



На правах рукописи

КАТАНОВ ЮРИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**ГЕОЛОГО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДЕФОРМАЦИИ КОЛЛЕКТОРОВ ПРИ ВЫРАБОТКЕ ЗАПАСОВ НЕФТИ**

Специальность 25.00.12 – Геология, поиски и разведка
нефтяных и газовых месторождений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Тюмень - 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет» на кафедре «Прикладная геофизика».

Научный руководитель:

Ягафаров Алик Каюмович

доктор геолого-минералогических наук,
профессор, заслуженный геолог РФ,
академик РАЕН

Официальные оппоненты:

Лившиц Валерий Рафаилович

доктор геолого-минералогических наук,
доцент, главный научный сотрудник
лаборатории теоретических основ
прогноза нефтегазоносности
ФГБУН ИНГГ им. А.А Трофимука
СО РАН, г. Новосибирск

Глухманчук Евгений Дмитриевич

кандидат геолого-минералогических
наук, генеральный директор ООО Центр
геологического моделирования,
г. Ханты-Мансийск

Ведущая организация:

Федеральное автономное учреждение
«Западно-Сибирский научно-
исследовательский институт геологии и
геофизики», г. Тюмень

Защита состоится 13 июня 2018 года в 14.00 часов, на заседании диссертационного совета Д212.273.05 при Тюменском Индустриальном Университете: 625000, Российская Федерация, Тюменская область, г. Тюмень, ул. Володарского, 56, ауд. 113.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотечно-информационном центре ТИУ по адресу: 625039, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 72

Автореферат разослан 12 мая 2018 г.

Отзывы, заверенные печатью учреждения, в 2 экземплярах просим направлять по адресу 625000, г. Тюмень, ул. Володарского 56, Тюменский индустриальный университет, ученому секретарю диссертационного совета Д212.273.05. Факс 8(3452)39-03-46, e-mail: semenovatv@tyuiu.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета



Семенова Татьяна Владимировна

Актуальность темы. Цементированные породы-коллекторы нефти и газа, как любое твердое тело, деформируются под воздействие приложенных к ним напряжений и температур. Большинство коллекторов Западной Сибири представлены осадочными породами, которые по своей структуре неоднородны даже при исследовании их упругих свойств на микроуровне. Тогда для осадочных пород понятие упругой среды теряет свой смысл, подчеркивая применимость закона Гука (линейная зависимость, выражающая связь между напряжением и деформацией) лишь в случае бесконечно малых приращений напряжений. Кроме того, при моделировании прочностных параметров пород-коллекторов вариативность их упругих свойств (сжимаемость) не принимается во внимание, что может вносить существенные ошибки в результаты расчетов, выполненных на базе классической механики. При этом алгоритмы классической теории упругости непосредственно переносятся на изучение структуры пород без учета их высоконеоднородной природы, которая может проявляться как случайная или неслучайная характеристика. Поэтому оценка пространственной изменчивости упругих свойств цементованных осадочных пород-коллекторов в различных напряженных состояниях, рассмотренная на стыке нескольких наук, является актуальной задачей исследования, представляющей очевидный научный и практический характер.

Следует отметить, что нефтенасыщенный пласт представляет собой поровую или трещиновато-поровую систему, содержащую в своих порах, кавернах и трещинах нефть, газ и связывающую их пластовую воду. Дебит нефтяных скважин во многом зависит как от состава и характеристик пластовых жидкостей, так и от структуры коллекторов, а значит и факторов, вызывающих частичную закупорку микроканалов в пористой среде и, соответственно, ухудшающих проницаемость прискважинной зоны в процессе проведения различных геолого-технологических операций. Поэтому актуальной задачей также является расчет вероятности объемной деформации пород-коллекторов при выработке запасов нефти в различных горно-геологических условиях на базе математического моделирования.

Степень разработанности темы исследования. Исследования структуры пород-коллекторов представлены в работах зарубежных и отечественных ученых Ханин А.А., Мирзаджанзаде А.Х., Тер-Мартirosяна В.В., Котяхов Ф.И., Добрынина В.М., Ягафаров А.К. и др. Моделирование напряженно-деформированного состояния пород (при выделении зон относительного растяжения и сжатия продуктивного пласта) может выполняться на поисковом и

разведочном этапах с целью прогнозирования фильтрационно-емкостных свойств коллекторов. При этом сложное геологическое строение объекта исследования (продуктивный пласт) сопровождается столь же сложным распределением различных компонент полей напряжений (объемных деформаций).

Цель работы - геолого-математическое обоснование процесса объемной деформации (дилатансии) песчано-глинистых пород-коллекторов в результате изменения напряженного состояния массива; вероятностно-статистическая оценка изменения структуры продуктивного пласта ЮВ₁¹ Лас-Еганского нефтяного месторождения; разработка вычислительных программ для обработки геолого-промысловых данных, необходимых для проведения вычислительных экспериментов.

Предметом исследования являются процессы объемных деформаций песчано-глинистых пород-коллекторов, как связанная система геолого-технологических параметров с признаками неоднородности в условиях стохастической неопределенности.

Основные задачи исследования:

1) Разработка аналитических выражений прочностных параметров песчано-глинистых пород-коллекторов для исследования процессов объемных деформаций (прогнозирование дилатансии) на базе математического моделирования.

2) Прогнозирование геолого-технологической эффективности потокоотклоняющих технологий с учетом объемных деформаций пород-коллекторов.

Научная новизна:

1) Впервые на базе математического моделирования получены закономерности, позволяющие спрогнозировать предел прочности песчано-глинистых пород-коллекторов в интервалах действующих напряжений в различных термодинамических условиях.

2) Предложен подход к использованию дифференциальной энтропии как меры неопределенности поведения коллекторов в процессе объемной деформации массива согласно выделенным литологическим типам: низкопроницаемые – глинистые алевролиты, среднепроницаемые – алевролиты, высокопроницаемые – песчаники.

3) Исследована геолого-технологическая эффективность применения потокоотклоняющих технологий (ВУГ, СПС) с учетом пределов прочности коллекторов продуктивного пласта ЮВ₁¹ Лас-Еганского месторождения в процессе выработки запасов нефти.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов исследования состоит:

- в изучении закономерностей прочностных характеристик коллекторов при работе продуктивного пласта ЮВ₁ Лас-Еганского нефтяного месторождения в условиях сжатия и растяжения;
- в выделении классификации коллекторов по показателю дифференциальной энтропии - высоко-, средне- и низкоэнтропийные геологические системы;
- в применении разработанных закономерностей и программ «IntellPro» и «WellCalc» как практического и лабораторного базиса в учебном процессе студентов специальности 21.04.01, 21.03.01- Нефтегазовое дело, 09.04.02 - Информационные системы и технологии, дисциплины «Математическое моделирование в задачах нефтегазовой отрасли. Методы математической физики», «Компьютерное проектирование (моделирование)», а также в проектной базе ОАО «КогалымНИПИнефть» и ООО «ТНЦ».

Методология и методы исследования. Для формирования геолого-геофизической базы данных рассмотрены классификации коллекторов по литологическим типам с дальнейшим анализом их физико-механических свойств. Для исследования неконтролируемого изменения структуры коллекторов вследствие влияния на них термодинамических характеристик применяются разработанные программные средства обработки геолого-промысловой информации, а также программные средства построения гидродинамических моделей, методы теории вероятностей и математической статистики.

Личный вклад автора включает следующие положения:

- новый подход для оценки изменения структуры коллекторов как неоднородных сред на базе геолого-математического моделирования;
- на базе нечетких моделей (в условиях неопределенности) разработан способ вероятностно-статистической оценки геолого-технологической эффективности применения потокоотклоняющих композиций с учетом объемных деформаций коллекторов продуктивного пласта ЮВ₁ Лас-Еганского месторождения в процессе выработки запасов нефти;
- разработаны программные продукты «IntellPro» и «WellCalc», используемые для динамической обработки исходной геолого-промысловой информации, свидетельство о

государственной регистрации которых №2013660228 и №2013619826 соответственно (патенты РФ).

Соответствие диссертационной работы паспорту научной специальности 25.00.12 - Геология, поиски и разведка нефтяных и газовых месторождений по направлению геолого-минералогических наук:

Пункт 3: Геологическое обеспечение разработки нефтяных и газовых месторождений.

Раскрытие данного пункта паспорта специальности 25.00.12 заключается в следующем. В диссертационной работе рассмотрены полимиктовые песчаники продуктивного пласта ЮВ₁¹ Лас-Еганского нефтяного месторождения, объемная деформация структуры которых происходит в межзерновом слое и в зернах, что приводит к появлению локальных касательных напряжений, вследствие которых возникают дефекты в кристаллической решетке минералов из-за имеющихся вакансий (точечные дефекты), вследствие которых происходит образование линейных дефектов (дислокации). Учитывая геологическую структуру песчаников наиболее вероятной будет модель упругопластического тела, когда пластическая зона деформации породы-коллектора будет лишь на контактах ее блоков, а остальная часть будет пребывать в упругом состоянии.

Проведено геолого-математическое исследование литологических типов пород-коллекторов продуктивного пласта ЮВ₁¹ (при его работе на растяжение и сжатие) Лас-Еганского нефтяного месторождения. С учетом кинетической теории разрушения С.Н. Журкова разработан вероятностный подход для прогнозирования объемных деформаций пород-коллекторов, характерных началу дилатансии (по каждому литотипу).

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Получены на основе вероятностно-статистических моделей дилатансии закономерности изменения пределов прочности основных литотипов пород в условиях сжатия и растяжения для стадий допредельного и запредельного деформирования.

2) Установленная аналогия структур поровых коллекторов при деформации и фибриллярно-поровых структур полимеров позволяет повысить эффективность полимерного заводнения.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы подтверждаются экспериментальными данными ОАО «КогалымНИПИнефть», на базе которых представлен разработанный вероятностно-статистический подход к исследованию объемных деформаций коллекторов продуктивного пласта ЮВ₁¹ Лас-Еганского нефтяного месторождения в процессе выработки запасов. Основные выводы диссертационного исследования были представлены на VII, VIII, IX, X Всероссийских научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых (г. Тюмень, ТюмГНГУ, 2008-2012 гг.), а также на научно-методических семинарах кафедры «Моделирование и управление процессами нефтегазодобычи» 2008-2015 гг. и кафедр «Прикладная геофизика» и «Геология нефти и газа» 2016-2017 гг.

Публикации. Основные результаты исследования опубликованы в 14 работах, в том числе (в скобках в числителе указан общий объем этого типа публикаций в печатных листах, в знаменателе - объем, принадлежащий лично автору) 9 статей в периодических изданиях, рекомендованных ВАК [31,33,35,39,40,46,49-51] для представления основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора или кандидата наук (4.22/2.91), 3 статьи в других изданиях [30,32,48] (0.625/0.5), 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (в Роспатенте) [41,42].

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из титульного листа, оглавления, введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, словаря терминов, списка литературы и приложений. Работа содержит 125 страниц машинописного текста, 44 рисунка и 12 таблиц. Список литературы включает 102 наименования, в том числе 4 на иностранных языках.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность научному руководителю, доктору геолого-минералогических наук, академику РАН, профессору А.К. Ягафарову. Автор выражает благодарность руководству ООО «КогалымНИПИнефть» и ФАУ «ЗапСибНИИГГ» за содействие при подготовке работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отображена актуальность диссертационной работы, цель и основные задачи исследования.

Глава 1. Краткие сведения о геологии и нефтегазоносности территории Западной Сибири. Проанализировано краткое геологическое строение Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. С учетом экспериментальных исследований ООО «КогалымНИПИнефть» по физико-технологическим свойствам пород-коллекторов автором исследованы литолого-стратиграфическая и петрофизическая характеристики Лас-Еганского нефтяного месторождения на примере продуктивного пласта ЮВ₁.

Глава 2. Исследование параметров пород-коллекторов, как геологической системы с признаками неоднородности и неопределенности. Для прогнозирования разрушения пород-коллекторов в процессе выработки запасов нефти необходимо иметь представление о закономерностях (фазах) развития их деформации: порода в устойчивом состоянии, порода в предразрушающей области, порода в стадии разрушения [1-3]. Абсолютное большинство пород-коллекторов месторождений Западной Сибири имеют осадочное происхождение. Коллекторами нефти и газа являются терригенные породы - пески, алевриты, песчаники, алевролиты, а также некоторые глинистые породы). Сравнивая организацию пространственных связей между частицами в глинистой породе и песчанике можно отметить, что в глинистых породах система связи имеет более плотный и насыщенный характер благодаря присутствию в связывающем веществе коллоидной компоненты [10,12]. В *диссертационной работе*, модель порового коллектора построена на следующих принципах [11]: связь между частицами породы осуществляется с помощью соединительных композиций, причем плотность композиций меняется в зависимости от вида породы; разрушение породы при обводнении происходит в результате двух основных независимых процессов - вымывания связки из узлов (внутрипластовая суффозия), и адсорбционного понижения прочности (эффект Ребиндера). Автор предполагает, что характеристика распределения прочностных параметров пород-коллекторов как дисперсия может служить мерой степени неоднородности породы - чем больше ширина распределения, тем выше степень неоднородности породы-коллектора [4]. В качестве закона распределения исследуемых параметров выбран нормальный закон. Автором получены аналитические соотношения для расчета вероятности объемных деформаций пород-коллекторов (прогнозирование дилатансии) [5]. Под *структурой породы-коллектора* понимается частная характеристика природного строения породы – образование минералов (при определенном расположении отдельных зерен) в процессе кристаллизации. Под *деформацией* пород-

коллекторов подразумевается изменение их размеров и формы под действием естественных статических нагрузок (горное давление) и механического нагружения. Под *неоднородностью* продуктивных пластов понимается свойство нефтяного пласта-коллектора, обусловленное изменением его структурно-фациальных и литологических свойств, оказывающих влияние на движение пластовых жидкостей к забоям скважин (Дементьев Л.Ф., 1982 г).

Глава 3. Вероятностно-статистическая модель объемной деформации пород-коллекторов продуктивного пласта ЮВ₁¹ Лас-Еганского нефтяного месторождения.

При оценке прочности пород-коллекторов определяется величина критических напряжений, при достижении которой порода разрушается. При этом уровень напряжений для разных горных пород различный и он является пределом прочности на соответствующие нагрузки (сжатие, растяжение). Тогда объемная деформация породы является случаем, когда происходит разрыв связей между частицами кристаллической решетки. Наличие мелких трещин, определяемых вакансиями (точечные дефекты в породе), неоднородностей состава и состояния, а также областей ослабления - определяет преобладание такого процесса как хрупкое разрушение. В начальной точке роста трещины, напряжения снижаются и перераспределяются на другие точки в кристаллах, где снова возникают микросдвиги, что вновь приводит к деформации породы. Автором построена геологическая модель пласта ЮВ₁¹ Лас-Еганского нефтяного месторождения. Распределения полей нефтенасыщенности и проницаемости по данному пласту, соответственно представлены на рисунок 1(А-Б).

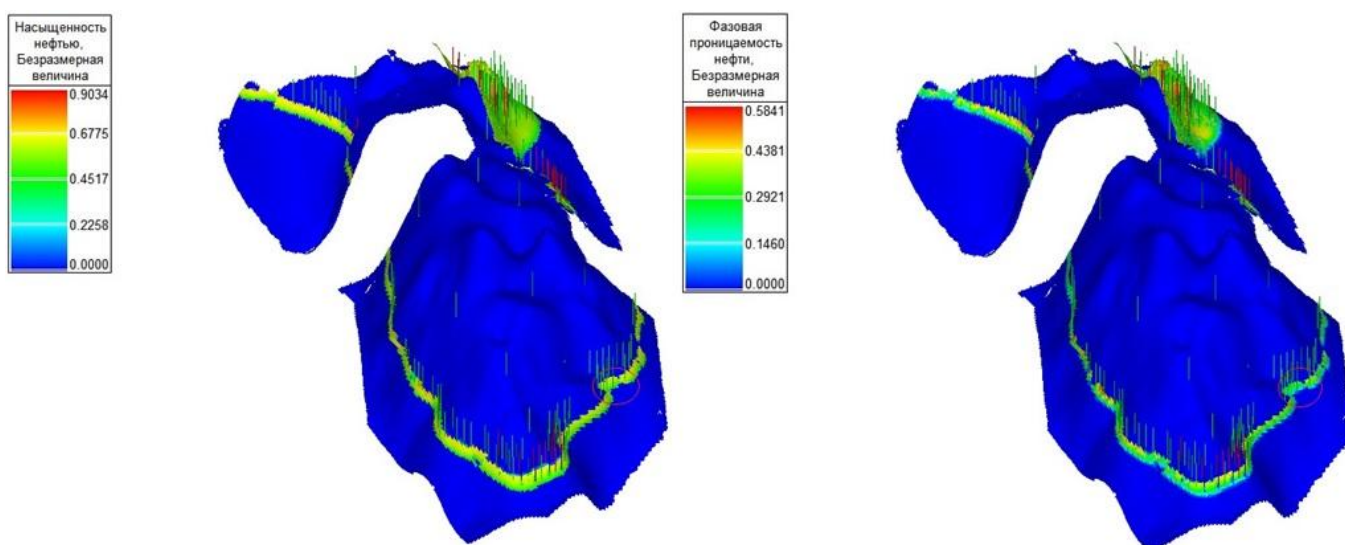


Рисунок 1 - А) (слева) - поле нефтенасыщенности пласта ЮВ₁¹,

Б) (справа) - поле проницаемости пласта ЮВ₁¹

В.Х. Ахияров (1980 г) выделил граничные значения параметров литологических типов пород, согласно которым нефтяными коллекторами следует считать породы, значения геофизического параметра $\alpha_{\text{пс}}$ которых изменяются в интервале (0,2-0,4). Согласно дальнейшим исследованиям в работах А.К. Ягафарова (1984 г), В.К. Федорцова (1986 г) для промышленно-продуктивного комплекса осадочного чехла Западной Сибири можно сделать вывод: на практике разделение пород на литотипы необходимо делать при интерпретации данных ГИС для каждой конкретной скважины. С учетом вышеизложенных методик, автором построены следующие аппроксимационные закономерности [9] для геофизических данных продуктивного пласта ЮВ₁¹ Лас-Еганского нефтяного месторождения (рисунок 2).

Согласно выделенными литологическим типам (рисунок 2) пород-коллекторов (низкопроницаемые – глинистые алевролиты (I), среднепроницаемые – алевролиты (II), высокопроницаемые – песчаники (III)) следует, что с увеличением содержания глинистой компоненты и, как следствие, уменьшением проницаемости, ее корреляционная связь с параметром собственной поляризации ослабевает. Следовательно, изучение прочностных характеристик для каждого литотипа пород-коллекторов необходимо исследовать отдельно, поскольку пределы прочности которых будут различаться.

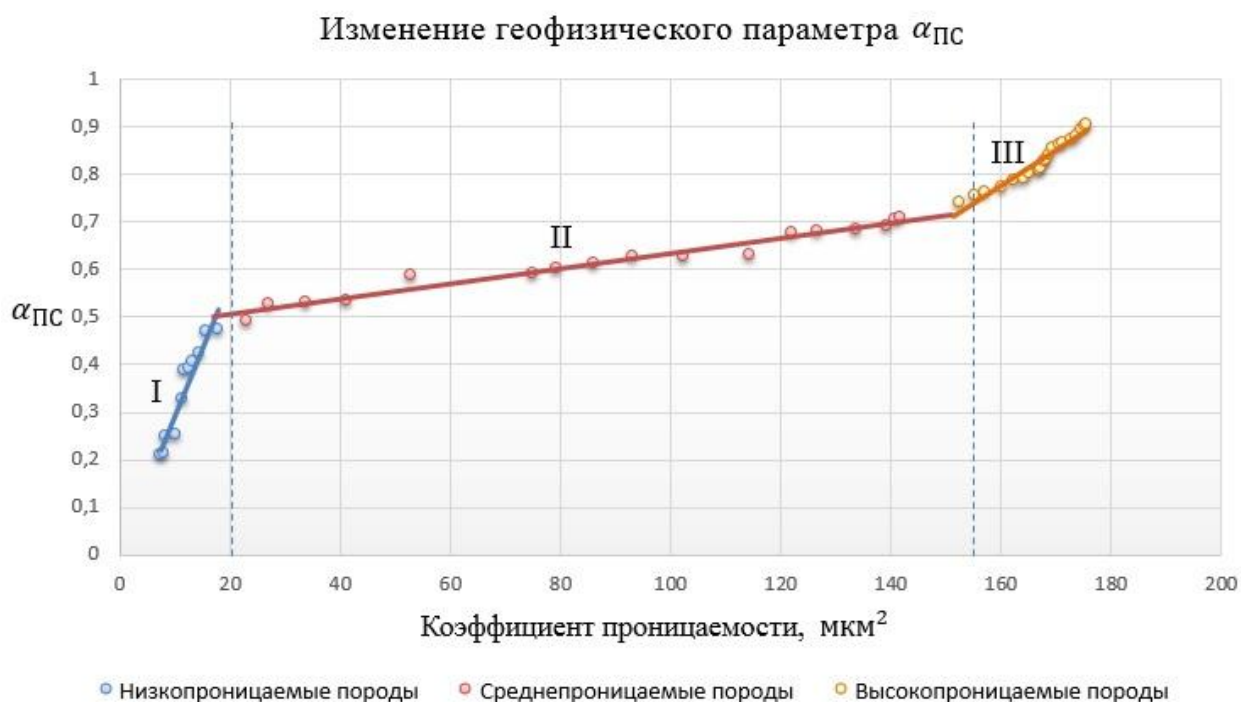


Рисунок 2 - Распределение полимиктовых коллекторов Лас-Еганского месторождения (пласт ЮВ₁¹) на литологические типы (график выполнен автором с учетом исследований

Ахиярова В.Х., Ягафарова А.К., Федорцова В.К.)

Предложенный, *автором работы*, дальнейший этап оценки пределов прочности пород-коллекторов учитывает кинетическую теорию разрушения С.Н. Журкова построенную на том, что разрушение породы не является критическим состоянием геологического тела, поскольку в твердом теле происходит непрерывный процесс накопления повреждений (передвижение вакансий, дислокации), которые приводят к полному его разрушению.

В формулировках закономерностей С.Н. Журкова постоянно прослеживается вероятностный исход в зависимости от возникновения неоднородностей достаточного размера. Непрерывно возникающие дефекты в кристаллической решетке минералов уже не распределены по заданному объему породы, а начинают скапливаться (концентраторы напряжений), образуя микроскопические, а затем и макроскопические предпосылки для объемной деформации в образце породы.

Понятие работы, необходимой для разрушения породы, противоречит кинетической теории прочности, поскольку по смыслу этой характеристики предполагается, что разрушение протекает во всем объеме образца, а не на перенапряженном участке у развивающейся трещины.

Такой механизм разрушения объясняет смысл термина кинетическая теория прочности: разрушение в напряженной породе является результатом постепенного накопления дефектов макромолекул, что в итоге приводит к разрушению всего объема породы. В этом случае, результаты исследования будут представлены методами математической статистики и теории вероятности с использованием теории дислокаций и реологии.

Для пласта ЮВ₁¹ минеральный состав цементирующего вещества (глин) преимущественно гидрослюдистый с примесью смешанослойных минералов, каолинита и хлорита.

Автором получены закономерности изменения пределов прочности пород-коллекторов по литотипам (рисунок 2) при работе продуктивного пласта на сжатие и растяжение (рисунок 3), отражающие атомную природу разрушения породы-коллектора - разрушение является закономерно развивающимся процессом.

С учетом методики С.Н. Журкова, автором впервые рассчитано время, необходимое для развития объемных деформаций (начало дилатансии) в породе-коллекторе [9,11], преимущественно для различных литологических типов (рисунок 4).

Из рисунка 4 видно, что значения времени для развития объемных деформаций варьируют в интервале 6,5-8 часов (при переводе логарифма времени (сек) в часы). Продолжая

исследование, *автором работы*, проведена аналогия изменения дифференциальной энтропии (как меры неопределенности изменения геологической структуры коллекторов продуктивного пласта ЮВ₁¹), при изменении поля проницаемости (по литотипам) (рисунок 5).

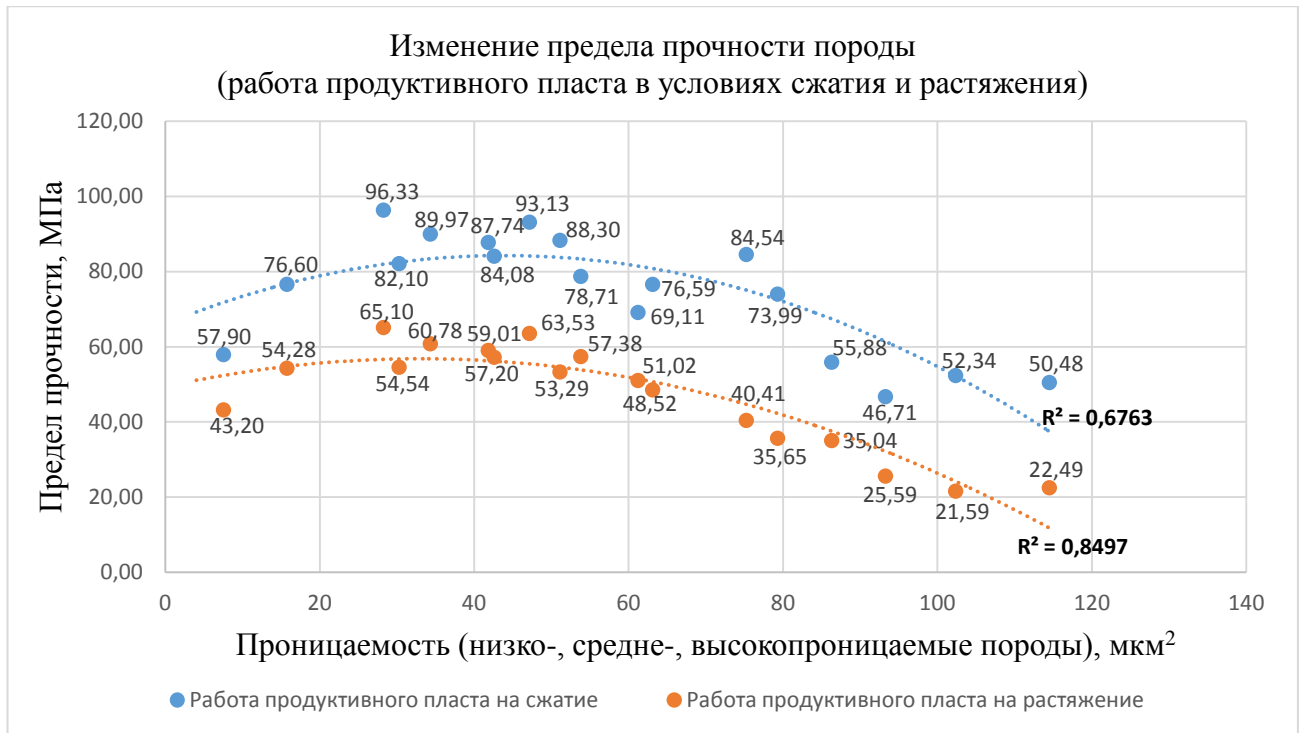


Рисунок 3 - Изменение пределов прочности пород-коллекторов продуктивного пласта ЮВ₁¹ Лас-Еганского нефтяного месторождения по литотипам [9]

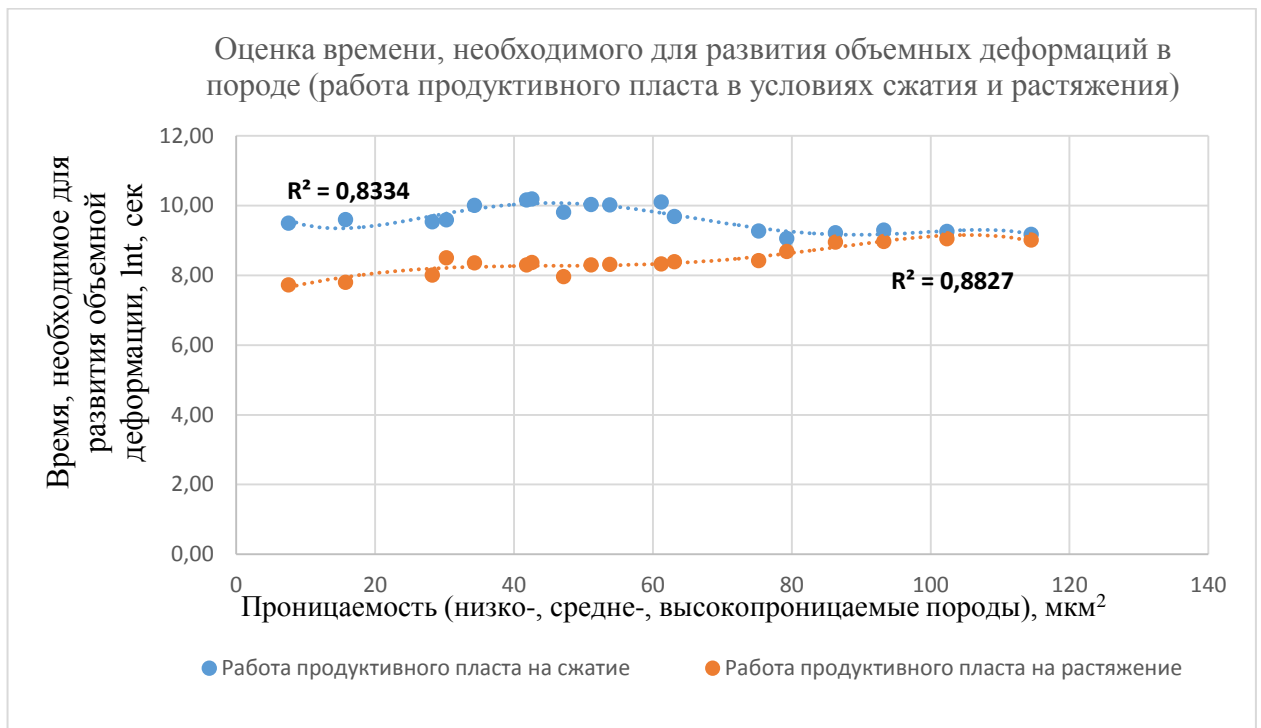


Рисунок 4 - Зависимость времени, необходимого для развития объемных деформаций в песчано-глинистых коллекторах от изменения их проницаемостей

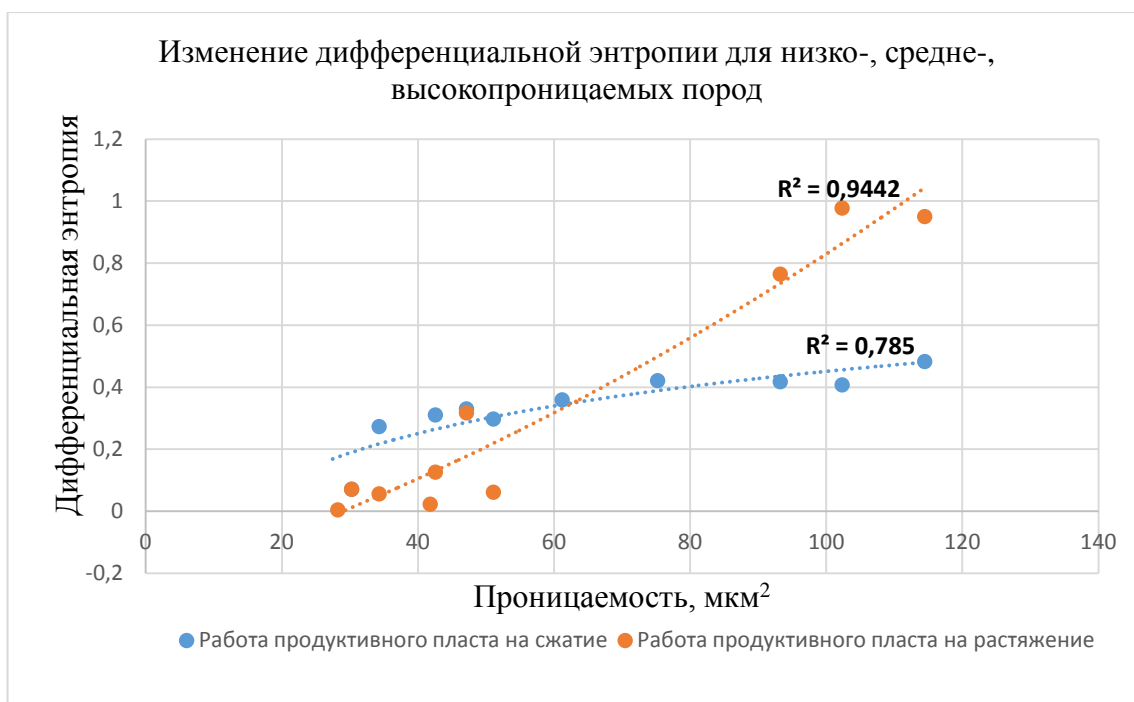


Рисунок 5 - Изменение дифференциальной энтропии по литотипам

Из полученных зависимостей видно, что при переходе от низко- к высокопроницаемым породам, уровень дифференциальной энтропии увеличивается, что объясняется уменьшением глинистой компоненты между зернами породообразующего минерала, что повышает вероятность неконтролируемого изменения структуры породы при влиянии различных термодинамических характеристик.

Следующим этапом исследования (по автору), является вероятностно-статистическая оценка объемной деформации пород-коллекторов (прогнозирование дилатансии) для рассчитанных пределов прочности по каждому литотипу пород-коллекторов пласта ЮВ₁¹ Лас-Еганского нефтяного месторождения при его работе в условиях сжатия и растяжения с учетом разработанных аналитических соотношений прочностных параметров коллекторов (Глава 2) (рисунки 6-11).

Данные закономерности соответствуют стадии допредельного деформирования, когда происходит закрытие структурных дефектов и выделяются линейные (упругие) участки деформирования.

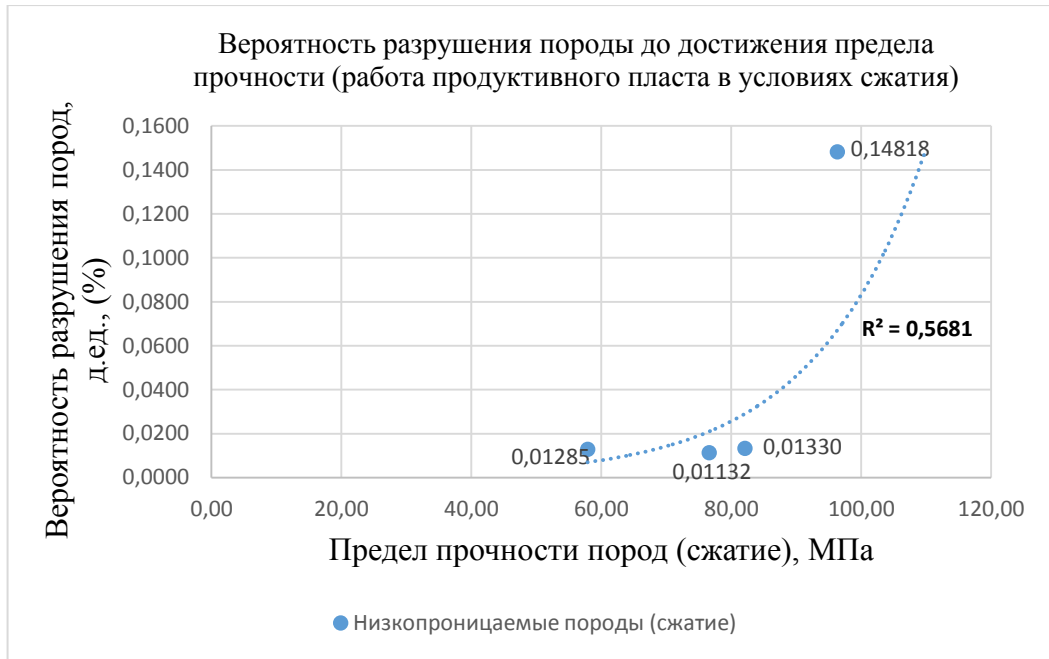


Рисунок 6 - Вероятность разрушения низкопроницаемых коллекторов при работе продуктивного пласта в условиях сжатия [5,9,11]

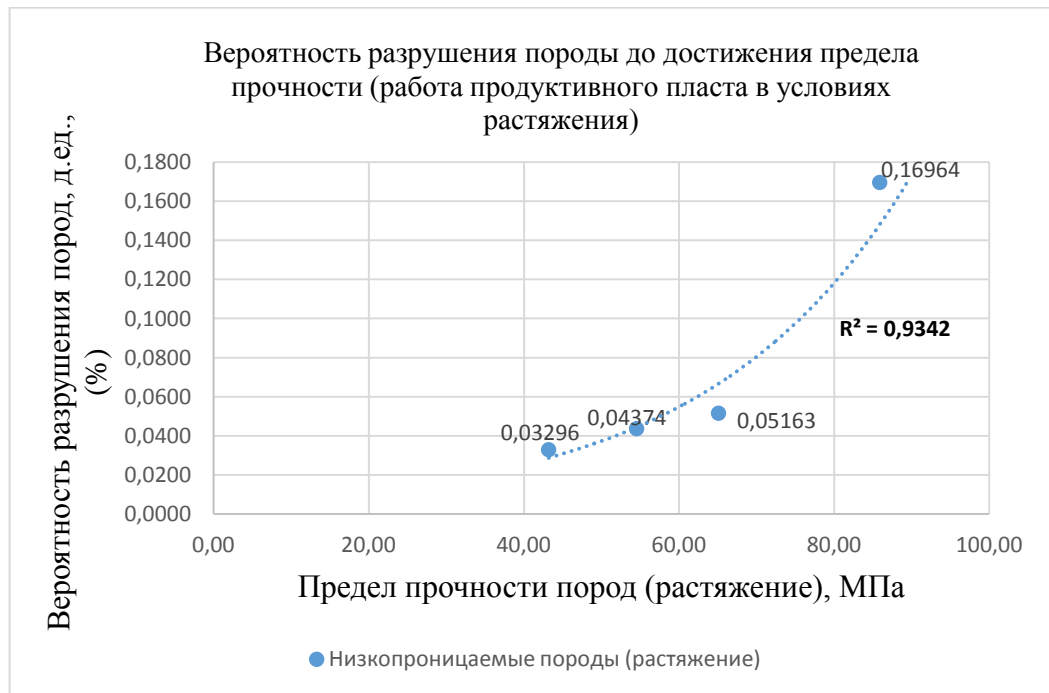


Рисунок 7 - Вероятность разрушения низкопроницаемых коллекторов при работе продуктивного пласта в условиях растяжения [5,9,11]

При переходе к среднепроницаемым коллекторам происходит образование микротрещиноватости, что соответствует запредельной стадии деформирования (стадия разупрочнения породы).

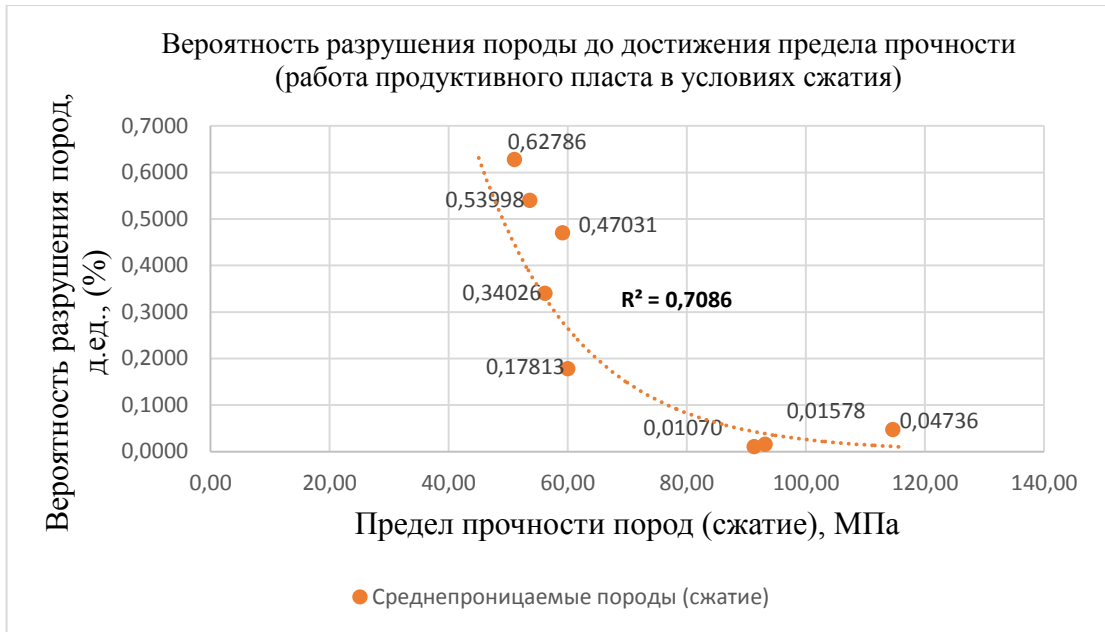


Рисунок 8 - Вероятность разрушения среднепроницаемых коллекторов при работе продуктивного пласта в условиях сжатия [5,9,11]

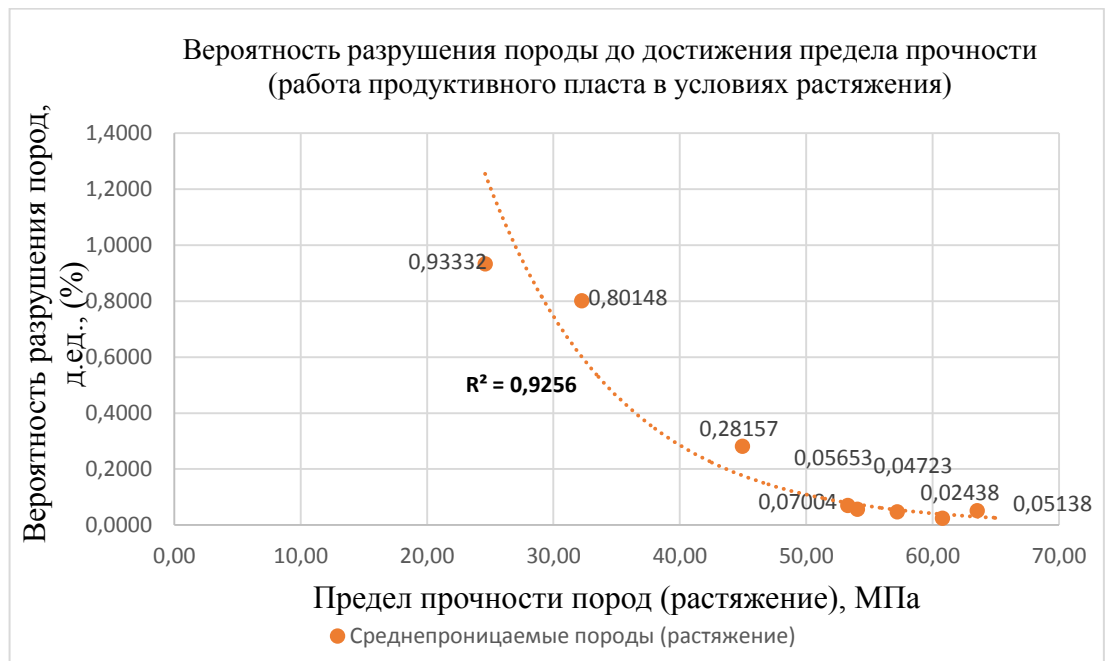


Рисунок 9 - Вероятность разрушения среднепроницаемых коллекторов при работе продуктивного пласта в условиях растяжения [5,9,11]

При переходе к высокопроницаемым коллекторам, для соответствующих пределов прочности, происходит динамическое разрушение породы, сопровождаемое разлетом ее частей - хрупкое разрушение (пластическая зона не наблюдается).

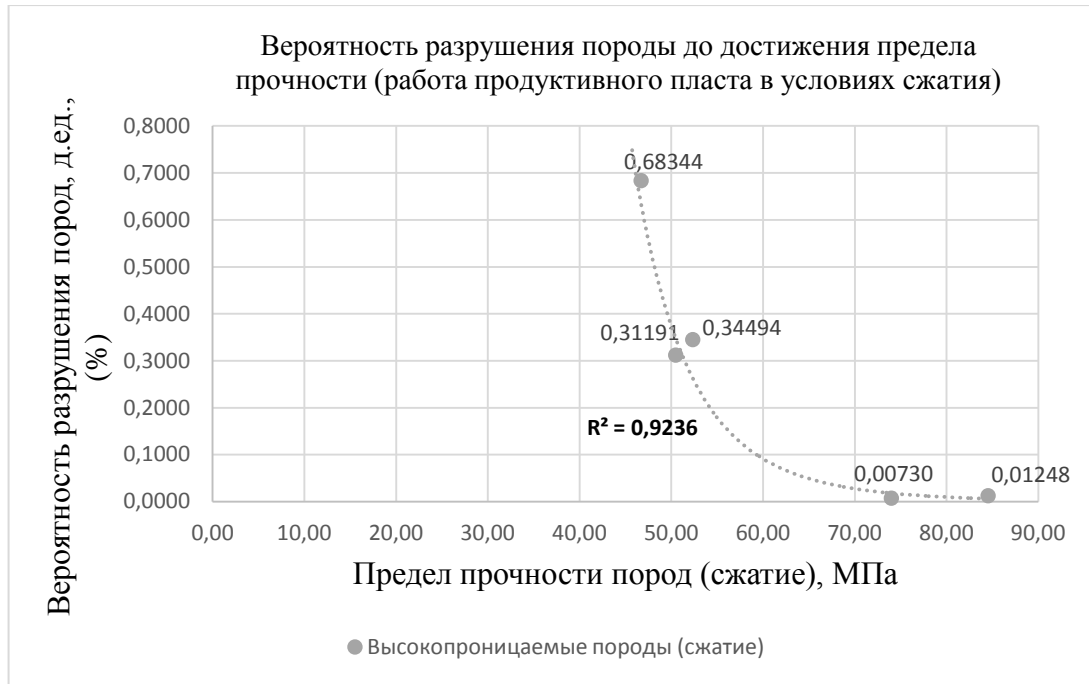


Рисунок 10 - Вероятность разрушения высокопроницаемых коллекторов при работе продуктивного пласта в условиях сжатия [5,9,11]

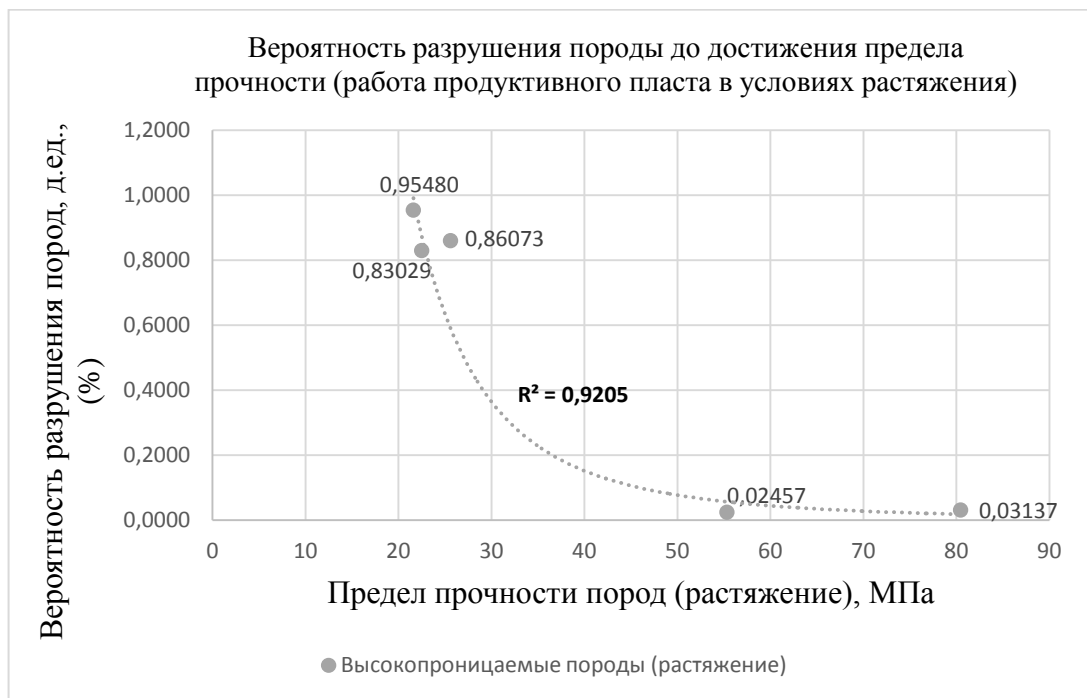


Рисунок 11 - Вероятность разрушения высокопроницаемых коллекторов при работе продуктивного пласта в условиях растяжения [5,9,11]

Для высокопроницаемых коллекторов наблюдается значительное снижение грузонесущей способности. При этом наблюдается секущий модуль спада, проходящий через предел прочности в запредельной стадии деформирования и касательный модуль спада (модуль

хрупкого разрушения) - касательная на более крутом участке в запредельной стадии деформирования.

Таким образом, получается, что при сжатии зависимость прочности породы-коллектора от объема более слабая. Это можно объяснить тем, что часть вакансий находится в зажатом состоянии и не развивается. При растяжении пород-коллекторов, поле напряжений способствует развитию вакансий.

Глава 4. Геолого-математическое моделирование изменения проницаемости пород-коллекторов продуктивного пласта ЮВ₁ Лас-Еганского нефтяного месторождения в условиях неопределенности.

Автором установлена аналогия изменения структуры порового коллектора и фибриллярно-поровой структуры полимера, состоящей из нитеобразных макромолекул (фибрилл), разделенных микропустотами (порами). Для оценки объемной деформации горной породы учитывается ее межкристаллические и внутрикристаллические особенности, в то время как в полимерах эту аналогию составляют межмолекулярные связи. В адсорбционно-активной жидкости возникновение и развитие новой поверхности наблюдается не только при разрушении, а значительно раньше - еще в процессе объемной деформации полимера, которая сопровождается переориентацией макромолекул.

Разработанные автором аналитические соотношения прочностных параметров коллекторов учитывают эффект Ребиндера (внутренний и внешний), который проявляется универсально, как при объемной деформации (дилатансии) горных пород, так и при изменении структуры полимеров. Однако фибриллярно-поровая структура полимера возникает в отдельных зонах (аналогия с зонами адсорбционного понижения прочности пород-коллекторов) и по мере развития процесса объемного деформирования изменяется структура все большего объема полимера (аналогия с концентраторами напряжения в породе-коллекторе). Поскольку фибриллы произвольно распределены в пространстве (аналогия со случайным распределением вакансий в структуре коллекторе), такая структура содержит множество микропустот, при постоянном физико-механическом воздействии на которые образуется необратимая деформация.

Суть потокоотклоняющей технологии состоит в снижении проницаемости промытой зоны скважины и области разуплотнения пород, следовательно, оценить геолого-технологическую

эффективность технологий (ВУГ, СПС) можно с помощью сравнения значений поля проницаемости после обработки скважин и до нее:

$$\gamma = \frac{K_2}{K_1}, \quad (3)$$

где K_1, K_2 - соответственно, значения поля проницаемости исследуемого участка до и после обработки технологиями (ВУГ, СПС). Следует отметить, что есть потокоотклоняющие композиции, блокирующие промьтые зоны полностью, а есть меняющие смачиваемость и соответственно фазовые проницаемости.

Гидродинамические модели изменения полей нефтенасыщенности и проницаемости построены автором в гидродинамическом симуляторе TNavigator (рисунок 8, интервал исследования - 1 год) [7,8]. Следует отметить, что интерактивный процесс гидродинамического моделирования полимерного заводнения, в том числе реализация опций моделирования потокоотклоняющих технологий, происходит за счет изменения проницаемости пласта. Задача численного моделирования полимерного заводнения в гидродинамическом симуляторе TNavigator выполнена на основе технологии BrightWater, ориентированной на оценку эффективности вытеснения нефти полимерным заводнением - закачки специальных химических веществ в виде микроскопических гранул, изменяющих свои свойства в поровом коллекторе с течением времени. Данная технология базируется на многофазной изотермической модели BlackOil, для которой используется математическая модель, учитывающая основные физические факторы физико-химического процесса, такие как время «активации» гранул полимера, изменение фильтрационно-емкостных свойств пласта в зависимости от концентрации полимера и его текущего динамического состояния, изменение подвижности воды в прискважинной зоне скважин при закачке растворов поверхностно активных веществ. После активации «частицы» BrightWater расширяются, во много раз превосходя свой первоначальный объем, блокируют поровые каналы и направляют нагнетаемую воду в еще неиспользованные богатые нефтью зоны.

Из представленных гидродинамических моделей (рисунок 12) прослеживается тенденция снижения проницаемости после применения технологий (ВУГ, СПС). Используя соотношение (3) автором рассчитано поквартальное изменение поля проницаемости промьтой зоны скважин и области разуплотнения пород после применения технологий (ВУГ, СПС), которое определено

снижением проницаемости на 19% в сравнении со значением данного параметра до обработки (ВУГ, СПС). Тогда дополнительная годовая добыча нефти (расчетная геолого-технологическая эффективность при реализации технологий ВУГ, СПС) будет рассчитывается как разница между прогнозной и фактической накопленной добычей нефти до и после применения технологий (ВУГ, СПС) (таблица 1).

С учетом разработанных автором вероятностно-статистических моделей объемной деформации структуры коллекторов и установленной аналогией «структура коллектора - структура полимера», рассчитанная геолого-технологическая эффективность потокоотклоняющих технологий (ВУГ, СПС) составляет 1634 т дополнительной годовой добычи нефти (таблица 1, «*последнее значение в нижней правой ячейке*» 1634 т), что в сопоставлении с реальным уровнем дополнительно добытой нефти 1712 т (за базовый период исследования 12 месяцев) составляет погрешность аппроксимации $\pm 5,1\%$ (Глава 4).

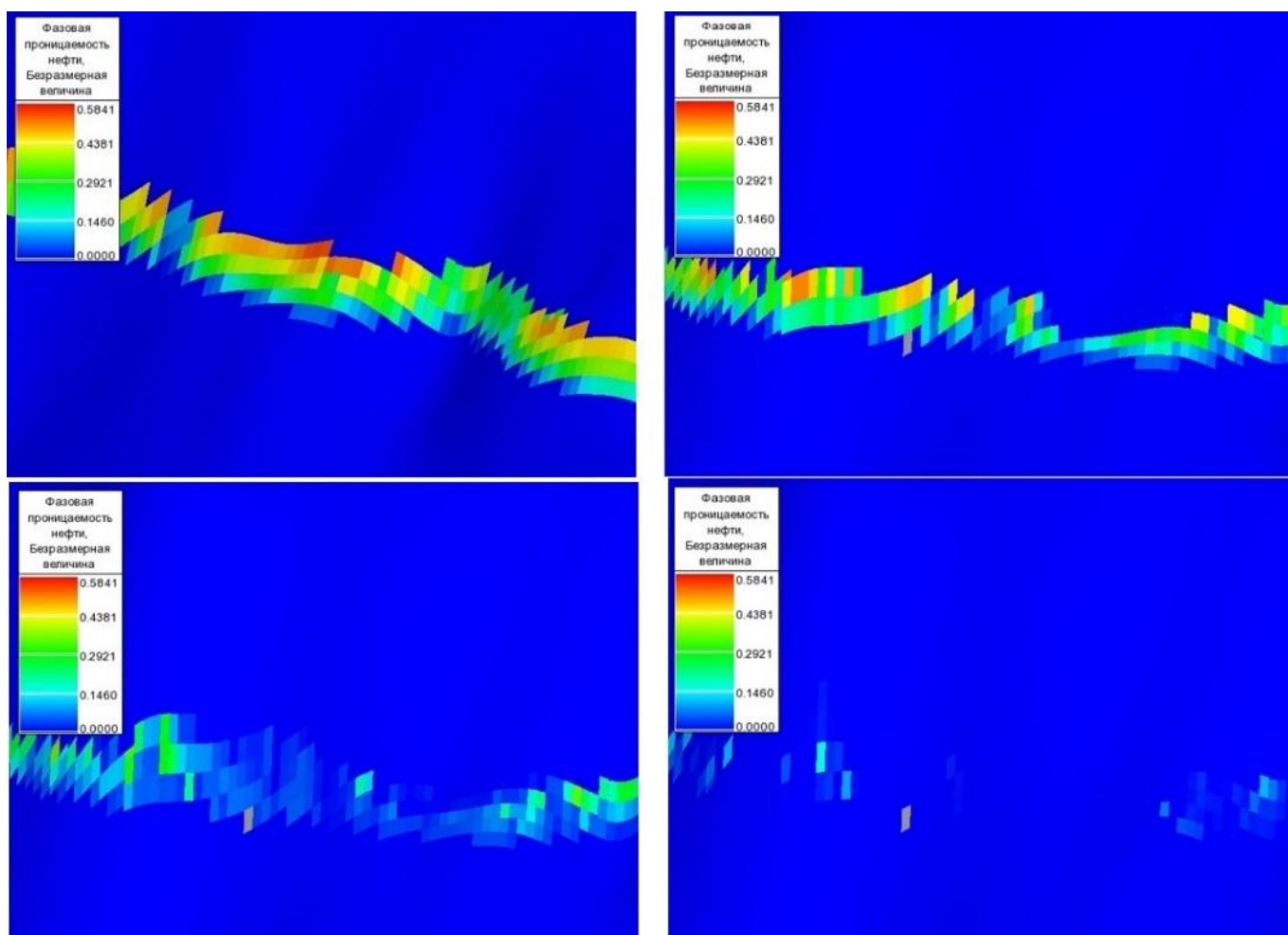


Рисунок 12 - *слева-сверху*: 1 квартал, *справа-сверху*: 2 квартал, *слева-снизу*: 3 квартал, *справа-снизу*: 4 квартал

Таблица 1 - Дополнительная годовая добыча нефти после применения технологий (ВУГ, СПС)

Вид МУН	ВУГ, СПС		
	Накопленная добыча нефти, т (после ВУГ, СПС, прогноз)	Накопленная добыча нефти, т (без ВУГ, СПС, прогноз)	Дополнительная годовая добыча нефти, т
Январь	434	285	149
Февраль	811	527	284
Март	1188	769	419
Апрель	1565	1011	554
Май	1942	1253	689
Июнь	2119	1495	824
Июль	2696	1737	959
Август	3073	1979	1094
Сентябрь	3450	2221	1229
Октябрь	3827	2463	1364
Ноябрь	4204	2705	1499
Декабрь	4581	2947	1634

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Разработана система статистических смещенных оценок прочностных параметров пород-коллекторов, на базе которой реализована вероятностно-статистическая оценка начала объемных деформаций (начало дилатансии) и разрушения коллекторов по выделенным литологическим типам.

2. Реализовано геолого-математическое моделирование для оценки геолого-технологической эффективности методов увеличения нефтеотдачи пластов (на примере потокоотклоняющих технологий (ВУГ, СПС) в нечетких условиях) с учетом экспериментальных данных изменения проницаемости и пределов прочности пород-коллекторов продуктивного пласта ЮВ₁¹ Лас-Еганского нефтяного месторождения.

3. Показано, что с учетом прогнозирования дилатансии нефтеотдача может быть увеличена на этапе выработки запасов.

4. Для многоуровневой динамической обработки исходных геолого-промысловых данных разработаны программные продукты «IntellPro» и «WellCalc».

Рекомендация диссертационной работы:

Предложенный вероятностно-статистический подход оценки объемных деформаций (прогнозирование дилатансии) будет малоэффективен, если объектом исследования будут трещиноватые коллекторы, а также пласты, сложенные слабосцементированными песчаниками, имеющих чрезвычайно высокую проницаемость.

Ключевые положения диссертационной работы опубликованы в печати:***Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ:***

1. Катанов Ю.Е. Оценка эффективности методов принятия решений в нечетких условиях / Ю.Е. Катанов // «Известия вузов. Нефть и газ». - 2011. - №5. - С. 106-111.
2. Катанов Ю.Е. Алгоритм прогнозирования фильтрационных характеристик пласта в системе неполноты информации / Ю.Е. Катанов // «Известия вузов. Нефть и газ». - 2011. - №6. - С. 66-71.
3. Катанов Ю.Е. Создание линейного симулятора для прогнозирования технологического процесса / Ю.Е. Катанов // «Известия вузов. Нефть и газ». - 2012. - №1. - С. 112-116.
4. Катанов Ю.Е. Математическая модель процесса накопления и пространственно-временной эволюции ансамбля элементарных повреждений как единого динамического процесса / Ю.Е. Катанов // Информационно-аналитический журнал «Нефть, газ и бизнес». - 2014. - С. 60-63.
5. Катанов Ю.Е. Механизмы и принципы моделирования деформационно-пространственной неустойчивости горных пород / Ю.Е. Катанов // ВНИИОЭНГ, Научно-технический журнал «Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море». - 2014. - С. 19-23.
6. Катанов Ю.Е. Принципы методологии технологических измерений в нефтедобывающих системах с признаками неопределенности, нечеткости и неоднородности / Ю.Е. Катанов // Научно-технологический журнал «Технологии нефти и газа» ISSN 1815-2600. - №2. - 2015. - С. 41-45.
7. Катанов Ю.Е. Численное моделирование изменения проницаемости и пределов устойчивости породы / Ю.Е. Катанов, А.К. Ягафаров // Научно-технологический журнал «Технологии нефти и газа» ISSN 1815-2600. - №1 (108). - 2017. - С.40-43.
8. Катанов Ю.Е. Моделирование деформационно-пространственной неустойчивости потоотклоняющих технологий в условиях стохастической неопределенности / Ю.Е. Катанов, А.К. Ягафаров // Научно-технологический журнал «Технологии нефти и газа» ISSN 1815-2600. - №2 (109). - 2017. - С.49-52.

9. Катанов Ю.Е. Оценка вероятности деформации пород-коллекторов в нечетких условиях / Ю.Е. Катанов, А.К. Ягафаров // Естественные и технические науки, Геофизика, геофизические методы поиска полезных ископаемых ISSN 1684-2626. - №4 (94). - 2016. - С. 41-49.

Статьи, опубликованные в других изданиях:

10. Катанов Ю.Е. Обоснование параметров горных пород (неоднородных сред) при моделировании / Ю.Е. Катанов, Н.В. Григорьев // Международный научно-исследовательский журнал ISSN 2303-9868, ПИ № ФС 77 - 51217. - №8 (27) 2014. - Часть 1. - С. 18-21 (участие автора 0,25 п.л.).

11. Катанов Ю.Е. Модели усталостного и лавинного разрушения горной породы / Ю.Е. Катанов, Н.В. Григорьев // Международный научно-исследовательский журнал ISSN 2303-9868, ПИ № ФС 77 - 51217. - №8 (27) 2014. - Часть 1. - С. 21-22 (участие автора 0,25 п.л.).

12. Катанов Ю.Е. Установление петрофизических связей пород-коллекторов пласта ЮВ₁ Лас-Еганского месторождения / В.Н. Гуляев, В.А. Баракин, Ю.Е. Катанов, А.К. Ягафаров // Новая наука: стратегии и векторы развития: Международное научное периодическое издание по итогам Международной научно-практической конференции (19 апреля 2016 г, г. Ижевск). - Ч.3. - Стерлитамак: АМИ. - 2016. - С.29-33 (участие автора 0,2 п.л.).

Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ:

13. Катанов Ю.Е. Программный комплекс Intellect Professional (IntellPro)/2013/Свид. о государственной регистрации программ для ЭВМ. Рег. №2013660228. Роспатент.

14. Катанов Ю.Е. Программный комплекс Wells Calculation (WellCalc)/2013/Свид. о государственной регистрации программ для ЭВМ. Рег. №2013619826. Роспатент.