

*На правах рукописи*

**Пеньков Григорий Михайлович**



**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕННО-  
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕРРИГЕННЫХ  
ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
ВЫРАБОТКИ ЗАПАСОВ НЕФТИ**

*Специальность 2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных  
и газовых месторождений*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, доцент

*Петраков Дмитрий Геннадьевич*

**Официальные оппоненты:**

*Сидоров Дмитрий Владимирович*

доктор технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Полигор», заместитель генерального директора по научной работе;

*Колонских Александр Валерьевич*

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Центр водородных технологий», директор по технологическому развитию.

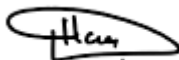
**Ведущая организация** – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Защита диссертации состоится 22 сентября 2022 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета ГУ 2022.8 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 22 июля 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



ТАНАНЫХИН  
Дмитрий Сергеевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Большинство месторождений нефти и газа в России приурочены к сложнопостроенным коллекторам, поэтому существует необходимость более детального моделирования пластовой системы и всех процессов, протекающих в ней. В настоящее время разработка и доработка нефтяных и газовых месторождений невозможны без предварительного моделирования. Это связано с возрастанием сложности разработки трудноизвлекаемых запасов углеводородов и необходимостью применения современных высокотехнологичных методов.

Моделирование процесса течения жидкости в поровом пространстве – это важный этап при построении гидродинамической модели месторождения. Данный процесс зависит от многих факторов, в том числе и от напряженно-деформированного состояния горной породы. Несмотря на то, что в современный гидродинамический симулятор заложено большое количество моделей, позволяющих моделировать практически любой процесс, происходящий в пласте, стволе скважины и призабойной зоне пласта, модель, описывающая поведение напряженно-деформированное состояние пласта, недостаточно точно интерпретирует его. Учет влияния напряженно-деформированного состояния на процесс фильтрации жидкости через породу позволит более детально спрогнозировать значение дебита скважины, а также значение накопленной добычи флюида в целом по месторождению.

### **Степень разработанности темы исследования**

Существенный вклад в изучение и развитие теории влияния напряженно-деформированного состояния пласта на процесс течения жидкости в поровом пространстве базируется на работах отечественных ученых (Ентов В.М., Николаевский В.Н., Кочин Н.Е., Кибель И.А., Седов Л.И., Басниев К.С., Желтов Ю.В., Баренблатт Г.И и др.) и работах зарубежных ученых (Muskat M, Matthews C., Fjaer E, Holt R.M., Horsburg P., Raaen A.M., Risnes R., Civan F., Zoback M.D. и др.).

Большинство работ не учитывали влияние напряженно-деформированного состояния терригенных пород-коллекторов на

течение жидкости в поровом пространстве в сложных горно- и гидрогеологических условиях.

#### **Цель работы**

Повышение эффективности извлечения нефти из порово-трещиноватых терригенных пород-коллекторов при техногенном изменении их напряженно-деформированного состояния.

#### **Идея работы**

Поставленная цель достигается путем учета изменения фильтрационно-емкостных свойств терригенных пород-коллекторов порово-трещиноватого типа в зависимости от их напряженно-деформированного состояния на различных стадиях разработки нефтяного месторождения.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ литературных источников и патентных материалов по теме влияния напряженно-деформированного состояния горного массива и параметров, характеризующих данное состояние, на процесс разработки месторождений нефти.

2. Разработать методику, позволяющую наиболее детально приблизить условия залегания терригенных пород-коллекторов в ходе лабораторных исследований.

3. Исследовать физико-механические и фильтрационно-емкостные свойства испытываемых терригенных образцов породы-коллектора и исследовать влияние параметров, характеризующих напряженно-деформированное состояние горного массива, на проницаемость терригенной горной породы.

4. Смоделировать в гидродинамическом симуляторе процесс течения жидкости в поровом пространстве терригенной породы и оценить потенциальное влияние предложенной методики исследований.

5. Разработать рекомендации по применению предложенной методики, учитывающей напряженно-деформированное состояние терригенной породы-коллектора.

#### **Объект исследования**

Терригенные глинистые породы-коллектора порово-трещиноватого типа нефтяных месторождений.

### **Предмет исследования**

Физико-механические и фильтрационно-емкостные свойства объекта исследования при техногенном изменении его напряженно-деформированного состояния в процессе разработки месторождения.

### **Научная новизна работы:**

1. Установлен механизм влияния эффективного напряжения и пластических деформаций на проницаемость в терригенных породах-коллекторах, вследствие воздействия которых происходит разрушение порового пространства и переупаковка зерен скелета пород, которые в свою очередь вызывают необратимое и нелинейное снижение проницаемости в терригенных породах-коллекторах на 10-19%.

2. Установлена зависимость проницаемости породы коллектора от эффективного напряжения, которая позволяет оценить степень влияния на изменение объема добычи нефти при гидродинамическом моделировании процессов разработки месторождения нефти.

3. Доказана целесообразность использования установленной зависимости проницаемости терригенной породы-коллектора от эффективного напряжения при гидродинамическом моделировании с целью оценки эффективности реализации проектных решений, корректировка которых осуществляется в том числе и путем контроля изменения эффективного напряжения в пласте-коллекторе на разных стадиях разработки месторождения нефти.

### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Установлены зависимости эффективного напряжения от проницаемости для двух типов терригенных пород-коллекторов (средне-мелкозернистый песчаник и среднезернистый песчаник).

2. Разработана и запатентована новая методика исследования процесса влияния напряженно-деформированного состояния горного массива на проницаемость терригенной горной породы.

3. Разработанный автором «Способ исследования проницаемости по жидкости образцов керна» внедрен в учебный процесс кафедры разработки нефтяных и газовых месторождений и используется при изучении дисциплин «Физика нефтяного и газового пласта», «Физика пласта», читаемых студентам по направлениям подго-

товки 21.03.01 «Нефтегазовое дело» и 21.05.05 «Нефтегазовые техника и технологии».

4. В ООО «ПИУЦ «Сапфир» актом (справкой) внедрения подтверждено, что использование результатов диссертации на тему: «Оценка влияния напряженно-деформированного состояния терригенных пород-коллекторов на эффективность выработки запасов нефти», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, позволит повысить информативность исследования образцов терригенных пород-коллекторов, а также качество подготавливаемой проектно-технической документации.

#### **Методология и методы исследования**

Работа проводилась с использованием метода научного обобщения и анализа литературных источников и патентных материалов. Работа выполнена в соответствии со стандартными методами теоретических и экспериментальных исследований (определение деформационных характеристик горной породы, определение пористости и проницаемости горной породы и др.), а также с применением специально разработанных экспериментальных методик (оценка влияния эффективного напряжения на проницаемость горной породы и др.). Обработка экспериментальных данных проводилась методами математической статистики.

#### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. При разработке месторождения нефти рекомендуется учитывать динамику изменения физико-механических и фильтрационно-ёмкостных свойств терригенной породы-коллектора с учетом зависимости проницаемости пласта от эффективного напряжения и от прочностных характеристик пород-коллекторов на различных стадиях разработки.

2. Использование установленных зависимостей проницаемости терригенной породы-коллектора от эффективного напряжения рекомендуется для построения гидродинамической модели с целью достоверной оценки состояния пород-коллекторов для повышения эффективности реализации проектных решений на разных стадиях разработки, поскольку первоначальные фильтрационно-ёмкостные свойства терригенной породы-коллектора претерпевают изменения в сторону уменьшения, в диапазоне 10–19% с течением времени.

### **Степень достоверности результатов исследования**

Работа подтверждена теоретическими и экспериментальными исследованиями с использованием современного оборудования (компаний MTS SYSTEMS и GCTS Testing Systems), высокой сходимостью расчетных и экспериментальных величин (сходимость равна 95%).

### **Апробация результатов**

Основные положения, результаты теоретических и экспериментальных исследований, выводы и рекомендации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научно-технических конференциях, форумах и симпозиумах, в том числе: 59-ая студенческая научная конференция по горному делу в Краковской Горно-Металлургической академии (Польша, г. Краков, 06.12.2018); XII Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности» (газ, нефть, энергетика) Россия, г. Москва, 22-25 октября 2019); Российский 9 международный молодежный научно-практический форум «Нефтяная столица» (Россия, г. Нижневартовск, 17-19 февраля 2020г.); семинар в рамках образовательного проекта «ENERGENIOUS» (Норвегия, г. Ставангер, Университет Ставангера, 2020 г.); XIII международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки и техники — 2020» (Россия, г. Уфа, 25-29 мая 2020 г.).

### **Публикации**

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования - Scopus. Зарегистрирована 1 заявка на патент.

### **Личный вклад автора**

Разработана новая методика исследования процесса влияния напряженно-деформированного состояния горного массива на проницаемость терригенной горной породы.

Исследовано влияние параметров, характеризующих напряженно-деформированное состояние горного массива, на проницаемость терригенной горной породы.

Смоделирован в гидродинамическом симуляторе процесс течения жидкости в поровом пространстве терригенной породы и произведена оценка потенциального влияния предложенной методики исследований.

#### **Объем и структура работы**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 106 наименований и двух приложений. Материал диссертации изложен на 153 страницах машинописного текста, включает 17 таблиц, 96 рисунков.

#### **Благодарности**

Автор выражает благодарность: научному руководителю, доценту Петракову Дмитрию Геннадьевичу, Ильинову Михаилу Дмитриевичу, а также всем сотрудникам лаборатории физико-механических свойств и разрушения горных пород. Отдельная благодарность за помощь и советы: Карманскому Даниилу Александровичу, Сухих Александру Сергеевичу.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены основные уравнения, описывающие движение флюида в поровом пространстве. Изучена взаимосвязь между физико-механическими и фильтрационно-емкостными свойствами терригенной породы-коллектора при техногенном изменении его напряженно-деформированного состояния в процессе разработки месторождения.

**Во второй главе** приводится краткое описание лабораторного оборудования и методик проведения экспериментального исследования.

**В третьей главе** определены основные физико-механические свойства образцов горной породы, а также выявлены зависимости между эффективным напряжением и проницаемостью терригенной горной породы.



**В четвертой главе** приводится пример использования полученных зависимостей при построении гидродинамической модели месторождения нефти.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях.

**1. При разработке месторождения нефти рекомендуется учитывать динамику изменения физико-механических и фильтрационно-ёмкостных свойств терригенной породы-коллектора с учетом зависимости проницаемости пласта от эффективного напряжения и от прочностных характеристик пород-коллекторов на различных стадиях разработки.**

Анализ зарубежной и отечественной литературы показал, что в настоящее время выполнено большое количество работ, направленных на изучение механизма влияния параметров, характеризующих напряженно-деформированное состояние горного массива, на течение жидкости в поровом пространстве. Анализ также показал, что объективно существует проблема получения достоверной информации о состоянии пород-коллекторов, а также о других параметрах, которые должны быть учтены при определении технической и экономической эффективности используемых технологий при разработке месторождений нефти. По результатам анализа литературы отмечается, что существуют различные параметры, характеризующие напряженно-деформированное состояние (НДС) породы-коллектора и влияющие на течение жидкости в поровом пространстве: коэффициент Био, коэффициент Скемптона, поровое давление, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, девиаторное напряжение. Данные параметры, необходимо учитывать при моделировании процесса течения жидкости.

В соответствии с необходимостью более детального описания процесса течения жидкости в поровом пространстве, была разработана и запатентована методика («Способ исследования проницаемости по жидкости образцов керна», заявка №2021121409) исследований, направленная на:

- определение основных физико-механических, прочностных свойств (например: модуль Юнга,  $\nu$ -т Пуассона, предел прочности на одноосное сжатие и др.) терригенной породы-коллектора, для

максимального приближения условий залегания при создании напряженно-деформированного состояния;

- моделирование процесса течения жидкости при различных значениях эффективного напряжения.

Лабораторные исследования проводились по программе, представленной на рисунке 1, которая включала в себя этапы по определению физико-механических и фильтрационно-емкостных свойств образцов терригенных глинистых пород-коллекторов порово-трещиноватого типа нефтяных месторождений.

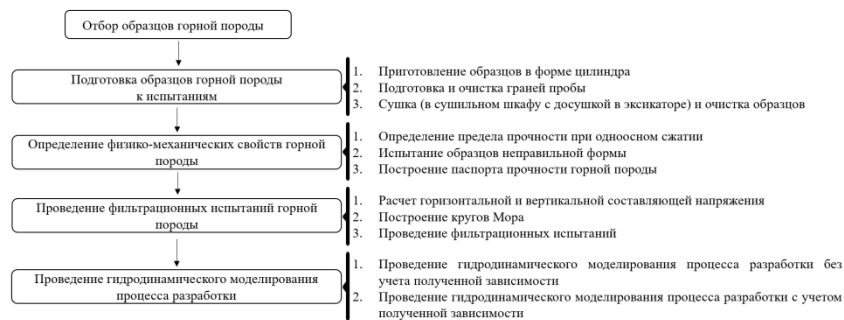


Рисунок 1 – Программа проведения лабораторных испытаний

По предложенной программе проведения лабораторных испытаний были определены основные физико-механические свойства образцов горной породы, а также выявлены зависимости между эффективным напряжением и проницаемостью горной породы (рисунки 4 и 5).

Для проведения исследований были выбраны 12 образцов горной породы терригенного происхождения с нефтяного месторождения Западной Сибири. Данные образцы были условно разделены на 2 группы по зернистости. Геологическое описание образцов приведено в таблице 1.

Таблица 1 - Геологическое описание образцов

Номер образца	Геологическое описание
1-6	Песчаник светло-серый, <b>средне-мелкозернистый</b> , слабослюдистый, с глинистым цементом. Плотный, крепкий, однородный.
7-12	Песчаник светло-серый, <b>среднезернистый</b> , слабослюдистый, с глинистым цементом. Плотный, крепкий, однородный.

Используя методики, предложенные в главе 2, были определены основные физико-механические свойства горной породы. Также были построены паспорта прочности для обеих групп пород.

По разработанной методике («Способ исследования проницаемости по жидкости образцов керна», заявка №2021121409) испытание образца происходит в несколько этапов нагружения, при различных значениях вертикальной составляющей напряжения ( $\sigma_1$ ) и постоянном значении горизонтальной составляющей напряжения ( $\sigma_3$ ).

- 1 этап нагружения: моделирование течения жидкости в ненарушенном образце (псевдо-упругая зона);
- 2 этап нагружения: моделирование течения жидкости в ненарушенном образце (псевдо-упругая зона), соотношение  $\sigma_3$  и  $\sigma_1$  максимально приближено к реальным условиям залегания в пласте;
- 3 этап нагружения: моделирование течения жидкости в образце с микротрещинами;
- 4 этап нагружения (в разрушенном образце): моделирование течения жидкости в образце с макротрещинами.

На каждой ступени нагружения осуществлялся процесс моделирования разработки нефтяного месторождения. В начале осуществлялось постепенное снижение порового давления (процесс эквивалентен упругой работе пласта), после достижения определенного значения порового давления, постепенное увеличение порового давления (создание системы поддержания пластового давления).

Опираясь на значения основных физико-механических свойств горной породы, были определены значения горизонтальной и вертикальной составляющей напряжения, а также значения эффективного напряжения на каждой ступени нагружения. Дополнительно

были построены круги Мора (рисунки 2 и 3), характеризующие напряженно-деформированное состояние (НДС) на каждой ступени нагружения. Представленные круги Мора описывают НДС при минимальном и максимальном значении порового давления. НДС на других стадиях находятся между этими крайними кругами.

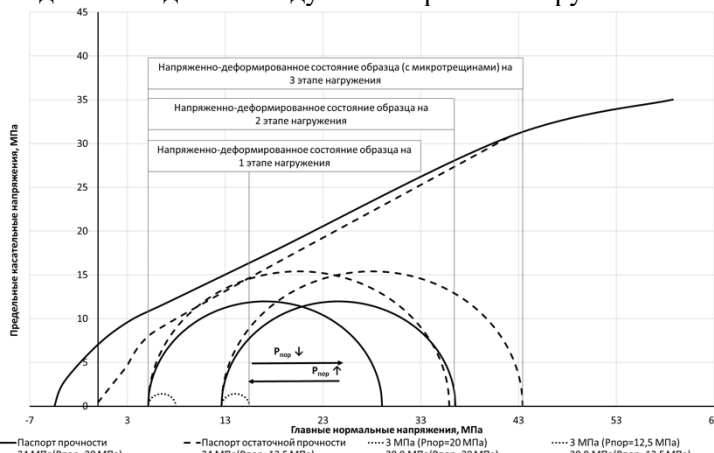


Рисунок 2 – Паспорт прочности образцов для первой группы образцов

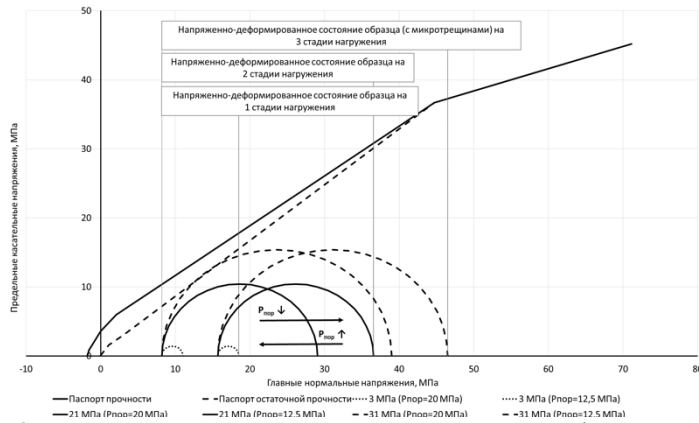


Рисунок 3 – Паспорт прочности для второй группы образцов горной породы

По результатам полученных паспортов прочности (круги Мора) получено, что, когда терригенная порода-коллектор, находится в НДС, при котором преобладают растягивающие нагрузки, значение проницаемости терригенной породы-коллектора выше (для первого типа песчаника различие в значении проницаемости составило 15%, для второго типа – 17%).

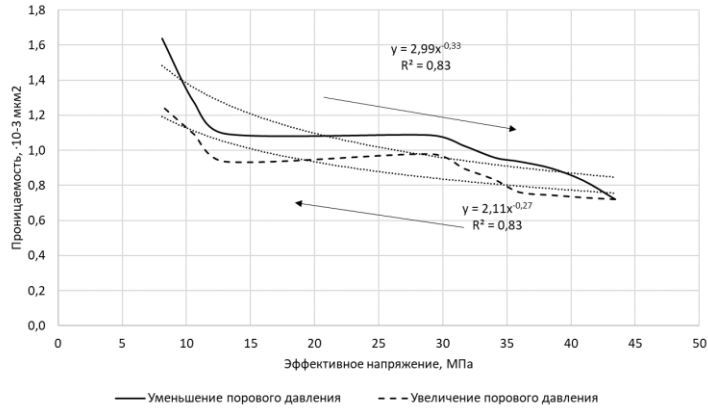


Рисунок 4— Зависимости проницаемости горной породы от эффективного напряжения (для первой группы образцов горной породы, до разрушения)

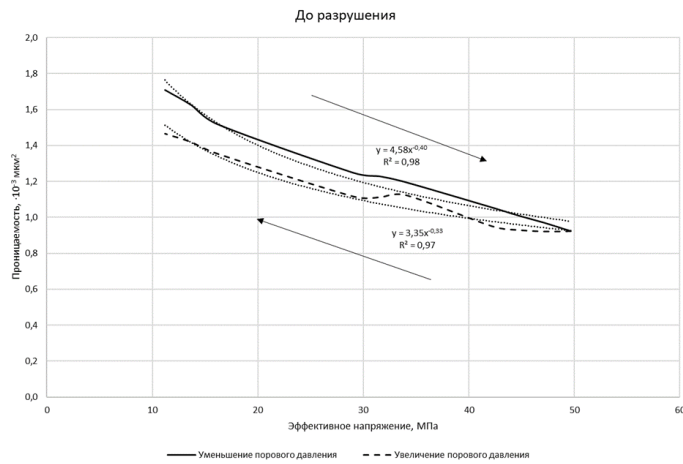


Рисунок 5— Зависимости проницаемости горной породы от эффективного напряжения (для второй группы образцов горной породы, до разрушения)

Значения проницаемости образцов терригенной породы-коллектора, полученной при первой ступени нагружения, можно считать, как первоначальные значения. Для первой группы образцов средняя проницаемость, относительно первоначального значения ( $1,63 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>) снизилась на 43% ( $0,76 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>). Безусловно, такое значительное изменение давления ( $\Delta\sigma_{эфф}=21$  МПа), оказываемого на скелет горной породы, практически невозможно в пласте. Более корректно следует сравнивать значения проницаемости на 2 и 3 этапе нагружения. Данные этапы различаются величиной осевой нагрузки. Путем увеличения осевой нагрузки моделировался процесс частичного разрушения образца, которое возможно при длительной эксплуатации объекта разработки. Сравнив значения средней проницаемости терригенной породы-коллектора, полученные в результате 2 и 3 этапов нагружения (для первой группы образцов), относительная разница между значениями проницаемости на последней стадии составила 22 %.

**2. Использование установленных зависимостей проницаемости терригенной породы-коллектора от эффективного напряжения рекомендуется для построения гидродинамической модели с целью достоверной оценки состояния пород-коллекторов для повышения эффективности реализации проектных решений на разных стадиях разработки, поскольку первоначальные фильтрационно-емкостные свойства терригенной породы-коллектора претерпевают изменения в сторону уменьшения, в диапазоне 10–19% с течением времени.**

Так как в данной диссертационной работе предполагался расчет основных параметров разработки не для всего месторождения, а только для его части, поэтому в качестве такой части был выбран элемент разработки с площадным расположением скважин. Это обусловлено тем, что с помощью этой системы осуществляется более равномерное воздействие на пласт.

В качестве элемента был выбран пятиточечный элемент.

В результате были построены 4 модели:

- Модель 1 и 2 – это гидродинамические модели для 1 и 2 группы образцов, построенные на кубе.

• Модель 3 и 4 – это гидродинамические модели для 1 и 2 группы образцов, построенные на модели с реальной геологией пласта.

Каждая из перечисленных моделей моделировала следующие процессы:

1. Естественный период разработки залежи, при котором пласт разрабатывался без системы поддержания пластового давления (ППД) на режиме истощения. На данном этапе происходило снижение пластового давления с 20 МПа.

2. После процесса, описанного в пункте 1, была организована система ППД (бурение 4 нагнетательных скважин) и за счет этого происходило увлечение пластового давления до 20 МПа.

На 4 моделях были применены расчеты:

1. Расчет процесса разработки данного элемента системы разработки месторождения без учета каких-либо зависимостей.

2. Расчет процесса разработки данного элемента системы разработки месторождения с учетом зависимости, полученной в результате лабораторных исследований, представленной в главе №3.

Накопленная добыча нефти использовалась для сравнения полученных результатов. Результаты гидродинамического моделирования приведены на рисунках 6 и 7 и в таблице 2.

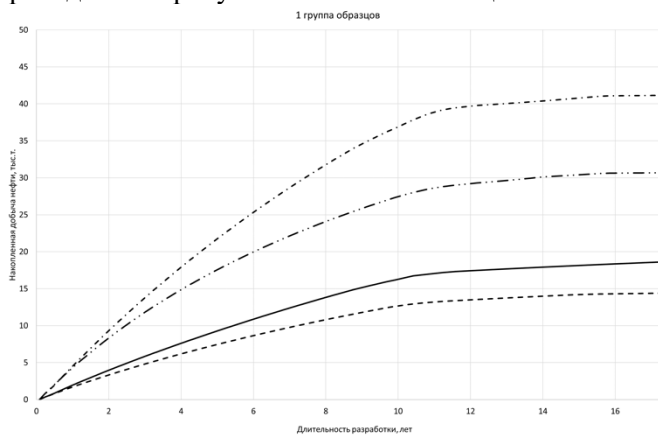


Рисунок 6 – Накопленная добыча нефти для первой группы образцов горной породы

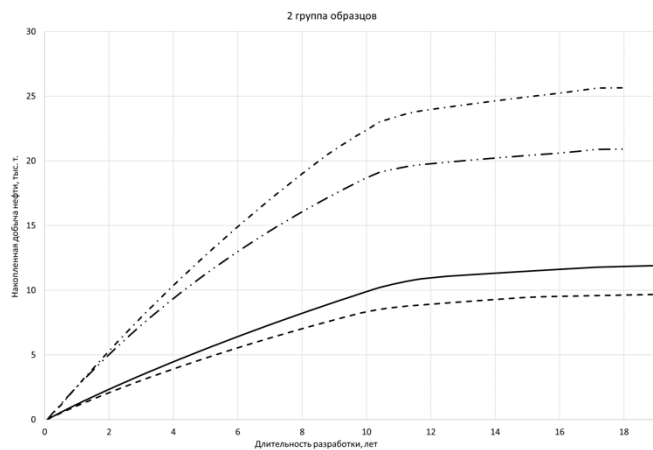


Рисунок 7 – Накопленная добыча нефти для второй группы образцов горной породы

Таблица 2 – Результаты гидродинамического моделирования

	Накопленная добыча нефти, тыс.т.			
	Куб		Модель с реальной геологией пласта	
	Без учета зависимости	С учетом зависимости	Без учета зависимости	С учетом зависимости
1 группа образцов	19	15	41	31
2 группа образцов	12	10	26	21

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, которая решает актуальную задачу повышения эффективности разработки сложнопостроенных месторождений путем уточнения зависимости проницаемости горной породы от напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:



1. Анализ отечественных и зарубежных источников показал, что существуют различные параметры, характеризующие напряженно-деформированное состояние (НДС) породы-коллектора и влияющие на течение жидкости в поровом пространстве: коэффициент Био, коэффициент Скемптона, поровое давление, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, девиаторное напряжение. Данные параметры необходимо учитывать при моделировании процесса течения жидкости в поровом пространстве.

2. По результатам лабораторных испытаний построены паспорта прочности (круги Мора) показывающие, что, когда терригенная порода-коллектор находится в НДС, при котором преобладают растягивающие нагрузки, значение проницаемости терригенной породы-коллектора выше (для первого типа песчаника различие в значении проницаемости составило 15%, для второго типа – 17%). При проектировании разработки нефтяного месторождения необходимо учитывать данные изменения проницаемости с целью достоверной оценки состояния пород-коллекторов, для этого рекомендуется проводить ряд лабораторных исследований по предложенной методике, для определения изменения состояния внутривпорового пространства коллектора, размера зерен породообразующего материала, пористости, минералогического состава и содержания глинистой компоненты.

3. При колебании порового давления от 20 МПа до 12,5 МПа, в терригенной породе-коллекторе наблюдалось снижение проницаемости, при этом, вследствие воздействия пластических деформаций, значение проницаемости не возвращалось в исходное состояние. Для первой группы терригенных образцов изменение проницаемости на второй стадии было 10% (с  $1,08 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> до  $0,98 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>) и третьей стадии было 19% (с  $0,94 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> до  $0,76 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>). Для второй группы терригенных образцов изменение проницаемости на второй стадии было 11% (с  $1,25 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> до  $1,16 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>) и третьей стадии было 10% (с  $1,05 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> до  $0,95 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>).

4. В результате гидродинамического моделирования процесса добычи нефти из терригенной породы-коллектора в условиях залегания, близких к естественным ( $\sigma_{гор} = 49,05$  МПа,  $\sigma_{гор.мин.} = 25,1$  МПа (для первой группы образцов терригенной горной породы),  $\sigma_{гор}$

$\sigma_{гор.мин.} = 49,05$  МПа,  $\sigma_{гор.мин.} = 28,2$  МПа (для второй группы образцов терригенной горной породы), разница в накопленной добыче между моделями составила:

- по 1 группе образцов 4 тыс. т. или 22% (на кубе) и 10 тыс. т. или 25% (на модели с реальной геологией пласта);
- по 2 группе образцов 2 тыс. т. или 19% (на кубе) и 5 тыс. т. или 19% (на модели с реальной геологией пласта).

5. Опираясь на полученные результаты лабораторных исследований и гидродинамического моделирования, можно сделать вывод о том, что при проектировании разработки месторождения нефти рекомендуется:

- проводить лабораторные исследования по определению основных физико-механических и прочностных свойств (предел прочности при одноосном и трехосном сжатии,  $\nu$ -т Пуассона, модуль Юнга) породы-коллектора и вышележащих горных пород;
- проводить лабораторные исследования по определению фильтрационно-емкостных свойств (проницаемость по газу, по жидкости, коэффициент пористости) породы-коллектора;
- проводить фильтрационные испытания по предложенной методике («Способ исследования проницаемости по жидкости образцов керна», заявка №2021121409) для выявления качественной зависимости между проницаемостью породы-коллектора и эффективными напряжениями, возникающими в пласте;
- учитывать сжимаемость пор порово-трещиноватых терригенных пород-коллекторов, так как она зависит от величины всестороннего эффективного напряжения.

6. Перспективы дальнейшей разработки темы диссертационного исследования связаны с проведением дополнительных лабораторных исследований на других образцах терригенных пород-коллекторов по предложенной методике, для более детального изучения влияния изменения напряженно-деформированного состояния на проницаемость породы-коллектора.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Петраков, Д.Г. Анализ зависимости между акустическими и физико-механическими свойствами горных пород терригенных отложений / Д.Г. Петраков, **Г.М. Пеньков**, Д.А. Соломойченко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2021. – Т. 21. – №. 2. – С. 71-75.
2. **Пеньков, Г.М.** Исследование зависимостей между физико-механическими свойствами песчаника и скоростью прохождения упругих волн / Г.М. Пеньков, Д.А. Карманский, Д.Г. Петраков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2020. – Т. 20. – №. 1. – С. 27-36.
3. **Пеньков, Г.М.** Исследование влияния насыщенности коллектора на его свойства при разработке месторождений нефти и газа / Г.М. Пеньков, Д.Г. Петраков // Инженер-нефтяник. – 2019. – №. 2. – С. 36-39.

*Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

4. **Penkov, G. M.** Simulation of a fluid influx in complex reservoirs of Western Siberia / G. M. Penkov, D. A. Karmansky, D. G. Petrakov // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: Proceedings of the International Forum-Contest of Young Researchers. – 2018. – pp. 119-124.
5. Pevneva, A. G. On designing a computational experiment system for various engineering interpretations of a global optimization problem / A. G. Pevneva, **G. M. Penkov**, M.D. Bakiev // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2017. – V. 12. – №. 4. – pp. 1219-1225.

*Патент:*

6. Заявка на изобретение №2021121409. Способ исследования проницаемости по жидкости образцов керна. **Пеньков Г.М.**, Петраков Д.Г., Корушнов В.А. Заявитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»