. Аргиллиты – наиболее часто встречаемая в разрезе БС группа пород.

С точки зрения структурно-текстурных особенностей и состава, отложения БС представлены породами тёмно-серого до чёрного цвета, иногда с буроватым оттенком, что связано, главным образом, с концентрацией в них органического вещества (ОВ) и степенью его катагенеза. Многие разности обладают тончайшей слоистостью, что определяет их способность раскалываться на тонкие пластинки с довольно ровной поверхностью скола. Реже поверхность скола бывает занозистой и раковистой.

Характерно наличие тонких прослоев, обогащенных глинистыми минералами, кварцем, карбонатами, пиритом, органическим веществом, раковинами. Встречаются стяжения карбонатов и пирита, размерами от нескольких миллиметров, до первых сантиметров. В карбонатных разностях, особенно в подошвенной части свиты, присутствуют трещины, заполненные вторичным кальцитом, иногда каверны или поры с корочкой вторичного кальцита или друзы кварца, в которых иногда отмечаются следы битумоидов. Для пород обычен запах нефти.

По компонентному составу породы баженовской свиты отличаются многокомпонентностью, что часто не позволяет однозначно отнести их к какому-либо из известных таксономических подразделений. В составе почти всех разностей в различных сочетаниях участвуют: обломочный материал, глинистые минералы, аутигенный кварц, опал, карбонаты, пирит, органическое вещество.

#### ***Обломочный материал.***

Обломочный материал алевритовой размерности относительно равномерно распределен в породах средней и верхней частей свиты, доля его, как правило, составляет менее 5%. В минеральном составе обломочной части пород преобладает кварц (70-80%), и зерна полевых шпатов, листочки слюд (мусковит, реже биотит).

#### ***Глинистые минералы.***

Глинистая составляющая пород баженовской свиты представлена, главным образом, тонкодисперсными (0.1-0.3 мк), гидрослюдами и смешано-слойнными образованиями ряда гидрослюда-монтмориллонит с изменяющимся числом набухающих пакетов (20-60%). В качестве примеси присутствуют каолинит, хлорит, глауконит.

#### ***Минералы кремнезёма***

В породах диагностируются: халцедон, кварц, опал, тридимит и кристобалит. Помимо терригенного кварца основной формой первичного кремнезёма был опал, слагавший раковины

радиолярий. Раскристаллизация опала должна протекать по схеме: опал-кристобалит-тридимит- $\alpha$ -кварц (халцедон). Результатом неполной перекристаллизации может явиться наличие в породе метастабильного опала, кристобалита и тридимита.

### ***Карбонаты.***

Карбонаты, входящие в состав пород БС, представлены, главным образом, кальцитом, в меньшей степени доломитом. Ещё реже встречается сидерит, а в единичных случаях отмечается незначительное присутствие анкерита. Доломит, сидерит и анкерит чаще встречаются в подошве или кровле свиты. Иногда в участках, обогащённых пиритом, сидерит встречается и в средней части разреза.

### ***Пирит.***

Для пород БС характерно присутствие пирита, содержание которого обычно составляет 5%. Чаще всего он присутствует в виде микроглобул (фрамбоидов) и их агрегатов, обычно ориентируясь по слойкам, обогащенным ОВ, а также в виде тонкодисперсной примеси.

### ***Органическое вещество.***

Органическое вещество (кероген) пигментирует породы и слагающие его компоненты. В большинстве случаев оно представлено гелефицированной бесструктурной массой различного цвета – чёрного, жёлтого, оранжевого до ярко-бурого. В породах оно почти нацело слагает отдельные прослои или сосредоточено в микропрослоях, образует неясные скопления, прожилки и выполняет трещины и пустоты. Часто ОВ заполняет внутренние части раковин радиолярий. Соотношения с кристаллическим кальцитом в раковинах двухстворчатых моллюсков показывают, что ОВ могло скапливаться в карбонатных агрегатах как сравнительно рано, сохраняясь в них в виде включений, так и значительно позднее, заполняя трещины

Таким образом, в составе баженовской свиты можно выделить три основных класса пород: карбонатные, кремнистые и глинистые, границы между которыми часто провести невозможно, т.к. существует целый ряд переходных разностей.

## **4.2. Нефтегазоносная характеристика баженовской свиты**

Баженовская свита верхней юры отличается высокой неоднородностью литолого-фациального состава, и в настоящее время рассматривается как материнская толща для основной массы углеводородного сырья Западной Сибири. В то же время 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.

Эти факторы предопределили внимание к БС со стороны широкого круга специалистов, среди которых одно из видных мест занимают геологи, исследования которых направлены на

изучение литолого-фациального состава пород-коллекторов. Заметно меньшее внимание исследователей привлекает георгиевская свита, подстилающая баженовскую, отражающая весьма характерный этап развития морского бассейна на территории Западно-Сибирской плиты.

### **Литология пород**

По результатам исследований каменного материала Салымского и Красноленинского месторождений (Сонич, 1985) отложения баженовской свиты сложены четырьмя основными типами пород:

1. Кремнистыми разновидностями или силицитами, обогащенными аутигенным кремнистым биогенным материалом (от 60 до 90%); в породах развиты вторичные коллекторы трещинного типа;
2. Карбонатными породами, представленными плотными, часто мелкозернистыми известняками сложного состава, слабо битуминозными мергелями и доломитами с низким содержанием органического вещества, и примесью марганца; в карбонатных породах, преимущественно в подошвенной части свиты, отмечаются коллекторы трещинно-кавернозного типа, каверны достигают 1.0-1.2 см в диаметре;
3. Массивными битуминозными слабо алевритистыми аргиллитами с высоким содержанием кремнезема (от 55 до 65%) и органического вещества (ОВ более 20%);
4. Листоватыми аргиллитами, представленными переслаиванием тонкослоистых битуминозных аргиллитов с микрослойками ОВ и алевритистыми аргиллитами;

По соотношению породообразующих компонентов выделяется до семи литотипов пород (Сонич, 1985), ограниченное распространение в толще свиты имеют слои высокодисперсных гидрофильных глинистых пород.

К наиболее продуктивным слоям относятся карбонатные и кремнистые разновидности, в которых под действием вторичных процессов сформировались различного типа коллекторы. Остальные разновидности пород, входящих в состав отложений БС, в основном, не являются коллекторами – преимущественно это породы матрицы.

Породы баженовской свиты характеризуются высоким содержанием ОВ, развитие которого связывают с постепенным вытеснением внутриводных вод образующейся из органического вещества нефтью. Поровое пространство продуктивных пород баженовской свиты в основном заполнено нефтью, содержание связанной воды в поровом пространстве незначительно и для большинства пород близко, в среднем, к 10%.

Поверхность капилляров чаще всего гидрофобная. Всё это обуславливает очень высокие удельные электрические сопротивления. Подстилающие отложения абалакской свиты

представлены углеродисто-кремнистыми аргиллитами, характеризующимися различным содержанием кремнезема, которые переслаиваются с чистыми и частично заглинизированными карбонатными прослоями малой мощности. Прослои представлены известняками, в различной степени доломитизированными, со значительным содержанием органического вещества (керогена), что характерно, в основном, для переходной от баженовской к абалакской свите зоны и затрудняет определение стратиграфической границы раздела свит (Гуралин, Матвиенко, 1980).

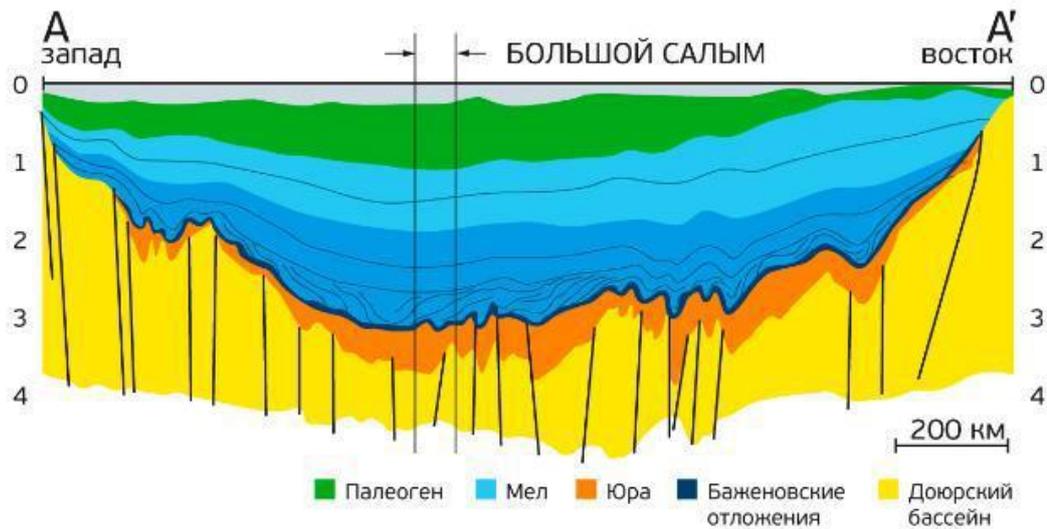


Рисунок 4.2 Залегание баженовской свиты в геологическом разрезе Западной Сибири (Зубков, Пормейстер, Бондаренко, 2002)

### Свойства углеводородов баженовской свиты

Отличительной особенностью углеводородов, содержащихся в баженовской свите является то, что процесс преобразования органического вещества в ней еще не завершен. В связи с этим, в коллекторе, кроме легкой нефти, содержатся углеводороды непосредственно в породообразующей части породы. Кероген, представляет собой в основном сапропелевое вещество, т.е. является органно-минеральными отложениями озерных водоемов. Органическое вещество в баженовской свите образуется преимущественно за счет распада живущих в воде растительных и животных организмов, в меньшей мере за счет принесенных с суши остатков наземных растений (Зубков и др., 2002).

Над нефтекерогеносодержащими породами БС залегают ачимовские отложения глин большой мощности, а под БС расположены породы абалакской свиты. Однако на отдельных участках отложения БС залегают непосредственно на проницаемых породах васюганской свиты или отделяются от них трещиновато-глинистыми породами небольшой толщины. Такие участки служат путями миграции нефти из БС в нижележащие проницаемые породы.

Органическая часть БС представлена двумя формами:

1. Жидкими углеводородами — легкой нефтью, являющейся продуктом генерации органического вещества — керогена, со средним содержанием 7.1% от объема породы;
2. Керогеном со средним содержанием 23.3% от объема породы.

### **Состав нефтеносного коллектора баженовской свиты**

Объемное содержание керогена в породе, определяется литофизическими типами породообразующих компонентов. Содержание керогена в зависимости от типа пород изменяется от единиц процентов в карбонатах до 35-40% в глинисто-кремнисто-керогенном типе. Генерация углеводородов из керогена происходила в условиях повышения температуры до 110-130°C и выше, которое, в свою очередь, из-за отсутствия оттока нефти приводило к формированию аномально высокого пластового давления (АВПД) с коэффициентом аномальности до 1.75. Согласно обобщенным данным промысловых и лабораторных исследований такое аномально высокое пластовое давление вызывало создание микротрещиноватости в основном в горизонтальном направлении (Зубков, 2001). В то же время в некоторых зонах происходило образование вертикальных трещин с высотой до 20-40 м, а также дробление пород толщиной до 1-4 м.

Пустотное пространство пород БС в зависимости от типа пород и пластовой температуры от 50 до 95% заполнено легкой нефтью и представлено микро- и макроуровнями. Гидродинамически связанная среда в основном содержится в макротрещиноватых частях породы, проницаемость которых изменяется в широких пределах — от единиц миллиарда до единиц дарси. Вместе с тем, значительная доля нефти содержится в микропустотном пространстве, которое в начальных пластовых условиях является практически непроницаемым.

### **Флюиды, генетически связанные с отложениями баженовской свиты.**

В центральных районах Западной Сибири подавляющее число залежей открыто в меловых отложениях. На юго-востоке Западной Сибири большинство открытых залежей углеводородов локализовано в верхнеюрских отложениях, флюидоупором и основным источником генерации для которых является баженовская свита. Породы баженовской свиты согласно перекрываются мощными глинистыми отложениями куломзинской свиты (до 300 м), которая является барьером к миграции генерируемых баженовской свитой флюидов в вышележащие отложения. Первичная миграция углеводородов происходит преимущественно в направлении песчаного коллектора подстилающих пород васюганской (наунакской) свиты.

В районе исследований значительное число залежей углеводородов приурочено к отложениям нижней и средней юры, а из палеозоя ведется промышленная добыча нефти

(Герасимовское, Арчинское, Нижне-Табаганское и др. месторождения). В направлении обрамления плиты происходит опесчанивание юрских отложений. Основные флюидоупоры в разрезе юры становятся невыдержанными по латерали, что делает возможной миграцию нефтей и газов различных генетических типов вверх до регионально развитых пород баженовской свиты, поэтому залежи углеводородов в верхнеюрских отложениях априори нельзя отождествлять с генерацией углеводородов только породами баженовской свиты.

Оценка вклада флюидов различных типов в нефтегазоносность юго-востока Западной Сибири и установление закономерностей их распространения требует выполнения их генетической типизации. Полученные в результате этих исследований молекулярные, атомные и изотопные параметры флюидов являются прямым подтверждением участия тех или иных потенциально нефтематеринских отложений баженовской свиты.

### **4.3. Геомеханические характеристики пород баженовской свиты**

В связи с существенной неоднородностью по литологическому составу пород баженовской свиты ключевым вопросом является учет свойств отдельных типов пород, входящих в ее состав. Литологические и петрофизические исследования, а также результаты исследований, приведенные в (Centurion, 2011), позволили выделить основные типы пород, характеризующих разрез баженовской свиты:

1. Глинисто-кремнистые породы, обогащенные органическим веществом, составляют основную часть баженовской свиты (около 65%). Представляют из себя тонкослоистые породы, сложенные биогенным кремнеземом (до 50%), глинами (до 30%), остатками организмов с карбонатным скелетом (до 10%). Пористость составляет порядка 6-8%, проницаемость – менее 0.01 мД.
2. Карбонатно-кремнистые породы, также обогащенные органическим веществом, составляют около 15% баженовской свиты. Это тонкослоистые породы, сложенные биогенным кремнеземом (до 30%), остатками кокколитофорид (до 25%) и глинами (до 10%). Значения пористости и проницаемости те же, что и в предыдущем случае.
3. Радиоляриты (около 15%). Породы, сложенные остатками радиолярий (до 90%) с незначительной примесью глин (до 5%). По составу могут быть кремнистыми, или замещенными кальцитом или доломитом. Радиоляриты характеризуются наибольшими значениями пористости (до 15%) и проницаемости (более 1 -5 мД).
4. Доломиты (не более 5%) сложены перекристаллизованным доломитом. Пористость до 6%, проницаемость менее 0.01 мД.

В работе (Centurion, 2011) приведены характерные значения основных геомеханических характеристик пород: модуля Юнга  $E$  и коэффициента Пуассона  $\nu$ .

Таблица 4.1 Деформационные характеристики пород бажендовской свиты

Тип породы	Минимальное/среднее/максимальное значения	
	$E \cdot 10^{-1}$ , ГПа	$\nu$
Аргиллиты	0.2/2.0/7.3	0.08/0.24/0.45
Алевриты	0.1/2.6/8.2	0.1/0.26/0.49
Песчаники	0.1/4.8/16.8	0.03/0.2/0.37
Известняки	1.8/6.1/9.3	0.13/0.26/0.45
Глины	1.5/1.9/2.3	-/0.35/0-
Доломиты	1.3/5.5/11.9	-0.12/0.27/0.48

При этом стоит отметить, что при увеличении давления в горной породе происходит закрытие и «залечивание» дефектов строения. Данные экспериментальных исследований показывают, что эти процессы наиболее интенсивно идут при увеличении давления от 0.1 до 50 МПа и в основном заканчиваются при 0.4-0.5 ГПа, в дальнейшем протекая очень медленно. Упрочнение структурных связей в породе вызывает увеличение упругих модулей и незначительное увеличение плотности. Изменения температуры до 150-200 градусов практически не сказывается на свойствах скелета породы. При дальнейшем повышении температуры наблюдается более или менее (в зависимости от минералогического состава) интенсивное снижение упругих параметров скелета пород.

Отдельно следует отметить изменчивость упругих модулей (модуль Юнга  $E$ , коэффициент Пуассона  $\nu$ , 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. Наибольшая анизотропия наблюдается у модуля Юнга, в то время как коэффициент Пуассона изменяется не так сильно.

## **Глава 5. Трещинообразование пород за счет высокоинтенсивных гидромеханических воздействий**

Сущность процесса ГРП заключается в нагнетании в пласт жидкости под большим давлением (порядка 60 МПа). В качестве основы для жидкости ГРП в зависимости от свойств коллектора и применяемых технологий используют пресную или минерализованную воду, углеводородные жидкости («мертвая» нефть, солярка), смеси с добавлением азота, двуокиси углерода, кислоты. Чтобы трещины сразу после снятия давления не смыкались, в них закачивают расклинивающий агент (проппант).

Трещины, образующиеся при ГРП, имеют вертикальную и горизонтальную ориентацию. Протяженность трещин достигает нескольких десятков метров, ширина – от нескольких миллиметров до сантиметров. При гидравлическом разрыве пласта (ГРП) происходит создание трещин в горных породах, прилегающих к скважине, за счет давления на забое скважины в результате закачки в породы вязкой жидкости. При ГРП в скважину закачивается вязкая жидкость с таким расходом, который обеспечивает создание на забое скважины давления, достаточного для образования трещин. После образования трещин в скважину закачивают смесь вязкой жидкости с твердыми частичками – для предотвращения смыкания трещин под действием горного давления. ГРП проводится в низкопроницаемых пластах, где отдельные зоны и пропластки не вовлекаются в активную разработку, что снижает нефтеотдачу объекта в целом. При проведении ГРП создаваемые трещины, пересекая слабодренируемые зоны и пропластки, обеспечивают их выработку, нефть фильтруется из пласта в трещину гидроразрыва и по трещине к скважине, тем самым увеличивая нефтеотдачу. Трещины становятся новыми проводниками нефти, значительно улучшая контакт скважины с пластом и расширяя площадь притока жидкости в скважину. В среднем однократный гидроразрыв пласта позволяет увеличить дебит нефтяных скважин в два-три раза. В горизонтальной скважине может быть одновременно проведено несколько гидроразрывов. В этом случае говорят о многостадийном гидроразрыве пласта (МГРП). На сланцевых месторождениях счет стадий в горизонтальных скважинах идет уже на десятки. В общем случае количество стадий определяется исходя из экономической целесообразности и геологических особенностей коллектора.

### **5.1. Методика применения мероприятий гидроразрыва пласта для повышения нефтеотдачи пород в приложении к слоистым сланцевым формациям.**

Разработка месторождений сланцевой нефти с использованием гидроразрыва пласта является одним из основных способов увеличения проницаемости и площади отбора углеводород содержащих флюидов. Трещина разрыва, образуемая в результате ГРП, контролируется множеством параметров, что делает сам процесс и возможность точных расчетов каждого из параметров крайне сложным. Параметры можно разделить на контролируемые и неконтролируемые. К контролируемым относятся все параметры растворов, проппантов, давлений и расходов, а также некоторые параметры скважины, такие как направление и зенитные углы вскрытия и прохождения некоторых горизонтов, конструкция и, в некоторых случаях интервалы стимуляции. К неконтролируемым параметрам можно отнести все горно-геологические условия и свойства самих пластов, например, пористость и проницаемость пласта, его толщина и область распространения, пластовые давление и температура, уровень напряжений в пласте и свойства пластовых флюидов.

Основными этапами создания раскрытых трещин в пласте являются:

1. Создание первоначальных трещин необходимой длины и степени раскрытости путем закачки жидкости гидроразрыва.
2. Добавление в жидкость гидроразрыва небольшого количества проппанта.
3. Увеличение концентрации проппанта для компенсации оседания проппанта в результате большой концентрации (удельного веса).
4. Замена суспензии проппанта в стволе скважины в конце закачки.

Процедура выбора оптимального варианта гидроразрыва состоит из трех процессов:

1. Моделирование гидроразрыва с использованием компьютерных программ (двумерные и трехмерные модели) для получения размеров трещин и количества жидкости гидроразрыва и проппанта, необходимого для получения определенной полудлины трещин.
2. Гидродинамическое моделирование системы пласт – горизонтальная скважина для определения влияния трещин на показатели добычи.
3. Экономический анализ различных вариантов ГРП для определения наибольшего экономического эффекта.

Существует несколько основных признаков, по которым можно классифицировать все существующие технологии ГРП:

1. Длина горизонтального участка скважины.

2. Взаиморасположение скважин на конкретных участках месторождения.
3. Тип и оборудование заканчивания скважины.
4. Количество стадий ГРП и их длина и размеры образовавшихся трещин.
5. Тип жидкости гидроразрыва и проппанта.
6. Наличие специализированных добавок.
7. Технологические параметры ГРП (скорости и объемы закачки жидкости гидроразрыва, давления).
8. Сочетание различных методов (например, сочетание ГРП и кислотных обработок).

При проведении исследований по поиску оптимального варианта ГРП для конкретных условий, на первом этапе проводят анализ чувствительности ГРП – с помощью симуляторов гидроразрыва пласта и гидродинамических симуляторов месторождений исследуют процесс ГРП и его результативность при изменении различных характеристик для определения параметров, оказывающих решающее влияние на эффективность применения ГРП в конкретных условиях. Основные параметры, исследуемые с помощью математического моделирования: расположение горизонтальных скважин и длина их горизонтальных участков, количество и длина стадий ГРП. Такие параметры как тип оборудования для заканчивания, выбор жидкости гидроразрыва и проппанта, наличие специализированных добавок выбираются при помощи анализа успешности уже проведенных операций по ГРП для конкретных условий применения.

Основные материалы при проведении ГРП: жидкость гидроразрыва, добавки к ней и проппант. Жидкость гидроразрыва служит для передачи давления от насосов к горной породе и для доставки проппанта в раскрытые трещины. Затем жидкость гидроразрыва удаляют (вымывают) для создания притока углеводородов.

Таким образом, для определения эффективности мероприятий по интенсификации притока при помощи ГРП, необходимо понимать площадное, объемное и поинтервальное изменение вдоль траектории скважины следующих параметров:

1. Тип литологической фации.
2. Напряженное состояние пластов, с учетом анизотропии механических свойств.
3. Механические свойства, такие как модуль Юнга, коэффициент Пуассона и прочностные свойства.
4. Характеристики естественной трещиноватости – плотность трещиноватости, углы простирания и падения, а также состояние или раскрытость трещин в пластовых условиях.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что для получения эффективной стимуляции пласта, требуется четкое понимание геометрии трещин ГРП каждой стадии, еще при

заложении скважины. То есть, необходимо иметь достоверную модель механических свойства, напряжённно-деформационного состояния и свойств трещиноватости по разрезу.

Основная сложность описания развития трещин при гидроразрыве заключается в том, что это сложный процесс с множеством параметров и эффектов, которые взаимосвязаны между собой. Можно выделить несколько определяющих процесс факторов: деформирование и разрушение горной породы под действием внутреннего давления в трещине, течение жидкости и перемещение проппанта в трещинах гидроразрыва (Рисунок 1.3).

Для относительно простых условий, проблема решается с удовлетворительной точностью. Простыми в данном случае можно назвать условия, в случае, когда нет больших неоднородностей среды, включений и трещин, структура породы имеет достаточно регулярное строение так, что на масштабе трещины может быть представлена квазиоднородной, а поведение среды близко к упругому. Кроме того, необходимо, чтобы начальное напряженное состояние было однородным, а вокруг трещины напряженное состояние приближенно описывается в рамках теории трещин.

## **5.2. Методика прогноза процессов трещинообразования в результате высокоинтенсивных гидромеханических воздействий**

Успешное описание роста трещины гидроразрыва требует выделения важнейших факторов, которые определяют процесс. Эти факторы в значительной мере зависят от масштаба или детальности рассмотрения задачи. Если основное внимание сконцентрировать на геомеханических факторах деформации и разрушения породы, то следует выделить два или три масштаба (Рисунок 5.1): макромасштаб, в котором может быть рассмотрена трещина целиком и масштаб, в котором могут быть рассмотрены процессы деформирования и разрушения породы с учетом ее неоднородного строения, т.е. мезоуровня. Первый – макромасштаб определит общее распределение напряжений вокруг трещины с учетом ее геометрии. На этом масштабе также рассматриваются задачи о течении флюида (включая перенос проппанта) в трещине, а также его утечек (Стефанов Ю.П., 2002).

На мезоуровне определяются особенности деформации и разрушения с учетом сложного строения породы. Возможно, следует рассмотреть также промежуточный масштаб деформирования и разрушения породы, в котором будет более точно учитываться изменение условий нагружения с учетом геометрии трещины и изменений порового давления, и учтены особенности процессов, протекающих на мезоуровне. Такое рассмотрение обеспечит не только детальное изучение разных факторов, определяющих процесс, но и существенно упростит задачу.

Таким образом, сконцентрируем внимание на процессах, происходящих в окрестности вершины трещины. Данное направление исследований выбрано в связи с первостепенным влиянием процессов разрушения среды в окрестности вершины и сопутствующих явлений на характер роста трещины и слабой изученностью данных факторов. В качестве важнейших вопросов изучения выделяются:

- Анализ возможных механизмов продвижения трещины. Оценка типа трещины в зависимости от НДС.
- Оценка влияния пластической деформации.

Наибольшую актуальность исследования данных вопросов имеют для сложнопостроенных неоднородных сред, какими являются породы нетрадиционных ресурсов, баженовские и сланцевые породы. Это обусловлено неоднородным строением, наличием хрупких и пластичных прослоек и включений и/или трещиноватостью (Стефанов Ю.П., 2002).

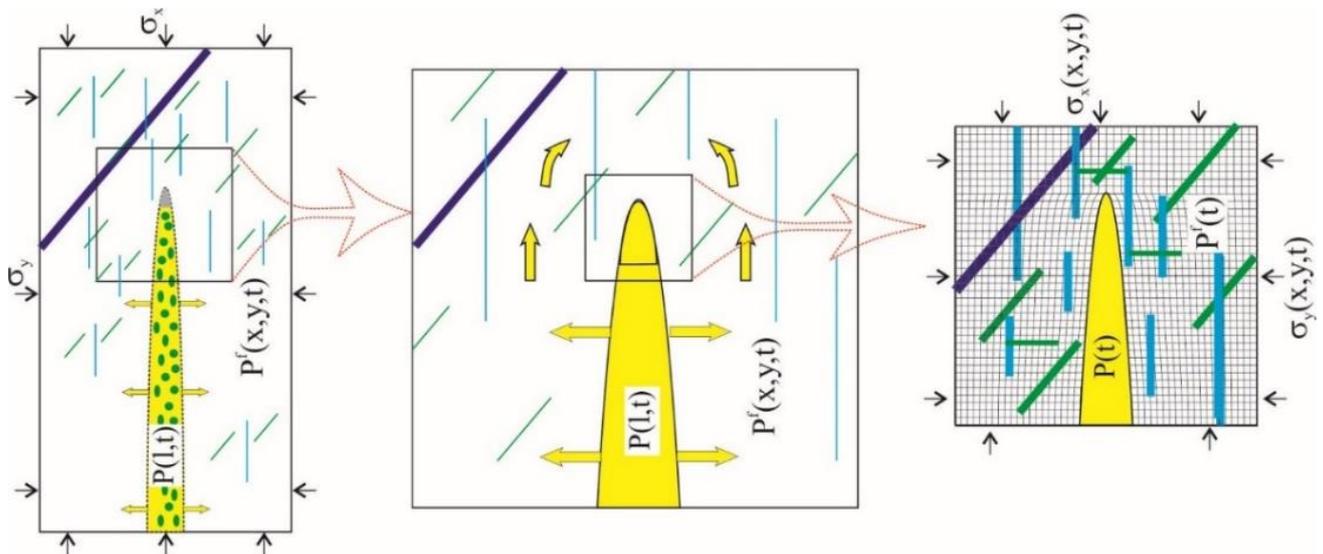


Рисунок 5.1 Масштабы рассмотрения процесса роста трещины гидроразрыва. Левый рисунок – макроуровень, промежуточный и правый – мезоуровень

Исследование каждого из представленных вопросов требует разработки соответствующих подходов и алгоритмов численных расчетов. В связи с этим возникает ряд вопросов о постановке задач и методе расчетов. Ответы на данные вопросы диктуются физической сутью протекающих процессов, а также возможностью решения поставленных задач с удовлетворительной точностью их описания.

Процессы разрушения и пластической деформации развиваются во времени и в пространстве, т.е. имеют динамический характер. Тогда, чтобы учесть последовательность развития этих процессов необходимо осуществлять поиск решений при очень мелком изменении нагрузки или состояния. Таким образом, мы вынуждены приближаться к описанию

динамического процесса, очень сильно уменьшая шаг приращения нагрузки. Причем, при неудачном, слишком большом приращении момент зарождения локализации деформации либо разрушения можно пропустить. Тогда неупругая деформация будет развиваться несколько иначе, сразу охватив значительно большую область, чем это было бы при более точном расчете.

При использовании динамического подхода обычно применяют явные численные схемы, которые требуют значительно меньших ресурсов по оперативной памяти вычислительной техники. Как было описано в главе 3, их существенным недостатком является ограничение на шаг по времени, накладываемое условием устойчивости разностной схемы. Смысл этого ограничения состоит в том, что никакое возмущение среды не должно за один шаг по времени распространиться более чем на одну ячейку.

Следует заметить, что развитие локализованной деформации и разрушение являются динамическими процессами, поэтому применение динамического описания оправдано физической сутью протекающих процессов и позволяет анализировать их развитие с течением времени. Таким образом, смягчение ограничений на временной интервал исследуемого процесса позволяет распространить динамические методы описания процессов на многие задачи, ранее рассматривавшиеся лишь в рамках квазистатических подходов.

Это особенно удобно для описания деформации горных пород, особенностью поведения которых является то, что неупругая деформация практически с самого начала развивается неоднородно, быстро формируются зоны локализации деформации и образуются трещины. Это связано в первую очередь с тем, что горные породы всегда являются микронеоднородными, в них имеются поры и трещины разных масштабов. В связи с этим, при решении задач о деформировании пород важным вопросом является выбор подхода и метода описания процесса, с учетом необходимости учета локализации деформации и разрушения.

Зарождению полос локализации способствует неоднородность напряженно-деформированного состояния. При наличии включений или геометрической особенности место зарождения зоны локализации или трещины определяется этой особенностью. Однако учесть неоднородность геологической среды ввиду несоизмеримости масштабов явным образом не представляется возможным. Можно лишь симитировать ее, задав некоторым образом мелкие включения среды. Это создаст множество очагов зарождения зон локализации.

### **Система уравнений**

Таким образом, для решения задачи о росте трещины гидроразрыва будем решать систему уравнений механики сплошной среды, состоящую из уравнений неразрывности, движения и энергии.

— движения:  $\sigma_{ij,j} + \rho F_i = \rho \frac{du_i}{dt}$ , (5.1)

— неразрывности:  $\frac{d\rho}{dt} + \rho u_{i,j} = 0$ , (5.2)

Здесь  $\rho$  — плотность материала,  $u_i$  — компоненты вектора скорости,  $\sigma_{i,j}$  — компоненты тензора напряжений Коши,  $F_i$  — массовые силы. При некоторых формах определяющих соотношений и уравнения состояния система должна содержать также уравнение энергии.

— энергии:  $\rho \frac{dE}{dt} = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - q_{i,j}$ , (5.3).

Замыкают систему уравнений определяющие соотношения, которые конкретизируют поведение среды, задавая связи между тензорами напряжений и деформаций, или их скоростями. В качестве замыкающих систему уравнений используются определяющие соотношения упругопластического тела, параметры которого зависят от напряженного состояния. Система уравнений решается при заданных начальных и граничных условиях.

Решение системы уравнений осуществляется на расчетной сетке, которой покрывается исследуемая область. Границы области должны быть достаточно далеки от вершины трещины, чтобы избежать их влияния. Граничные условия должны приближенно соответствовать условиям нагружения, действующим в заданной области. Эти условия могут быть определены путем решения задачи на разных масштабах, начиная от масштаба, включающего трещину целиком.

### Определяющие соотношения

Для решения задач о деформировании горной породы необходимо уметь описывать ее поведение под нагрузкой. Совершенно очевидно, что рассмотреть и учесть при описании всю структуру материала с учетом геометрии и свойств отдельных компонентов явным образом не представляется возможным в силу огромного числа частиц и различия масштабов. На каком бы масштабе мы не рассматривали горную породу, она будет оставаться неоднородной. Поэтому необходимо применять модели поведения среды на основании данных о ее поведении с использованием эффективных характеристик, а влияние процессов и структуры более мелкого масштаба (но не значения) учесть через соответствующие уравнения. В то же время включения, имеющие размер близкий к размеру ячеек расчетной сетки и более следует рассматривать явным образом, задавая в них соответствующие параметры. Таким образом в нашем случае при достаточной детальности расчетной сетки может быть учтено наличие определенного числа прослоек, включений и трещин.

Горные породы являются средами с ярко выраженной неоднородной структурой. Их механические свойства зависят от напряженного состояния, от давления при котором они находятся, а также от температуры. В зависимости от условий нагружения, а также структуры материала (пористости, трещиноватости, минерального состава и размера зерен) развитие деформации за пределом упругости в геологических средах сопровождается различными явлениями. При растяжении в таких материалах быстро развиваются магистральные трещины, разрушение, как правило, имеет хрупкий характер. В условиях сдвига поведение становится более сложным, часто сопровождается объемными изменениями и сильно зависит от давления. При умеренном давлении горные породы хрупки, в них разрушаются зерна и связи между ними. С ростом давления они ведут себя как упругопластические тела и разрушаются вязким образом.

Несмотря на хрупкий характер разрушения при обычной температуре, образование трещин в условиях сжатия не приводит к полной потере прочности для большинства геологических материалов. Поведение тела зависит от траектории роста, возможности слияния и образования магистральных трещин. В свою очередь, это определяется условиями взаимодействия поверхностей несплошностей и величиной сжимающих напряжений, от которых зависят как условия контакта внутренних поверхностей, так и предельная длина трещин. В условиях бокового сжатия трение на поверхностях микротрещин обеспечивает достаточную прочность и для приращения деформации необходимо приложить дополнительные усилия. Лишь при формировании протяженных, магистральных трещин или разломных зон наблюдаются заметный сброс напряжений до остаточной прочности. Таким образом, макроскопическое поведение за пределом упругости пород в условиях сжатия подобно пластическому, поэтому общепринято рассматривать их поведение с использованием теории пластичности.

Для описания процессов деформации горных пород за пределом упругости, в условиях макроскопического сжатия и сдвига, удобно использовать модели пластичности. Воспользуемся соотношениями модифицированной модели Друккера–Прагера с неассоциированным законом течения (Друккер, Прагер, 1975; Николаевский, 1971; Стефанов, 2002). Будем использовать аддитивное разложение деформации скорости на упругую и пластическую части:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^e + \dot{\varepsilon}_{ij}^p, \quad (5.4)$$

Пластической деформацией здесь будем называть неупругую деформацию независимо от ее природы. Напряженное состояние среды определяется согласно уравнению:

$$\dot{\sigma}_{ij} = \lambda(\dot{\theta} - \dot{\theta}^p) \delta_{ij} + 2\mu(\dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^p), \quad (5.5)$$

где  $\lambda$ ,  $K$  и  $\mu$  — коэффициент Ламе, модули сжатия и сдвига соответственно,  $\sigma_{ij}$  и  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  — компоненты тензора напряжений и тензора скорости деформаций,  $\dot{\theta} = \dot{\varepsilon}_{kk}$ ,  $\delta_{ij}$  — символ Кронекера.

Для проведения расчетов удобно записать все соотношения для шаровой и девиаторной частей тензоров. До начала пластической деформации напряжения будем рассчитывать по гипотезе упругости:

$$\frac{Ds_{ij}}{Dt} = 2\mu \left( \dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{\varepsilon}_{kk} \delta_{ij} \right), \quad (5.6)$$

$$\dot{\sigma} = -K \frac{\dot{V}}{V}, \quad (5.7)$$

где  $\frac{Ds_{ij}}{Dt} = \dot{s}_{ij} - s_{ik} \dot{\omega}_{jk} - s_{jk} \dot{\omega}_{ik}$  — производная Яумана,  $K$  и  $\mu$  — модули сжатия и сдвига соответственно. Использовано разложение тензора напряжений на шаровую и девиаторную части:  $\sigma_{ij} = -\sigma \delta_{ij} + s_{ij}$ , где  $\sigma = -\frac{\sigma_{kk}}{3}$  — давление (шаровая);  $s_{ij}$  — компоненты девиатора тензора напряжений. Компоненты тензора скорости деформаций  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  и компоненты тензора скоростей вращения  $\dot{\omega}_{ij}$  определяются из соотношений:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}), \quad \dot{\omega}_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} - u_{j,i}). \quad (5.8)$$

Упругое состояние среды в пространстве напряжений ограничено поверхностью предельного состояния, при достижении которой, начинается процесс неупругого, пластического деформирования, или разрушения. Неупругая деформация определяется в соответствии с уравнениями предельной поверхности и пластического потенциала:

$$f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0, \quad (5.9)$$

$$g(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = 0, \quad (5.10)$$

где  $d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}}$ ,  $f$  — уравнение предельной поверхности,  $g$  — пластический потенциал,  $\varepsilon_{ij}^p$  — компоненты пластической (неупругой) деформации,  $\lambda$  — пластический множитель, определяемый в ходе процесса деформации. Предельная поверхность описывалась уравнением (Рисунок 5.2 а):

$$f(\sigma, \tau) = \tau - \alpha \sigma - Y, \quad (5.11)$$

где  $\alpha$  и  $Y$  — параметры, которые могут быть выражены через коэффициент внутреннего трения и когезию. Интенсивность касательных напряжений

$$\tau = \left( \frac{s_{ij}s_{ij}}{2} \right)^{1/2}, \quad (5.12)$$

Примем во внимание, что в верхних слоях, где давление не велико, возможно возникновение растягивающих напряжений, а значит и формирование трещин отрыва. Чтобы это учесть, предельную поверхность в области растяжения ограничим давлением  $\sigma = \sigma^*$ .

Пластический потенциал для расчета приращений пластической деформации, запишем в виде:

$$g(\sigma, \tau) = \tau - A\sigma, \quad (5.13)$$

$A$  — коэффициент дилатансии. Заметим, что использование неассоциированного закона течения обеспечивает независимость коэффициента дилатансии. В общем случае, данный параметр является функцией напряженно-деформированного состояния среды.

Упрочнение и разупрочнение среды опишем соотношением:

$$Y(\gamma^p) = Y_0 \left[ 1 + h \left( A(\gamma^p) - D(\gamma^p) \right) \right], \quad (5.14)$$

где  $h$  — коэффициент упрочнения,  $d\gamma^p = 2 \left[ (de_{ij})^p (de_{ij})^p / 2 \right]^{1/2}$  — интенсивность сдвиговой пластической деформации,  $e_{ij}^p = \varepsilon_{ij}^p - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk}^p \delta_{ij}$ . Для учета упрочнения используется линейная зависимость  $A(\gamma^p) = 2\gamma^p / \gamma^*$  и квадратичная — для учета разупрочнения (накопления повреждений)  $D(\gamma^p) = (2\gamma^p / \gamma^*)^2$ , где  $\gamma^*$  — критическая деформация, после которой, преобладает деградация материала. Предельная поверхность будет меняться в процессе деформации как показано на рисунке 5.2 б. При достижении заданного уровня напряжений на этапе разупрочнения сдвиговая прочность остается постоянной, соответствующей остаточной прочности  $Y^*$  материала в данных условиях.

Следует заметить, что в предложенном варианте модели основное внимание уделяется развитию деформации в нормальных условиях. При необходимости, учет влияния температуры может быть выполнен в рамках соотношения термоупругости. Это позволит получить оценки неупругой деформации и поврежденности среды при нагреве или охлаждении. Раздел написан по материалам статьи (Стефанов Ю.П., 2002, 2010).

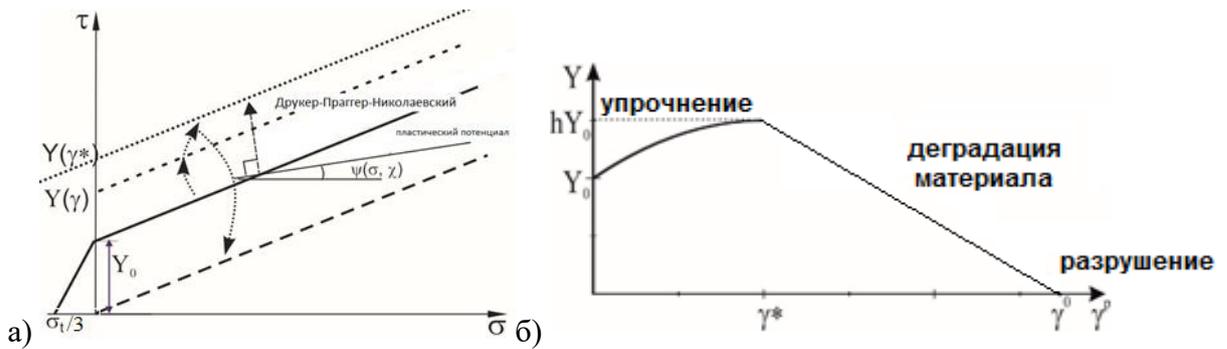


Рисунок 5.2 Характер изменения поверхности предельного состояния в ходе сдвиговой деформации (а); зависимость упрочнения и деградации материала от интенсивности пластической деформации (б)

### Условия разрушения

Формулировка условий разрушения определяется спецификой задачи. При рассмотрении процессов деформации и разрушения среды в связи с ростом трещины гидроразрыва будем учитывать, что разрушение породы в окрестности трещины может протекать по механизмам отрыва и сдвига, а также вследствие пластической деформации. Для описания хрупкого разрушения примем силовой критерий, согласно которому разрушение произойдет при достижении напряжениями предельных величин:  $\sigma_1 = \sigma_t$ , где  $\sigma_1$  и  $\sigma_t$  – главное и предельное растягивающее напряжения соответственно. Величина  $\sigma_t$  определяется как прочность на растяжение. Данное значение может быть рассчитано при известной трещиностойкости среды из соотношения:  $\sigma_t = K_{IC} / r$ , где  $K_{IC}$  – критический коэффициент интенсивности напряжений,  $r$  – расстояние от вершины или по результатам опытов на растяжение. Данное соотношение следует из решения механики трещин.

Аналогичное соотношение запишем для максимального касательного напряжения:  $\tau_m = \tau_m^*$

Удобно использовать также комбинированный вариант критерия:  $\sigma_n(1-a) + \tau \cdot a = \sigma^*$ , где  $0 \leq a \leq 1$  – параметр.

Учет накопления повреждений осуществляется путем добавления соответствующего параметра состояния среды в условия разрушения:

$$\sigma_1 = \sigma_n^*(1-D), \quad (5.15)$$

$$\tau_m = \tau_m^*(1-D), \quad (5.16)$$

$$\sigma_n(1-a) + \tau \cdot a = \sigma^*(1-D), \quad (5.17)$$

Параметр поврежденности  $D=0$  в сплошной и принимает значение  $D=1$  в разрушенной средах. Таким образом, принимаем, что разрушение и раскрытие трещин происходит при

наличии растягивающих напряжений, которые присутствуют в локальных областях неоднородной среды практически при любом виде нагрузок. В ходе пластической деформации происходит накопление повреждений, т.е. происходит образование, рост и слияние микротрещин и пор. Развитие и накопление этих повреждений проявляются в объемной пластической деформации и разупрочнении среды.

В условиях пластической деформации напряжения ограничены условием пластичности. В этом случае достижение предельного уровня пластической деформации также будет служить условием разрушения и соответственно продвижения трещины:

$\gamma^p = \gamma_0$ , где  $\gamma^p$ ,  $\gamma_0$  – накопленная сдвиговая и предельная деформации. Следует заметить, что процесс разупрочнения начинается на более ранних этапах деформации. Раздел написан по материалам статьи (Стефанов Ю.П., 2002, 2010).

### Граничные условия

При заданных начальных условиях при  $t = 0$ , для всех точек расчетной области (Рисунок 5.3) при решении задач используются кинематические, динамические и смешанные граничные условия, а также их комбинация. Граничные условия на внешнем контуре расчетной области определяются в соответствие с масштабом рассмотрения задачи. На масштабе рассмотрения всей трещины или ее значительного участка внешней нагрузкой будут действующие на данной глубине напряжения в пласте. Полученное решение о напряженном состоянии вокруг трещины могут быть использованы в качестве нагрузки для выделенного участка вокруг вершины.

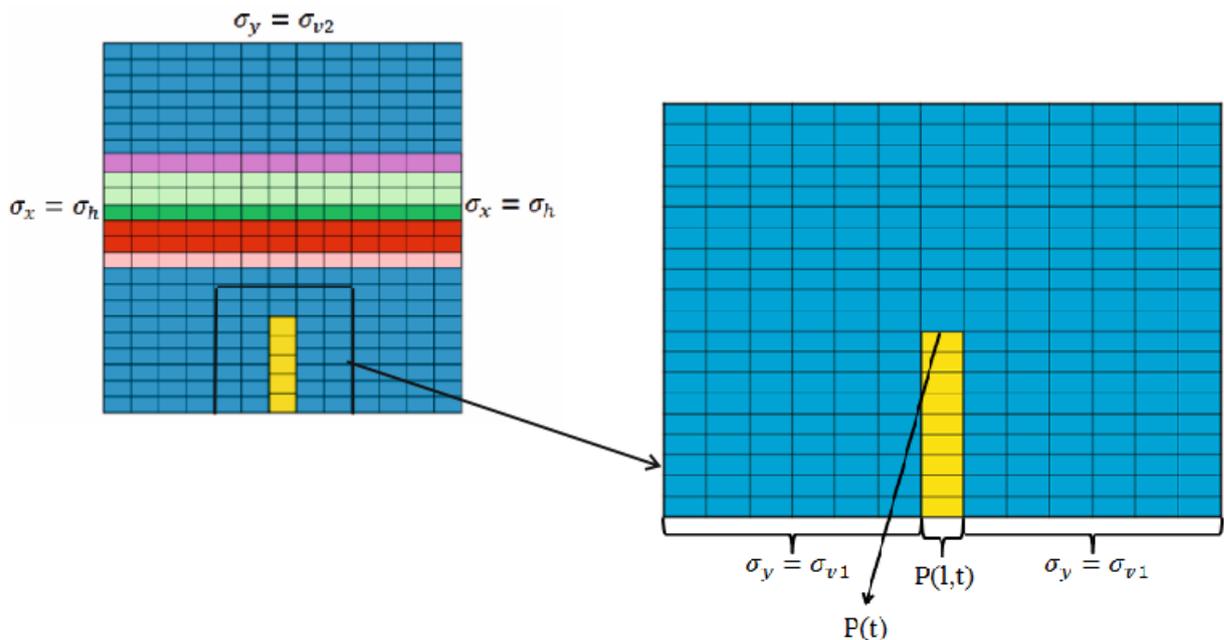


Рисунок 5.3 Схема расчетной области и граничных условий, задаваемая в пласте

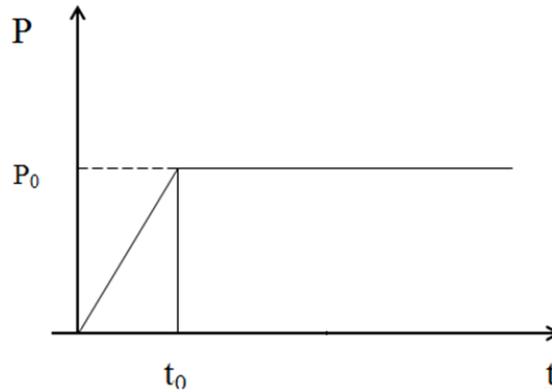


Рисунок 5.4 График зависимости давления в трещине (избытка давления над минимальным напряжением) от времени роста нагрузки

Начальное положение трещины задается ростом заданной длины и ширины (Рисунок 5.3). Как правило, ширина трещины описывается одной лагранжевой ячейкой (то есть ширина трещины изменяется в процессе расчета). Для определения давления «флюида», заполняющего вновь образованную трещину, применены специальные численные процедуры для имитации вязкого запаздывания). При рассмотрении протяженного участка трещины необходимо задать давления (вернее, избытка давления над минимальным пластовым напряжением) в ростке в виде функции (кусочно-линейной)  $P(t)$  (Рисунок 5.4). Пространственное распределение давления в развивающейся из ростка трещине (индивидуальный материал №0 представлен желтым цветом на рисунке 5.3 и рассчитывается по тем же соотношениям, что и в остальных материалах №№ 1–N (представлены синим, розовым, красным, голубым и оранжевым на рисунке 5.3)). В тестовых расчетах рассматривалось распространение трещины в однородной среде ( $N=1$ ), в двуслойной среде ( $N=2$ ) и в девятислойной среде ( $N=9$ ).

Поровое давление в настоящей модели учитывается статически, при переходе от полного тензора напряжения к эффективному. В постановке задачи, однако, ничего не изменится при динамическом учете изменения порового давления и переопределении эффективных напряжений в процессе расчета (Вершинин и др, 2016) и поровое давление (вместе с пористостью) будет той величиной, при помощи которой можно будет сопрягать данный модуль с гидродинамическим.

Развитие трещины происходит по ячейкам домена – если в какой - либо из ячеек, соседствующей с существующей трещиной выполняется один из критериев разрушения, такая ячейка становится частью трещины и заполняется «флюидом», то есть идентификационный номер материала становится равным  $N=0$ . Резкие перепады напряженно-деформированного состояния в такой ячейке, в силу моментальной разгрузки, нивелируются в течение некоторого характерного промежутка времени путем моделирования процесса релаксации напряжений и, ассоциированных с напряжением, свойств заполняющего ячейку материала. Раздел написан по материалам статьи (Stefanov Y.P. и др., 2016).

### 5.3. Выбор прочностных параметров пород. Инициализация расчетной модели

Для определения распределения начальных напряжений в массиве пород была использована модель Руммеля (Rummel, Möhring-Erdmann, Baumgärtner, 1986), согласно которой  $S_v = 70$  МПа при  $z = 3$  км и  $\rho^s = 2.4$  г/см<sup>3</sup>,  $S_h = 50$  МПа,  $S_H = 70$  МПа. Примем, что коэффициент аномальности (отклонение порового давления от гидростатического) равен 1.2, так что

$$p_p = 1,2 \cdot p_f \approx 35 \text{ МПа} .$$

Эффективные напряжения  $\sigma = S - \alpha_B p_p$ , таким образом, принимались равными значениям, представленным в таблице 5.1, при двух значениях коэффициента Био. В расчетах были рассмотрены различные варианты соотношений начальных горизонтального и вертикального напряжений.

Таблица 5.1 Принятые для расчетов значения начальных напряжений в массиве пород

$\alpha_B$	$\sigma_v$ , МПа	$\sigma_H$ , МПа	$\sigma_h$ , МПа
<b>1</b>	35	35	15
<b>0,3</b>	60	60	40

Давления нагнетания жидкости в трещине  $P_{inj}$  ограничено сверху технологическим значением 65 МПа, обусловленным прочностными особенностями скважинного оборудования, и давлением гидроразрыва снизу. Так же были рассмотрены значения  $P_{inj}$  равные 50 МПа и 20 МПа.

Применение представленной модели требует определения следующих параметров:

- упругие модули:  $K$  — модуль сжатия;  $G$  — модуль сдвига;
- прочностные параметры, определяющие предельную поверхность и ее изменение в ходе деформации:  $\alpha$  и  $Y_0$  — параметры, определяющие предельную поверхность при  $\sigma > 0$ ;  $h$  — коэффициент упрочнения;  $\gamma^*$  — критическая деформация, после которой, преобладает деградация материала;  $\gamma^0$  — пластическая деформация полного разрушения;
- $\Lambda$  — коэффициент дилатансии, определяющий пластический потенциал и соответствующее направление вектора приращения пластической деформации;
- $\sigma_t$  — прочность на отрыв при одноосном растяжении.

Рассмотренные в работе данные соответствуют осесимметричному нагружению цилиндрических образцов керна при постоянном боковом давлении. На рисунке 5.5 показан пример диаграмм нагружения. По результатам испытаний имеем:  $Q = (\sigma_1 + \sigma_c)$  приложенное напряжение,  $\sigma_c = const$  — боковое обжатие;  $\varepsilon_1$  — осевая деформация;  $\varepsilon_2$  — радиальная деформация;  $\varepsilon = (\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2)$  — объемная деформация.

Все измерения соответствуют этапу осевого нагружения после приложения всесторонней нагрузки. Упругие модули определяются по начальному линейному участку кривых нагружения.

Модуль Юнга будет  $E = Q/\varepsilon_1$ , коэффициент Пуассона  $\nu = -\varepsilon_2/\varepsilon_1$ . Данные коэффициенты можно пересчитать в искомые модули сжатия и сдвига.

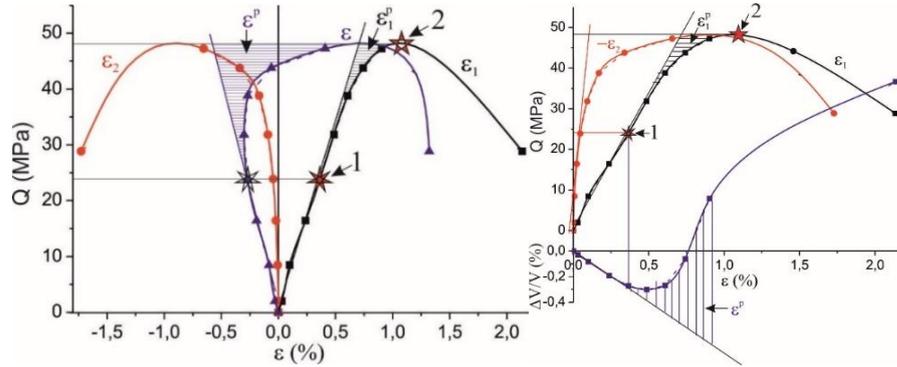


Рисунок 5.5 Пример диаграммы нагружения образца. Показаны два варианта представления данных

Отклонение от линейного участка свидетельствует о начале пластической деформации, а соответствующие напряжения будут пределом упругости. Они соответствуют начальной предельной поверхности. На рисунке 5.5 данная точка отмечена звездочкой-1. Максимальные напряжения на кривых нагружения будут пределом прочности (звездочка-2). Соответствующая предельная поверхность будет конечной, после чего начинается интенсивное разрушение и разупрочнение.

Примем, что справедливо соотношение  $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p$ . Отсюда пластические части компонент тензора деформации будут:  $\varepsilon_1^p = \varepsilon_1 + \varepsilon_1^e$  и  $\varepsilon_2^p = \varepsilon_2 + \varepsilon_2^e$ , аналогично для объемной пластической деформации:  $\varepsilon^p = \varepsilon - \varepsilon^e$ . Таким образом, пластической деформации соответствуют заштрихованные области на рисунке 5.5.

При построении предельной поверхности и анализа поведения пород за пределом упругости в рамках используемой модели удобно представить имеющиеся данные в инвариантных величинах. Для напряжений это  $(\sigma, \gamma)$ :  $\tau$  – интенсивность касательных напряжений и  $\sigma$  – давление. Деформации представлены в координатах  $(\varepsilon, \gamma)$ :  $\gamma$  – интенсивность сдвиговой деформации и  $\varepsilon$  – объемная деформация. При заданных условиях указанные параметры определяются из соотношений:

$$\tau = |\sigma_1 - \sigma_c|/\sqrt{3} \quad (5.18)$$

$$\sigma = P = -(\sigma_1 + 2\sigma_c)/\sqrt{3} \quad (5.19)$$

$$\gamma = 2|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|/\sqrt{3} \quad (5.20)$$

$$\varepsilon = (\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2) \quad (5.21)$$

Из данных соотношений следует, что все экспериментальные значения будут лежать на прямой, с тангенсом угла наклона  $\tau/P = 1/\sqrt{3}$ , которая пересекает ось абсцисс, где  $\tau = 0$  в точке  $\sigma = \sigma_t$ .

Из уравнения предельной поверхности ясно, что для построения предельной поверхности необходимы данные измерений в двух точках, т.е. при двух разных давления бокового обжатия для  $\sigma \geq 0$  и в одной точке для  $\sigma < 0$ . Желательно, чтобы последняя точка соответствовала условиям одноосного растяжения, т.е. соответствовала значению  $\sigma_t$ .

При отсутствии необходимых данных возможно определить диапазон изменения параметров, основываясь на физических соображениях. Рассмотрим поведение пород при положительных давлениях, т.е. в условиях сжатия. Для большинства горных пород  $0,45 \leq \alpha \leq 0,6$ , однако учитывая, что рассматриваемые породы сильно неоднородны и могут иметь большое содержание глины и битума, примем, что  $0,05 \leq \alpha \leq 0,06$ . Для коэффициента  $Y_0$  диапазон возможных значений также широк, он сильно зависит от состава и трещиноватости, примем, что  $0 < Y_0 < 25$ . Более высокие значения для рассматриваемого типа пород маловероятны, т.к. будут означать очень высокую сдвиговую прочность, характерную для метаморфических и кристаллических пород. Наиболее высокие значения можно ожидать для пород с высоким содержанием кварца и известняка. Наименьшие значения для обоих параметров вероятны при наибольшей неоднородности породы с большим содержанием глины и битума.

Рассмотрим возможные варианты предельных поверхностей, соответствующие экспериментальным данным. Для этого отметим значения пределов упругости и прочности в координатах  $(\sigma, \tau)$ .

Таблица 5.2 Таблица значений пределов упругости и прочности для набора образцов разного строения

Литологический тип	Глубина, м	$\tau_0$ , МПа	$P$ , МПа
Песчаник	2927	22,0	28,8
Алевролитно-глинистый	2918	17,3	26,5
Карбонатно-глинисто-кремнистый	2903	21,3	28,5
Карбонатно-глинисто-кремнистый	2896	21,3	28,5
Карбонатно-кремнистый	2891	22,7	29,1
Глинисто-кремнистый	2883	18,7	27,1
Керогено-глинисто-кремнистый	2875	16,0	25,8
Карбонатно-глинисто-кремнистый	2870	16,7	26,1
Кремнисто-глинистый	2866	11,3	23,5

На Рисунках 5.6 и 5.7 показаны полученные значения для данных таблицы 5.2. Значками разного цвета и формы выделены породы по разным литологическим типам. На рисунках видно,

что данные даже для одного типа пород имеют большой разброс. Построенные на графиках прямые есть предельные поверхности для максимальных, минимальных и средних значений прочности, независимо от состава пород.

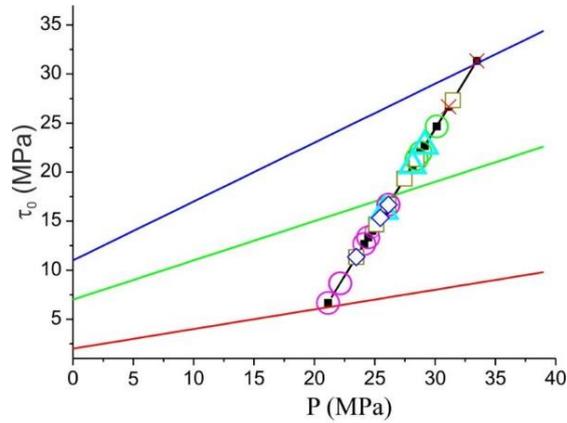


Рисунок 5.6 Экспериментальные значения предела упругости для образцов пород разной литологии и соответствующие начальные предельные поверхности

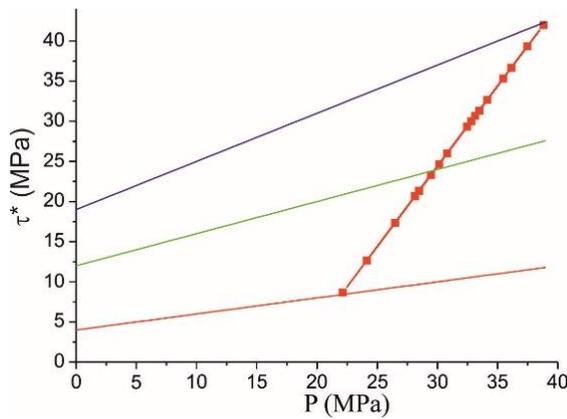


Рисунок 5.7 Экспериментальные значения предела прочности для образцов пород разной литологии и соответствующие конечные предельные

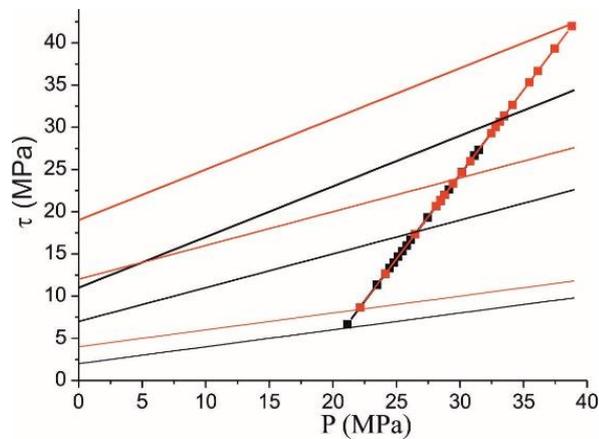


Рисунок 5.8 Экспериментальные значения пределов упругости и прочности для образцов пород разной литологии и соответствующие предельные поверхности

Начальные предельные поверхности, с параметрами  $\alpha$  и  $Y_0$  приведены на рисунке 5.6. Конечные предельные поверхности, параметры которых  $\alpha$  и  $Y^*$  показаны на рисунке 5.7. На рисунке 5.8. приведены данные для начального и конечного предельных состояний. Отношения пределов прочности к пределам упругости для данных экспериментов также показывают большой разброс (Рисунок 5.9).

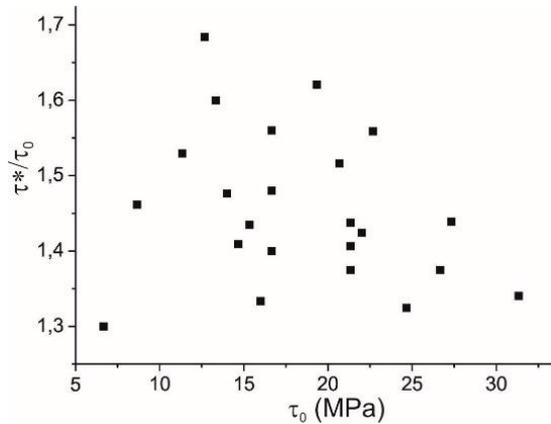


Рисунок 5.9 Отношения пределов прочности к пределам упругости

Полученные параметры имеют средние значения, приведенные в таблице 5.3, которые следует варьировать для определения степени влияния их неопределенности на результаты расчетов.

Таблица 5.3 Таблица значений когезии и угла внутреннего трения

$\alpha = 0.2$	$Y_0 = 2$ МПа	$Y^* = 4$ МПа.	Для пород наименьшей прочности
$\alpha = 0.4$	$Y_0 = 7$ МПа	$Y^* = 12$ МПа	Для пород средней прочности
$\alpha = 0.6$	$Y_0 = 11$ МПа	$Y^* = 19$ МПа	Для наиболее прочных пород

Следующими параметрами, которые необходимо определить являются значения коэффициент упрочнения  $h$ , а также значения критической деформация  $\gamma^*$ , после которой преобладает деградация материала и пластическая деформация при полном разрушении  $\gamma^0$ , коэффициент дилатансии  $L$  и прочность на растяжение  $\sigma_t$ .

Значения критической деформации легко определяются по величинам пластической деформации, при которых достигаются пределы прочности. Также легко определяются коэффициенты упрочнения, их можно вычислить как отношения  $Y^*/Y_0$ .

Значения предельной деформации  $\gamma^0$  определяются либо по известным  $\gamma^*$ ,  $Y_0$  и форме кривой упрочнения-разупрочнения, определяемой функциями  $A(\gamma^p) = 2\gamma^p/\gamma^*$  и  $D(\gamma^p) = (\gamma^p/\gamma^*)^2$ , либо задается как независимый параметр, участвующий в построении кривой на (Рисунок 5.2, б).

Коэффициент дилатансии  $\lambda$  определяется по данным экспериментов как отношение приращений сдвиговой пластической деформации к приращениям объемной пластической деформации:  $\lambda = \Delta \varepsilon^p / \Delta \gamma^p$ . Однако вычислить данный параметр по имеющимся экспериментальным данным не удалось, т.к. полученные значения имели огромный разброс и часто принимали не физичные значения. Таким образом, по имеющимся данным определить данный коэффициент не представляется возможным ввиду малого количества точек измерений. Поэтому опираясь на физические соображения будем считать, что  $0 \leq \lambda \leq \alpha$ . Кроме того значения коэффициента зависят от структуры и состава породы. Чем мельче структура, тем меньшие значения имеет данный коэффициент. Наименьшие значения будут при высоком содержании глины и битума. Будем считать, что для данных типов пород коэффициент дилатансии лежит диапазоне  $0,2\alpha \leq \lambda \leq 0,5\alpha$ .

Таблица 5.4 Коэффициенты хрупкости, вычисленные по минеральному составу выделенных литологий в моделях Ванга и Ярви

Литология	Номер образца	BI <sub>m</sub>	
		Wang	Jarwie
Песчаник	1-1	0,608	0,583
Алевролитно-глинистый	1-2	0,183	0,151
Карбонатно-кремнистый	1-3	0,785	0,445
	1-4	0,891	0,906
Керогено-глинисто-кремнистый	1-5	0,530	0,619
	1-6	0,522	0,642
Карбонатно-глинисто-кремнистый	1-7	0,709	0,316
	1-8	0,799	0,713
	1-9	0,702	0,140

Последний параметр, который необходим для проведения расчетов, требует испытаний на растяжение, он соответствует прочности на отрыв. В данных по имеющейся скважине такие измерения отсутствовали. Тем не менее, значение этого параметра можно оценить из оценки хрупкости породы по минеральному составу – модели Ванга (W) и Ярви (Y):

$$BI_W = \frac{Q_z}{(Q_z + C_a + Clay)} \quad (5.22)$$

$$BI_Y = \frac{(Q_z + C_a + Dol)}{(Q_z + C_a + Dol + OB + Clay)} \quad (5.23)$$

и того факта, что в предлагаемой модели хрупкость есть отношение  $BI_g = Y_0 / \sigma_t$

Зная минеральный состав,  $BI_W$  и прочность на сжатие можно получить недостающие значения прочности на растяжение. Следует иметь в виду, что  $BI_W$ , вычисленный по минеральному составу, не всегда корректно отражает хрупкость породы, так не учитывает трещиноватость. В качестве проверочных соотношений могут служить качественные значения

$\sigma_t < Y_0$  для хрупких пород с высокой сдвиговой прочностью и  $\sigma_t \approx Y_0$  в пластичных породах, для которых возможен вязкий характер разрушения. Коэффициенты хрупкости, вычисленные по минеральному составу для выделенных литологий скважины 1 в моделях Ванга и Ярви представлены в таблице 5.4.

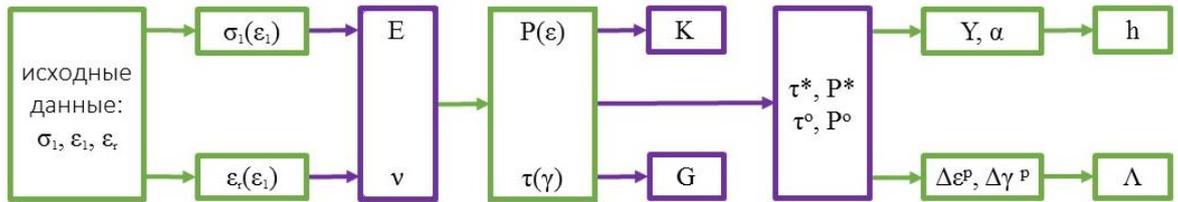


Рисунок 5.10 Схема инициализации упруго-пластической модели. В фиолетовых боксах данные, снимаемые с графиков, в зеленых - расчетные.

На примере одной скважины был построен схематический разрез участка баженовской свиты и выделено 9 литологических разностей в соответствии с минералогическим составом, прочностными и упругими свойствами: песчаник, алевролито-глинистая, два типа карбонатно-глинисто-кремнистой, карбонатно-кремнистая, глинисто-кремнистая, керогено-кремнистая, керогено-глинисто-кремнистая и кремнисто-глинистая (Рисунок 5.11).

Параметры, определяющие каждый из слоев описаны в таблице 5.5. В качестве изменяемых параметров выступили начальное распределение напряжений (горизонтальная и вертикальная компоненты), давление закачки, литологический состав и конфигурация слоев. Раздел написан по материалам статьи (Stefanov Y.P. и др., 2016).

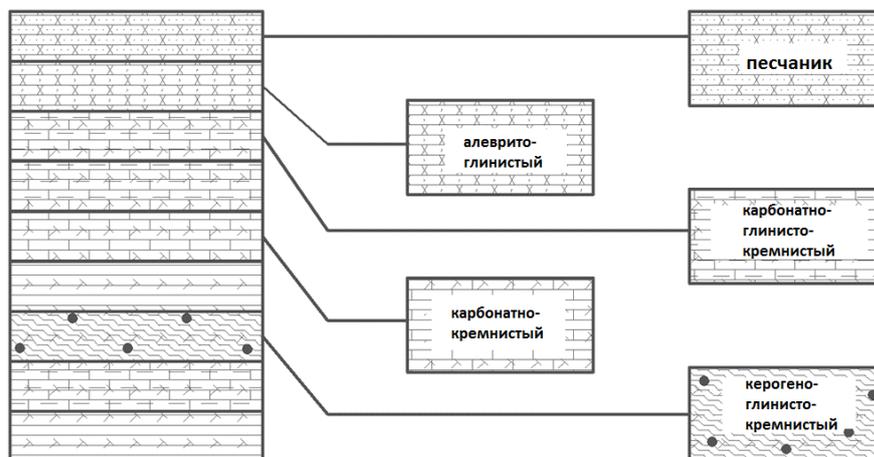


Рисунок 5.11 Схематический разрез по скважине Баженовской Свиты

Таблица 5.5 Значения параметров, инициализирующих упруго-пластическую модель по скважине

№ обр	σ, МПа		Модуль объемного сжатия К, ГПа	Модуль сдвига G, ГПа	P, МПа		τ <sub>i</sub> , МПа		Y <sub>0</sub> , МПа	α	h	γ*	глубина	Наименование породы
	σ <sub>is</sub>	σ <sub>ic</sub>			P <sub>is</sub>	P <sub>ic</sub>	τ <sub>is</sub>	τ <sub>ic</sub>						
<b>1-1</b>	33	47	3,1	2,5	28,8	33,5	22	31,3	7	0,521	1,98	0,70	2927,0	Песчаник
<b>1-2</b>	26	33	2,9	2,85	26,5	28,8	17,3	22	4	0,502	1,89	0,27	2918,0	Алевролитно-глинистая
<b>1-3</b>	32	44	4,5	3,4	28,5	32,5	21,3	29,3	7	0,502	1,86	0,39	2903,0	Карбонатно-глинисто-кремнистая
<b>1-4</b>	32	46	3,8	3,2	28,5	33,1	21,3	30,1	7	0,502	1,93	0,25	2896,6	Карбонатно-глинисто-кремнистая
<b>1-5</b>	34	53	4,6	3,6	29,1	35,5	22,7	35,3	7	0,541	2,31	0,10	2891,1	Карбонатно-кремнистая
<b>1-6</b>	28	36	2,7	1,9	27,1	29,8	18,7	24	6	0,469	1,67	1,25	2883,0	Глинисто-кремнистая
<b>1-7</b>	24	29	3,5	1,8	25,8	27,5	16	19,3	6	0,388	1,44	0,50	2875,7	Керогенно-глинисто-кремнистая
<b>1-8</b>	25	31	6,8	4,1	26,1	28,1	16,7	20,7	6	0,412	1,53	0,57	2870,2	Карбонатно-глинисто-кремнистая
<b>1-9</b>	17	26	2,5	2,5	23,5	26,5	11,3	17,3	6	0,226	1,89	0,21	2866,9	Кремнисто-глинистая

#### 5.4. Прогноз процесса ветвления трещин при применении мероприятий по гидроразрыву пласта

##### Прогноз ветвления трещин в однослойном массиве

###### *Песчаник*

При различных соотношениях в начальном распределении компонент тензора напряжений в песчанике могут возникать как магистральные трещины, направленные перпендикулярно стволу горизонтальной скважины так и ветвящиеся трещины.

В случае, когда значение горизонтального стресса меньше вертикального, в песчанике наблюдаются только магистральные вертикальные трещины (Рисунок 5.12 а,в). При заданном давлении и темпе нагнетания трещина распространяется в направлении перпендикулярном минимальным напряжениям, в данном случае горизонтальным, в соответствии с классической теорией хрупкого (упругого) разрушения, которая, впрочем, допускает возможность бифуркационного ветвления трещин при определенных скоростях ее распространения (Krugman, 1986). При низких скоростях трещина распространяется в «стабильном» режиме в направлении минимального сопротивления и поверхность трещины проходит по поверхности минеральных частиц. Для невысоких скоростей их влияние на конфигурацию трещин не значительно, но в случае, когда будет достигнуто значение критической скорости высвобождения энергии, скорость распространения трещины начинает играть одну из основных ролей в ее формировании. При таких скоростях режим образования трещины можно назвать «нестабильным» и на максимально возможной скорости распространения, так называемой терминальной скорости, возникает ветвление. Однако, для рассмотренных вариантов это условие не выполняется (зависимости скоростей распространения трещин при хрупком разрушении приведены на рисунке 5.14, а).

В случае, когда значения начальных стрессов в породе сближаются достаточно, что бы трещина открылась в горизонтальном направлении, возникает незначительное ветвление трещины (Рисунок 5.12, б,г). Стоит отметить, что механизмы хрупкого и пластического разрушения отличаются друг от друга по значению критической пластической деформации  $\gamma^*$  – чем ниже значение, тем ниже зона пластической деформации и более хрупкий режим разрушения, в частности при гидроразрыве. Для песчаника это значение достаточно низкое  $\gamma^* = 0,001$ , так что ветвление, возникающее вследствие перераспределения напряжений в области пластической деформации (см. ниже качественную и количественную иллюстрации процессов при хрупком и вязком разрушении), носило хрупкий характер.

Так же на примере песчаника было рассмотрено влияние времени закачки жидкости гидроразрыва в трещину. При уменьшении этого параметра в два раза (увеличении интенсивности закачки) отмечается повышение скорости распространения прямой магистральной трещины, а в случае с ветвящейся трещиной – уменьшение времени начала ветвления (Рисунок 5.13).

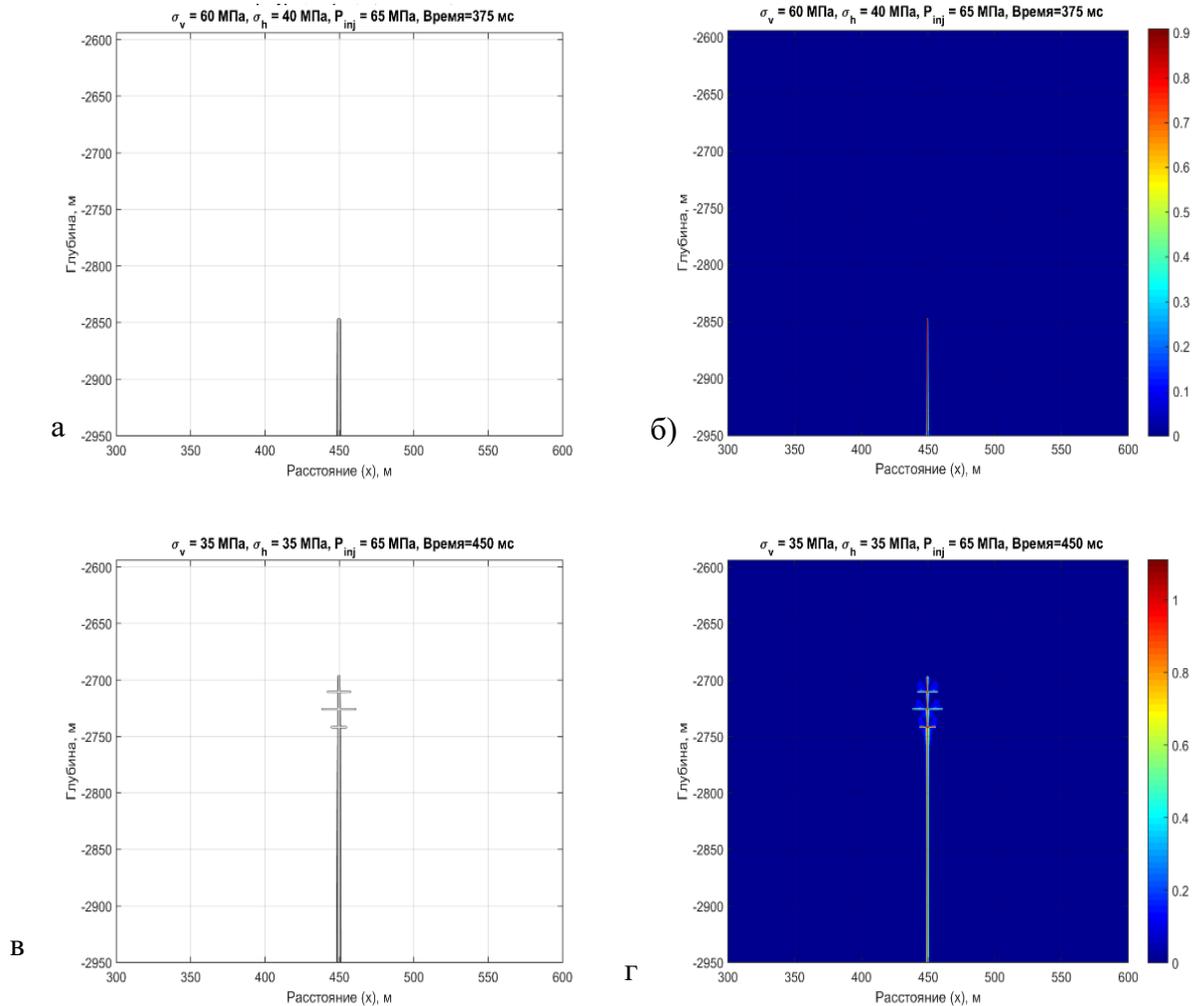


Рисунок 5.12 Конфигурация трещин (а,в) и интенсивность пластической деформации (б,г) трещины гидроразрыва в песчанике при различных (верхний ряд) и одинаковых (нижний ряд) значениях вертикальных и горизонтальных стрессов

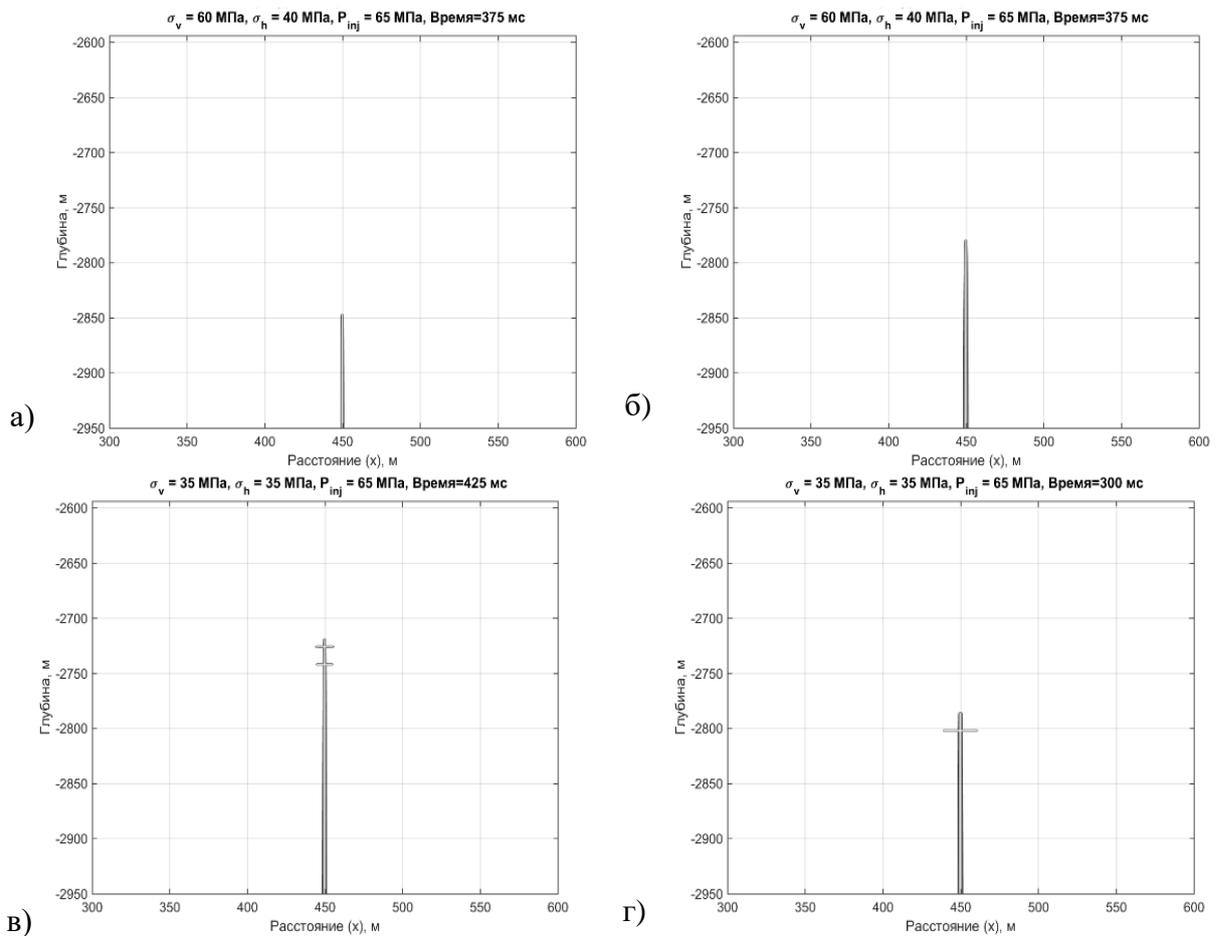


Рисунок 5.13 Влияние интенсивности нагнетания на структуру трещины ГРП в песчанике при различных (а,б) и равных (в,г) значениях вертикальных и горизонтальных напряжений.  $t_0=2000 \text{ мс}$  (а,в) и  $t_0=1000 \text{ мс}$  (б,г)

Хоть скорость распространения трещины в рассмотренных случаях не превышает критическую, она значительно зависит от давления нагнетания (Рисунок 5.14, а). При постоянном распределении начальных стрессов можно отметить, что скорость проникновения трещины понижается с понижением значения давления нагнетания (Рисунок 5.14, б).

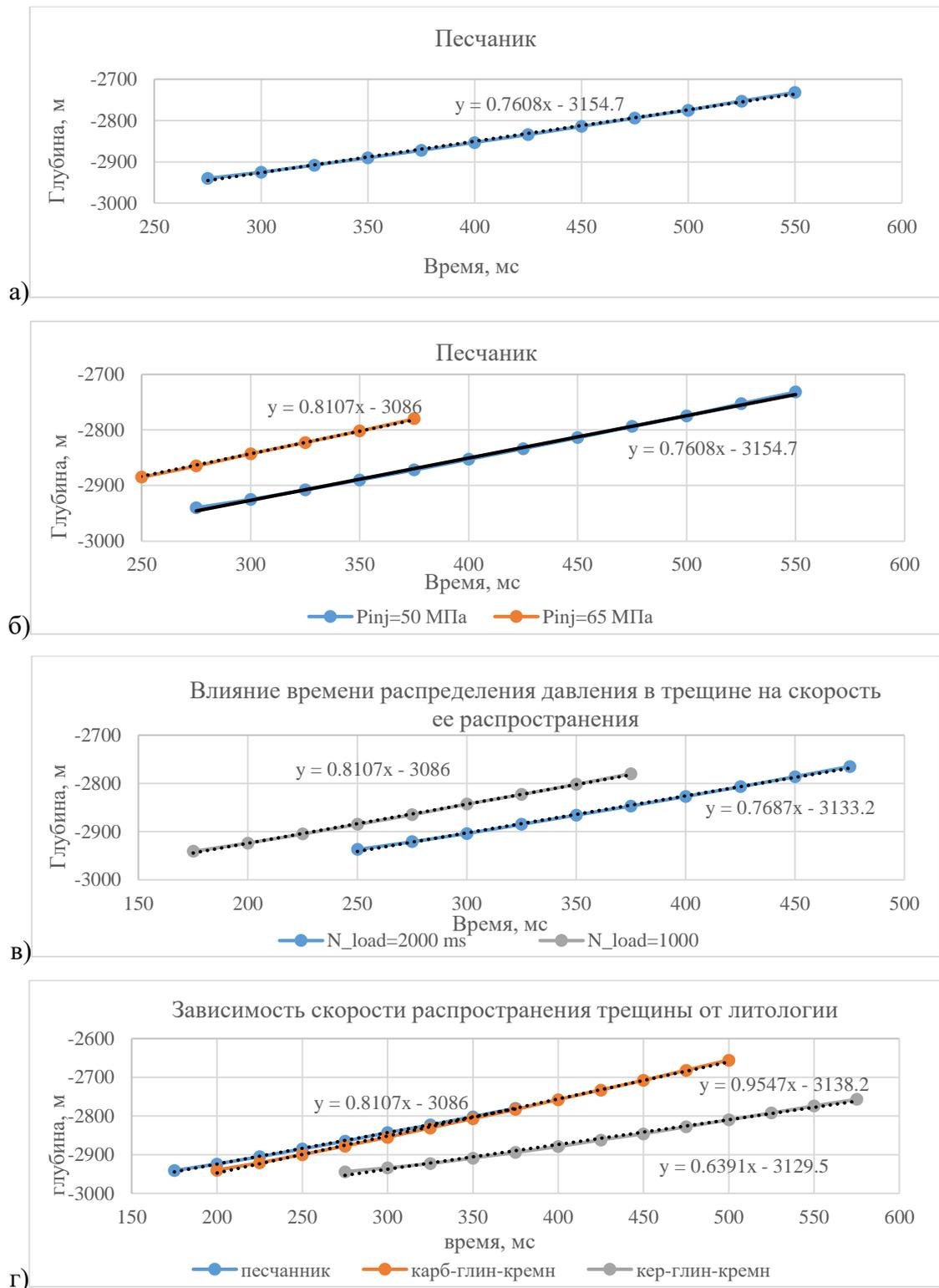


Рисунок 5.14 Скорость распространения трещины: (а) в песчанике при начальном распределении напряжений и давлением нагнетания  $\sigma_h = 40$ ,  $\sigma_v = 60$  МПа,  $P_{inj} = 65$  МПа, (б) при различном давлении нагнетания при начальном распределении стрессов  $\sigma_h = 40$ ,  $\sigma_v = 60$  МПа,  $P_{inj} = 65$  МПа (в) при различном времени распределения давления в трещине  $t_0$  при  $\sigma_h = 40$ ,  $\sigma_v = 60$  МПа,  $P_{inj} = 65$  МПа (г) скорость распространение трещины в зависимости от литологии при  $\sigma_h = 40$ ,  $\sigma_v = 60$  МПа,  $P_{inj} = 65$  МПа

### Карбонатно-глинисто-кремнистые породы

В карбонатно-глинисто-кремнистых породах так же наблюдается ветвление трещин при равных значениях начальных напряжений и магистральные трещины в случаях, когда вертикальный стресс больше горизонтального (Рисунок 5.15). Наличие глинистых частиц и органики приводит к накоплению пластической деформации и переходу от хрупкого механизма разрушения к пластическому. Более пластичная среда «замедляет» распространение трещины и приводит к релаксации сдвиговых напряжений на кончике трещины, что в свою очередь, приводит к снижению сдвиговых напряжений, которые ограничиваются предельной поверхностью. Соответственно величина растягивающих напряжений становится значительно ниже, чем в упругом состоянии. В результате происходит переход в пластический режим разрушения при накоплении необратимой деформации. В основном, это предположение очень четко коррелирует со скоростями проникновения трещин.

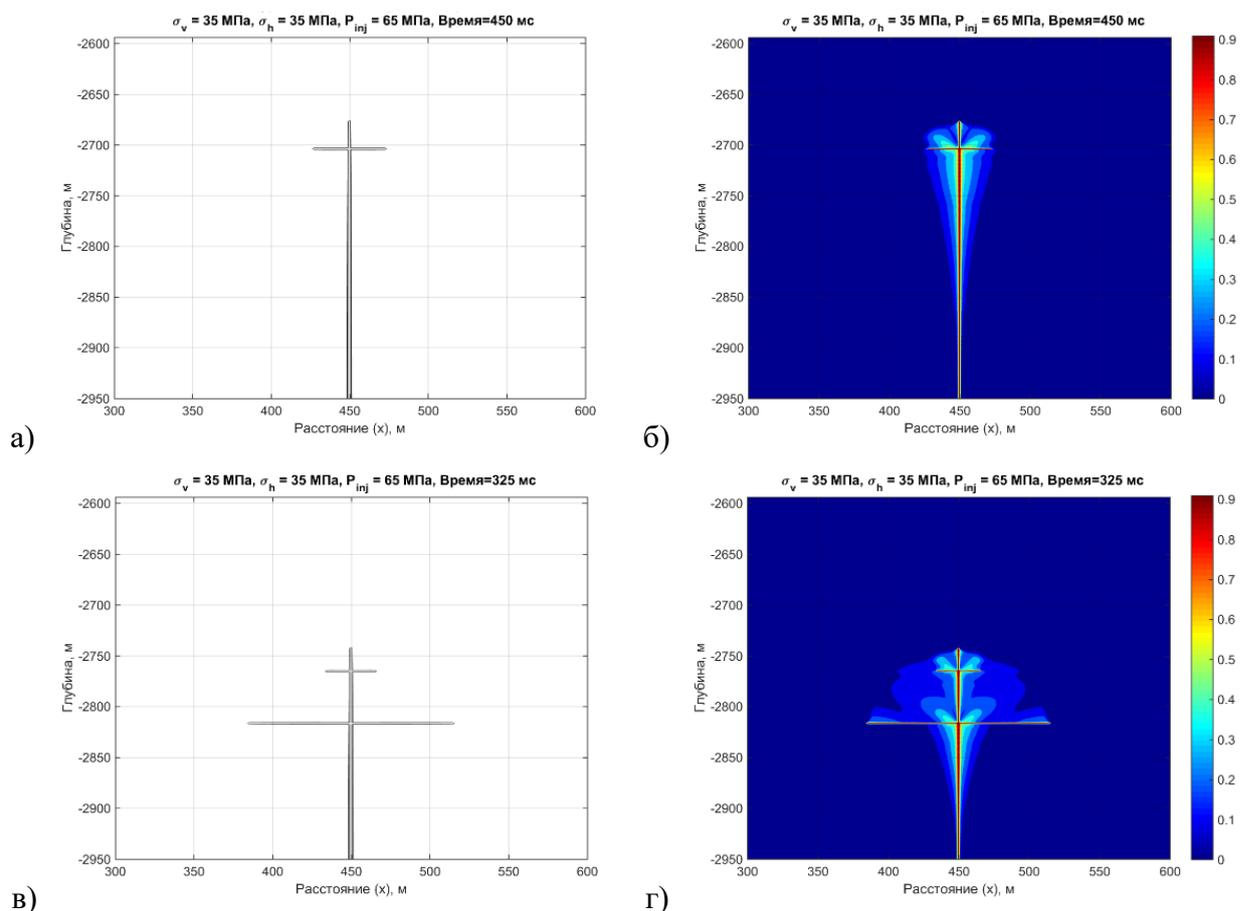


Рисунок 5.15 Конфигурация трещин (а,в), интенсивность пластических деформаций (б,г) в карбонатно-глинисто-кремнистом материале при  $\sigma_h = \sigma_v = 35$  МПа,  $P_{inj} = 65$  МПа и различной интенсивности закачки (а,б)  $t_0=2000$  и (в,г)  $t_0=1000$ .

### Керогеново-глинисто-кремнистые породы

В керогено-глинисто-кремнистых породах в случае, когда значение горизонтального стресса ниже вертикального так же наблюдаются магистральные вертикальные трещины. Так же, как и в песчанике, это объясняется тем, что трещина будет раскрываться в направлении перпендикулярном минимальным напряжениям, а в случае равных горизонтального и вертикального напряжений возникает возможность ветвления (Рисунок 5.16).

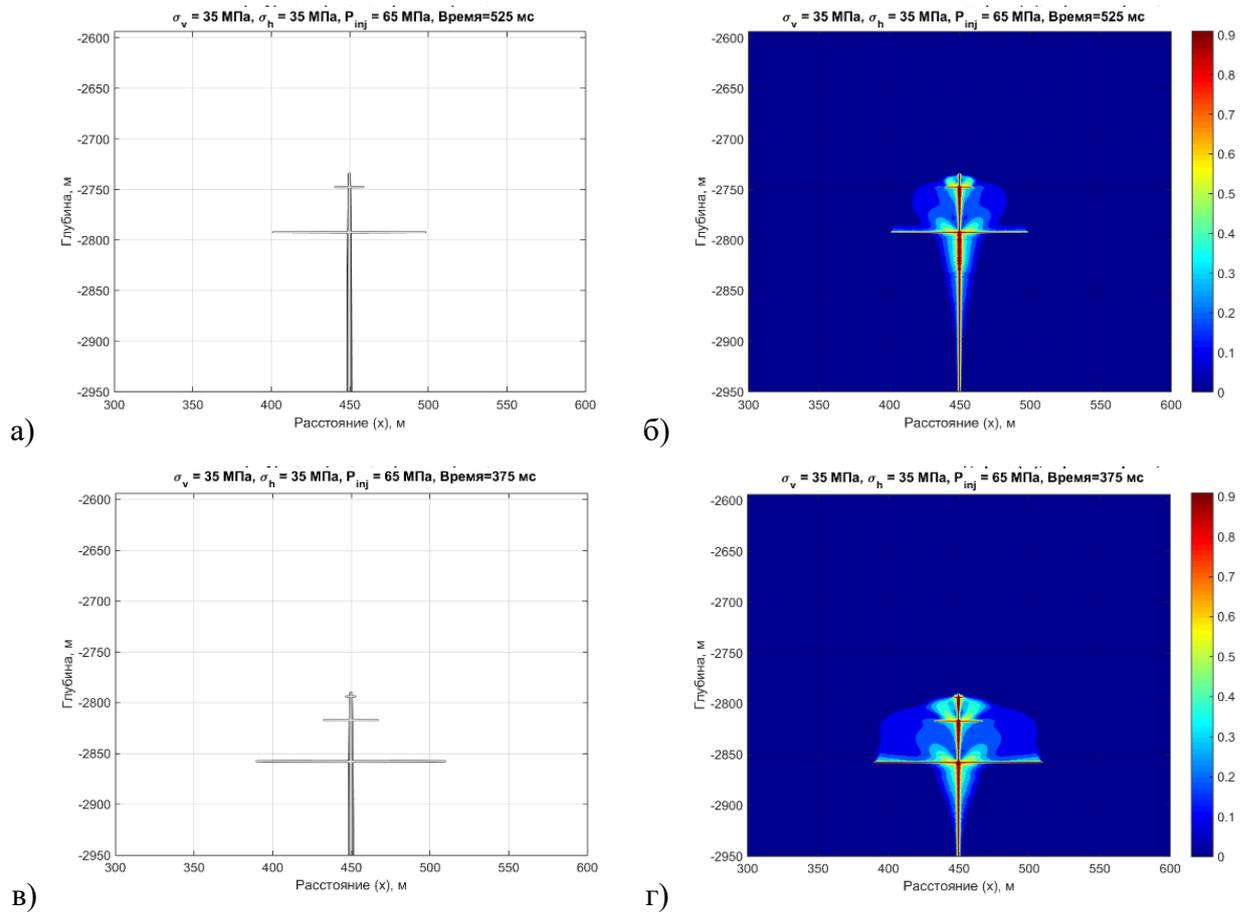


Рисунок 5.16 Конфигурация трещин (а,в), интенсивность пластических деформаций (б,г) в карбонатно-глинисто-кремнистом материале при  $\sigma_h = \sigma_v = 35$  МПа,  $P_{inj} = 65$  МПа и различной интенсивности закачки (а,б)  $t_0=2000$  и (в,г)  $t_0=1000$ .

Сравнивая данный материал с карбонатно-глинисто-кремнистым материалом, можно сказать, что интенсивность пластической деформации в данном материале выше и не так локализована в окрестности трещины, как в случае с песчаником. Это связано с наличием в минералогическом составе керогена и большим содержанием глинистого материала. Данное явление связано с упруго-пластическими свойствами породы в соответствии с минеральным составом. Более высокое содержание глинистых минералов приводит к тому, что пластические свойства в данной породе более ярко выражены и релаксация напряжений происходит в направлении перпендикулярном направлению основной магистральной трещины.

### Карбонатно-кремнистые породы

В рамках выбранных вариантов распределения начальных напряжений, рассматривая данный тип пород мы наблюдаем сильное ветвление трещины при обоих рассмотренных режимах закачки (Рисунок 5.17). Глядя на результаты, можно заметить, что доля пластической деформации вне существующих трещин в данном случае не так значительна, как в рассмотренных ранее породах – она полностью локализована в непосредственной окрестности границ трещины. Это вполне соответствует минеральному составу данной литологической разности. Как было сказано ранее, интенсивность пластической деформации тем выше, чем выше содержание глинистой и органической компоненты в породе, так что в данном случае ветвление трещины является скорее результатом соотношения давления нагнетания и начального распространения напряжений нежели влиянием литологического состава. С другой стороны, тщательный анализ распределений напряжений в окрестности носика трещин приводит к тому же выводу, что и для вышерассмотренных пород – именно уменьшение вклада сдвиговых напряжений в общий тензор за счет их работы на пластических деформациях является движущей силой эффекта ветвления

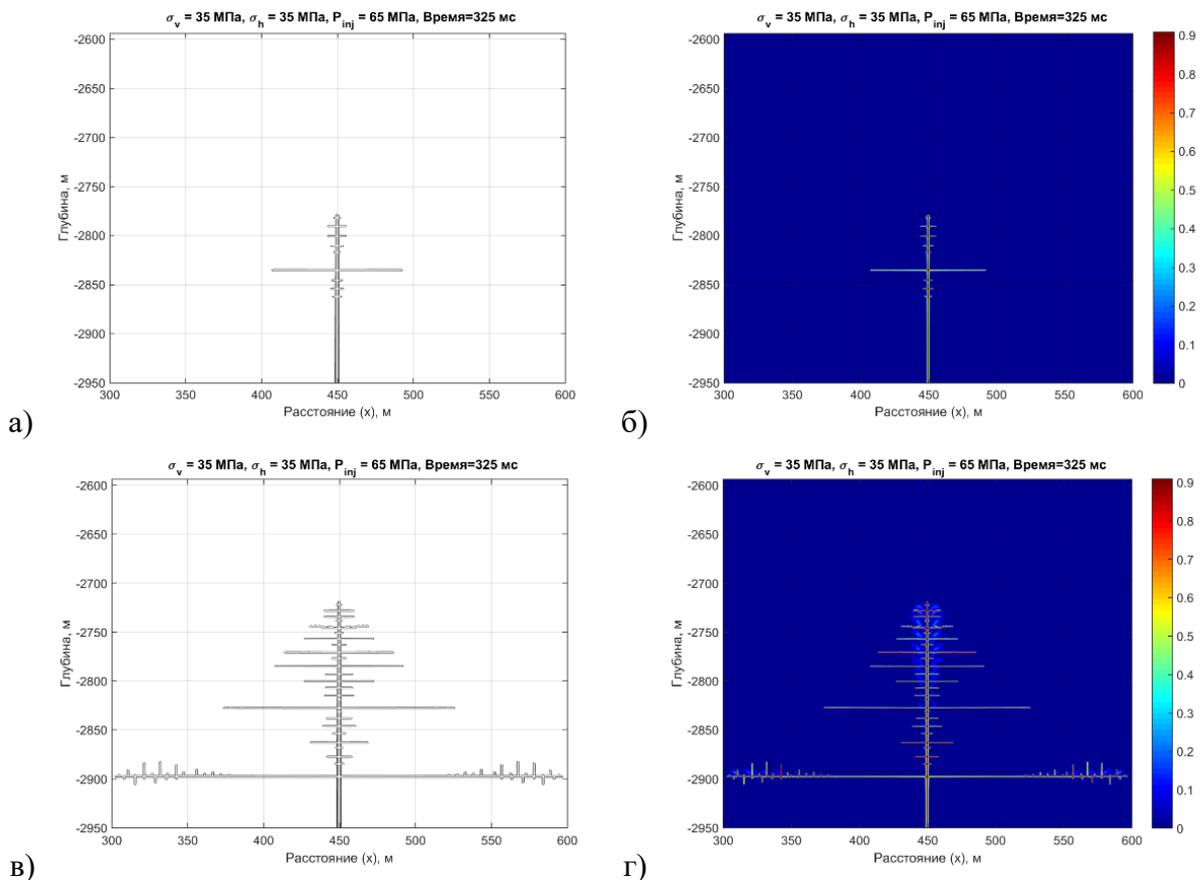


Рисунок 5.17 Конфигурация трещин (а,в) интенсивность пластических деформаций (б,г) в карбонатно- кремнистом материале при  $\sigma_h = \sigma_v = 35$  МПа,  $P_{inj} = 65$  МПа и различной интенсивности закачки (а,б)  $t_0=2000$  и (в,г)  $t_0=1000$ .

Глядя на полученные рисунки можно отметить, что при сближении значений горизонтального и вертикального стресса интенсивность распространения трещины в горизонтальном направлении увеличивается, что отмечалось и в ранее рассмотренных случаях (Рисунок 5.18).

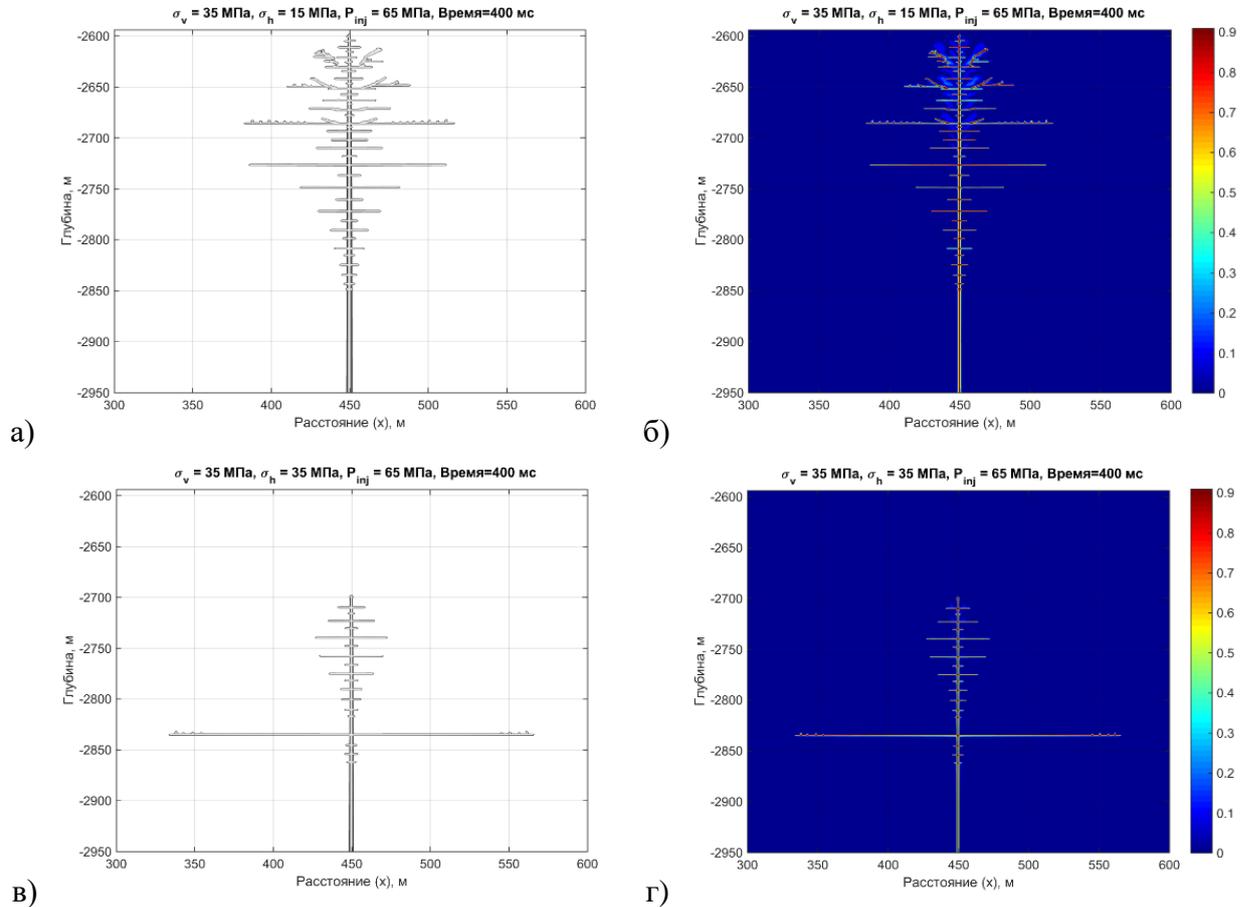


Рисунок 5.18 Конфигурация трещин (а,в), интенсивность пластических деформаций (б,г) в карбонатно- кремнистом материале при  $\sigma_h = 15$ ,  $\sigma_v = 35$  МПа,  $P_{inj} = 65$  МПа (а,б) и  $\sigma_h = \sigma_v = 35$  МПа,  $P_{inj} = 65$  МПа (в,г). Интенсивности закачки везде  $t_0=2000$  мс.

Как было описано выше, максимальное давление нагнетания в трещине было принято 65 МПа. Если фиксировать это значение при рассмотрении случаев с различающимися напряжениями, то, не привязывая его к минимально необходимому избыточному значению над минимальным пластовым напряжением, результатом может оказаться усиление ветвистости при уменьшении горизонтального стресса при одновременном увеличении его контраста с давлением закачки (Рисунок 5.18). Также наблюдаются трещины, ответвляющиеся от вторичных трещин в направлении параллельном основной магистральной трещине. Однако, как видно на рисунке 5.19, при одновременном уменьшении горизонтального напряжения и давления нагнетания при уменьшении избытка вплоть до минимального, ветвление исчезает.

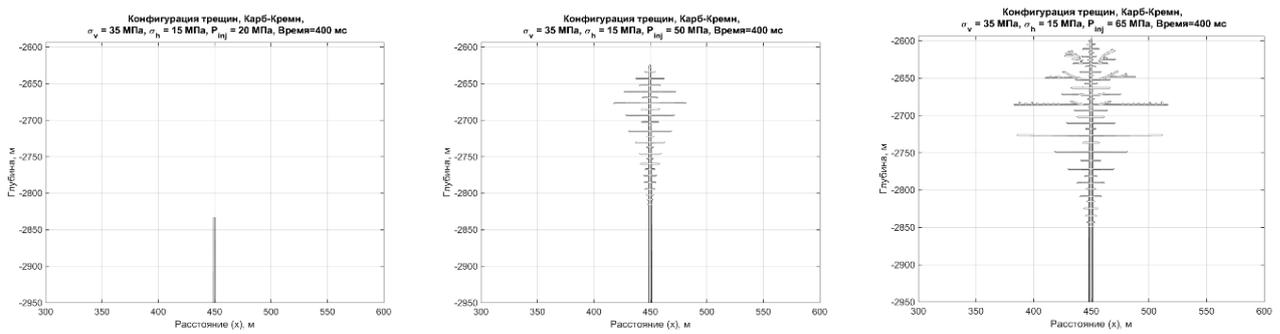


Рисунок 5.19 Конфигурация трещин в карбонатно-кремнистом материале при фиксированном распределении стрессов в породе и различных давлениях нагнетания.

### *Алеволито-глинистые породы*

В первой серии расчетов значения параметров брались из таблицы 5.5. Однако при выбранных пластовых параметрах и параметрах закачки состояние породы оказалось в области пластической деформации, близкой к предельному упрочнению. Провести расчет на каких-либо представительных временах оказалось невозможным – разрушение происходило на ранних стадиях закачки. Как было сказано ранее, поведение породы во многом зависит от ее минералогического состава, прочностных характеристик, а также условий, в которой последняя находится. В силу явной неоднородности алеволито-глинистых пород, широкого диапазона изменения ее прочностных характеристик, было изучено поведение трещины в алеволито-глинистой структуре при вариации начального распределения напряжения, давления нагнетания в трещине, упругих модулей сжатия и сдвига, а также таких пластических характеристик как: когезия  $Y_0$ , пластическая деформация начала разупрочнения  $\gamma^*$ .

В таблицах 5.6 и 5.7 представлены результаты расчетов с вариацией наборов упруго-прочностных и пластово-промысловых параметров, представленных в таблицах 5.8 и 5.9. По представленным результатам можно заметить, что при меньшем значении давления нагнетания (столбец №1), трещина приобретает конфигурацию «вилки», причем при уменьшении коэффициента когезии, раскрытие вилки становится менее заметным. Для значений I-III, во втором столбце, конфигурация трещины также принимает форму «вилки». Далее, с ростом давления (и уменьшением коэффициента когезии), трещина становится более ветвистой (увеличивается ее ширина). Наибольшей разветвленности трещина достигает в случае равенства горизонтальных и вертикальных напряжений, малого коэффициента когезии и близких значений модулей сдвига и сжатия.

Изменения конфигураций представленных решений монотонно меняются по направлениям 1-2-3 при фиксированных I, II, III и по направлениям I-II-III при фиксированных 1, 2 и 3. Исключением является клетка II. Появление вилки выглядит нелогично при эволюции структуры решения в обоих направлениях и требует дополнительных исследований, хотя

подобные структуры наблюдаются при расчетах с большими значениями пластических напряжений (что соответствует коэффициенту Био, равному 0.3 – таблица 5.1), а также в экспериментах (Suarez-Rivera, и др., 2013).

Таблица 5.6 Конфигурация трещин для наборов вариантов, представленных в таблицах 5.8 и 5.9.

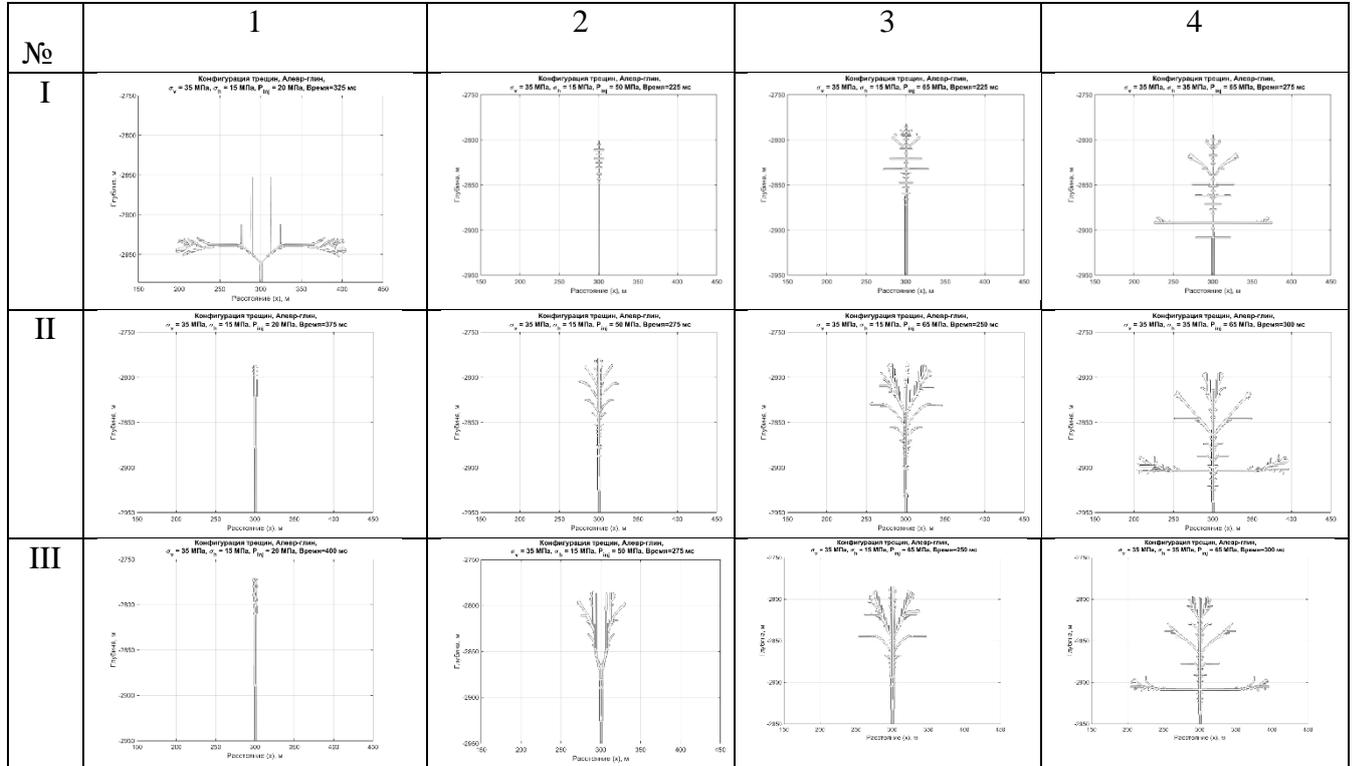


Таблица 5.7 Интенсивность пластической деформации для набора вариантов, представленных в таблицах 5.8 и 5.9

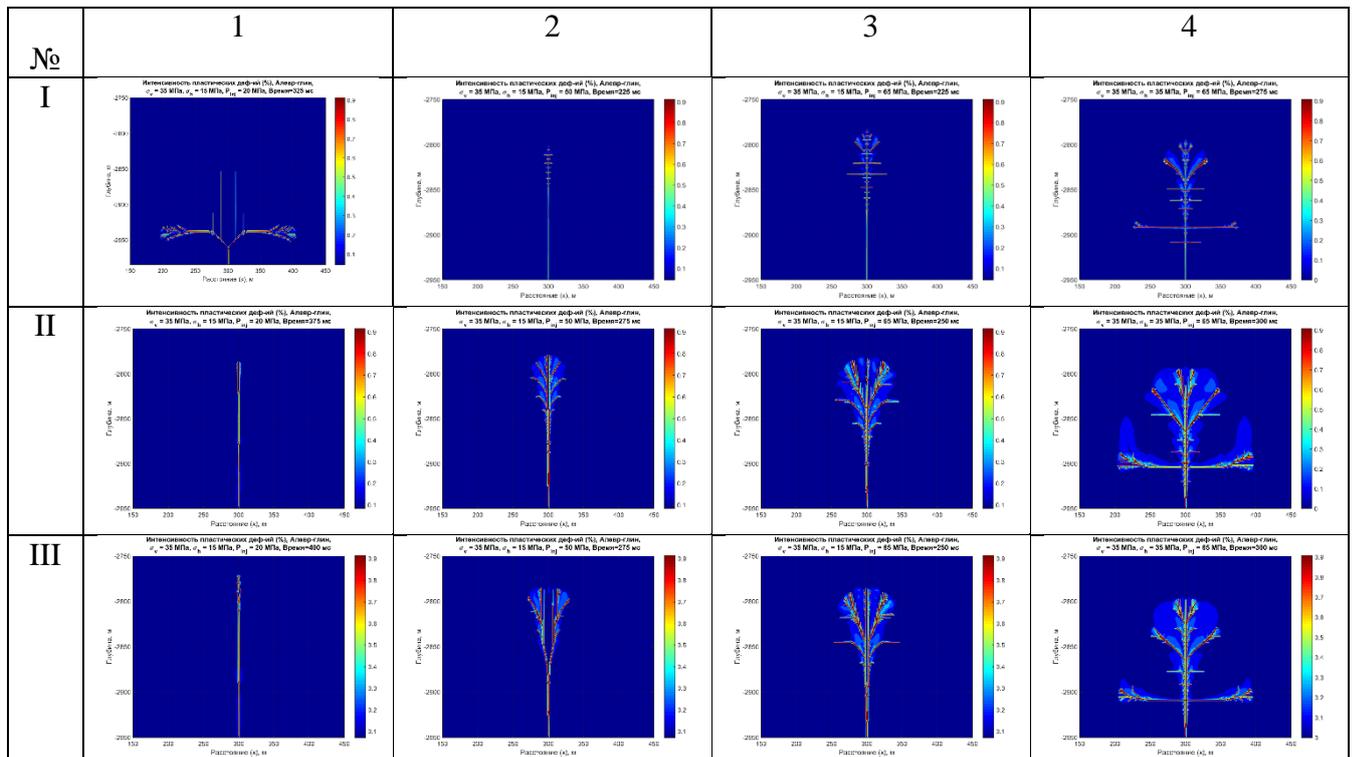


Таблица 5.8 Уруго-прочностные параметры

Уруго-прочностные параметры	$K$ , МПа	$G$ , МПа	$Y_0$ , МПа	$\gamma^*$
I	2950	2800	7	0,001
II	2950	2800	5	0,002
III	3000	2800	5	0,002

Таблица 5.9 Стрессы и параметры закачки

Стрессы и параметры закачки	$\sigma_v$ , Мпа	$\sigma_H$ , МПа	$P_{inj}$ , Мпа
1	35	15	20
2	35	15	50
3	35	15	65
4	35	35	65

### *Сопоставление с экспериментом и качественное обоснование результатов*

Представленные численные расчеты качественно повторяют полученные в (Suarez-Rivera и др., 2013) экспериментальные данные для ГРП горизонтальной скважины. На рисунке 5 этой статьи показано, что характер распространения трещины ГРП в образце сланцевой формации, является аналогичным случаям, описанным в настоящей работе, т.е. в скважине, расположенной вдоль напластования, магистральная вертикальная трещина сопровождается вторичными горизонтальными трещинами. Результат, представленный на рисунке 5 работы (Suarez-Rivera и др., 2013), является лишь одним из многочисленных экспериментов, проведенных авторами с образцами сланцевых формаций. Результаты этих экспериментов классифицированы в представленной на рисунке 6 этой работы схеме типичных конфигураций, наиболее часто встречающихся в экспериментах. Имеет место качественное сходство представленных схем с полученными в настоящем отчете численными структурами. В качестве причин такого ветвления авторы указывают влияние таких механических свойств горных пород как когезию и угол внутреннего трения, то есть фактически апеллируют к рассмотренному в данной работе существенному влиянию механизма разрушения пластической деформации. Данный раздел написан по материалам статьи (Stefanov Y.P., и др, 2016).

### **Прогноз ветвления трещин в двухслойном массиве**

Как было сказано ранее, БС представляет собой слоистое месторождение. Для оценки влияния смены слоев с различными упруго-пластичными и прочностными свойствами была рассмотрена двухслойная среда с песчаником, перекрывающим алевролито-глинистые породы, и наоборот. Эти литологические разности были выбраны как породы с наиболее контрастными характеристиками.

Поведение трещин в алевролито-глинистом прослое одинаково в обоих рассмотренных случаях и размер вторичной трещины сохраняется. В песчанике трещина соответствует трещине при распространении в однослойной среде: трещина прямая и не ветвится. Вторичная трещина в

алевролито-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 алевролито-глинистых породах определяется интенсивностью пластических деформаций.

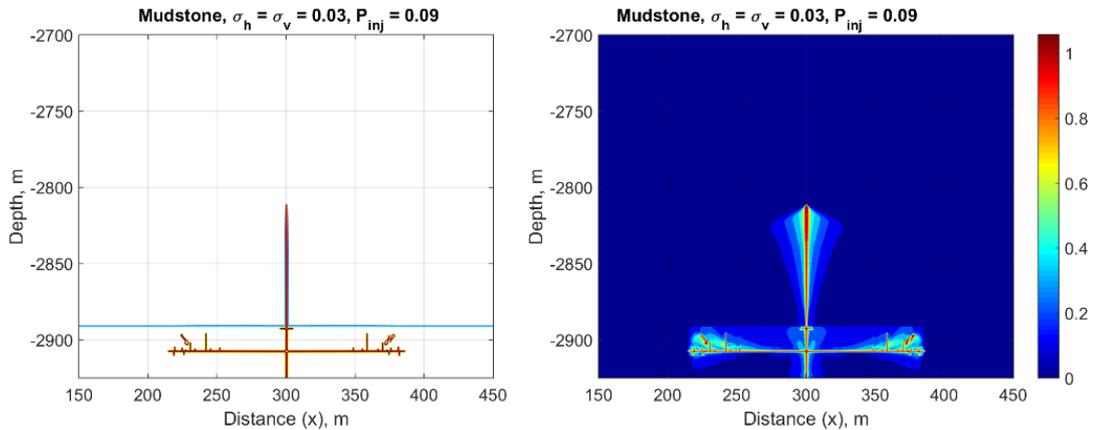


Рисунок 5.20 Конфигурация трещин (слева), интенсивность пластических деформаций (справа) в двухслойном разрезе, песчаник залегает над алевролито-глинистым литотипом

С другой стороны, поведение трещины в двухслойной 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 – таблицы 5.8 и 5.9 (предыдущий раздел). Раздел написан по материалам статьи (Stefanov Y.P. и др., 2016).

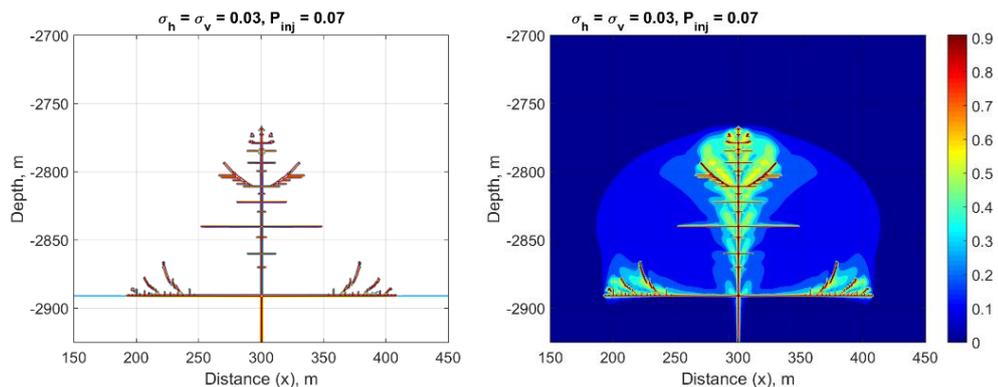


Рисунок 5.21 Конфигурация трещин (слева), интенсивность пластических деформаций (справа) в двухслойном разрезе, песчаник подстилает алевролито-глинистый литотип

### Прогноз ветвления трещин в многослойном массиве

На третьем этапе была рассмотрена 9-тислойная модель среды с параметрами, полученными по результатам керновых испытаний. Результаты представлены на рисунке 5.22. Распространение трещин в слоистой среде зависит от соотношения упругопластических характеристик слоев и их мощности. Пластическая деформация ограничивает роль

растягивающего напряжения, что увеличивает вероятность возникновения ветвления. Ветвление может быть многостадийным, как мы наблюдали в предыдущем разделе и трещины могут соединяться друг с другом и образовывать структуры елочного типа или приобретать овальную форму. 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. Раздел написан по материалам статьи (Stefanov Y.P. и др., 2016).

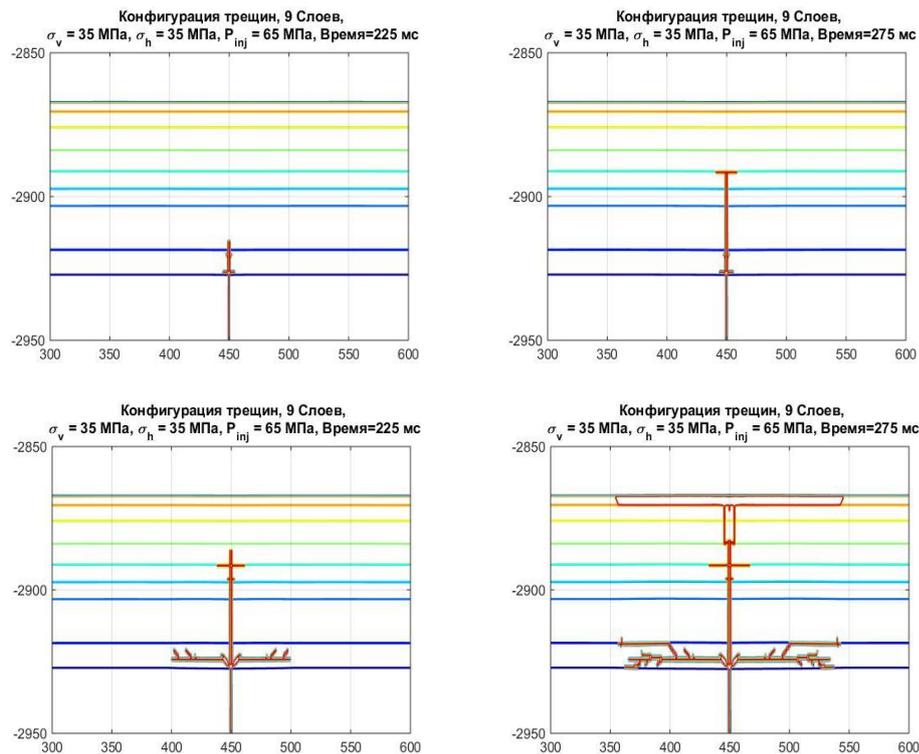


Рисунок 5.22 Конфигурация трещин, распространяющихся в девятислойной среде (верхняя строка)  $t_0=2000$  мс, (нижняя строка)  $t_0=1000$  мс

### Оптимизация ГРП на примере Вынгаяхинского месторождения

По материалам, предоставленным по скважине 2152 Вынгаяхинского месторождения был составлен схематический многослойный разрез (Рисунок 5.23). На данном этапе схематизация разреза заключалась в том, что каждой выделенной по разрезу пачке был присвоен преобладавший в ней литотип и его упругопластические свойства. Мощности слоев были приняты в соответствии с мощностями выделенных пачек баженовской свиты. Начальное распределение стрессов было принято средним по разрезу (Таблица 5.10).

		Аргиллит
	BV	Силицит глинистый низкоуглеродистый
	BIV	Карбонатная и кремнисто- карбонатная порода низкоуглеродистая
	BIII	Глинисто-кремнистая сильно-углеродистая порода
	BII	Глинисто-кремнисто- карбонатная сильно- углеродистая порода
	BI	Силицит глинистый низкоуглеродистый
	Georg	Аргиллит

Рисунок 5.23 Схематический разрез баженовской свиты по скважине 2152 Вынгаяхинского месторождения

Таблица 5.10 Начальное распределение стрессов по разрезу

	$\sigma_v$ , МПа	$\sigma_h$ , МПа
<b>Многослойный разрез</b>	46	32

Параметры закачки выбирались в соответствии с технологическими и экологическими ограничениями. Как было сказано выше, ограничением сверху для давления закачки являются технологические возможности проведения мероприятий ГРП, что соответствует давлению  $P_{inj} = 65$  МПа. Так же варьируемым параметром, с точки зрения рассматриваемых режимов нагнетания является время закачки, которое изменялось от 100 до 1500 миллисекунд. Таким образом, определяющими режим закачки параметрами для данных расчетов выступили давление нагнетания и время закачки. Дополнительным ограничением выступило экологическое требование не прорывать насквозь прослой аргиллита (Георгиевская свита), подстилающий первую пачку баженовской свиты. Исходя из этого требования было сформулировано условие, что трещина ГРП не должна проникать в Георгиевскую свиту на глубину более половины мощности свиты, что соответствует длине трещины порядка 11 м.

Представлена также концепция «псевдостационарного» решения, состоящая в том, что закачка прекращается в момент, когда объем (в двумерном моделировании – площадь) достигает некоторой заданной величины. Функция давления закачки, представленная на рисунке 5.4, перестает играть роль граничного условия, а давление в трещине перераспределяется вплоть до установления равновесия с создавшимся на тот момент напряженным состоянием в пласте. Напряженное состояние, в свою очередь, также меняется в процессе установления, так что совокупные динамические процессы могут быть весьма интенсивными и зачастую исключают

выход на стационарный режим в технологически обозримое время. Поэтому в настоящей работе эти процессы исключены из рассмотрения и стационарным – псевдостационарным – решением считается состояние в трещине и окружающей ее породе на момент окончания закачки. Поскольку при отсутствии утечек объем трещины равен объему закаченной в нее несжимаемой жидкости, то сформулированное условие эквивалентно экономическому ограничению (по объему закаченных агентов гидроразрыва).

Для учета указанных выше требований был проведен расчет распространения трещины в однослойной среде – аргиллите – и получено псевдостационарное решение для заданной длины трещины. Таким образом, удалось выяснить, какое количество закачиваемой жидкости соответствует удовлетворяющей нашим требованиям трещине,  $V = 0.164$ .

Далее, были рассмотрены различные режимы закачки (Таблица 5.11) при заданном расходе, удовлетворяющие условию по длине трещины.

Таблица 5.11 Режимы закачки, удовлетворяющие ограничению по длине трещины при заданном расходе жидкости, нагнетаемой в трещину

<b><math>P_{inj}</math>, давление нагнетания, МПа</b>	<b>T, время закачки, мс</b>	<b>L, длина трещины, м</b>
65	100	8
65	200	9
65	500	10
65	1000	10
65	1500	9
55	100	8
55	200	8
55	500	8
55	1000	10
55	1500	9

Полученные режимы были использованы для расчетов распространения трещины в многослойной среде. При фактической инициации трещины ниже первой пачки, длина трещины на момент расхода нагнетаемой жидкости, соответствующего установленному для псевдостационарного решения для аргиллита, не превышает 13 м для всех рассмотренных режимов нагнетания. Ветвления трещины на данном этапе тоже не наблюдается (Таблица 5.12). В результате, при соблюдении экологического ограничения по сохранности аргиллита, самая протяженная трещина прорывает отложения баженовской свиты до второй пачки.

Таблица 5.12 Длина трещины в многослойном разрезе при заданных режимах закачки

$P_{inj}$ , давление нагнетания, МПа	T, время закачки, мс	L, длина трещины, м
65	100	10
65	200	13
65	500	12
65	1000	13
65	1500	14
55	100	13
55	200	13
55	500	13
55	1000	12
55	1500	11
45	100	11
45	200	13
45	500	13
45	1000	14

При ослаблении ограничений по расходу и снятии запрета на прорыв аргиллита трещиной ГРП в многослойном разрезе при заданных режимах трещина проникает на всю мощность разреза и ветвится в отдельных пачках, образуя различные структуры: вилка (Рисунок 5.24), щетка (Рисунок 5.25), (Таблица 5.13).

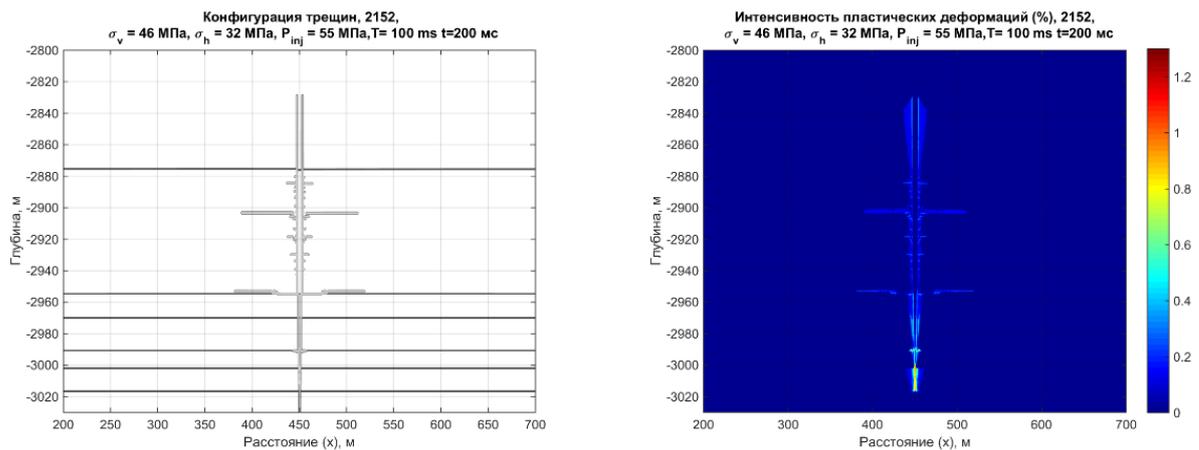


Рисунок 5.24 Распространение трещины ГРП в многослойном разрезе. Конфигурация трещины – ‘вилка’

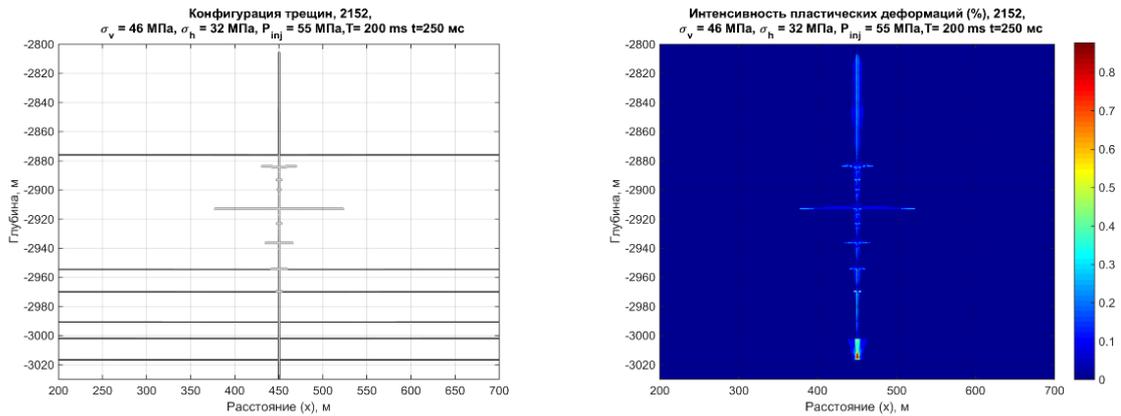


Рисунок 5.25 Распространение трещины ГРП в многослойном разрезе. Конфигурация трещины – ‘щетка’

По результатам, представленным в таблице 5.13, можно отметить, что основным ограничением в этих расчетах, в ситуации, когда мы считаем трещину в георгиевской свите так или иначе купированной, является ограничение для пятой пачки баженовской свиты: трещина не должна прорывать пачку BV, но при этом максимально охватить все подстилающие, в особенности пачку VII, являющуюся целевым интервалом моделирования развития трещин - нефтеносным интервалом БС Вынгайхинского месторождения. Отсутствие ограничения на сохранность георгиевской свиты позволило рассмотреть большие фиксированные для псевдостационарного решения расходы нагнетаемой в трещину жидкости. В качестве базового расчета был рассмотрен режим нагнетания при давлении  $P_0 = 65$  МПа и времени закачки  $t_0 = 100$  мсек.

Хотя некоторые из представленных результатов, очевидно, «на глаз» не удовлетворяют сформулированным условиям максимального охвата второй пачки и непроникновения в пятую, иные требуют сопоставления количественных характеристик для выявления преимуществ выбранного режима закачки. Можно отметить, что при прочих равных условиях, при более низком давлении нагнетания данный расход реализуется в менее ветвистые конфигурации трещин, распространяющиеся на большие глубины. Схожий эффект возникает при увеличении времени нагнетания – трещина менее ветвистая, но более протяженная. В качестве количественных характеристик эффективности закачки были выбраны (1) длина трещины во второй пачке; (2) удельная доля ИПД во второй пачке (Рисунок 5.26).

Первый параметр представляется нам основным, дающим представление об перспективности выбираемого дизайна ГРП и определяющего КПД использования трещиноватой системы. Вторым параметром является контрольным и характеризующим степень близости псевдостационарного решения к стационарному – чем больше доля ИПД, тем скорее диссипируют динамические процессы после прекращения закачки и тем скорее

псевдостационарное решение станет стационарным. На схеме, представленной на рисунке 5.26 изображена столбчатая диаграмма значений этих двух параметров.

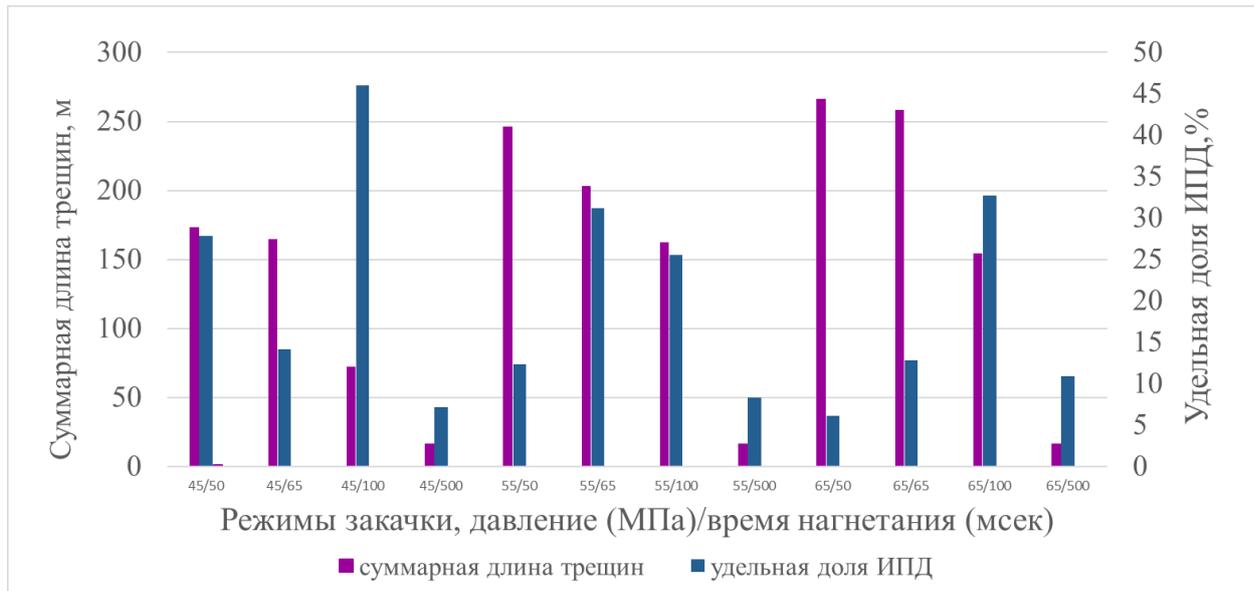
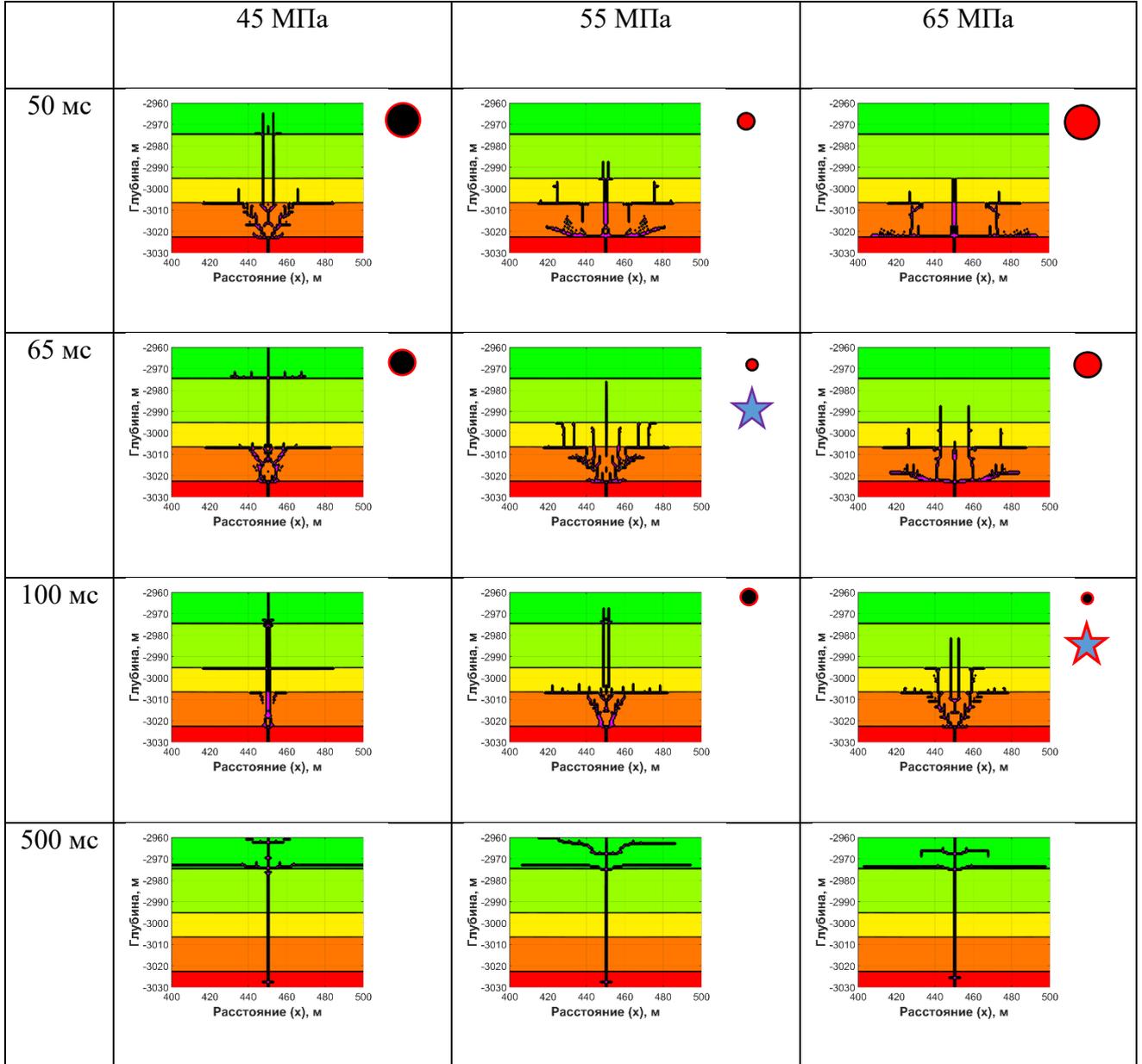


Рисунок 5.26. Суммарная длина трещин и доля интенсивности пластической деформации в зависимости от режима нагнетания флюида в трещину.

Из рисунка 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 (отмечены красными кружками в Таблице 5.13, размер кружка тем больше, чем больше суммарная длина трещины во второй пачке – не в пропорции). Во втором «семействе» решений находятся варианты 45/50, 45/65, 55/100 и 65/100 (отмечены черными кружками в Таблице 5.13), 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 значение удельной доли ИПД, с которой может сравниться лишь один вариант из первого семейства – 55/65. Оба этих варианта отмечены в Таблице 5.13 голубыми звездами. Однако, поскольку псевдостационарное решение варианта 55/65 ближе приближается к пятой пачке, чем псевдостационарное решение варианта 65/100, предпочтение отдается последнему (голубая звезда в красной рамке). Этот вариант и считается реализующим оптимальную закачку, хотя, конечно, проведенные рассуждения являются лишь иллюстративным примером многопараметрического анализа, который следует проводить при выборе оптимального сценария закачки. Данный раздел написан по материалам статьи (Бек Д.Д. и др., 2017).

Таблица 5.13 Конфигурации трещин ГРП в многослойном разрезе при различных соотношениях давления и времени нагнетания флюида в трещину. Начальное распределение эффективных стрессов  $\sigma_v = 30$ ,  $\sigma_h = 16$ . Красные кружки обозначают семейство решений с длиной трещин во второй пачке более 200 метров, черные – более 150, но менее 200 метров. Размер кружка соответствует (непропорционально) длине трещины в своем семействе. Звезды обозначают решения с наибольшей долей ИПД в своем семействе. Обведенная красным звезда обозначает кандидата на оптимальную закачку.



## 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 осязаемое 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 (криопэггов) 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 обоим 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.

## Список сокращений

АВПД – аномально высокое пластовое давление;

БС – баженовская свита;

ГРП – гидроразрыв пласта;

М – мощность мерзлой толщи;

ММП – многолетнемерзлые попорды;

НГКМ – нефтегазоконденсатное месторождение;

НТС – низкотемпературный термостабилизатор;

ОВ – органическое вещество;

ПЖЛ – повторно-жильные льды;

СМС – сезонномерзлый слой;

СПГ – сжиженный природный газ;

СТС – сезонноталый слой;

ТС – термостабилизатор;

## Список литературы

1. Акулич А.В., Звягин А.В. Взаимодействие трещины гидроразрыва с естественной трещиной. //Известия Российской Академии Наук. Механика Жидкости и Газа, 3, 2008. - С. 104–112.
2. Акулич А.В., Звягин А.В. Численное моделирование распространения трещины гидроразрыва. //Вестник Московского Университета. Математика, Механика, 1, 2008. - С. 43–49.
3. Баренблатт Г.И. О некоторых задачах теории упругости, возникающих при исследовании механизма гидравлического разрыва пласта. //Прикладная Математика и Механика, 20 (4), 1956. - С. 475–486.
4. Баренблатт Г.И., Христианови, С.А. О модуле сцепления в теории трещин. //Механика твёрдых Тел, (2), 1968. - С. 70–75.
5. Баулин В.В., Аксенов В.И., Дубиков Г.И., Ривкин Ф.М., и др. Инженерно-геологический мониторинг промыслов Ямала, -Институт СО РАН Тюмень, т.2, ISBN 5-89181-006-9, 1996. - 237 с.
6. Баулин В.В., Иванова Н.В., Ривкин Ф.М. и др. Прибрежная криолитозона северо-западного Ямала: проблемы освоения // Криосфера Земли. 2005.-Т. 9, № 1. - С. 28–37.
7. 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. (IF Scopus (SJR) (2018) 0.201, Q3).
8. Брушков А.В., Булдович С.Н., Волохов С.С., Гарагуля Л.С., Комаров И.А., Мотенко Оспенников Е.Н., Пармузин С.Ю., Пустовойт Г.П. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях (под.ред Л.С.Гарагули и А.В. Брушкова). - Геоинфо. Москва, 2016. -512 с.
9. Гарагуля Л.С., Кудрявцев В.А., Кондратьева К.А. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. -Москва: Издательство Московского университета, 1974. - 430 с.
10. Гордеев Ю.Н. Автомодельное решение задачи о распространении псевдотрехмерной вертикальной трещины гидроразрыва в непроницаемом пласте. //Механика Жидкости и Газа, 6, 1955. - С. 79–86.
11. Городецкий С.Э. Экспериментальные исследования ползучести и длительной прочности мерзлых грунтов, 1969.
12. Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. (под ред. Л. Г. Китаенко). -Москва: Недра, 1980. - 380 с.
13. Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Основы моделирования криогенных физико-геологических процессов. -Москва: Недра, 1984. - 230 с.
14. Григорян С.С., Красс М.С., Гусева Е.В., Георгиевич Г.С. Количественная теория геокриологического прогноза. (под ред. Солод Р.Д.). -Москва: Издательство Московского университета, 1987. - 266 с.
15. Гурарин Ф.Г., Матвиенко Н.И. Палеогеография баженовской свиты по распределению в ней урана.//Перспективы нефтегазоносности юго-востока Западной Сибири, Новосибирск, 1980. - С. 81–90
16. Достовалов Б.Н. О физических условиях образования морозобойных трещин и развития трещинных льдов в рыхлых породах. Исследования вечной мерзлоты в Якутской республике. -Москва: Издательство Академии Наук СССР, 3 изд., 1952. - С. 162–194.
17. Друккер Д.Ч., Прагер В. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование. (под ред. В.Н. Николаевского), Механика. Новое в зарубежной науке. 2. Определяющие законы механики грунтов. -Москва: Мир, 1975. - С. 166–177.
18. Ершов Э.Д. (ред.). Геокриология СССР. Западная Сибирь. -Москва: Недра, 1989. - 454 с.

19. Ершов Э.Д., Гарагуля Л.С., Булдович С.Н., Оспенников Е.Н., Комаров И.А., Пармузин С.Ю., Лисицына О.М., Брушков А.В. Основы геокриологии Ч.4. Динамическая геокриология. - Москва: Издательство МГУ, ISBN 5-211-04360-X, 2001. - 688 с.
20. Зазовский А.Ф. Распространение плоской круговой трещины гидроразрыва в непроницаемой горной породе. //Механика твёрдых Тел, 2, 1979. - С. 103–109.
21. Зазовский А.Ф., Одишария М.Г., Песляк Ю.А. Автомодельные решения задачи о распространении трещины гидроразрыва в непроницаемой горной породе. //Механика твёрдых Тел, 5, 1986. - С. 92–100.
22. Занин Ю.Н., Замирайлова, А.Г., Эдер В.Г. Опыт изучения черносланцевой формации (баженовская свита западно-сибирского бассейна). // VII Всероссийское литологическое совещание 28-31 октября 2013. - С. 324–327.
23. Зубков М.Ю. (2001) Состав, строение и условия образования баженовской и абалакской свит Красноленинского свода (Западная Сибирь). // Литология и полезные ископаемые, 2001. - С. 37–48.
24. Зубков М.Ю., Пормейстер Я.А., Бондаренко П.М. Прогноз трещинных коллекторов в отложениях баженовской и абалакской свит на основе результатов тектонофизического моделирования. // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО, Ханты-Мансийск, 2002. - С. 244–253.
25. Зубков М.Ю., Сонич, В.П., Чухланцева В.Я. Литолого-геохимические особенности отложений баженовской свиты Салымского месторождения. \Сб. научн. тр. СибНИИ НП «Особенности подсчета запасов нефти в баженовских отложениях Западной Сибири». Тюмень, 1985. - С. 72-83.
26. Калмыков Г.А. Строение баженовского нефтегазоносного комплекса как основа прогноза дифференцированной нефтепродуктивности: диссертация д.г.-м.н. 25.00.10 – Москва: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 2016.
27. Каракин А.В. Проблема гидроразрыва в верхних слоях коры //Физика Земли, 2006, 8, - С. 27- 42.
28. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. -Киев: Наук. Думка, 1970 -308 с.
29. Комаров И.А. Термодинамика и теплообмен в дисперсных мерзлых попродах. -Москва: Научный мир,. 2003 -608 с.
30. Комаров И.А., Ананьев В.В., Бек Д.Д. К проблеме использования хладоресурса сжиженного природного газа для целей термостабилизации грунтов. //Криосфера Земли, XIX, 2, 2015. - С. 75–80.
31. Комаров И.А., Ананьев В.В., Бек Д.Д. Использование хладоресурса сжиженного природного газа для промораживания засоленных грунтов, вмещающих криопэги. // ОФМГ Основания, Фундаменты и Механика Грунтов, 2016, № 2, - С. 31–36.
32. Комаров, И.А., Ананьев В.В., Бек Д.Д., Исаев В.С. Проблемы термостабилизации грунтовых оснований инженерных сооружений. / Материалы V конференции гкриологов России , Москва. 2016. - С. 266–278.
33. Комаров И.А., Исаев В.С. Криология Марса и других планет Солнечной системы. -Москва: Научный мир,. 2010. - 232 с.
34. Комаров И.А., Мироненко М.В., Кияшко Н.В. Совершенствование нормативной базы по расчетной оценке теплофизических свойств пород и криопэгов // ОФМГ (Основания, фундаменты и механика грунтов), 2012, № 2. - С. 25–30.
35. Королёв В.А., Трофимов В.Т., Самарин Е.Н., Николаева С.К., Широков В.Н., Вознесенский Е.А., Соколов В.Н., Панасьян Л.Л., Бершов А.В., Чернов М.С., Крупская В.В., Фролова Ю.В., Андреева Т.В., Григорьева И.Ю., Ладыгин В.М., Закусин С.В., Комаров И.А., Коптева-Дворникова М.В., Кушнарева Е.С., Булыгина Л.Г. Лабораторные работы по грунтоведению: уч. Пособие (под ред. В.Т.Трофимова и В.А.Королёва). -КДУ Москва, ISBN 978-5-91304-724-3, 2017. - 654 с.
36. Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири. -Москва: Научный мир, 2010 - 351с.

37. Кудрявцев В.А., Достовалов Б.Н., Кондратьева К.А., Меламед В.Г., Общее мерзлотоведение (геокриология). (под ред. Кудрявцева В.А.). - Москва: Издательство Московского университета, 1978. - 463 с. .
38. Максимов Г.Н. Руководство по устройству свйных фундаментов в вечномерзлых грунтах с предварительным охлаждением оснований. (под ред. Федорович Д.И.) (II). -Москва: Стройиздат, 1979. - 33 с.
39. 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.
40. Николаевский В.Н. Определяющие уравнения пластического деформирования сыпучей среды. // Прикладная Математика и Механика, 35(6), 1971. - С. 1017–1029.
41. Осипова Е.Н. Зональный прогноз нефтегазоносности нижнемелового комплекса нюрольской мегавпадины на основе моделирования геотермического режима материнской баженовской свиты. / Национальный исследовательский томский политехнический университет., 2016. - 21 с.
42. Полевой А.А., Умрихин Р.В. Особенности использования холодильных установок в условиях Якутии (Республика Саха). / Актуальные проблемы механики, прочности и теплопроводности при низких температурах. Теория и методы замораживания грунтов: Материалы XI-й конференции. Санкт-Петербург: СПбГУНиПТ. 2008. - С. 59–62
43. Пустовойт Г.П., Венкстерн А.А., Барке В.В. (2014) Программа расчета процесса промерзания-оттаивания пород. 2014.
44. Рачевский Б.С. Сжиженные углеводородные газы. -Москва: Нефть и газ. 2009. - 640 с.
45. Рачевский Б.С., Шушерина Е.П., Отрошенко О.П., Макарец В.Н. Исследование тепературных деформаций мерзлых горных пород при их охлаждении до -165 °С. Мерзлотные исследования XII. -Москва: Издательство Московского университета, 1972. - С. 209–215.
46. Ривкин Ф. М., Иванова Н. В., Кузнецова И. Л. Засоленные мерзлые грунты и криопэги полуострова Ямал и прибрежной зоны шельфа Карского моря // Проблемы строительства на засоленных грунтах. -Эпоха, 2007. - С. 34–43.
47. Сравнение эффективности замораживания грунтов термостабилизаторами различных производителей. Тюмень: НПО Фундаментстройаркос.
48. Стефанов Ю.П. Локализация деформации и разрушение в геоматериалах. Численное моделирование. Физическая Мезомеханика, 5(5), 2002. - С. 107–118.
49. Стефанов Ю.П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов. // Физическая Мезомеханика, 8(3), 2005. - С. 129–142.
50. Стефанов Ю.П. Режимы дилатансии и уплотнения развития деформации в зонах локализованного сдвига. // Физическая Мезомеханика, 13, 2010. - С. 44–52.
51. Стефанов Ю.П., Поболь И.Л., Князева А.Г., Гордиенко А.И. Рост трещины вблизи границы раздела разнородных материалов в условиях сжатия. // Физическая Мезомеханика, 5(1), 2002. - С. 81–88.
52. Трофимов В.Т., Бадю Ю.Б., Кудряшов В.Г., Фирсов Н.Г. Полуостров Ямал (Инженерно-геологический очерк). -Москва: Изд-во МГУ, 1975. -2 78 с.
53. Трофимов В.Т., Королёв В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров Р.С. Грунтоведение (под ред. В.Т.Трофимова) -Москва: Изд-во МГУ и "Наука", ISBN 5-211-04848-2, 2005. - 1024 с.
54. Филина С.И., Корж М.В., Зонн М.С. Палеогеография и нефтеносность Баженовской свиты Западной Сибири. - Москва: Наука. 1984. -36 с.
55. Хрусталев Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне. - Москва: Издательство МГУ, 2005. - 544 с.
56. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. - Москва: Высшая школа. 1973. - 448 с.
57. Цытович Н.А., Сумгин, михаил И. Основания механики мерзлых грунтов. -Москва:

- Издательство Академии Наук СССР. 1937. - 432 с.
58. Черепанов О.И. Численное моделирование деформации материалов с учетом неустойчивой ветви сигма-эпсилон-диаграммы. // Физическая Мезомеханика, 2(1–2), 1999. - С. 5–16.
  59. Шушерина Е.П., Рачевский Б.С., Отрощенко О.П. Исследование температурных деформаций мерзлых горных пород. Мерзлотные исследования X. -Москва: Издательство Московского университета, 1970. - С. 273–283.
  60. Эдер В.Г., Замирайлова А.Г., Занин Ю.Н., Жигульский И.А. Особенности литологического состава основных типов разрезов баженовской свиты. // Геология Нефти и Газа, 6, 2015. - С. 96–106.
  61. Abé H., Mura T., Keer L. M. Growth rate of a penny-shaped crack in hydraulic fracturing of rocks. *Journal of Geophysical Research*, 81(29), 1976. – pp. 5335–5340, 6292–6298.
  62. Adachi J., Siebrits E., Peirce A., Desroches J. Computer simulation of hydraulic fractures. // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 44, 2007. – pp. 739–757.
  63. Advani S., Lee T., Lee J. Three dimensional modeling of hydraulic fractures in layered media: Finite element formulations. // *Journal of Energy Resources Technology*, 112, 1990. –pp. 1–18.
  64. Anderko A., Pitzer K. S. Equation of state for pure sodium chloride. *Fluid Phase Equilibria*, 79(C), 1992. – pp. 103–112.
  65. Ben Naceur K., Thiercelin M. J., Touboul E. Simulation of fluid flow in hydraulic fracturing: implications for 3D propagation. // *Product Engineering*, 1990.
  66. Beugelsdijk L. J. L., de Pater C. J., Sato K. Experimental Hydraulic Fracture Propagation in a Multi-Fractured Medium. /SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management. 2000. - pp. 1–8.
  67. Blanton T. L. An Experimental Study of Interaction Between Hydraulically Induced and Pre-Existing Fractures. /SPE Unconventional Gas Recovery Symposium. 1982.
  68. Carbonell R., Desroches J., Detournay E. A comparison between a semi-analytical and a numerical solution of a two-dimensional hydraulic fracture. // *International Journal of Solids and Structures*, 36(31–32). 1999. – pp. 4869–4888.
  69. Carter R. D. Derivation of the General Equation for Estimating the Extent of the Fractured Area. In *Drilling and Production Practice*, 1957. - pp. 261–269
  70. Centurion S. Eagle Ford Shale: A Multi-Stage Hydraulic Fracturing , Completion Trends And Production Outcome Study Using Practical Data Mining Techniques. //Spe 149258, 16. 2011.
  71. Chalivendra V. B., Rosakis A. J. Interaction of dynamic mode-I cracks with inclined interfaces. // *Engineering Fracture Mechanics*, 75(8). 2008. - pp. 2385–2397.
  72. Clifton R. J., Abou-Sayed A. S. A Variational Approach To The Prediction Of The Three-Dimensional Geometry Of Hydraulic Fractures. /SPE/DOE Low Permeability Gas Reservoirs Symposium. 1981.
  73. Clifton R. J., Wang J. J. Adaptive optimal mesh generator for hydraulic fracturing. // *Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science*, 1991. - pp. 607.
  74. Cook J., Aps H. D., Green S., Judzis A., Martin J. W., Suarez-rivera R., Marsden R. Rocks Matter : Ground Truth in Geomechanics. // *Oilfield Review*, 2007. - pp. 36–55.
  75. Cook J., Gordon J. E., Evans C. C., March D. M. A mechanism for the control of crack propagation in all brittle systems. /*Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1964.
  76. Cooke M. L., Underwood C. A. Fracture termination and step-over at bedding interfaces due to frictional slip and interface opening. // *Journal of Structural Geology*, 23(2–3). 2001. - pp. 223–238.
  77. Dean R. H., Schmidt J. H. Hydraulic-Fracture Predictions With a Fully Coupled Geomechanical Reservoir Simulator. // *SPE Journal*, 14(04). 2009. - pp. 707–714.
  78. Desroches J., Detournay E., Lenoach B., Papanastasiou P., Pearson J. R. A., Thiercelin M., Cheng A. The Crack Tip Region in Hydraulic Fracturing. /*Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 447(1929), 1994. - pp. 39–48.
  79. Eekelen H. A. M. Hydraulic fracture geometry: fracture containment in layered formation. // *Society*

- of Petroleum Engineers Journal, 22(3), 1982. - pp. 341–349.
80. Fan Y., Economides M. J. Fracturing fluid leakoff and net pressure behavior in frac&pack stimulation. /Paper SPE 29988 International meeting on petroleum engineering, Beijing 14-17 Nov 1995.
  81. Fox A., Snelling P., McKenna J., Neale C., Neuhaus C., Miskimmins J. Geomechanical Principles for Unconventional Reservoirs, 2013.
  82. Gale J. F. W., Reed R. M., Holder J. Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fracture treatments. /AAPG Bulletin, 91(4). 2007. - pp. 603–622.
  83. Garagash D. Propagation of a plain-strain hydraulic fracture with a fluid lag: Early time solution. //International Journal of Solids and Structures, 43(18–19). 2006. - pp. 5811–5835.
  84. Garagash D., Detournay E. Plane strain propagation of a fluid-driven fracture: Small toughness. //Journal of Applied Mechanics, 72(6). 2005. - pp. 916–928.
  85. Geertsma J., De Klerk F. A Rapid Method of Predicting Width and Extent of Hydraulically Induced Fractures. //Journal of Petroleum Technology, 21(12). 1969. - pp. 1571–1581.
  86. Griffith A. A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. //Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 221(582–593). 1921. - pp. 163–198.
  87. Griffith A. A. The theory of rupture. /Proceedings of 1st international congress for applied mechanics, Delft, 1924. - pp. 55–63.
  88. Jeffrey R. G., Bunger A., LeCampion B., Zhang X., Chen Z., van As A., ... Mainguy M. Measuring Hydraulic Fracture Growth in Naturally Fractured Rock. /SPE Annual Technical Conference and Exhibition. 2009.
  89. Jeffrey R. G., Zhang X., Thiercelin M. Hydraulic Fracture Offsetting in Naturally Fractured Reservoirs: Quantifying a Long-Recognized Process. /Proceedings of SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. 2009.
  90. Jeffrey R., Vandamme L., Roegiers J. Mechanical Interactions in Branched or Subparallel. SPE 16422, 9. 1985.
  91. Ji L., Settari A., & Sullivan R. B. A Novel Hydraulic Fracturing Model Fully Coupled With Geomechanics and Reservoir Simulation. //SPE Journal, 14(03). 2009. - pp. 423–430.
  92. Keer L. M., Chen S. H. The intersection of a pressurized crack with a joint. //Journal of Geophysical Research, 86, 1981. - pp. 1032–1038.
  93. Khristianovic S. A., Zheltov Y. P. Formation of Vertical Fractures by Means of Highly Viscous Liquid. /Proceeding of the 4th World Petroleum Congress, 5, 1955. - pp. 579–586.
  94. Komarov I. A., Kiyashko N. V. Method for estimating properties of cryopegs from the Yamal Peninsula. /Tenth Intern. Conf. on Permafrost. Salekhard, 2012. - pp. 169–174.
  95. Kontorovich A. E., Moskvina V. I., Bostrikov O. I., Danilova V. P., Fomin A. N., Fomichev A. S., ... Melenevsky V. N. Main oil source formations of the West Siberian Basin. //Petroleum Geoscience, 3(4). 1997. - pp. 343–358.
  96. Krugman D. G. The Influence of Crack Velocity During Brittle Fracture. /SPE Unconventional Gas Technology Symposium, 18-21 May, Louisville, Kentucky. Society of Petroleum Engineers. 1986.
  97. Lam K. Y., Cleary M. P. Slippage and re-initiation of (hydraulic) fractures at frictional interfaces. //International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 8(6). 1984. - pp. 589–604.
  98. Leem J., Reyna J. Shale geomechanics: Optimal multi-stage hydraulic fracturing design for shale and tight reservoirs. London: Taylor & Francis Group, 2014.
  99. Lenoach B. The crack tip solution for hydraulic fracturing in a permeable solid. //Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 43(7). 1995. - pp. 1025–1043.
  100. Ming Yuan He, Evans A. G., Hutchinson J. W. Crack deflection at an interface between dissimilar elastic materials: Role of residual stresses. //International Journal of Solids and Structures, 31(24). 1994. - pp. 3443–3455.
  101. Morgan W. E. A fully implicit stochastic model for hydraulic fracturing based on the discontinuous

- deformation analysis, 2014.
102. Nordgren R. Propagation of vertical hydraulic fractures. //Society of Petroleum Engineers, 12(4), 1972. - pp. 306–314.
  103. Omlin S., Development of Massively Parallel Near Peak Performance Solvers for Three-Dimensional Geodynamic Modelling, doctoral thesis, 2010.
  104. Perkins T. K., Kern L. R. Widths of Hydraulic Fractures. //Journal of Petroleum Technology, 13(09). 1961. - pp. 937–949.
  105. Potluri N. K., Zhu D., Hill A. D. The Effect of Natural Fractures on Hydraulic Fracture Propagation. /SPE European Formation Damage Conference. 2005.
  106. Renshaw C. E., Pollard D. D. An experimentally verified criterion for propagation across unbounded frictional interfaces in brittle, linear elastic materials. //International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And, 32(3). 1995. - pp. 237–249.
  107. Rummel F., Möhring-Erdmann G., Baumgärtner J. Stress constraints and hydrofracturing stress data for the continental crust. //Pure and Applied Geophysics PAGEOPH, 124(4–5). 1986. - pp. 875–895.
  108. Siebrits E., Peirce A. P. A efficient multi-layer planar 3D fracture growth algorithm using a fixed mesh approach. //International Journal for Numerical Methods in Engineering, 53(3). 2002. - pp. 691–717.
  109. Spence D. A., Sharp P. Self-Similar Solutions for Elastohydrodynamic Cavity Flow. /Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 400(1819). 1985. - pp. 289–313.
  110. Stefanov Y. P., Chertov M. A., Aidagulov D. R., Myasnikov A. V. Dynamics of inelastic deformation of porous rocks and formation of localized compaction zones studied by numerical modeling. //Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 59, 2011. - pp. 2323–2340.
  111. 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.
  112. Suarez-Rivera R., Et.al. Understanding the effect of rock fabric on fracture complexity for improving completion design and well performance. /International Petroleum technology Conference, 2013.
  113. Thiercelin M., Makkhyu E. Stress Field in the Vicinity of a Natural Fault Activated by the Propagation of an Induced Hydraulic Fracture. /American Rock Mechanics Association, 2007. - pp. 1617–1624.
  114. Thiercelin M., Roegiers J. C., Boone T. J., Ingraffea A. R. An investigation of the material parameters that govern the behavior of fractures approaching rock interfaces. /6th ISRM Congress. 1987. - pp. 263–269.
  115. Underwood C. A., Cooke M. L., Simo J. A., Muldoon M. A. Stratigraphic controls on vertical fracture patterns in Silurian dolomite, northeastern Wisconsin. /AAPG Bulletin, 87(1). 2003. - pp. 121–142.
  116. Vandamme L., Curran J. H. A three-dimensional hydraulic fracturing simulator. //International Journal for Numerical Methods in Engineering, 28(4). 1989. - pp. 909–927.
  117. Voller V., Cross M. Accurate solutions of moving boundary problems using the enthalpy method. //International Journal of Heat and Mass Transfer, 24(3). 1981. - pp. 545–556.
  118. Warpinski N. R. Measurement of Width and Pressure in a Propagating Hydraulic Fracture. //SPE Journal, 25(01). 1985. - pp. 46–54.
  119. Warpinski N. R., Teufel L. W. Influence of Geologic Discontinuities on Hydraulic Fracture Propagation. //Journal of Petroleum Technology, 39(02). 1987. - pp. 209–220.
  120. Zhang X., Jeffrey R. G. The role of friction and secondary flaws on deflection and re-initiation of hydraulic fractures at orthogonal pre-existing fractures. //Geophysical Journal International, 166(3). 2006. - pp. 1454–1465.

121. Zhang X., Jeffrey R. G., Thiercelin M. Escape of fluid-driven fractures from frictional bedding interfaces: A numerical study. //Journal of Structural Geology, 30(4). 2008. - pp. 478–490.
122. Zhang X., Thiercelin M. J., Jeffrey R. G. Effects of Frictional Geological Discontinuities on Hydraulic Fracture Propagation. /SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. 2007. - pp. 1– 11.
123. Zhou J., Chen M., Jin Y., Zhang G. Analysis of fracture propagation behavior and fracture geometry using a tri-axial fracturing system in naturally fractured reservoirs. //International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45(7). 2008. - pp. 1143–1152.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А. Программный продукт, используемый для моделирования температурных полей и ореолов промерзания пород

Задача реализована с помощью программного продукта TUNDRA (Пустовойт, Венкстерн, Барке, 2014), предназначенного для моделирования методом конечных разностей процессов промерзания и оттаивания в дисперсных горных породах (грунтах), взаимодействующих с окружающей средой и инженерными сооружениями, в том числе термостабилизаторами, с учетом фазовых переходов влаги в диапазоне отрицательных температур (кривых незамерзшей воды). Используются явная конечно-разностная схема с регуляризацией, что позволяет в несколько раз увеличить шаг во времени и во столько же раз сократить время счета, а также энтальпийная форма представления и метод балансов. Это приводит к наглядной физической интерпретации результатов и существенно повышает точность определения положения границ промерзания-оттаивания. Настоящая версия программы решает двумерные задачи в декартовых или в цилиндрических координатах (в последнем случае задача является трехмерной осесимметричной).

### Теоретические основы модели

Кондуктивный перенос тепла описывается эмпирическим законом Фурье, который устанавливает пропорциональную зависимость между плотностью теплового потока  $q$  и градиентом температуры  $T$ :

$$q = -\lambda \operatorname{grad} T, \quad (1.1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

При фазовых превращениях "лед–вода" теплопроводность и теплоемкость пород изменяется, поэтому уравнение теплопроводности записывается отдельно для талой и мерзлой зоны, то есть получается система двух уравнений с двумя неизвестными температурами:  $T_1(x, y, z, \tau)$  в талой зоне и  $T_2(x, y, z, \tau)$  – в мерзлой. Положение границы раздела фаз также является неизвестной функцией времени, которая определяется из так называемого условия Стефана, представляющего собой закон сохранения энергии при выделении скрытой теплоты фазового перехода. Запишем условие Стефана для одномерного случая:

$$Q_f \, dh/d\tau = \lambda_2 \partial T_2(x, \tau)/\partial x|_{x=h} - \lambda_1 \partial T_1(x, \tau)/\partial x|_{x=h}, \quad (1.2)$$

где  $Q_f$  – скрытая теплота фазового перехода на единицу объема пород;

$h$  – текущая координата фазовой границы, рассматриваемая как неизвестная функция времени; индексы 1 и 2 относятся к талой и мерзлой зоне, соответственно. Задача о фазовых переходах в указанной постановке получила название задачи Стефана.

В глинистых породах, особенно в засоленных, фазовые превращения связанной воды происходят в диапазоне температур, ширина которого определяется видом кривой содержания незамерзшей воды. Поэтому в отличие от талой зоны, мерзлая зона описывается более сложным уравнением:

$$(C + d Q_w / d T) \partial T / \partial \tau = \text{div} ( \lambda \text{grad} T ), \quad (1.3)$$

где  $Q_w = W_w(T) \cdot L(T)$ ,  $W_w(T)$  – содержание незамерзшей воды в попрадах при температуре  $T$ , кг/м<sup>3</sup>,  $L(T)$  – удельная теплота фазового перехода связанной воды при температуре  $T$ .

Задача о фазовых переходах в указанной постановке относится к классу нелинейных задач, и не имеет не только точных, но и приближенных аналитических решений. Такие задачи решаются численно. Основным методом решения является метод конечных разностей. Он состоит в том, что расчетная область дискретизируется во времени и пространстве, то есть покрывается прямоугольной сеткой, в узлах которой задаются теплофизические характеристики и определяются искомые температуры. Дискретизируется также и время: вся система рассматривается только в определенные моменты (как говорят, на заданных временных слоях). Шаг во времени может быть, как постоянным, так и переменным. Тем самым вместо непрерывных в пространстве и во времени температурных полей мы имеем дело с сеточными функциями, областью определения которых являются узлы сетки на заданных временных слоях (Пустовойт, 2013а).

При решении задач Стефана по неявной схеме появляются дополнительные трудности, связанные с фазовыми переходами. Задачи Стефана целесообразно решать по явной схеме, тем более что в настоящее время известны весьма простые регуляризирующие алгоритмы, которые позволяют в несколько раз увеличить шаг во времени без потери устойчивости схемы.

Явная схема позволяет применить так называемый метод элементарных балансов. При традиционном "сеточном" подходе непрерывная среда дискретизируется: узлы сетки сосредоточивают как теплофизические характеристики, так и искомые температуры; между узлами – вакуум. Этот подход удобен для математических исследований конечно-разностных схем. При "балансовом" подходе среда рассматривается как непрерывная, а сетка определяет границы прямоугольных расчетных блоков. В пределах каждого блока порода считается однородной, но соседние блоки могут иметь разные теплофизические характеристики, что позволяет моделировать любые неоднородности. В процессе вычислений для каждого блока

рассчитываются тепловые потоки от сопредельных блоков, составляются и решаются уравнения баланса тепла (отсюда и название метода). При этом считается, что искомые температуры относятся к геометрическим центрам блоков.

В математическом отношении расчетная схема метода балансов эквивалентна обычной сеточной схеме, так что для нее остаются справедливыми все положения теории разностных схем. Однако в отличие от сеточного метода метод балансов имеет наглядную физическую интерпретацию и по форме описания и постановки задач близок к методам физического моделирования (например, к методу гидроанalogий). В частности, для блоков, находящихся при температуре фазового перехода, определяется еще одна физическая величина – относительный объем талой фазы ( $V$ ), который изменяется от нуля до единицы. Это позволяет отслеживать положение границы раздела фаз с погрешностью, в несколько раз меньшей, чем размеры блоков. В.Воллер (Voller, Cross, 1981) строго обосновал корректность введения величины  $V$  и ее использование для уточнения положения фазовой границы.

При решении задач с фазовыми переходами важно сохранить однородность схемы, состоящую в том, что во всех узлах сетки разностные уравнения имеют один и тот же вид. Созданию однородных схем для задачи Стефана препятствует сама ее математическая формулировка: точки фазовой границы являются особыми и описываются уравнением совершенно иного типа. Физически обоснованный путь достижения однородности – так называемая энтальпийная формулировка задачи Стефана. Энтальпия ( $H$ ) имеет физический смысл плотности внутренней энергии, и по ней однозначно восстанавливается температура как функция  $T(H)$ . Поэтому все три зоны (талая, мерзлая и фазовых переходов) могут быть описаны единым дифференциальным уравнением:

$$\partial H / \partial t = \operatorname{div} [ \lambda ( H ) \operatorname{grad} T ( H ) ], \quad (1.4)$$

Поскольку энтальпийная формулировка задач с фазовыми переходами является по своей физической сути формулировкой энергетической, она самым естественным образом сочетается с балансовым (энергетическим) методом построения конечно-разностных схем, который приводит к консервативным схемам, то есть таким, где разностные уравнения выражают собой закон сохранения энергии. Это свойство схемы совершенно необходимо при решении задач Стефана (Пустовойт, 2013а).

Основные особенности алгоритма состоят в следующем: использована явная схема с регуляризацией, что позволяет в несколько раз увеличить шаг во времени (и во столько же раз сократить время счета), использована энтальпийная форма решения и метод балансов, что

приводит к наглядной физической интерпретации результатов и существенно повышает точность определения положения границ промерзания-оттаивания (Пустовойт и др., 2013).

### Алгоритм работы с программой

После задания конфигурации расчетной области задаются грунтовые условия по разрезу. На данном этапе, всем блокам, участвующим в расчетах, присваивается принадлежность к той или иной группе граничных условий или типу грунтов. Так же на этом шаге задаются координаты и тип задачи.

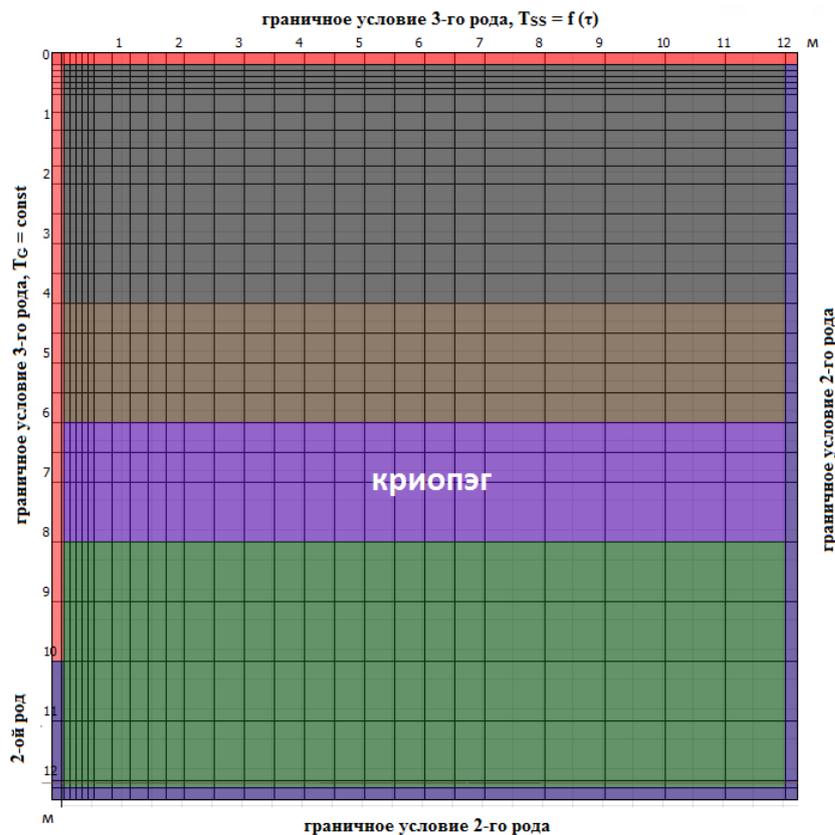


Рисунок 1 Расчетная область

Выделяются три рода граничных условий. Условиям первого рода соответствует температура, задаваемая как функция координат и времени.

$$t = f(x, y, z, \tau), (1.5)$$

По условиям второго рода задается распределение плотности теплового потока, проходящего через рассматриваемую границу

$$q = f(x, y, z, \tau), (1.6)$$

Данные условия используются в случаях, когда тепловой поток не зависит от температуры окружающего грунта и может быть получен в натуральных условиях или рассчитан. Зачастую в рамках рассматриваемого класса задач условие второго рода применяется с нулевым теплотокном, который задается на плоскостях симметрии и нижней, удаленной от тепловыделяющих объектов границе.

По условиям третьего рода задается температура окружающей среды и закон теплообмена между окружающей средой и поверхностью. Этим условием описывается большинство случаев для зданий и сооружений и дневной поверхности грунтов, для описания контакта между сооружением и грунтом с учетом различных промежуточных преград (снежный или растительный покров, теплоизоляция, и т.д.), оказывающих сопротивление теплообмену, а также в случае наличия конвективного теплообмена на поверхности (открытая дневная поверхность, подполья и т.д.). Задается это с помощью термического сопротивления  $R$  или коэффициента конвективного теплообмена  $\alpha$  обратного  $R$  соответственно.

$$q = -\alpha(t_{\text{п}} - t_{\text{в}}), (1.7)$$

В качестве теплофизических характеристик выделенных типов грунтов (раздел 3.3). необходимо задать теплопроводность и объемную теплоёмкость как для талого, так и для мёрзлого грунта каждого выделенного типа, объемную теплоту фазовых переходов и температуру начала замерзания. Также, в случае если известно количество незамерзшей воды в диапазоне отрицательных температур, данный программный продукт позволяет задавать кривую незамерзшей воды, что в свою очередь позволяет корректировать теплофизические характеристики в процессе расчета и вымерзания воды.

Последним задается начальное распределение температур в массиве грунта. В данном случае использовались температуры, полученные в результате натуральных наблюдений в скважинах (Пустовойт и др., 2013)

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Программный продукт, используемый для моделирования водно-ионного режима пород

Химический аспект моделирования поведения водно-солевых систем в области отрицательных температур сводится к расчету фазового состава образований различного валового химического состава характеризующихся определенной температурой и давлением. Для оценки водно-солевого режима массива использовались данные по свойствам грунтов, взятые из нормативного документа СП 25.13330.2012, а для криопэггов - опытные данные по химическому составу проб криопэггов п-ова Ямал, приведенные в работе Л.Н. Крицук (Крицук, 2010), обработанные с помощью программы «FREEZBRINE» (Комаров, Мироненко, Кияшко, 2012). Были рассчитаны: температура начала замерзания; температурная зависимость фазового состава; плотность растворов и их теплоемкость и теплопроводность.

Программа «FREEZBRINE» калибрована согласно данным К.Э.Гиттермана. Она включает в себя следующие химические компоненты, которые могут быть образованы в системе:

- Раствор (23 компонента): катионы :  $\text{Na}^+$  ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})^+$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{FeOH}^+$ ; анионы:  $\text{Cl}^-$  ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{-2}$ ,  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ; нейтральные :  $\text{CO}_2, \text{aq}$  ,  $\text{FeCO}_3, \text{aq}$ ,  $\text{CaCO}_3, \text{aq}$ ,  $\text{MgCO}_3, \text{aq}$ ,  $\text{H}_2, \text{aq}$ ,  $\text{O}_2, \text{aq}$ ,  $\text{CH}_4, \text{aq}$  ,  $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$  ;
- Газы (8 компонентов):  $\text{O}_2, \text{g}$  ,  $\text{H}_2, \text{g}$  ,  $\text{CH}_4, \text{g}$  ,  $\text{CO}_2, \text{g}$ ,  $\text{H}_2\text{O}, \text{g}$  ,  $\text{HCl}, \text{g}$  ,  $\text{HNO}_3, \text{g}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4, \text{g}$  ;
- Твердые фазы (56 компонентов): основные их них:  $\text{H}_2\text{O}(\text{cr}, \text{l})$ ,  $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , HALITE, SYLVITE,  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , ANHYDRITE, , CALCITE, MAGNESITE,  $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , DOLOMITE, ARAGONITE, VATERITE,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , SIDERITE, и др.

Программа «FREEZBRINE» работает в различных режимах: «закрытые или открытые системы», «равновесная или фракционная кристаллизация», «промерзание-оттаивание», «изменение давления», «идеальные – неидеальные газы», «испарение-конденсация воды». Программа «FREEZBRINE» не учитывает возможность нахождения в растворе органических примесей, сульфатредукцию (продукт жизнедеятельности соответствующих бактерий) и химические реакции, типа восстановления сульфатов с образованием сульфидов и сероводорода.

Входные данные в программу: исходная общая минерализация и концентрация основных компонентов химического состава пробы криопэга, полученные на основании химического анализа. Выходные данные: содержание воды, ионов и солей в жидкой, твердой и газообразной

фазах; плотность и объемы фаз; pH растворов; масса в молях, химический потенциал и др., которые рассчитаны для определенного интервала и заданного шага по температуре или давлению. Работа программы проверена на большом экспериментальном и тестовом материале. В частности, с ее помощью были обработаны натурные данные по составу 48 криопэггов п-ова Ямал, полученные для криопэггов, которые расположены на различных геоморфологических уровнях (террасы, пойма, лайда) (Komarov, Kiyashko, 2012).

Валовый химический состав, температура и давление могут быть заданы или являться решением задачи тепломассопереноса. При низких температурах (меньше 40° С) скорости взаимодействия растворов с минералами вмещающих алюмосиликатных пород несопоставимо малы по сравнению со скоростями установления вводно-солевых и водно-газовых равновесий, а также с замерзанием или оттаиванием растворов, поэтому полагается, что системы состоят из раствора электролита, солей (включая карбонаты), льда и газовой фазы. Алюмо-силикатные породы полагаются химически инертными.

### Теоретические основы модели

Равновесный состав системы при температуре  $T$ , давлении  $P$  и заданном валовом химическом составе системы может быть найден методом минимизации свободной энергии Гиббса на множестве линейных ограничений в виде системы уравнений баланса масс.

Приведенная функция свободной энергии системы, содержащей  $M$  твердых фаз, водный раствор (компоненты: вода и растворенные частицы) и  $L$ -компонентную газовую фазу, записывается следующим образом:

$$g = \frac{G}{RT} = \sum_{k=1}^M \mu_k^0 n_k + (\mu_w n_w + \sum_{j=1}^J \mu_j n_j) + \sum_{l=1}^L n_l \mu_l, \quad (1.1)$$

где  $G$  – свободная энергия,  $g$  – приведенная свободная энергия системы,  $n$  – мольные количества компонентов,  $\mu$  – химические потенциалы компонентов, при этом  $\mu_w$  – химический потенциал воды,  $\mu_k^0$  – стандартный химический потенциал однокомпонентной твердой фазы  $k$  (соли или лед),  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – абсолютная температура.  $M$  – количество твердых фаз,  $J$  – количество растворенных частиц,  $L$  – количество газовых частиц. Химический потенциал частицы водного раствора в терминах моляльной концентрации (моль/кг воды), может быть записан как  $\mu_w = \mu_w^0 + \ln a_w$ , где активность воды  $a_w$ , согласно (Anderko, Pitzer, 1992), определяется через осмотический коэффициент раствора и моляльности растворенных частиц

$$\ln a_w = -\phi \frac{W}{1000} \left( \sum_j m_j \right), \quad (1.2)$$

где  $W$  – молекулярная масса воды (18.0153).

Химические потенциалы частиц газового раствора определяются как

$$\mu_l = \mu_l^0 + \ln a_l = \mu_l^0 + \ln(x_l \gamma_l), \quad (1.3)$$

где  $\mu_l^0$  – стандартный химический потенциал,  $x_l = \frac{n_l}{\sum_{l=1}^L n_l}$  – мольные доли частиц и  $\gamma$  – коэффициент летучести.

Соответственно функция свободной энергии системы принимает вид

$$g(\vec{n}) = \sum_{k=1}^M \mu_k^0 n_k + n_w (\mu_w^0 - \phi \frac{\sum_j n_j}{n_w}) + \sum_{j=1}^J n_j (\mu_j^0 + \ln(\frac{n_j 55.51}{n_w} \gamma_j)) + \sum_{l=1}^L (\mu_l^0 + \ln(\frac{n_l}{N_L} \gamma_l)), \quad (1.4)$$

Ограничения баланса масс, включая, при необходимости, уравнение электронейтральности, записываются в виде системы линейных уравнений

$$\sum_{j=1}^{M+J+L} v_{ij} n_j = B_i, \quad i = 1, P, \quad (1.5)$$

где  $P$  – число независимых компонентов системы,  $v_{ij}$  – число молей (стехиометрических единиц) независимого компонента  $i$  в одном моле компонента  $j$ .  $B_i$  – количество молей независимого компонента  $i$  в системе. Для уравнения электронейтральности  $B_i = 0$ , и  $v_{ij} = z_j$ , где  $z_j$  – заряд  $j$ -го компонента. В матричном виде система (1.5) может быть записана как

$$N \vec{n}^T = \vec{B}$$

где  $N$  – стехиометрическая матрица,  $\vec{n}$  – вектор количества молей компонентов,  $\vec{B}$  – вектор валового химического состава системы.

Таким образом, задача расчета равновесного состава сводится к нахождению минимума функции, (1.1), удовлетворяющему системе линейных уравнений (1.5).

Выражение свободной энергии системы, наряду с неизвестными  $n$ , содержит параметры  $\mu^0$  – стандартные химические потенциалы (или стандартные свободные энергии Гиббса) компонентов, активность воды  $a_w$  и  $\gamma$  - коэффициенты активности растворенных компонентов и газов. Параметры, необходимые для расчета этих величин и представляют собой предмет базы термодинамических данных для рассматриваемой модели.

### Алгоритм реализации модели

Задача расчета равновесия в общем виде предполагает, что заранее неизвестно, какие именно фазы (твердые вещества, водный и газовый растворы) будут образованы в системе. При этом список потенциально возможных фаз (главным образом за счет солей) значительно превышает разрешенное правилом фаз Гиббса максимальное количество (число независимых компонентов системы). Задача поиска равновесного состава представляет собой последовательный расчет серии локальных равновесий, в результате определяется фазовый состав, имеющий минимальную свободную энергию (глобальный минимум).

Поиск локального равновесия. Локальное равновесие понимается как равновесный состав системы, в котором все существующие фазы заранее известны. Энергия Гиббса системы, содержащей  $M$  однокомпонентных твердых фаз, водный раствор (вода +  $J$  компонентов) и газовый раствор ( $L$  компонентов), описывается функцией (1.1).

Коэффициенты активности частиц водного раствора и осмотический коэффициент, также как и коэффициенты летучести компонентов газовой фазы вычисляются на каждой итерации для текущих составов фаз по модели Питцера и уравнению Пенга-Робинсона соответственно. Мольные количества твердых фаз рассчитываются после нахождения локального равновесия по уравнениям (1.3).

Поиск равновесной фазовой ассоциации (глобальный минимум). Если мольное количество твердой фазы, вычисленное по уравнению (1.3) отрицательно, эта фаза полагается растворившейся, а химический потенциал этого компонента неизвестным. Находится новое локальное равновесие без этой твердой фазы, после чего просматривается весь список возможных твердых фаз на предмет включения в систему. Критерием включения фазы  $K$  в систему является

$$\Delta g_K = \mu_K^0 - \sum_{k=1}^M \mu_k^0 a_{kK} - \sum_{i=M+1}^P \lambda_i a_{iK} < 0 \quad (1.6)$$

Термодинамический смысл этого выражения состоит в том, что свободная энергия реакции образования данной фазы из независимых компонентов системы должна быть отрицательной, то

есть фаза должна быть термодинамически стабильной. Если условие (1.6) выполнено, эта фаза заменяет тот независимый компонент системы  $i$ , который с ней линейно независим и имеет

минимальную величину  $B_i / a_{iK}$ .

Возможность использования режимов закрытой или открытой системы и фракционной кристаллизации позволяет моделировать химический состав растворов при промерзании-оттаивании, когда рассчитывается серия равновесий в заданном интервале температур с заданным шагом изменения температуры при постоянном заданном давлении. Если температура понижается, вычисления заканчиваются по достижении точки эвтектики (полная раскристаллизация раствора).

### Алгоритм работы с программой

Для работы с программой необходимо:

1. Представить исходный материал;
2. Привести его к нужным единицам измерения;
3. Ввести исходные данные в программу;
4. Обработать полученные результаты.

1. Исходные данные – это результаты химического анализа проб водных вытяжек засоленных пород и криопэггов. В лаборатории водную вытяжку получают дистилляционным методом по ГОСТ 26423-85. Определение рН проводится по ГОСТ 26423-85. Анализ на карбонаты и бикарбонаты - по ГОСТ 26424-85, в одном растворе. Содержание хлоридов получают по ГОСТ 26425-85. Определение жесткости - по ГОСТ 26428-85 (Ca<sup>2+</sup>; Mg<sup>2+</sup>). Для определения сульфатов - ГОСТ 26426-85.

При работе с водными вытяжками сложность представляла разработка методики пересчета лабораторных данных по суммарному содержанию солей в породе, на 100 грамм грунта в данные, действительные для 1 литра растворителя. Важно также отметить, что полученный по программе FREEZEBRINE для каждой пробы результат по величине содержания жидкой фазы необходимо пересчитать с учетом общей влажности образца породы. Результаты определений представляются в различных видах (Таблицы 1.1, 1.2, формула Курлова). Раздел написан по материалам (Комаров, Мироненко, Кияшко, 2012).

Таблица 1.1 Вариант предоставления полученных результатов

№ скв	форма выражения анализа	Содержание ионов								Сумма ионов
		K+	Na+	Mg 2+	Ca 2+	Cl -	Br -	SO <sub>4</sub> 2-	HCO <sub>3</sub> -	
80	г/кг	0,61	3,76	2,08	3,87	18,18	0,31	1,51	0,06	30,38
	г/дм <sup>3</sup>	0,635	3,86	2,13	3,96	18,62	0,32	1,55	0,06	31,11
	мг-экв	15,98	167,67	174,8	197,8	525	4	32,21	1	
	%-экв	2,87	30,14	31,43	35,56	93,38	0,71	5,73	0,18	

Таблица 1.2 Вариант предоставления полученных результатов

№ скв.	Интервал отбора, м		Наименование грунта	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	Mg <sup>++</sup>	Ca <sup>++</sup>
	от	до		% экв	% экв	% экв	% экв	% экв	% экв
62-п	6,9	7,6	песок пылеватый	60,0	33,0	7,0	84,0	6,0	10,0
34-п-1	33,4	34,0	песок пылеватый	26	65	9	76	4	20

## ПРИЛОЖЕНИЕ В. Программный продукт, используемый для моделирования распространения трещин

### Теоретические основы модели

Раздел написан по материалам статьи (Стефанов Ю.П., 2002, 2010, 2016). В программе заложен функционал моделирования одной или нескольких взаимодействующих трещин, а также процессов деформирования и разрушения породы в остальной части расчетной области с учетом ее неоднородного строения. Программа предоставляет возможность геомеханического моделирования сложнопостроенных неоднородных сред, какими являются породы нетрадиционных ресурсов. В подобной среде определяется общее распределение напряжений вокруг трещин с учетом их геометрии.

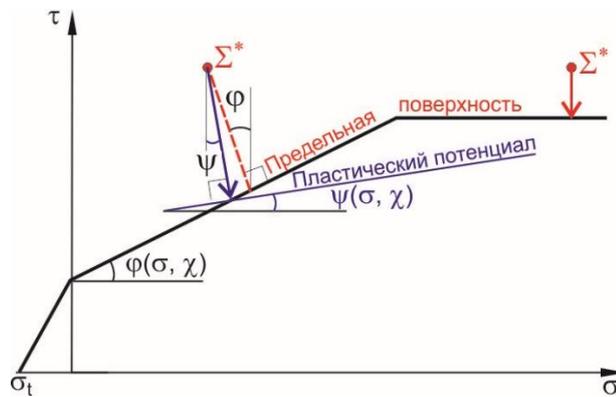


Рисунок 1.1. Расчетная схема возвращения точки на предельную поверхность

Для расчета процесса деформации за пределом упругости применяется процедура вычислений, основанная на мгновенном приведении напряжений на предельную поверхность нагружения (Рисунок 1.1). На каждом последовательном шаге по времени приращения пластической деформации будут пропорциональны разнице между напряжениями, вычисленными по упругому закону, и напряжениями, соответствующими предельной поверхности. Первый этап расчета, после определения координат точек расчетной сетки и нахождения полных приращений деформации, состоит в предварительном расчете напряжений по упругому закону. Предварительно вычисленные напряжения обозначаются звездочкой:

$$\sigma_{ij}^* = \sigma_{ij} + \Delta\sigma_{ij}^* \quad (1.1)$$

После этого проверяется, находится ли данная точка в пространстве напряжений (напряженное состояние представлено точкой  $\Sigma^*$  с координатами  $(\sigma^*, \tau^*)$ ) внутри предельной поверхности или нет, т.е. проверяется условие перехода в пластическое состояние.

Проверка условия осуществляется подстановкой данных значений напряжений в уравнение, определяющее предельную поверхность. Если  $f^* = f(\sigma_{ij}^*) \leq 0$ , то состояние материала в данной ячейке расчетной сетки на текущем интервале времени находится внутри предельной поверхности, т.е. данный элемент среды находится в упругом состоянии и можно продолжить расчет на последующий слой времени, опустив символ «\*». Другими словами, рассчитанное напряженное состояние соответствует истинному и можно переходить к дальнейшему расчету на следующем слое по времени.

В случае  $f^* = f(\sigma_{ij}^*) > 0$ , т.е. когда точка  $\Sigma^*$  (Рисунок 1.1), в пространстве напряжений оказалась вне поверхности, заданной функцией текучести, условие пластичности считается выполненным, элемент среды переходит в пластическое состояние и часть деформации имеет неупругий характер. Необходимо вычислить эту часть пластической деформации, так чтобы точка в пространстве напряжений оказалась на поверхности, определяющей область упругого состояния и ограничивающей возможное напряженное состояние среды.

Использование ассоциированного закона означает, что из данного предварительно вычисленного напряженного состояния точка  $\Sigma^*$  должна быть перенесена на предельную поверхность, переместившись к ней по нормали (Рисунок 1.1). В случае использования неассоциированного закона течения, когда уравнения предельной поверхности и пластического потенциала не совпадают, точка в пространстве напряжений перемещается по нормали к поверхности пластического потенциала до пересечения с предельной поверхностью. Таким образом, осуществляется корректировка напряжений, чтобы удовлетворить условиям, определенным моделью поведения.

Предельная поверхность и поверхность пластического потенциала изменяются в ходе развития неупругой деформации, они эволюционируют от одного временного шага к другому в соответствии с заданными законами. Для осуществления расчетов, моделирующих поведение среды в ограниченной расчетной области, необходимо получить выражения, которые позволят вычислить напряжения и деформации в ходе процесса.

При заданных начальных условиях при  $t = 0$ , для всех точек расчетной области (Рисунок 1.2) при решении задач используются кинематические, динамические и смешанные граничные условия, а также их комбинация. Граничные условия на внешнем контуре расчетной области определяются в соответствии с масштабом рассмотрения задачи. На масштабе рассмотрения всей трещины или ее значительного участка внешней нагрузкой будут действующие на данной глубине напряжения в пласте. Полученное решение о напряженном состоянии вокруг трещины может быть использовано в качестве нагрузки для выделенного участка вокруг вершины.

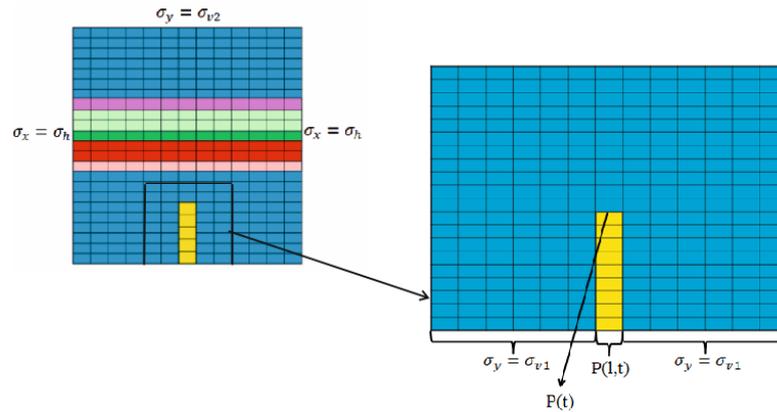


Рисунок 1.2 Схема расчетной области и граничных условий, задаваемая в пласте

Начальное положение трещины задается ростом заданной длины и ширины (Рисунок 1.2). Как правило, ширина трещины описывается одной лагранжевой ячейкой (то есть ширина трещины изменяется в процессе расчета). Для определения давления «флюида», заполняющего вновь образованную трещину, применены специальные численные процедуры для имитации вязкого запаздывания). При рассмотрении протяженного участка трещины необходимо задать давления (вернее, избытка давления над минимальным пластовым напряжением) в ростке в виде функции (кусочно-линейной)  $P(t)$  (Рисунок 1.3). Пространственное распределение давления в развивающейся из ростка трещине (материал №0, представлен на рисунке 1.2 желтым цветом и рассчитывается по тем же соотношениям, что и в остальных материалах №№ 1–N (представлены синим, розовым, красным, голубым и оранжевым)). В тестовых расчетах рассматривалось распространение трещины в однородной среде ( $N=1$ ), в двуслойной среде ( $N=2$ ) и в девятислойной среде ( $N=9$ ).

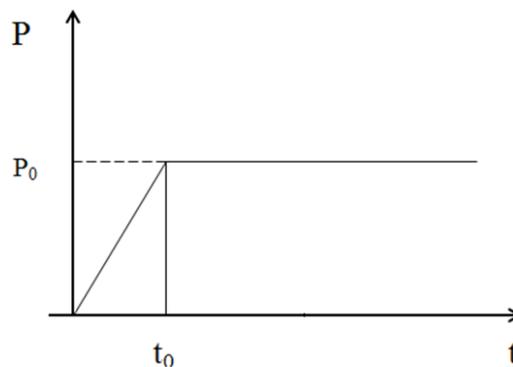


Рисунок 1.3 График зависимости давления в трещине (избытка давления над минимальным напряжением) от времени роста нагрузки

Поровое давление в настоящей модели учитывается статически, при переходе от полного тензора напряжения к эффективному. В постановке задачи, ничего не изменится при динамическом учете изменения порового давления и переопределении эффективных напряжений

в процессе расчета (Вершинин и др, 2016). Поровое давление (вместе с пористостью) будет той величиной, при помощи которой можно будет сопрягать данный модуль с гидродинамическим.

Развитие трещины происходит по ячейкам домена – если в какой-либо из ячеек, соседствующей с существующей трещиной выполняется один из критериев разрушения, такая ячейка становится частью трещины и заполняется «флюидом», то есть идентификационный номер материала становится равным  $N=0$ . Резкие перепады напряженно-деформированного состояния в такой ячейке, в силу моментальной разгрузки, нивелируются в течение некоторого характерного промежутка времени путем моделирования процесса релаксации напряжений и, ассоциированных с напряжением, свойств заполняющего ячейку материала.

### **Алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния**

Решение системы уравнений включает следующую последовательность операций

1. Решение уравнения движения. Расчет скорости движения узлов расчетной сетки при заданных условиях нагружения на данном шаге
2. Расчет скоростей и приращений деформации в ячейках.
3. Определение новых координат всех узлов расчетной сетки.
4. Предварительный расчет напряжений на основе уравнения гипотезы упругости.
5. Проверка условия хрупкого разрушения.
6. Проверка условия пластичности и разрушения.
7. Определение упругой и неупругой частей деформации.
8. Пересчет напряжений с учетом пластичности и разрушения
9. Расчет давления в трещине
10. Задание граничных условий на поверхности трещины
11. Определение нового шага по времени
12. Переход к расчету на новом шаге по времени

Для расчета процесса деформации за пределом упругости применим процедуру вычислений, основанную на мгновенном приведении напряжений на поверхность нагружения (текучести) На каждом последовательном шаге по времени приращения пластической деформации будут пропорциональны разнице между напряжениями, вычисленными по упругому закону, и напряжениями, соответствующими предельной поверхности (текучести). Первый этап расчета после определения координат точек расчетной сетки и нахождения полных приращений деформации состоит в предварительном расчете напряжений по упругому закону. Обозначим предварительно вычисленные напряжения звездочкой:

$$\begin{aligned} (s_{ij}^{n+1})^* &= s_{ij}^n + (\Delta s_{ij}^{n+1})^*, \\ (\sigma^{n+1})^* &= \sigma^n + (\Delta \sigma^{n+1})^*. \end{aligned}$$

После этого проверяем, находится ли данная точка в пространстве напряжений внутри предельной поверхности или нет, т.е. проверяется условие перехода в пластическое состояние. Проверка условия осуществляется подстановкой данных значений напряжений в уравнение, определяющее предельную поверхность. Если  $f^* = f(\sigma_{ij}^*) \leq 0$ , то состояние материала в данной ячейке расчетной сетки на текущем интервале времени находится внутри предельной поверхности, т.е. данный элемент среды находится в упругом состоянии и можно продолжить расчет на последующий слой времени, опустив символ «\*». Другими словами, рассчитанное напряженное состояние соответствует истинному и можно переходить к дальнейшему расчету на следующем слое по времени.

В случае  $f^* = f(\sigma_{ij}^*) > 0$ , т.е. когда точка  $\Sigma^*$  (Рисунок 1.1) в пространстве напряжений оказалась вне поверхности, заданной функцией текучести, условие пластичности считается выполненным, элемент среды переходит в пластическое состояние и часть деформации имеет неупругий характер. Необходимо вычислить эту часть пластической деформации, так чтобы точка в пространстве напряжений оказалась на поверхности, определяющей область упругого состояния и ограничивающей возможное напряженное состояние среды.

Использование ассоциированного закона означает, что из данного предварительно вычисленного напряженного состояния точка  $\Sigma^*$  должна быть перенесена на предельную поверхность, переместившись к ней по нормали (Рисунок 1.1). В случае использования неассоциированного закона течения, когда уравнения предельной поверхности и пластического потенциала не совпадают, точка в пространстве напряжений перемещается по нормали к поверхности пластического потенциала до пересечения с предельной поверхностью. Таким образом, осуществляется корректировка напряжений, чтобы удовлетворить условиям, определенным моделью поведения.

Предельная поверхность и поверхность пластического потенциала изменяются в ходе развития неупругой деформации, они эволюционируют от одного временного шага к другому в соответствии с заданными законами. Для осуществления расчетов, моделирующих поведение среды в ограниченной расчетной области, нам необходимо получить выражения, которые позволят вычислить напряжения и деформации в ходе процесса.

Для вычисления неупругой деформации необходимо определить направление вектора ее приращения в пространстве напряжений, в котором строится предельная поверхность. С этой

целью воспользуемся линейной формой пластического потенциала, приняв неассоциированный закон течения, как это было предложено Николаевским (Николаевский, 1971). Запишем необходимые для вычислений соотношения (Стефанов, 2002, 2005, 2010, Stefanov и др., 2011).

$$g(\sigma, \tau) = \tau - \Lambda \sigma.$$

Тогда приращения пластической деформации и напряжения будут определяться из выражений:

$$\begin{aligned} d\gamma^p &= \lambda \frac{\partial g}{\partial \tau} = \lambda, \\ d\varepsilon^{pl} &= -\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma} = -\lambda \Lambda, \\ \tau &= \tau^* - \lambda \mu, \\ \sigma &= \sigma^* + \lambda \Lambda K, \end{aligned}$$

Имея значения второго инварианта девиатора напряжений, можно вычислить компоненты

напряжений как:

$$s_{ij} = s_{ij}^* \frac{\tau}{\tau^*}.$$

Изложенные особенности численного расчета реализованы в пакетах оригинальных программ, которые успешно используются на протяжении многих лет для решения разных задач о деформации и разрушения твердых тел., в том числе задач геомеханики. Особенности используемого подхода и многих алгоритмов для описания процессов деформации, а также результаты их применения можно найти в работах (Стефанов, 2002, 2005, 2007, 2010; Stefanov и др., 2016; Макаров и др. 2007),

Многие изложенные особенности подхода аналогичны тем, что реализованы в пакете FLAC который успешно используется для решения многих задач геомеханики. Не достаточная распространенность этого пакета, вероятно, связана с достаточно высокой стоимостью, а также его сложностью, что требует высокой квалификации исследователя для его использования.

### **Необходимые для моделирования данные о свойствах породы**

Исследование (практически любых задач о деформации и разрушения горных пород) должно включать:

1. Анализ экспериментальных данных и оценка параметров модели
2. Моделирование поведения образцов и сопоставление результатов с данными экспериментов. Уточнение параметров модели. Верификация.

3. Изучение особенностей развития процесса деформации и разрушения вокруг вершины и роста трещины гидроразрыва.
4. Решение задач. Моделирование процессов деформации и разрушения, роста трещин.

***Экспериментальные данные, необходимые определения свойств породы:***

Учитывая, что определение механических свойств горных пород достаточно сложная задача, требующая значительного объема кернового материала и разных экспериментальных установок, разделим требуемые данные на две категории. В первой категории будут минимально необходимые параметры для проведения расчетов деформации и разрушения. Во второй категории будут параметры, которые позволят уточнить и улучшить решение задач, с учетом возможности дальнейшего усовершенствование модели и более точного описания процессов. Это позволит анализировать влияние напряженно-деформированного состояния на механические характеристики среды, разрабатывать и усовершенствовать соответствующие математические модели поведения горных пород под нагрузкой, в том числе при изменении действующих условий.

- I. Минимальные требования к измерениям на керновом материале для оценки поведения реальной среды и инициации модели для проведению расчетов в 2D и 3D постановках
  1. Цифровые фотографии представительного мезообъема породы, с выделением основных компонент структуры, включая трещины.
  2. Данные стандартных трехосных испытаний образцов породы при разных давлениях бокового обжатия. Кривые нагружения с тщательной регистрацией всех компонент деформаций. Цифровые снимки деформируемых образцов.
  3. Данные по испытаниям прочности на отрыв. Кривые нагружения с цифровыми снимками на разных этапах роста трещины.
  4. Пористость.
  5. Проницаемость (для задач с учетом фильтрации)
  
- II. Расширенные экспериментальные измерения, позволяющие усовершенствовать модели для более точного анализа и математического описания процессов деформации и разрушения.
  1. Цифровые фотографии представительного мезообъема породы, с выделением основных компонент структуры, включая трещины.

2. Данные трехосных испытаний образцов породы. Кривые нагружения с тщательной регистрацией всех компонент деформаций. Цифровые снимки деформируемых образцов. Нагрузка и разгрузка по разным схемам нагружения.

Программы испытаний на трехосное сжатие:

- Всестороннее сжатие до разных значений давления - осевое деформирование
- Нагружение до разной степени деформации и последующая разгрузка.
- Нагружение до полного разрушения.
- Всестороннее сжатие до разных значений давления – осевая разгрузка

Испытания на независимое трехосное нагружение позволят реализовать условия нагружения более близкие к действующим в пласте.

Измерения в течение процесса деформирования образцов:

- Скоростей распространения упругих волн
  - Проницаемости
  - Структуры (рентгеновскими методами)
3. Данные по испытаниям прочности на отрыв. Кривые нагружения с цифровыми снимками на разных этапах роста трещины.
  4. Кривые нагружения при разных скоростях деформирования
  5. Данные по деформации составляющих, имеющих размеры (протяженность) сопоставимую с размером образцов.
  6. Пористость.
  7. Проницаемость.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Список рисунков, приведенных в основном тексте работы

1. Рисунок 1.1 Развитие температурных деформаций  $\epsilon$  льда (1), мерзлого песка (2) и мерзлого суглинка (3) при понижении температуры  $\Theta$  и различной степенью водонасыщения: 3а – 0.98, 3б – 0.90, 3в – 0.82, 3г – 0.47 (Рачевский и др., 1972)..... 18
2. Рисунок 1.2 Зависимость коэффициента линейного температурного расширения  $\alpha$  льда (1), мерзлого песка (2) и мерзлого суглинка (3) от температуры  $\Theta$ : 1а – слоистый лед (измерения перпендикулярно слоистости), 1б – слоистый лед (измерения  $\parallel$  слоистости), 1в – массивный, 2а – песок, степень водонасыщения 0.86, 2б – песок 0.56, 3а – суглинок 0.98, 3б – суглинок 0.90, 3в – суглинок 0.47 (Рачевский и др., 1972) ..... 19
3. Рисунок 1.3 Схематичное представление основных физических процессов трещины гидроразрыва ..... 31
4. Рисунок 1.4 Возможная конфигурация трещин гидроразрыва в зависимости от ориентации скважины и главных напряжений (Leem J., Reyna J., 2014) ..... 32
5. Рисунок 1.5 Разворот плоскости трещины в зависимости от ориентации главных напряжений (Rahman, 2002) ..... 32
6. Рисунок 1.6 Возможные сценарии поведения трещины гидроразрыва после достижения ею природного разлома. .... 36
7. Рисунок 1.7 Варианты взаимодействия трещины ГРП с естественными разломами (Morgan W.E., 2014). .... 37
8. Рисунок 1.8 Аналитические модели трещин гидроразрыва в приближении плоской деформации (KGD-модель) и в рамках гипотезы плоских сечений (РKN-модель). .... 39
9. Рисунок 1.9 Схематическое представление псевдотрехмерного представления геометрии трещины: «лампобразная» (слева) и ячеистая (справа) (Adachi, Siebrits, Peirce, Desroches, 2007)..... 41
10. Рисунок 2.1 Схема местоположения района (составленная на основании карты распространения ММП К.А. Кодратьева, 1976), 1-зона редкоостровного и массивно-островного распространения ММП со среднегодовыми температурами( $t_{cp}$ ) от 3 до минус 1°C и мощностью мёрзлой толщи (М) от 0 до 100 м; 2-5-зона сплошного распространения ММП: 2 -  $t_{cp}$  от минус 1 до минус 3, М от 50 до 300 м; 3 -  $t_{cp}$  от минус 5 до минус 9°C, М от 200 до 600 м; 5 -  $t_{cp}$  от ниже минус 9°C, М от 400 до 900 м и более; 6 - граница зон ММП; 7 южная граница криолитозоны. .... 43
11. Рисунок 2.2 Колонка отложений лайды на рассматриваемом участке п-ова Сабетта ..... 46
12. Рисунок 2.3 Типовой литологический разрез отложений, слагающих рассматриваемый участок п-ова Сабетта (масштаб 1:1000/100). .... 47
13. Рисунок 3.1 Холодильная установка ТНТ-200/WTE-200 контейнерного типа российско-чешского производства..... 57
14. Рисунок 3.2 Схема резервуара для хранения сжиженного природного газа. 1-резервуар, 2-технологический отбор газа, 3-приток тепла извне. .... 59
15. Рисунок 3.3 Схема трубки Фильда. Стрелки – направление движения хладоносителя в НТС; заштрихованные участки – материал стенки НТС, диаметр приемно-выпускной камеры 100 мм, диаметр внешней трубки 57 мм при толщине стенки 3.5 мм, диаметр внутренней трубки 38 мм при толщине стенки 3 мм. .... 59
16. Рисунок 3.4 Постановка задачи о температурном распределении в процессе промерзания ..... 62
17. Рисунок 3.5 Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры пород различного состава (Комаров, Исаев, 2010) ..... 68

18. Рисунок 3.6 Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для пород различной влажности (Комаров, Исаев, 2010) ..... 68
19. Рисунок 3.7 Зависимость коэффициента температурного расширения от температуры для пород различного состава (Комаров, Исаев, 2010) ..... 69
20. Рисунок 3.8 Профиль температуры (Т) вблизи границы термостабилизатор-грунт в периоды с отрицательными (зима) и положительными (лето) температурами для незасоленного песка при различных температурах хладоносителя (Т<sub>G</sub>): 1 - минус 40°C, 2 – минус 60°C, 3 – минус 80°C ..... 70
21. Рисунок 3.9 Профиль температуры (Т) вблизи границы термостабилизатор-грунт в периоды с отрицательными (зима) и положительными (лето) температурами для засоленного суглинка при различных температурах хладоносителя (Т<sub>G</sub>): 1 - минус 40°C, 2 – минус 60°C, 3 – минус 80°C ..... 70
22. Рисунок 3.10 Сравнение результатов расчета изменения температуры связанной и несвязанной задач..... 72
23. Рисунок 3.11 Период промерзания массива грунта с различной М - минерализацией (г/л) при различных значениях температуры хладагента (°C). ..... 74
24. Рисунок 4.1 Схема местоположения района (на основании карты распространения ММП К.А. Кодратьева, 1976), 1 - зона редкоостровного и массивно-островного распространения ММП со среднегодовыми температурами(*t*<sub>ср</sub>) от 3 до минус 1°C и мощностью мёрзлой толщи (М) от 0 до 100 м; 2-5-зона сплошного распространения ММП: 2 - *t*<sub>ср</sub> от минус 1 до минус 3, М от 50 до 300 м; 3 - *t*<sub>ср</sub> от минус 3 до минус 5°C, М от 100 до 400 м; 4 - *t*<sub>ср</sub> от минус 5 до минус 9°C, М от 200 до 600 м; 5 - *t*<sub>ср</sub> от ниже минус 9°C, М от 400 до 900 м и более; 6 - граница зон ММП; 7 южная граница криолитозоны..... 76
25. Рисунок 4.2 Залегание баженовской свиты в геологическом разрезе Западной Сибири (Зубков, Пормейстер, Бондаренко, 2002)..... 81
26. Рисунок 5.1 Масштабы рассмотрения процесса роста трещины гидроразрыва. Левый рисунок – макроуровень, промежуточный и правый – мезоуровень..... 89
27. Рисунок 5.2 Характер изменения поверхности предельного состояния в ходе сдвиговой деформации (а); зависимость упрочнения и деградации материала от интенсивности пластической деформации (б)..... 95
28. Рисунок 5.3 Схема расчетной области и граничных условий, задаваемая в пласте..... 96
29. Рисунок 5.4 График зависимости давления в трещине (избытка давления над минимальным напряжением) от времени роста нагрузки..... 97
30. Рисунок 5.5 Пример диаграммы нагружения образца. Показаны два варианта представления данных ..... 99
31. Рисунок 5.6 Экспериментальные значения предела упругости для образцов пород разной литологии и соответствующие начальные предельные поверхности..... 101
32. Рисунок 5.7 Экспериментальные значения предела прочности для образцов пород разной литологии и соответствующие конечные предельные ..... 101
33. Рисунок 5.8 Экспериментальные значения пределов упругости и прочности для образцов пород разной литологии и соответствующие предельные поверхности ..... 101
34. Рисунок 5.9 Отношения пределов прочности к пределам упругости..... 102
35. Рисунок 5.10 Схема инициализации упруго-пластической модели. В фиолетовых боксах данные, снимаемые с графиков, в зеленых - расчетные..... 104
36. Рисунок 5.11 Схематический разрез по скважине Баженовской Свиты..... 104
37. Рисунок 5.12 Конфигурация трещин (а,в) и интенсивность пластической деформации (б,г) трещины гидроразрыва в песчанике при различных (верхний ряд) и одинаковых (нижний ряд) значениях вертикальных и горизонтальных стрессов..... 107

38. Рисунок 5.13 Влияние интенсивности нагнетания на структуру трещины ГРП в песчанике при различных (а,б) и равных (в,г) значениях вертикальных и горизонтальных напряжений.  $t_0=2000$  мс (а,в) и  $t_0=1000$  мс (б,г) ..... 108
39. Рисунок 5.14 Скорость распространения трещины: (а) в песчанике при начальном распределением напряжений и давлением нагнетания  $\sigma_h = 40, \sigma_v = 60$  МПа,  $P_{inj} = 65$  МПа, (б) при различном давлении нагнетания при начальном распределении стрессов  $\sigma_h = 40, \sigma_v = 60$  МПа, (в) при различном времени распределения давления в трещине  $t_0$  при  $\sigma_h = 40, \sigma_v = 60$  МПа,  $P_{inj} = 65$  МПа (г) скорость распространение трещины в зависимости от литологии при  $\sigma_h = 40, \sigma_v = 60$  МПа,  $P_{inj} = 65$  МПа ..... 109
40. Рисунок 5.15 Конфигурация трещин (а,в), интенсивность пластических деформаций (б,г) в карбонатно-глинисто-кремнистом материале при  $\sigma_h = \sigma_v = 35$  МПа,  $P_{inj} = 65$  МПа и различной интенсивности закачки (а,б)  $t_0=2000$  и (в,г)  $t_0=1000$ . ..... 110
41. Рисунок 5.16 Конфигурация трещин (а,в), интенсивность пластических деформаций (б,г) в карбонатно-глинисто-кремнистом материале при  $\sigma_h = \sigma_v = 35$  МПа,  $P_{inj} = 65$  МПа и различной интенсивности закачки (а,б)  $t_0=2000$  и (в,г)  $t_0=1000$ . ..... 111
42. Рисунок 5.17 Конфигурация трещин (а,в) интенсивность пластических деформаций (б,г) в карбонатно- кремнистом материале при  $\sigma_h = \sigma_v = 35$  МПа,  $P_{inj} = 65$  МПа и различной интенсивности закачки (а,б)  $t_0=2000$  и (в,г)  $t_0=1000$ . ..... 112
43. Рисунок 5.18 Конфигурация трещин (а,в), интенсивность пластических деформаций (б,г) в карбонатно- кремнистом материале при  $\sigma_h = 15, \sigma_v = 35$  МПа,  $P_{inj} = 65$  МПа (а,б) и  $\sigma_h = \sigma_v = 35$  МПа,  $P_{inj} = 65$  МПа (в,г). Интенсивности закачки везде  $t_0=2000$  мс. .... 113
44. Рисунок 5.19 Конфигурация трещин в карбонатно-кремнистом материале при фиксированном распределения стрессов в породе и различных давлениях нагнетания. 114
45. Рисунок 5.20 Конфигурация трещин (слева), интенсивность пластических деформаций (справа) в двухслойном разрезе, песчаник залегает над алевролитом-глинистым литотипом ..... 117
46. Рисунок 5.21 Конфигурация трещин (слева), интенсивность пластических деформаций (справа) в двухслойном разрезе, песчаник подстилает алевролитом-глинистый литотип 117
47. Рисунок 5.22 Конфигурация трещин, распространяющихся в девятислойной среде (верхняя строка)  $t_0=2000$  мс, (нижняя строка)  $t_0=1000$  мс..... 118
48. Рисунок 5.23 Схематический разрез баженской свиты по скважине 2152 Вынгайхинского месторождения ..... 119
49. Рисунок 5.24 Распространение трещины ГРП в многослойном разрезе. Конфигурация трещины – ‘вилка’ ..... 121
50. Рисунок 5.25 Распространение трещины ГРП в многослойном разрезе. Конфигурация трещины – ‘щетка’ ..... 122
51. Рисунок 5.26. Суммарная длина трещин и доля интенсивности пластической деформации в зависимости от режима нагнетания флюида в трещину. .... 123

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Список таблиц, приведенных в основном тексте работы

1. Таблица 2.1 Средняя месячная температура воздуха, °С.....	44
2. Таблица 2.2 Суммарная солнечная радиация, МДж/м <sup>2</sup> , при средней облачности .....	45
3. Таблица 2.3 Радиационный баланс подстилающей поверхности станции, МДж/м <sup>2</sup> .....	45
4. Таблица 2.4 Даты образования, разрушения и число дней со снежным покровом .....	46
5. Таблица 3.1 Радиусы замораживания ТС различных производителей общей длиной 10 метров ( <i>Сравнение эффективности замораживания грунтов термостабилизаторами различных производителей, n.d.</i> ) .....	61
6. Таблица 3.2 Верхние граничные условия на естественной поверхности и на поверхности насыпей .....	64
7. Таблица 3.3 Водно-физические и теплофизические свойства грунтов .....	67
8. Таблица 3.4 Теплофизические свойства линз криопэггов .....	67
9. Таблица 3.5 Механические свойства пород.....	67
10. Таблица 3.6 Сопоставление расчетных и экспериментальных прочностных и деформационных свойств пород.....	71
11. Таблица 3.7 Результаты моделирования зависимости времени промораживания криопэггов от температуры хладагента и степени минерализации .....	73
12. Таблица 4.1 Значения прочностных свойств пород баженовской свиты .....	84
13. Таблица 5.1 Принятые для расчетов значения начальных напряжений в массиве пород	98
14. Таблица 5.2 Таблица значений пределов упругости и прочности для набора образцов разного строения .....	100
15. Таблица 5.3 Таблица значений когезии и угла внутреннего трения.....	102
16. Таблица 5.4 Коэффициенты хрупкости, вычисленные по минеральному составу выделенных литологий в моделях Ванга и Ярви .....	103
17. Таблица 5.5 Значения параметров, инициализирующих упруго-пластическую модель по скважине.....	105
18. Таблица 5.6 Конфигурация трещин для наборов вариантов, представленных в таблицах 5.8 и 5.9.....	115
19. Таблица 5.7 Интенсивность пластической деформации для набора вариантов, представленных в таблицах 5.8 и 5.9 .....	115
20. Таблица 5.8 Упруго-прочностные параметры.....	116
21. Таблица 5.9 Стрессы и параметры закачки .....	116
22. Таблица 5.10 Начальное распределение стрессов по разрезу.....	119
23. Таблица 5.11 Режимы закачки, удовлетворяющие ограничению по длине трещины при заданном расходе жидкости, нагнетаемой в трещину.....	120
24. Таблица 5.12 Длина трещины в многослойном разрезе при заданных режимах закачки .....	121
25. Таблица 5.13 Конфигурации трещин ГРП в многослойном разрезе при различных соотношениях давления и времени нагнетания флюида в трещину. Начальное распределение эффективных стрессов $\sigma_v = 30$ , $\sigma_h = 16$ . Красные кружки обозначают семейство решений с длиной трещин во второй пачке более 200 метров, черные – более 150, но менее 200 метров. Размер кружка соответствует (непропорционально) длине трещины в своем семействе. Звезды обозначают решения с наибольшей долей ИПД в своем семействе. Обведенная красным звезда обозначает кандидата на оптимальную закачку.....	124