

На правах рукописи

Химуля Валерий Владимирович

**РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ  
ПОРОД В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО ТРЕХОСНОГО НАГРУЖЕНИЯ**

Специальность 01.02.04

«Механика деформируемого твердого тела»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Москва — 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН).

Научный руководитель: **Карев Владимир Иосифович**  
д.т.н., зам. директора ИПМех РАН, главный научный сотрудник лаборатории геомеханики.

Официальные оппоненты: **Назарова Лариса Алексеевна**, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник лаборатории горной информатики ФГБУН «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» Сибирского отделения Российской академии наук.

**Зайцев Алексей Вячеславович**, к.ф.-м.н., доцент кафедры механики композиционных материалов и конструкций, ведущий научный сотрудник кафедры нефтегазовых технологий ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», доцент.

Ведущая организация: ФГБУН «Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского» Российской академии наук (ИДГ РАН)

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д002.240.01 при Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН по адресу: 119526, г. Москва, проспект Вернадского, д. 101, к. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПМех РАН <http://www.ipmnet.ru/diss/diss/>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д002.240.01  
кандидат физико-математических наук

Сысоева Е.Я.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Геомеханические и геофизические исследования показали, что возникающее в породах напряженное состояние оказывает большое влияние на их механические и фильтрационные свойства. Изучая механизмы деформирования породы при изменении напряженного состояния, можно узнать характер ее разрушения и эволюции механических свойств, что имеет ключевое значение для предотвращения аварийных ситуаций, надежного строительства различного рода конструкций, а также эффективной и безопасной разработки и эксплуатации скважин и горных выработок. В настоящее время проводится широкий спектр исследований деформационных, прочностных и фильтрационных характеристик горных пород в условиях трехмерного напряженного состояния. Все они основаны преимущественно на экспериментальном изучении, так как эти свойства определены самой природой и не могут быть получены расчетным путем. Для горных пород характерны существенные различия свойств, даже если они залегают в непосредственной близости друг от друга. Сегодня большая часть лабораторных исследований проводится по традиционной условно трехосной схеме с использованием установок кармановского типа (Nasseri M.H.V. et al, 2018; Yang S. et al., 2020; Хашпер А.Л. и др., 2019). Образцы для испытаний имеют цилиндрическую форму, нагрузка прикладывается по оси образца и по его боковой поверхности, что не позволяет в полной мере воспроизводить истинно трехмерные напряженные состояния, которые могут возникать в массиве горных пород в реальных геотехнических условиях. Для моделирования таких напряженно-деформированных состояний конструируются установки истинно трехосного нагружения (УИТН), которые способны независимо и одновременно изменять напряжения или деформации по каждой из трех осей. УИТН используются для изучения деформационных, прочностных, фильтрационных и реологических свойств горных пород в условиях неравнокомпонентного трехосного сжатия, служат незаменимым инструментом для определения параметров математических моделей, создаваемых для расчетов процессов деформирования и разрушения геоматериалов с учетом анизотропии их свойств (Takahashi M. et al., 2018; Rasouli V. et al., 2020; Shi L. et al., 2017, Feng X.-T. et al., 2018).

Существенный вклад в описание движения флюидов в геоматериалах, а также изучение трещинообразования своими пионерскими работами внесли М. Маскет, Г. И. Баренблатт, В.М. Ентов, В. М. Рыжик, Р.Л. Салганик и др. Знание механических и фильтрационных характеристик продуктивного пласта необходимо для создания геомеханической модели месторождения, на основе которой создается проект его разработки, а также для создания способов повышения продуктивности скважин, нефтеотдачи пластов и обеспечения устойчивости стволов скважин. Построение теоретических и математических моделей должно опираться на экспериментальные данные, полученные в условиях, отвечающих реальным трехмерным полям напряжений, возникающим в окрестности скважин при проведении тех или иных технологических операций.

Большинство горных пород-коллекторов подвержены значительной ползучести, т.е. деформированию во времени при неизменной нагрузке. Учет явления ползучести горных пород при создании моделей и изучении деформационных свойств имеет большое значение при прогнозировании долговременной прочности скважин, особенно в случае необсаженного ствола. Если горная порода в окрестности скважины способна деформироваться при постоянном давлении на стенке скважины с течением времени, то возникает опасность потери устойчивости стенок скважин в процессе бурения и эксплуатации, смятия обсадных колонн, прихватов бурового инструмента и др. Помимо влияния на устойчивость стволов скважин, явление ползучести может приводить к изменению проницаемости пород-коллекторов в окрестности скважин, что также необходимо учитывать при выборе режимов их эксплуатации и способов интенсификации притока. При этом влияние данного процесса на проницаемость остается малоизученным вопросом, для изучения которого требуется большее число опытных данных в условиях, приближенных к реальным.

Теория ползучести горных пород в настоящее время разработана недостаточно. Это связано с тем, что подавляющее большинство моделей ползучести создавалось для металлов, и их поведение не всегда соответствует поведению геоматериалов. Для создания математических моделей ползучести горных пород должен быть накоплен большой объем экспериментальных данных для различных типов пород. Один из путей решения данной проблемы - моделирование на установках истинно трехосного нагружения процесса ползучести горных пород в условиях реальных напряженных состояний, возникающих в окрестности скважин при их бурении и эксплуатации.

В работе проведено физическое моделирование процессов деформирования, разрушения и фильтрации; исследуются фильтрационные и реологические свойства пород продуктивных пластов морских месторождений Киринского газоконденсатного, Приразломного нефтяного и низкопроницаемых пород Уренгойского газоконденсатного месторождения (УГКМ) на уникальной научной установке ИПМех РАН Испытательной системе трехосного независимого нагружения (ИСТНН). Изучение и физическое моделирование процессов в продуктивных пластах этих месторождений имеет особую значимость в связи со сложностью и трудоемкостью их разработки.

Описанные в диссертации исследования являются продолжением работ, проводимых в лаборатории геомеханики ИПМех РАН, инициированных академиком С.А. Христиановичем.

**Целями** настоящей работы являются:

- Экспериментальное исследование деформационных, реологических и фильтрационных свойств горных пород, слагающих продуктивные пласты нефтяных и газовых месторождений, в том числе с трудноизвлекаемыми запасами, в условиях реальных напряжений, возникающих в окрестности как вертикальных, так и горизонтальных скважин.
- Изучение характера изменения проницаемости и процессов ползучести горных пород под действием неравномерного напряженно-деформированного состояния пласта, влияния деформаций ползучести на проницаемость пород. Поиск закономерностей

стей в характере изменения фильтрационных свойств пород при изменении неравнокомпонентного напряженного состояния, систематизация полученных экспериментальных данных.

- Определение физических параметров воздействия на пласт, приводящих к улучшению фильтрационных свойств пород и недопущению разрушения стволов скважин.

Для достижения целей работы ставились следующие **задачи**:

1. Аналитический обзор современных методов исследования свойств горных пород, анализ преимуществ и недостатков существующих подходов и оборудования. Проведение анализа распределения напряжений в окрестности скважин для разных начальных условий в пласте, а также различных конструкций забоя скважины.

2. Разработка программ нагружения, воспроизводящих реальные напряженные состояния в окрестности скважин исследуемых месторождений.

3. Проведение физического моделирования процессов деформирования и фильтрации при изменении неравнокомпонентного напряженного состояния в окрестности скважины в ходе проведения технологических операций; регистрация процессов ползучести исследуемых пород.

4. Определение зависимости фильтрационных свойств исследуемых пород от вида и уровня напряженно-деформированного состояния с последующим анализом эволюции проницаемости во времени.

5. Статистический анализ связи процессов фильтрации и ползучести; определение тесноты установленной связи данных процессов для пород исследуемых месторождений.

6. Систематизация полученных результатов в рамках классификации горных пород по реакции фильтрационных свойств на изменение напряженного состояния; создание феноменологической модели изменения проницаемости исследованных пород.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанная методика физического моделирования реальных напряженно-деформированных состояний, возникающих в продуктивных пластах нефтегазовых месторождений с целью изучения закономерностей влияния процессов деформирования, в том числе ползучести, на фильтрационные свойства пород.

2. Экспериментально установленные закономерности деформирования и изменения фильтрационных свойств горных пород различных литотипов во времени при моделировании процессов, происходящих в окрестности вертикальных и горизонтальных скважин для различных пластовых и эксплуатационных условий: равномерного и неравномерного исходных распределений напряжений в пласте, а также двух потенциальных конструкций забоя скважины.

3. Проведенный статистический анализ влияния процесса ползучести на проницаемость исследуемых горных пород: вычисленная посредством корреляционного анализа теснота установленной связи фильтрационных и реологических свойств на разных этапах деформирования. Показано, что ползучесть может различным образом влиять на проницаемость пород в зависимости от характера происходящих при этом

процессов: заплывание фильтрационных каналов, дилатансия, образование микро- и макротрещин. Изучен характер изменения проницаемости при протекании данных процессов.

4. Разработанная феноменологическая модель эволюции проницаемости исследованных терригенных пород ачимовских отложений в процессе их деформирования при изменении напряжений, соответствующих условиям в окрестности скважины при понижении давления на забое.

5. На основе проведенных экспериментальных исследований реологических и фильтрационных свойств горных пород-коллекторов исследуемых месторождений углеводородов и их взаимосвязи сделаны выводы о способах недопущения негативных процессов в пластах и намечены пути повышения продуктивности скважин.

**Обоснованность и достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются использованием в ходе исследований фундаментальных законов механики сплошных сред; корректностью постановки задач; применением в экспериментах методического подхода, проверенного многолетней практикой; использованием испытательного и измерительного оборудования с высокими метрологическими характеристиками; строгой математической обработкой результатов экспериментальных исследований с применением хорошо апробированных методов.

**Методы исследований** включают: анализ научной литературы и накопленного опыта исследований по теме работы, применения классических моделей для соответствующих геомеханических расчетов; экспериментальные исследования на образцах пород-коллекторов с использованием различных методов и режимов их нагружения на установке истинно трехосного нагружения и последующий теоретический анализ результатов, включающий их статистическую обработку.

**Научная новизна** исследований заключается: в разработке методики проведения прямого физического моделирования механических и фильтрационных процессов в окрестности скважины для условий исследуемых месторождений на установке истинно трехосного нагружения; в проведении лабораторного моделирования и определении реологических и фильтрационных характеристик пород-коллекторов месторождений; в установлении зависимости от времени деформаций исследуемых пород в условиях сложного трехосного нагружения и характера изменения проницаемости в процессе ползучести; в определении влияния ползучести на фильтрационные характеристики, оценке тесноты установленной связи с помощью методов корреляционного анализа; систематизации накопленных результатов изучения эволюции проницаемости в условиях сложного трехосного нагружения; создании феноменологической модели изменения фильтрационных свойств пород исследуемых месторождений при проведении технологических операций на скважине, в получении критериев улучшения фильтрационных характеристик пород.

**Практическая значимость** и реализация результатов. Результаты испытаний позволили сделать выводы об оптимальных для данных месторождений режимах эксплуатации скважин с целью поддержания устойчивости стенок скважин и недопущения негативных процессов в пласте. На основе проведенных исследований по разра-

ботанной методике определены условия, которые необходимо создать в породах исследуемых месторождений, в том числе с трудноизвлекаемыми запасами, чтобы значительно повысить их проницаемость и, тем самым, продуктивность скважин. Сделана предварительная оценка величин депрессий, необходимых для поддержания устойчивости стенок скважин либо для реализации явления увеличения проницаемости пород в призабойной зоне скважин для различных геометрий забоя. Полученные результаты и практические рекомендации представлены компании-разработчику месторождений: ПАО «Газпром».

**Апробация работы.** Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Biot-Bažant Conference 2021 on Engineering Mechanics and Physics of Porous Materials (Illinois, USA); XVI-XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources» (Санкт-Петербург, 2020, 2021); XV Всероссийской школе-конференции «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск, 2021); XXIV, XXV, XXVII и XXVIII Международных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов" (Москва, 2017-2018, 2020-2021); III, IV и VI Международных научных школах молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» (Москва, 2017-2018, 2020); 3-й и 4-й Всероссийской конференции молодых учёных-механиков YSM (Сочи, 2020-2021).

**Работы отмечены наградами:**

1. Диплом 1-й степени в конкурсе научных работ, выполненных аспирантами. Награждающая организация: НИИ механики МГУ имени М.В.Ломоносова, Национальный комитет по теоретической и прикладной механике (2021 г.)

2. The Best Presenter Award for the winners of XVI International Forum-Contest of Students and Young Researchers "Topical Issues of Rational Use of Natural Resources", breakout session on "Oil & Gas Field Development"; awarded by Saint-Petersburg Mining University, International Competence Centre for Mining-Engineering Education under the auspices of UNESCO.

3. Премия корпорации "Шеврон Нефтегаз Инк" аспирантам и студентам МГУ, чья научная деятельность связана с нефтяной отраслью, включая экологию нефти и газа (2018 г.).

4. Премия за лучший доклад в подсекции «Геофизика» (II место) на Международном молодежном научном форуме МГУ «Ломоносов-2018».

5. Премия в конкурсе лучших научных работ среди молодых ученых и студентов ИПМех РАН за 2018 год.

6. Премия в конкурсе лучших научных работ среди молодых ученых и студентов ИПМех РАН за 2017 год.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, среди которых 7 статей в журналах из списка ВАК, в том числе индексируемых в Web of Science и Scopus.

**Личный вклад автора.** Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены лично соискателем. Им выполнены обзор и анализ литературы [1, 6], проведены подготовка к испытаниям и предварительные исследования образцов [2, 5]; осуществлен анализ напряженного состояния в окрестности скважин для разных начальных пластовых условий и геометрий забоя скважин; разработаны программы нагружения образцов; проведены эксперименты на установке ИСТНН, осуществлены анализ и систематизация результатов [2-3, 5-7]. В числе основных исполнителей в составе лаборатории геомеханики ИПМех РАН автор принимал участие в постановке задач исследования, планировании и реализации экспериментов, обсуждении и обработке полученных результатов. Подготовка публикаций по теме диссертации проведена совместно с соавторами. Апробация работы на конференциях, съездах и форумах осуществлена лично автором.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы. Общий объём работы составляет 133 страницы, включая 39 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 99 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность рассматриваемых в работе проблем, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, излагается научная новизна и практическая ценность полученных результатов, кратко изложена структура диссертации.

**В первой главе** проведен анализ современного состояния экспериментальных исследований процессов деформирования, разрушения и фильтрации в горных породах. Описана история развития методологии и подходов, получивших наиболее широкое распространение. Экспериментальными и теоретическими исследованиями механических и фильтрационных процессов в горных породах занимались С.А. Христианович, Е.И. Шемякин, А.Х. Мирзаджанзаде, М.А. Садовский, В.Н. Щелкачев, Ю.П. Желтов, А.Н. Гузь, В.Н. Николаевский, А.Г. Протосеня, Р.М. Тер-Саркисов, К.С. Басниев, Г.П. Черепанов, В.Г. Быков, С.М. Капустянский, А.Н. Ставрогин, В.М. Добрынин, Ч. Джегер, Д. Друккер, В. Прагер, К.Терцаги, М. Зобак, М. Маскет, Г. И. Баренблатт, В.М. Ентов, В. М. Рыжик, Р.Л. Салганик и др. Основным способом изучения свойств горных пород был и остается экспериментальный подход. Для горных пород характерны большие разбросы механических и фильтрационных характеристик даже для слоев, залегающих в непосредственной близости друг от друга.

Описаны гостированные методы изучения механических свойств геоматериалов. Представлен обзор исследований механических и фильтрационных свойств горных пород с использованием установок условно трехосного нагружения (УУТН), построенных по схеме Кармана. Такие установки производятся серийно и используются в большинстве лабораторий по исследованию механических свойств горных пород. Схема нагружения предполагает приложение нагрузки по всей поверхности цилиндрического образца, но независимо изменять ее можно по оси и по боковой поверхности образца. Главным недостатком установок является то, что они не позволяют мо-

делировать реальные геомеханические условия в горном массиве, которые могут быть существенно трехмерными.

Приведен аналитический обзор, описание и классификация установок истинно трехосного нагружения (УИТН), перечислены ключевые исследования, реализуемые с их помощью. Исследования с применением УИТН дают наиболее полную информацию о свойствах горной породы. В отличие от УУТН образец для испытаний на УИТН имеет форму параллелепипеда, а нагрузка прикладывается одновременно и независимо по каждому из трех взаимно ортогональных направлений. Универсального конструктивного решения для таких установок в настоящий момент нет, поэтому в мире нет двух одинаковых УИТН.

Описаны основные современные направления исследований в области геомеханики с использованием УИТН. На УИТН (как и на УУТН) таковыми являются: изучение закономерностей механического поведения горных пород различных литотипов в зависимости от уровня и характера нагружения, оценка влияния естественной структуры пород, различного рода дефектов на деформационные и прочностные свойства, порового давления на протекающие механические процессы, типа напряженного состояния на фильтрационные свойства. Наибольшее внимание на протяжении всей истории проведения испытаний на УИТН уделяется изучению влияния средней компоненты главных напряжений на процессы деформирования, разрушения и фильтрации, а также физическому моделированию реальных процессов, происходящих на горных выработках и пластах месторождений.

Представлено описание классификации горных пород по реакции фильтрационных свойств на изменение напряженного состояния, предложенной ранее в ИПМех РАН [6]. В лаборатории геомеханики ИПМех РАН были испытаны образцы пород из многих регионов РФ, с разным литологическим составом и глубиной залегания. Данные эксперименты позволили установить, что изменение проницаемости горных пород при неравнокомпонентном нагружении определяется прежде всего уровнем возникающих в породе касательных напряжений. По характеру реакции горных пород на возникающие касательные напряжения оказывается возможным разделить их на три категории. Приводятся результаты, полученные представителями различных отечественных и зарубежных научных школ, подтверждающие правомерность данной классификации. Систематизация результатов, полученных в рамках работы, выполнена с использованием классификации.

**Во второй главе** проведен теоретический анализ распределения напряжений в окрестности скважин различных конструкций забоя скважины и для разных начальных условий в пласте.

В первом разделе рассматриваются напряжения на стенках скважины при равномерном исходном начальном сжатии пород в пласте. Для описания данного случая используется решение задачи Ламе, записываемое в терминах эффективных напряжений, действующих на грунтовый скелет породы в окрестности скважины:

$$S_r = -(q + p_c) \left( \frac{r_c^2}{r^2} \right) + q + p_c; \quad S_\theta = (q + p_c) \left( \frac{r_c^2}{r^2} \right) + q + p_c; \quad S_z = q + p_c \quad (1)$$

где  $S_z$ ,  $S_\theta$ ,  $S_R$  – осевая, кольцевая и радиальная компоненты эффективных напряжений,  $p_c$  – давление в скважине,  $q$  – горное давление,  $r_c$  – радиус скважины,  $r$  – расстояние до рассматриваемой точки от центра скважины.

Описано распределение напряжений на стенках необсаженной горизонтальной скважины для условий, когда боковое горное давление не равно вертикальному. Рассматриваемый случай можно представить, как суперпозицию двух задач: всестороннего равномерного сжатия боковым горным давлением при наличии давления внутри скважины (первая задача) и одноосного сжатия скважины в вертикальном направлении разностью вертикального и бокового горных давлений (вторая задача). Суперпозиция полей напряжений, получаемых на основе решений двух задач:

$$\begin{aligned} S_\theta &= \frac{(q + p_c)}{2} (\alpha + 1) \left(1 + \frac{r_c^2}{r^2}\right) - \frac{(q + p_c)}{2} (\alpha - 1) \left(1 + \frac{3r_c^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \\ S_r &= \frac{(q + p_c)}{2} (\alpha + 1) \left(1 - \frac{r_c^2}{r^2}\right) - \frac{(q + p_c)}{2} (\alpha - 1) \left(1 + \frac{3r_c^4}{r^4} - \frac{4r_c^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \\ S_z &= \alpha(q + p_c) \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $\theta$  – угол от горизонтали до рассматриваемой точки,  $\alpha$  – отношение горизонтального горного давления к вертикальному (боковой распор).

Описано распределение напряжений в окрестности конца перфорационного отверстия в обсаженной скважине. На основе задачи о напряженном состоянии в окрестности сферической полости, нагруженной внутренним давлением и внешней всесторонней сжимающей нагрузкой, представлено решение в терминах эффективных напряжений в окрестности конца отверстия:

$$S_r = -(q + p_c) \left(\frac{r_c^3}{r^3}\right) + q + p_c; \quad S_\varphi = S_\theta = \frac{1}{2} (q + p_c) \left(\frac{r_c^3}{r^3}\right) + q + p_c \quad (3)$$

**В третьей главе** представлены объекты исследования, экспериментальное оборудование, применяемое в рамках работы, а также детально изложена методика проведенного физического моделирования.

Объектами исследования являются породы продуктивных пластов Киринского и Приразломного месторождений, а также ачимовских отложений Уренгойского газоконденсатного месторождения. Дано краткое описание месторождений и план испытаний для каждого объекта.

Для пород Приразломного и Киринского месторождений проводилось моделирование процессов деформирования и фильтрации в условиях, реально возникающих на стенках необсаженной скважины, причем для Приразломного было рассмотрено два потенциальных исходных состояния пласта: 1) равномерное всестороннее сжатие горным давлением; 2) величина бокового горного давления составляет 40% от величины вертикального горного давления.

На породах ачимовских отложений Уренгойского ГКМ проведено физическое моделирование реальных напряженных состояний, возникающих в окрестности необсаженной скважины и кончика перфорационного отверстия в обсаженной скважине.

Испытания проводились на истинно трехосной установке ИСТНН (рис. 1). Она позволяет нагружать образцы породы, представляющие собой кубы с гранью 40 или 50 мм, независимо по трем осям и непрерывно измерять их проницаемость в ходе

нагружения. Это дает возможность воссоздавать в ходе опытов любые напряженные состояния, возникающие в призабойной зоне пласта при бурении скважины, ее освоении и эксплуатации, и изучать их влияние на фильтрационные свойства породы. Наибольшее усилие сжатия по каждой из осей нагружения – 500 кН. Система оборудована двумя газовыми расходомерами, позволяющими производить измерения в широком диапазоне величин: от 0,5 мл/мин до 5 л/мин. Дано описание основных компонентов ИСТНН, методики измерения проницаемости.

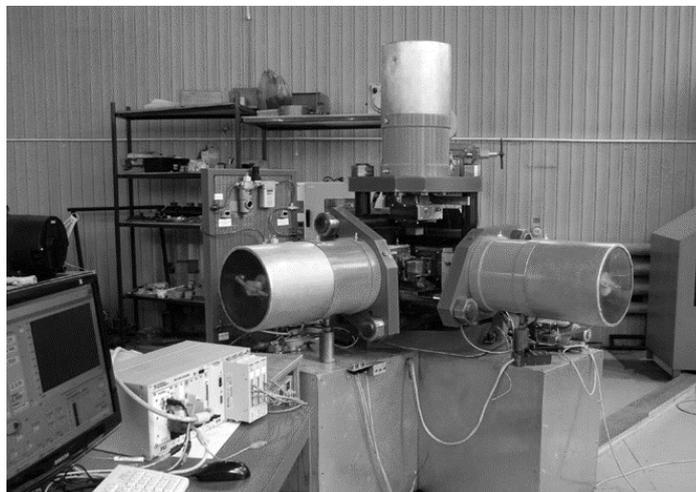


Рис. 1. Установка ИСТНН

Были разработаны программы нагружения для изучения механических и фильтрационных свойств пород на установке ИСТНН для каждого рассматриваемого случая. Они были составлены на основе анализа напряжений в окрестности скважины для условий и геометрий забоя, описанных во второй главе. Согласно разработанным программам, напряжения  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ , прикладываемые к граням образца в нагружающем узле установки ИСТНН, соответствуют напряжениям  $S_z$ ,  $S_\theta$ ,  $S_R$ , действующим на грунтовый скелет в окрестности скважины, или напряжениям  $S_\theta$ ,  $S_\phi$ ,  $S_R$  в окрестности конца перфорационного отверстия.

На рис. 2. представлены схемы программ для каждого моделируемого случая. Все программы состоят из трех этапов: 1) точка А соответствует напряжениям, действующим на грунтовый скелет до начала бурения скважины; 2) точка В соответствует состоянию, когда скважина пробурена и давление на ее забое равно пластовому; 3) участок ВС соответствует понижению давления на забое скважины. Третий этап длится до тех пор, пока образец не будет разрушен, или напряжения не достигнут значений, соответствующих максимально возможной депрессии.

**Четвертая глава** посвящена описанию результатов проведенных экспериментальных исследований 18 образцов пород Приразломного, 9 образцов пород Киринского месторождения, 21 образец ачимовских отложений Уренгойского ГКМ.

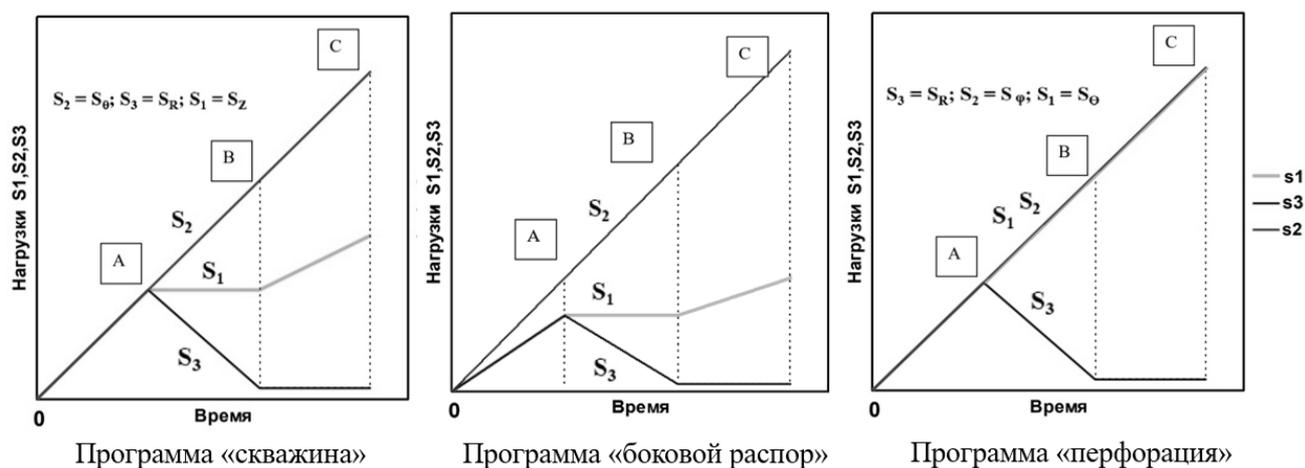


Рис. 2. Типы программ нагружения образцов

Таблица 1. Результаты физического моделирования на образцах Приразломного месторождения

№ образца	Программа нагружения	Глубина, м	$K_0$ , мД	$K/K_0$	Напряжение разрушения $S_3^*$ , МПа
ПЗ-4	«Скважина»	2453,6	572	0,15	2,1
П5-4	«Скважина»	2514,75	5,7	0,2	6,6
П7-4	«Скважина»	2517	6,7	0,32	5,4
П6-4	«Скважина»	2521	20,1	0,51	2,0
П11-4	«Скважина»	2528,75	3,6	0,43	3,6
П11-5	«Скважина»	2528,75	15	0,42	3,5
П-11	«Скважина»	2530	12,1	0,03	Разруш. при депрессии
П10-4	«Скважина»	2537,5	2,6	0,1	2,0
П1-4	«Скважина»	2542,75	68	0,15	3,4
П2-4	«Скважина»	2548,5	8,5	0,15	6,25
П8-4	«Скважина»	2558	10,5	0,1	4,9
П4-4	«Скважина»	2566,75	5,6	0,35	5,5
П1-6 р	«Боковой распор»	2542,75	0,75	0	5,4
П2-9 р	«Боковой распор»	2548,5	8,2	0,12	6,5
П5 р	«Боковой распор»	2514,75	1,2	0	7,5
П7 р	«Боковой распор»	2517	16,9	0,2	6,9
П8-6 р	«Боковой распор»	2558	0,23	0	4,2
П10-6 р	«Боковой распор»	2537,5	2,6	0,1	2,2
П-16 р	«Боковой распор»	2530	20,3	8,0	4,4

По результатам испытаний для каждого образца были построены экспериментальные кривые деформирования, временные зависимости изменения проницаемости, совмещенные с реальными программами нагружения, и зависимости деформаций (ползучести).

Для пород Приразломного и Киринского месторождений проведено физическое моделирование процессов деформирования и фильтрации в окрестности необсаженных горизонтальных и вертикальных скважин при наличии или отсутствии в пласте бокового распора, а также получено изменение проницаемости в ходе деформаций ползучести.

В табл. 1 представлены результаты испытаний пород Приразломного месторождения ( $K_0$  – начальная проницаемость образца,  $K/K_0$  – отношение конечной проницаемости к начальной). Как видим, для одинаковых глубин залегания при наличии бокового распора разрушение образцов происходило в основном при более высоких значениях напряжения  $S_3^*$ .

На рис. 3, в качестве примера, представлены результаты испытаний образца № К-4/7 Киринского месторождения. На кривых деформирования по оси ординат отложен параметр нагружения – монотонно возрастающее кольцевое напряжение  $S_2$ . На начальном этапе нагружения порода деформировалась упруго, проницаемость при этом упала на 20%. При дальнейшем росте касательных напряжений произошел переход к неупругому деформированию, падение проницаемости продолжалось практически монотонно. При переходе к абсолютно неупругому деформированию скорость изменения проницаемости возросла, конечная зарегистрированная проницаемость составила лишь 60% от начальной.

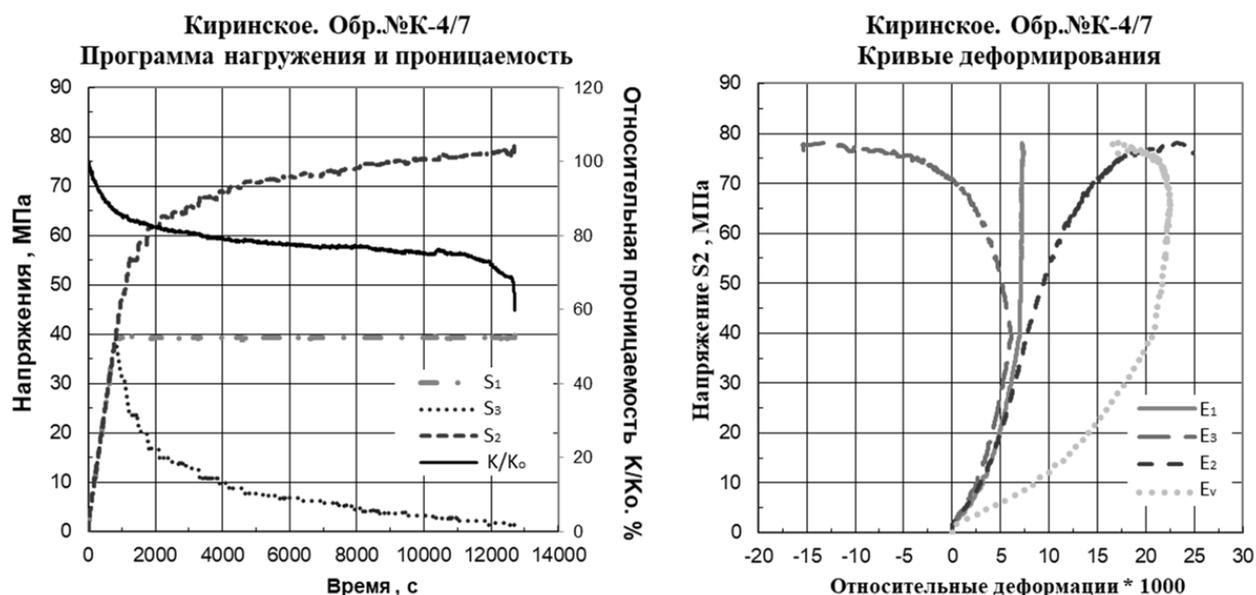


Рис. 3. Программа нагружения, изменение проницаемости и кривые деформирования образца ( $\epsilon_v$  — объемная деформация) К-4/7 Киринского месторождения

На рис. 4 представлены кривые ползучести и соответствующие кривые изменения проницаемости во времени при пяти величинах напряжений. По оси ординат отложены изменения деформации (радиальной компоненты) и проницаемости по сравнению с их величинами при остановке нагружения.

При первых четырех остановках нагружения образец демонстрировал затухающую ползучесть. Проницаемость при этом уменьшалась, но незначительно. По мере роста касательных напряжений, изменение фильтрационных свойств в процессе ползучести становилось более заметным, и наиболее сильно уменьшение проницаемости проявилось при  $S_2 = 76.9$  МПа. Во время последней остановки нагружения образец перешел к ускоряющейся ползучести, что привело к разрушению.

Как видно из графиков, имеет место корреляция между процессами ползучести и изменением проницаемости. Для определения характера и тесноты связи данных процессов были применены базовые методы статистического анализа, в частности, корреляционный анализ.

Для каждой пары кривых ползучесть-проницаемость вычислялся линейный коэффициент корреляции: отношение коэффициента ковариации к произведению средних квадратических отклонений:

$$r_{XY} = \frac{\text{cov}_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X - \bar{X})^2 \sum(Y - \bar{Y})^2}}$$

В табл. 2 представлены сводные результаты корреляционного анализа образца Киринского месторождения. Коэффициенты корреляции рассчитывались между деформациями в радиальном направлении (ось разгрузки) и изменением проницаемости.

Как видим, абсолютные значения коэффициента корреляции близки к единице, что свидетельствует о сильной положительной связи между величинами. При 12.8 и 10.8 МПа имеет место менее тесная связь (однако, так же высокая), чем при большем уровне напряжений. Это может быть связано с различными этапами деформирования образца и текущим соотношением упругих и неупругих деформаций в образце. В целом, на разных этапах нагружения в испытанных образцах наблюдались высокие корреляции как при падении проницаемости с ростом деформаций, так и ее увеличении (причем как постепенном, так и скачкообразном). В среднем наибольшая корреляция в каждом опыте наблюдалась во время этапов интенсивного деформирования ползу-

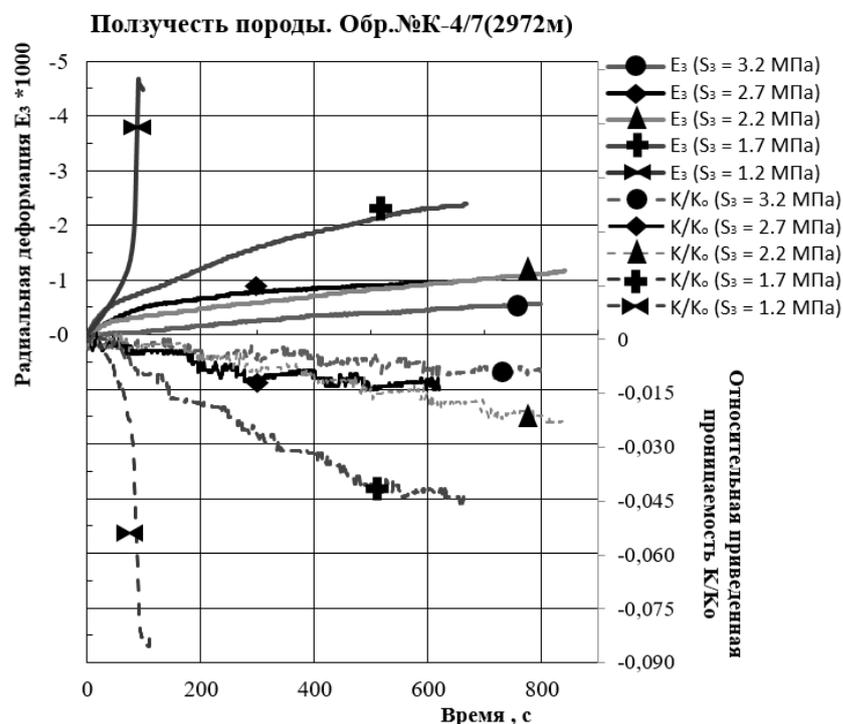


Рис. 4. Ползучесть и проницаемость образца К-4/7

чести, а также во время развития деформаций, приводящих к разрушению. Для изучения точной причинно-следственной связи необходимо проведение исследований, включающих томографию горных пород, регистрацию акустической эмиссии. Эти методы планируется использовать в дальнейших исследованиях.

В таблице 3 приведены результаты экспериментальных исследований для пород Киринского месторождения. Обозначения в таблице аналогичны предыдущим.

Таблица 3. Результаты физического моделирования механических и фильтрационных процессов на образцах Киринского месторождения

№ образца	Интервал по керну, м	Начальная проницаемость $K_0$ , мД	$K/K_0$	Напряжение $S_3^*$ , МПа
К-10	2776	7493	0,11	2,9
К-4/2-1	2972	363	0,53	5,45
К-3/4	2872	59	1,4	7,3
К-2/2	2862	0	0	8,6
К-2/2-1	2862	20	0,36	5,1
К-1	2776	5566	0,1	4,5
К4-7	2972	1912	0,6	0,9
К-1/2	2776	4827	0,62	4,7
К-3/7	2872	74,9	1,3	Разруш. при депрессии

Измерение проницаемости исследуемых пород Приразломного и Киринского месторождений при трехосном неравнокомпонентном сжатии показало существенную зависимость фильтрационных характеристик от напряженно-деформированного состояния.

Проведенные исследования подтверждают тот факт, что напряжения в призабойной зоне пласта могут вызывать как уменьшение, так и увеличение фильтрационных характеристик пласта и продуктивности скважин.

В работе также была проведена серия экспериментов по физическому моделированию механических и фильтрационных процессов в продуктивных пластах ачимовских отложений УГКМ при понижении давления в скважине. Рассмотрены две возможных геометрий забоя: необсаженная скважина, перфорационное отверстие в обсаженной скважине. Исследовались породы из разных интервалов залегания, взятые из трех скважин. Для некоторых образцов также исследовалась взаимосвязь процессов ползучести и проницаемости с применением аналогичных методов корреляционного анализа. Проведенные испытания позволили сделать ряд практических выводов относительно применимости методов увеличения нефтеотдачи, основанных на использовании упругой энергии пласта, и параметров их реализации.

Таблица 2. Коэффициент корреляции между изменением проницаемости и ростом радиальных деформаций ползучести

К-4/7	
Величина радиального напряжения, МПа	Коэф. корреляции $r$
12,8	0.715
10,8	0.724
3,2	0.859
2,7	0.916
2,2	0.960
1,7	0.992
1,2	0.995

Были выявлены закономерности в изменении фильтрационных свойств изучаемых терригенных пород ачимовских отложений в ходе моделирования. По результатам испытаний предложена феноменологическая модель эволюции проницаемости исследованных терригенных пород ачимовских отложений в процессе вязкоупруго-пластического деформирования при моделировании понижения давления в скважине:

1) Первый этап характеризуется снижением проницаемости в результате компакции при всестороннем равномерном сжатии. При переходе к напряженному состоянию в окрестности скважины при нулевой депрессии скорость падения проницаемости уменьшается. Для некоторых пород, в частности алевролитов, снижение фильтрационных свойств на данном этапе было незначительно в силу изначально малой проницаемости и меньшей интенсивности деформирования.

2) На втором этапе проницаемость пород не изменялась либо ее изменение было незначительно по сравнению с другими этапами. Данный этап связан с началом процесса понижения давления в скважине, сопровождающимся дальнейшим ростом касательных напряжений в образце. Во время данного этапа породы деформировались либо упруго, либо происходил переход к неупругому деформированию.

3) На третьем этапе инициируется постепенный рост проницаемости. Начало этапа связано с ростом в породах касательных напряжений, приводящих к заметным деформациям ползучести и росту объемной деформации.

4) На четвертом этапе наблюдается скачкообразный рост проницаемости, связанный с появлением и развитием макротрещин в образцах, что может происходить либо в результате достижения критических значений либо касательными напряжениями, либо деформациями в результате ускоряющейся ползучести.

На рис. 5 и 6 представлены программы нагружения, кривые изменения проницаемостей и кривые деформирования образцов Ач-10 и А-5 ачимовских отложений. Образец Ач-10 был испытан по программе перфорационного отверстия, образец А-5 – по программе необсаженной скважины. Образец Ач-10 взят с глубины 3629.8 м и обладал начальной проницаемостью 22.5 мД. Образец А-5 изготовлен из керна другой скважины с глубины 3825 м и обладал начальной проницаемостью 0.13 мД.

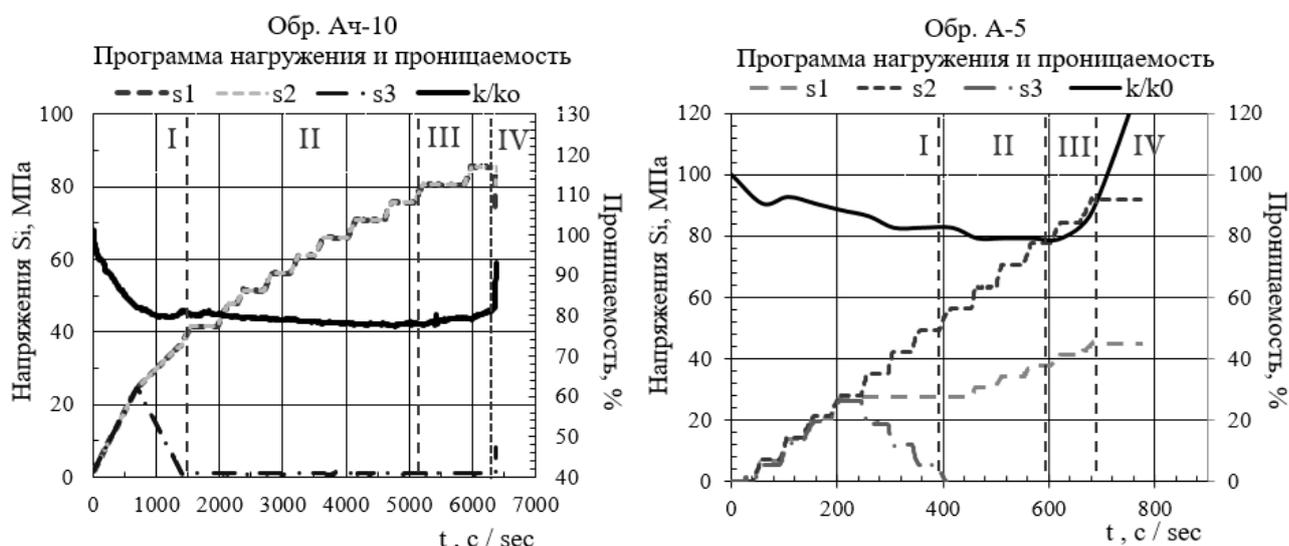


Рис. 5. Изменение приложенных напряжений и проницаемостей образцов Ач-10 и А-5 ачимовских отложений

На первых двух этапах деформации были преимущественно упругими. При переходе к третьему этапу по мере увеличения касательных напряжений инициируется рост проницаемости, протекающий с увеличением объемной деформации и соответствующий некоторой величине депрессии. При переходе к четвертому этапу наблюдается скачкообразное увеличение деформаций, связанное с растрескиванием породы, и резкое увеличение проницаемости.

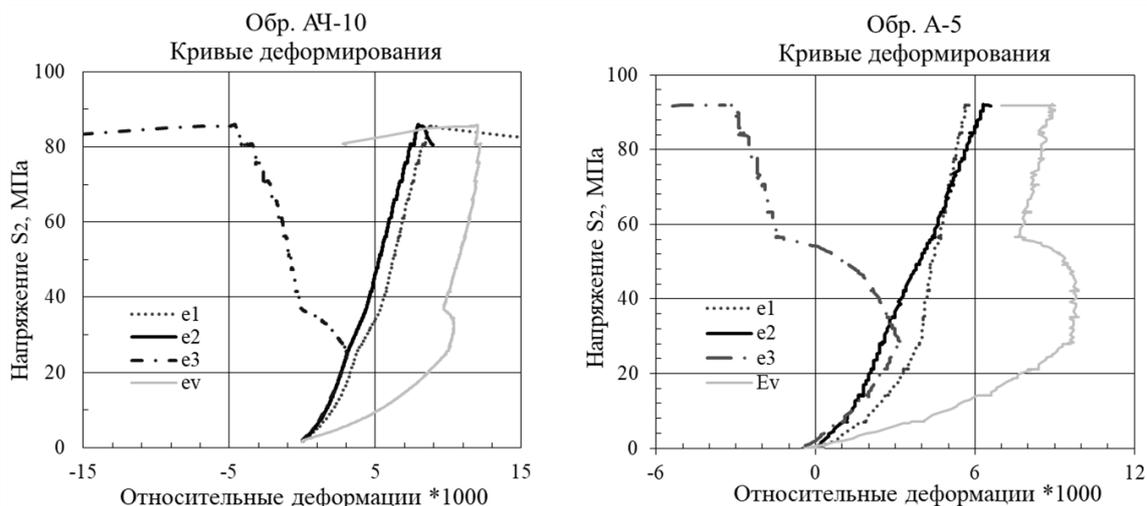


Рис. 6. Кривые деформирования и объемной деформации образцов Ач-10 и А-5

Сводные результаты испытаний пород ачимовских отложений Уренгойского ГКМ представлены в таблице 4. Для каждого образца показаны критические значения кольцевой компоненты напряжений. На основе экспериментальных данных были рассчитаны значения депрессий  $\Delta p$  на забое скважины, приводящих к растрескиванию пород.

Таблица 4. Результаты физического моделирования на образцах Уренгойского месторождения

№ образца	№ Скважины	Программа нагружения	Глубина отбора, м	$k_0$ , мД	$S_0$ , МПа	$\Delta p$ , МПа
А-6	1	Открытый ствол	3836	3.7	115	24
А-11	1	Перфорация	3836	0.2	85	21.6
А-4	1	Перфорация	3825	0.18	90	30
А-5	1	Открытый ствол	3825	0.13	92	16
А-8	1	Открытый ствол	3825	0.14	не разруш	
А-10	1	Перфорация	3794	2.41	82	25.4
А-3	1	Открытый ствол	3794	2.41	63	22
А-2	1	Открытый ствол	3793	1.61	68	4.8
А-7	1	Открытый ствол	3793	1.61	81	11.3
А-1	1	Открытый ствол	3766	2.02	110	26.4
А-9	1	Перфорация	3766	2.04	105	38.8
А-17	2	Перфорация	3727	0.027	98.5	40.1

А-22	2	Перфорация	3730	0.1	98.5	40.1
А-32	2	Перфорация	3740	0.001	не разруш	
А-42	2	Открытый ствол	3730	0.1	88.3	33.3
А-52	2	Перфорация	3749	0.013	не разруш	
А-61	2	Открытый ствол	3730	0.5	98.5	18.6
Ач-6	3	Открытый ствол	3625	34.8	61.6	5.5
Ач-7.3	3	Открытый ствол	3628	18.9	74.6	12.4
Ач-7.4	3	Перфорация	3628	24.1	71	22.4
Ач-10	3	Перфорация	3630	22.5	85.5	31.7

Характер разрушения пород ачимовских отложений был преимущественно хрупким, вследствие чего наблюдался скачкообразный рост проницаемости, вызванный появлением макротрещин. Конечную проницаемость не всегда удается точно зарегистрировать в силу нарушения герметичности оболочки образца.

Разрушение пород при моделировании открытого ствола скважины в среднем происходило при меньших депрессиях, однако для однозначного вывода об оптимальной конструкции забоя для данных условий требуется большее количество испытаний. Таким образом, одним из факторов при реализации способности пород увеличивать проницаемость является правильный выбор геометрии забоя скважины.

Ползучесть исследованных пород трех месторождений при докритических значениях максимального главного напряжения и соответствующих величинах максимального касательного напряжения была затухающей, что характерно для начальных этапов развития ползучести, а ее влияние на фильтрационные свойства незначительно: проницаемость при этом либо уменьшалась (это может быть связано со сдвигом, разворотом и перекомпоновкой зерен матрицы, проявлением пластических свойств цемента), либо оставалась на одном уровне. Установившийся режим ползучести отсутствовал или был непродолжительным, быстро приводя к появлению третьей стадии ползучести.

Как показали испытания, по мере роста деформаций проницаемость может существенно и необратимо уменьшаться, особенно при наличии в составе глинистых примесей. В ходе деформирования может происходить увеличение проницаемости, как постепенное, так и скачкообразное. Первое может быть вызвано увеличением порового пространства при дилатансии породы, либо появлением и развитием микротрещин в ходе деформирования. Второе — связано с образованием и развитием макротрещин в материале при достижении деформациями критических значений.

Таким образом, ключевым фактором, определяющим возможность повышения проницаемости породы при изменении напряженно-деформированного состояния, является не только уровень касательных напряжений, но и длительность их действия. Правильный учет этого фактора при эксплуатации скважины может позволить повысить эффективность применения методов увеличения нефтеотдачи, основанных на геомеханическом подходе, не допуская при этом разрушения ствола скважины.

Описанная ранее классификация пород с точки зрения характера изменения проницаемости при создании в них напряжений была использована для систематизации полученных результатов. По результатам испытаний породы были отнесены ко второй

(10 образцов Приразломного, 6 – Киринского и 18 образцов Уренгойского месторождений) и третьей (8 обр. Приразломного и 3 – Киринского). Три образца ачимовских отложений (упругое поведение и отсутствие необратимого изменения проницаемости в моделируемых диапазонах изменения напряжений) были отнесены к первой категории.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили свойство пород второй категории существенно и необратимо изменять проницаемость под действием напряжений, что может приводить к значительному изменению дебита скважин. При увеличении депрессии до определенного уровня проницаемость пород в призабойной зоне скважины может падать, когда деформация достигает некоторой критической величины, породы могут начать растрескиваться, что приводит не только к восстановлению, но и улучшению фильтрационных свойств призабойной зоны. Эта способность пород второй категории резко увеличивать свою проницаемость может быть использована на практике для повышения продуктивности скважин.

Если продуктивный пласт месторождения сложен породами третьей категории, единственно возможным выходом для сохранения естественной проницаемости является недопущение роста касательных напряжений в окрестности скважины, например, путем нарезания глубоких щелей до создания депрессии.

### **Заключение**

1. В результате исследования фильтрационных, деформационных и реологических свойств пород шельфовых нефтегазовых месторождений Киринское и Приразломное, а также низкопроницаемых пород ачимовских отложений Уренгойского ГКМ, на установке истинно трехосного нагружения получены соответствующие зависимости их изменения в условиях реальных напряжений, возникающих в призабойной зоне скважин.

2. На основе проведенного анализа напряженного состояния в окрестности скважин для разных исходных пластовых состояний и конструкций забоя разработаны программы нагружения на установке ИСТНН, соответствующие рассматриваемым условиям.

3. Выполнено физическое моделирование процессов деформирования и фильтрации в окрестности скважины для условий Приразломного месторождения для двух исходных состояний пласта: случая равномерного всестороннего изначального горного давления, а также случая наличия в пласте бокового распора. Установлено влияние бокового распора на устойчивость стенок скважины.

4. Для условий Уренгойского ГКМ проведены опыты по моделированию понижения давления в необсаженной скважине и в обсаженной скважине с перфорационным отверстием. Предложена феноменологическая модель эволюции проницаемости при понижении давления в скважине.

5. Исследован характер изменения проницаемости и процессов ползучести горных пород-коллекторов в ходе моделирования, установлено влияние ползучести на фильтрационные свойства пород. В результате проведенного статистического анализа установлена корреляционная связь между характером роста деформаций ползучести и

изменением проницаемости пород. Показано, что ползучесть может различным образом влиять на проницаемость пород в зависимости от характера происходящих при этом процессов: заплывание фильтрационных каналов, дилатансия, образование микро- и макротрещин. Изучен характер изменения проницаемости при протекании данных процессов. Систематизация результатов экспериментальных исследований выполнена в рамках предложенной в Институте проблем механики РАН классификации горных пород по реакции фильтрационных свойств на возникающие в породе касательные напряжения.

6. На основе проведенных экспериментальных исследований реологических и фильтрационных свойств горных пород-коллекторов месторождений углеводородов и их взаимосвязи намечены подходы к повышению качества скважин. Для исследованных пород ачимовских отложений вычислены значения депрессий, при которых возможно реализовать увеличение проницаемости пород в призабойной зоне скважины. Сделан предварительный вывод об оптимальной конструкции забоя скважин для условий данного месторождения.

Автор выражает искреннюю благодарность и признательность научному руководителю В.И. Кареву за постановку задачи, ценные советы, постоянное внимание и поддержку на протяжении всех лет руководства. Автор благодарен всему коллективу лаборатории геомеханики ИПМех РАН, в особенности заведующему Ю.Ф. Коваленко за плодотворные обсуждения, неоценимую консультативную помощь и руководство экспериментом; Н.И. Шевцову и Ю.Н. Семенову за помощь в подготовке и проведении экспериментов; Т.О. Чаплиной за полезные замечания и всестороннее содействие. Отдельно хотелось бы выразить благодарность за наставничество и обучение технике эксперимента покойным А.А. Сиротину и Ю.В. Сидорину, создавшим возможность проведения данных исследований и безупречно осуществлявшим до последнего дня своей жизни техническое обслуживание и эксплуатацию экспериментального оборудования.

#### **Публикации автора по теме диссертации:**

1. Карев В. И., **Химуля В.В.**, Шевцов Н.И. Экспериментальные исследования процессов деформирования, разрушения и фильтрации в горных породах // Известия российской академии наук. Механика твердого тела. 2021, № 5.

2. Karev V. I., **Khimulia V. V.** Physical modeling of deformation and filtration processes in low-permeability reservoir rocks when implementing the directional unloading method // E3S Web of Conferences. — 2021. — Vol. 266. — P. 01001.

3. Карев В. И., Коваленко Ю. Ф., **Химуля В.В.** Фильтрационные и реологические характеристики низкопроницаемых пород-коллекторов при моделировании направленной разгрузки пласта // Ученые записки физического факультета Московского Университета. — 2021. — № 2.

4. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., **Химуля В.В.**, Шевцов Н.И. Применение на пластах-объектах хранения газа метода направленной разгрузки пласта // Газовая промышленность, №7, 2021.

5. Карев В. И., **Химуля В. В.**, Коваленко Ю. Ф. Влияние напряжений на прочностные и фильтрационные свойства пород в окрестности горизонтальной скважины // Процессы в геосредах. — 2018. — № 1 (14). — С. 746–756.
6. Карев В. И., **Химуля В. В.** Влияние напряженно-деформированного состояния на фильтрационные характеристики пород–коллекторов нефтегазовых месторождений // Ученые записки физического факультета Московского Университета. — 2018. — № 4. — С. 1840405.
7. Карев В. И., Коваленко Ю. Ф., **Химуля В. В.** Влияние деформационных процессов на проницаемость горных пород и устойчивость нефтяной скважины // Ученые записки физического факультета Московского Университета. — 2017. — № 4. — С. 1740501–1–1740501–7.
8. Karev V., **Khimulia V.** Physical modeling of deformation and filtration processes in low-permeability reservoir rocks when implementing the directional unloading method // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources Proceedings of the International Forum-Contest of Young Researchers 2020, St. Petersburg, Russia.
9. **Химуля В.В.** Лабораторное моделирование реологических и фильтрационных процессов в пластах подземных хранилищ газа при реализации метода направленной разгрузки пласта // Материалы Международного молодежного научного форума ЛОМОНОСОВ-2021. Москва, 2021.
10. **Химуля В.В.** Моделирование процессов деформирования и фильтрации при использовании метода направленной разгрузки пласта на скважинах, пробуренных на Ачимовские отложения // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Шестая международная научная конференция-школа молодых ученых; Сборник материалов. Москва, 2020. — С. 229–230.
11. Карев В. И., **Химуля В. В.** Влияние напряженно-деформированного состояния на фильтрационно-емкостные характеристики пород-коллекторов // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Четвертая международная школа молодых ученых; 2018. Москва: Сборник материалов школы. С. 44–45.
12. **Химуля В. В.** Влияние деформационных процессов на проницаемость горных пород и устойчивость нефтяной скважины // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Третья международная школа молодых ученых. Сборник материалов школы. Москва, 2017. С. 213–214.
13. **Химуля В. В.** Влияние деформационных процессов на проницаемость горных пород и устойчивость нефтяной скважины // Материалы Международного молодежного научного форума Ломоносов-2017 М.: Макс Пресс, 2017. — Москва: Москва, 2017. — С. 160–161.
14. **Химуля В. В.** Фильтрационные и реологические характеристики низкопроницаемых пород-коллекторов при моделировании направленной разгрузки пласта // Материалы Международного молодежного научного форума Ломоносов-2020. Москва, 2020.
15. **Химуля В. В.** Влияние напряженно-деформированного состояния на фильтрационно-емкостные характеристики пород-коллекторов // Материалы Международного молодежного научного форума Ломоносов-2018. Москва: 2018.

*Химуля Валерий Владимирович*

Реологические и фильтрационные свойства горных пород в условиях сложного трехосного нагружения

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография \_\_\_\_\_