

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ НЕФТИ И ГАЗА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ФГБУН «ИПНГ РАН»)**

На правах рукописи

**ПОПОВ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ**

**АНОМАЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ МЕХАНИКО-  
ХИМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ  
ЗАЛЕЖЕЙ НЕФТИ И ГАЗА**

Специальность – 25.00.17 –  
«Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в лаборатории ресурсной базы нефтегазового комплекса Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем нефти и газа Российской академии наук (ИПНГ РАН).

**Научный консультант:**

**Михайлов Николай Нилович,**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУВО Российский  
государственный университет (НИУ)  
им. И.М. Губкина

**Официальные оппоненты:**

**Рогачев Михаил Константинович,**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой разработки и  
эксплуатации нефтяных и газовых  
месторождений, ФГБОУВО Санкт-  
Петербургский горный университет

**Кузьмин Юрий Олегович,**  
доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий отделением  
Разведочной геофизики и прикладной  
геодинамики, ФГБУН Институт физики  
земли им. О.Ю. Шмидта РАН

**Коваленко Юрий Федорович,**  
доктор физико-математических наук,  
заведующий лабораторией геомеха-  
ники, ФГБУН Институт проблем  
механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

**Ведущая организация:**

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

Защита диссертации состоится 18 марта 2020 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 002.076.01 при ФГБУН Институте проблем нефти и газа Российской Академии наук (ИПНГ РАН) по адресу: 119333, г. Москва, ул. Губкина, дом 3.

С диссертацией можно ознакомиться у ученого секретаря ИПНГ РАН и на сайте ИПНГ РАН <http://www.ipng.ru/>.

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.076.01,  
кандидат технических наук

Баганова М.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Известно, что разработка нефтяных и газовых месторождений сопровождается изменением целого ряда природных физических свойств пород-коллекторов. Например, при снижении пластового давления как в околоскважинной зоне пласта, так и в продуктивной толще в целом происходят существенные нарушения микроструктуры коллектора (деформирование и уплотнение поровой матрицы, смыкание трещин и др.), следствием чего является изменение его фильтрационно-емкостных свойств (пористость, проницаемость), упругих и прочностных характеристик (модуль упругости, коэффициент Пуассона, пределы прочности и др.).

Важную роль в изменении фильтрационно-емкостных (ФЕС) и физико-механических свойств (ФМС) пород-коллекторов при добыче углеводородов играют физико-химические явления в системе «флюид-порода». При разработке нефтяных месторождений в процессе нагнетания воды возникают разнообразные химические реакции, приводящие к выпадению или растворению солей, выщелачиванию пород-коллекторов, набуханию и диспергированию глинистых минералов в зонах проникновения нагнетаемого флюида. Изменение природных свойств продуктивных пластов-коллекторов имеет место также и при разработке газовых и газоконденсатных месторождений. В них при изменении термобарических условий, наряду с деформационными процессами, происходит выделение пресной конденсационной воды, которая по отношению к минеральному скелету гораздо более агрессивна, нежели минерализованная пластовая. Кроме того, на фильтрационные свойства пород-коллекторов нефти и газа значительное влияние оказывают многочисленные химические реагенты (кислоты, щелочи, ПАВ и др.), применяемые при интенсификации разработки месторождений углеводородов.

Вариации ФЕС и ФМС коллекторов при изменении пластового давления или под воздействием физико-химически активных жидкостей достаточно хорошо изучены. Однако совместное влияние этих процессов имеет свои особенности. Совокупный эффект изменения ФЕС и ФМС под воздействием этих процессов не является аддитивной характеристикой. Наоборот, возникает особый синергетический эффект, не совпадающий с ранее установленными закономерностями изменения природных свойств пласта, под воздействием только изменений давления или только закачки

физико-химически активных флюидов. Возникает необходимость изучения *аномальных механико-химических явлений* при разработке залежей углеводородов.

Сложный характер совокупного влияния нескольких факторов на изменение емкостного пространства и упруго-прочностных свойств продуктивного пласта-коллектора требует междисциплинарного подхода, комплексно учитывающего изменение его свойств под воздействием как механических, так и химических эффектов, возникающих при разработке месторождений нефти и газа.

В существующих методиках и нормативных документах, используемых для изучения свойств горных пород, влияние механических и химических эффектов на изменение ФЕС и упруго-прочностных свойств изучается автономно. В частности, физико-химическое взаимодействие жидкостей с породой определяется, как правило, в условиях, не учитывающих влияние переменных эффективных напряжений и без адекватной привязки к механическим свойствам образцов. Изучение деформационных и прочностных свойств пород производится без учета физико-химического взаимодействия фильтрующейся жидкости с породообразующими минералами. В связи с вышесказанным, для оценки влияния механико-химических явлений на ФЕС и ФМС пород-коллекторов при разработке месторождений нефти и газа требуется синергетический, междисциплинарный подход к изучению этих эффектов в лабораторных условиях, околоскважинных зонах и непосредственно в пласте. Потребность в обосновании научных подходов к изучению и использованию механико-химических явлений для повышения эффективности выработки запасов еще более возрастает в связи с переходом на геомеханическое моделирование залежей и внедрением новых геомеханических технологий интенсификации добычи (кислотный гидроразрыв, методы разгрузки околоскважинной зоны пласта от горного давления и др.). Решение этих проблем требует проведения комплексных фундаментальных исследований для установления *закономерностей проявления механико-химических эффектов* в продуктивных пластах и создания оригинальных экспериментальных методик их изучения. Для использования закономерностей изменения ФЕС и ФМС под воздействием механико-химических эффектов необходимо создать новые физико-математические модели, описывающие изменение физических свойств пород-коллекторов с учетом синергетического взаимодействия физико-химических и геомеханических явлений.

Таким образом, разработка научных основ изучения и использования механико-химических эффектов в системе порода-коллектор–флюид в целях повышения эффективности добычи нефти и газа является актуальной проблемой для нефтегазовой отрасли. Решение этой проблемы позволит получить новые знания для дальнейшего совершенствования традиционных и создания принципиально новых технологий увеличения эффективности извлечения углеводородов с учетом результатов взаимодействия геомеханических и физико-химических процессов.

**Основная идея работы** заключается в экспериментальном и теоретическом обосновании аномальности проявлений механико-химических эффектов при техногенном изменении пласта-коллектора в процессе разработки залежи.

**Цель работы** – разработка и апробация оригинальных методов изучения механизмов и выявления закономерностей аномальных проявлений механико-химических эффектов в пластах-коллекторах для учета и регулирования техногенных изменений природных свойств пластов-коллекторов при освоении залежей нефти и газа.

**Основными задачами исследования являются:**

1. Анализ существующих представлений о механико-химических явлениях в горных породах, грунтах и обоснование междисциплинарного характера исследований, необходимых для их изучения, применительно к условиям разрабатываемых месторождений нефти и газа.
2. Разработка современного лабораторно-методического комплекса для изучения совместного влияния деформационных и физико-химических процессов на изменение природных ФЕС и ФМС коллекторов нефти и газа.
3. Выявление аномальных закономерностей влияния механико-химического воздействия на изменение природного состояния коллекторов нефти и газа при переменных эффективных напряжениях и фильтрации физико-химически активных растворов (низкоминерализованная вода, кислоты, щелочи и др.).
4. Разработка аналитических и численных методов прогнозирования изменений ФЕС и ФМС коллекторов в результате проявления механико-химических явлений при сопряженном воздействии изменяющегося напряженного состояния коллектора с фильтрацией пресных вод, или с кислотной обработкой пласта.

5. Разработка методов моделирования околоскважинных зон с учетом влияния механико-химических эффектов на производительность скважин при вариациях эффективных напряжений, фильтрации низкоминерализованных вод и кислотной обработке пласта.

#### **Объект и предмет исследования**

Объектом исследования являются коллекторы нефти и газа, представленные терригенными и карбонатными разностями с гранулярным и трещинным типами пористости, а также околоскважинные зоны пласта-коллектора, находящиеся под воздействием физико-химически активных флюидов и деформационных процессов.

#### **Методы исследования**

Для решения поставленных задач применялись следующие методы: анализ и обобщение теоретических и экспериментальных результатов в области физики горных пород, физики нефтегазового пласта, геомеханики, физики грунтов, физико-химической механики и механохимии; экспериментальные лабораторные методы исследования карбонатных и терригенных образцов керна, методы аналитического и численного моделирования, методы геохимического и гидрогеологического анализа флюидов, численное моделирование механико-химических процессов при разработке продуктивных объектов.

#### **Соответствие диссертации паспорту специальности**

Исследования, проведенные в данной диссертационной работе, соответствуют следующим пунктам паспорта специальности 25.00.17 – «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений»:

2. Геолого-физические и физико-химические процессы, протекающие в пластовых резервуарах и окружающей геологической среде при извлечении из недр нефти и газа известными и создаваемыми вновь технологиями и техническими средствами для создания научных основ эффективных систем разработки месторождений углеводородов и функционирования подземных хранилищ газа;
5. Научные основы компьютерных технологий проектирования, исследования, эксплуатации, контроля и управления природно-техногенными системами, формируемыми для извлечения углеводородов из недр или их хранения в недрах с целью эффективного использования методов и средств

информационных технологий, включая имитационное моделирование геологических объектов, систем выработки запасов углеводородов и геолого-технологических процессов.

### **Научная новизна работы**

1. Экспериментально и теоретически установлено влияние механико-химических эффектов на ФЕС и ФМС пласта-коллектора под сопряженным воздействием его изменяющегося напряженно-деформированного состояния, длительной фильтрации пресных вод и кислотной обработке пласта.
2. Обоснован и разработан современный комплекс методов лабораторного изучения совместного влияния фильтрации физико-химически активных жидкостей и изменяющихся эффективных напряжений на техногенные изменения природных ФЕС и ФМС пласта.
3. Уточнен механизм изменений природных ФЕС и ФМС в коллекторах нефти и газа в результате проявления механико-химических эффектов, обусловленный аномальной локальной растворимостью и микродеформациями участков контактов зерен породы, находящихся под воздействием концентрации напряжений, при совокупном влиянии переменных напряжений и маломинерализованных агентов заводнения карбонатных пород и кислотных агентов обработки терригенных коллекторов.
4. Разработаны методы и алгоритмы сопряженного моделирования процессов пороупругости и фильтрации флюидов с учетом техногенного изменения фильтрационных и деформационных свойств пласта в околоскважинных зонах под воздействием физико-химически активных флюидов и меняющихся эффективных напряжений.
5. Показано влияние механико-химических явлений на изменение напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны пласта и, как следствие, изменение производительности скважин под воздействием варьирующихся эффективных напряжений с фильтрацией пресных вод с кислотной обработкой пласта.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Выявленные эффекты аномальных изменений ФЕС и ФМС при совокупном воздействии переменных напряжений с фильтрацией маломинерализованных

вод в карбонатных породах или глинокислотных агентов в терригенных коллекторах, обусловленные локальной растворимостью и микродеформациями участков контактов частиц породы.

2. Современный лабораторно-методический комплекс для исследований изменения фильтрационных, упругих и прочностных свойств пласта под воздействием механико-химических эффектов при фильтрации агрессивных жидкостей и изменяющихся эффективных напряжениях. Основные направления повышения информативности промысловых исследований механико-химических явлений при сопряженном влиянии геомеханических нагрузок и нагнетании физико-химически активного флюида.
3. Научное обоснование и методические решения по созданию комплекса аналитических моделей, описывающих: а) изменение проницаемости трещиноватого коллектора при длительной фильтрации пресных вод и изменяющемся напряженном состоянии продуктивного пласта; б) изменение фильтрационно-емкостных свойств гранулярного коллектора в процессе фильтрации пресной воды и при вариациях эффективных напряжений.
4. Научное обоснование, комплекс методических решений и алгоритмов численного моделирования околоскважинной зоны продуктивного пласта, находящейся под воздействием физико-химически активных флюидов и меняющихся эффективных напряжений.

### **Практическая значимость работы**

1. Результаты работы могут быть использованы в лабораторной практике при проведении специальных исследований образцов керн с целью определения влияния механико-химических явлений на проницаемость трещиноватых образцов керн при совместном воздействии фильтрации воды и изменяющихся эффективных напряжений.
2. Установленные закономерности и разработанные модели изменения проницаемости трещин при фильтрации пресной воды и вариациях эффективных напряжений могут быть использованы при геомеханическом моделировании месторождений углеводородов.
3. Разработанная аналитическая модель воздействия глинокислотного реагента на продуктивный пласт рекомендуется для прогноза изменения проницаемости,

упругих и прочностных свойств терригенного коллектора порового типа в процессе фильтрации закачиваемого реагента и при переменной величине эффективных напряжений.

4. Применение разработанной методики и алгоритма моделирования гранулярного коллектора при длительной фильтрации пресной воды и изменяющихся эффективных напряжениях позволяет прогнозировать изменение фильтрационно-емкостных свойств пласта, приемистости нагнетательных скважин или дебита высокообводненных добывающих скважин в процессе эксплуатации залежи.
5. С помощью разработанной методики и алгоритма моделирования терригенного коллектора порового типа возможен прогноз изменения фильтрационно-емкостных и физико-механических свойств пласта и околоскважинной зоны, а также его напряженно-деформированного состояния под воздействием кислотных реагентов для целей интенсификации добычи.
6. Разработанные методика и алгоритм моделирования трещиноватого карбонатного коллектора позволяют прогнозировать изменение проницаемости систем трещин, приемистости нагнетательных скважин или дебита высокообводненных добывающих скважин под воздействием фильтрации пресной воды и эффективных напряжений в процессе длительной разработки залежи.

#### **Апробация работы**

Основные положения и результаты, изложенные в диссертации, докладывались на семинарах ИПНГ РАН, российских и зарубежных конференциях, начиная с 2002 года: XXXI-я научно-практическая конференция горно-нефтяного факультета ПГТУ (Пермь, 2002 г.); XXXIII-я научно-практическая конференция горно-нефтяного факультета ПГТУ «75 лет пермской нефти» (Пермь, 2004 г.); VII-я международная молодежная научная конференция СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2006 (Ухта, 2006 г.); научно-практическая южнороссийская конференция «Проблемы бассейнового и геолого-гидродинамического моделирования» (Волгоград, 2006 г.); краевая научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (Пермь, 2007 г.); VIII-я международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «География, геоэкология, геология: опыт научных исследований» (Киев, 2011 г.); II-й научно-

технический семинар «Актуальные вопросы проектирования разработки месторождений углеводородов» («Газпром ВНИИГАЗ», Москва, 2011 г.); всероссийская конференция с международным участием «Фундаментальные проблемы разработки месторождений нефти и газа» (ИПНГ РАН, Москва, 2011 г.); международная конференция молодых ученых и студентов «Новые подходы и достижения в науках о земле» (Институт геологии Национальной Академии наук Азербайджана, Баку, 2011 г.); всероссийская молодежная конференция «Актуальные проблемы геологии, планетологии и геоэкологии» (Южно-Российский государственный технический университет, Новочеркасск, 2012 г.); IV-я научно-практическая конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» («Газпром ВНИИГАЗ», Москва, 2012 г.); II-я ежегодная конференция молодых специалистов ИПНГ РАН (Москва, 2012 г.); XVII-й международный научный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2013 г.); всероссийская молодежная научная конференция с участием иностранных ученых «Трофимуковские чтения-2013» (Новосибирск, 2013 г.); V-я международная молодежная научно-практическая конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» («Газпром ВНИИГАЗ», Москва, 2013 г.); III-я ежегодная конференция молодых специалистов ИПНГ РАН (Москва, 2013 г.); молодежная научно-практическая конференция «Моделирование газовых и нефтегазоконденсатных месторождений» («Газпром ВНИИГАЗ», Москва, 2014 г.); всероссийская научная конференция с международным участием «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами» (Владивосток, 2015 г.); II-я международная научно-практическая конференция «Нефтепромысловая химия» (Москва, 2015 г.); V-й международный научный симпозиум «Теория и практика применения методов увеличения нефтеотдачи пластов» («ВНИИнефть», Москва, 2015 г.); X-я международная научно-техническая конференция «Geopetrol-2016» (Польша, Закопане, 2016 г.); российская нефтегазовая техническая конференция и выставка SPE-2016 (Москва, 2016 г.). В полном объеме результаты диссертационной работы докладывались на научных семинарах ИПНГ РАН.

### **Публикации**

По результатам исследований, выполненных в рамках данной диссертационной работы, опубликовано 76 печатных работ, из них 44 статьи в периодических изданиях,

рекомендованных ВАК, 32 тезиса докладов, материалов конференций и публикаций в журналах, не входящих в список рекомендованных ВАК, 3 патента РФ.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы, включающего 385 наименований. Общий объем работы составляет 364 страницы, включая, 157 рисунков, 31 таблицу.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, указаны цель, основные защищаемые положения, научная новизна, ее практическая значимость и апробация работы. В **главе 1** «Существующие исследования влияния эффекта Ребиндера и механико-химических явлений на фильтрационно-емкостные и физико-механические свойства пород-коллекторов» приведен анализ основных положений в научных публикациях, посвященных изучению воздействия эффекта Ребиндера и механико-химических явлений на пористость, проницаемость, упругие и прочностные свойства пород-коллекторов. В **главе 2** «Информационно-методическое обеспечение экспериментальных исследований влияния нагнетания воды и воздействия кислотного реагента на фильтрационно-емкостные и физико-механические свойства пород-коллекторов» описываются лабораторные установки и методики для подготовки образцов керна к исследованиям, а также для определения пористости, проницаемости и механических свойств пород-коллекторов при совместном воздействии изменяющихся эффективных напряжений и фильтрации физико-химически активных жидкостей; представлено описание керна материала и химического состава нагнетаемых и пластовых вод исследуемых продуктивных объектов. **Глава 3** «Экспериментальные исследования влияния механико-химических эффектов на фильтрационно-емкостные и физико-механические свойства пород при нагнетании воды в трещиноватые карбонатные коллекторы» содержит результаты лабораторных экспериментов, при выполнении которых определялись изменения пористости, проницаемости и упругих свойств пористых и трещиноватых карбонатных образцов керна при совместном воздействии нагнетаемой воды и изменяющейся нагрузки. *По материалам первой, второй и третьей глав обосновывается первое защищаемое положение.* В **главе 4** «Экспериментальные исследования влияния кислотного реагента на фильтрационно-емкостные и физико-механические свойства терригенных пород-коллекторов» рассмотрены результаты лабораторных экспериментов по исследованию

проницаемости, упругих и прочностных свойств терригенных образцов керна при фильтрации кислотного раствора; предложена оригинальная методика обработки результатов исследований и построения аналитических моделей изменения свойств продуктивного пласта в зависимости от количества прокачанных поровых объемов кислотного реагента и характера изменения эффективных напряжений. В **главе 5** «Обработка данных экспериментальных исследований и разработка моделей изменения фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов при нагнетании воды» представлены методики интерпретации лабораторных экспериментов и построения моделей изменения пористости и проницаемости гранулярного терригенного и трещиноватого карбонатного коллекторов. *На основе четвертой и пятой глав формируется третье защищаемое положение.* В **главе 6** «Численное моделирование влияния механико-химических явлений на фильтрационно-емкостные и физико-механические свойства пород-коллекторов при нагнетании воды и кислотной обработке пласта» приведены методические подходы и алгоритмы численного моделирования изменения проницаемости и напряженного состояния околоскважинных зон при фильтрации физико-химически активных жидкостей на примере гранулярного терригенного и трещиноватого карбонатного коллекторов; разработана принципиальная схема основных направлений и этапов экспериментального моделирования технологических процессов для повышения информативности и достоверности лабораторных исследований при реализации физико-химических и геомеханических воздействий на пласт; предложена схема основных направлений повышения информативности промыслово-геологического анализа при проявлении механико-химических явлений. *На материалах первой, второй, третьей, четвертой и шестой глав обосновываются второе и четвертое защищаемые положения.*

### **Благодарности**

Автор выражает глубокую благодарность д.т.н. Н.Н. Михайлову за помощь в выборе направления научных исследований, а также за ценные научные консультации и рекомендации по проведению экспериментальных исследований; автор благодарит д.г.-м.н. Л.А. Абукову, д.т.н. В.М. Максимова, д.т.н. А.М. Свалова, д.т.н. С.Н. Закирова, д.т.н. Э.С. Закирова, д.т.н. И.М. Индрупского, к.г.-м.н. О.П. Абрамову, к.г.-м.н. Н.А. Скибицкую за ценные советы и участие в обсуждении результатов, а также всех сотрудников сектора нефтегазовой гидрогеологии ИПНГ РАН за поддержку и

неоценимую помощь при проведении лабораторных экспериментов по изучению механико-химических эффектов при взаимодействии пластовых и нагнетаемых вод с породами-коллекторами; весьма серьезная помощь была оказана специалистом филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» В.В. Плотниковым при проведении экспериментальных исследований с кислотными реагентами; ценные научные консультации по моделированию в программном комплексе «ANSYS» были получены от сотрудников кафедры Вычислительной математики и механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ) д.ф.-м.н. Н.А. Труфанова и д.т.н. О.Ю. Сметанникова.

## ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

*Первое защищаемое положение. Выявленные эффекты аномальных изменений ФЕС и ФМС при совокупном воздействии переменных напряжений с фильтрацией маломинерализованных вод в карбонатных породах или глинокислотных агентов в терригенных коллекторах, обусловленные локальной растворимостью и микродеформациями участков контактов частиц породы.*

Для уточнения механизмов, характеризующих техногенное изменение природных свойств коллектора при сопряженном воздействии варьирующихся эффективных напряжений и физико-химически активных флюидов, предварительно были проанализированы существующие научные труды ведущих отечественных и зарубежных специалистов в данном направлении исследований.

В работах В.М. Добрынина, Ф.И. Котяхова, Ю.П. Желтова, Т.Д. Гольф-Рахта, В.Д. Викторина, В.П. Сонича, Н.А. Черемисина, С.Н. Закирова, Ю.А. Кашникова, N.R. Barton, S.N. Bandis, W. Wittke, B. Plischke, M.D. Zobak, E. Fjaer, R.M. Holt, F.P. Charlez, R.E. Goodman, L.E. Chin и др. изучалось влияние изменения эффективных напряжений на вариации ФЕС и ФМС пород-коллекторов, однако воздействие фильтрации физико-химически активных флюидов на данные свойства пласта не исследовалось.

Проблемы геомеханического и сопряженного геомеханического и гидродинамического моделирования применительно к разработке нефтяных и газовых месторождений рассматривались в работах A. Settari, J. Wang, D. Walters, R.C. Bachman, R.B. Sullivan, M. Nassir, R. Wan, D. Tran, Ю.А. Кашникова, С.Г. Ашихмина, С.В. Лукина, Ю.В. Овчаренко и др. В научных исследованиях данных специалистов не учитывалось

влияние химических факторов на фильтрационно-емкостные, упругие и прочностные свойства пород-коллекторов.

А.Т. Карманский, О.Г. Латышев, А.К. Dube, T.N. Singh, Z. Li, R.A. Martin, R.J. Hickman, M. Gutierrez, R. Hellmann, J. Hadizadeh, J.C. Thompson, H. Corapcioglu и др. изучали изменение физико-механических свойств горных пород под воздействием жидкостей различного химического состава применительно к проблемам горного дела. Однако результаты данных авторов не применимы к пластам-коллекторам, так как в них не исследовалось изменение ФЕС флюидонасыщенных пород-коллекторов под воздействием механико-химических эффектов, а при испытании прочностных свойств горных пород не учитывался химический состав насыщающей породы воды.

Изучение ФЕС терригенных и карбонатных пород-коллекторов при фильтрации воды проводилось в работах E. Thenthorey, H. Yasuhara, D. Elsworth, A. Polak, X. Zhang, C.J. Spiers. Однако в этих исследованиях эффективные напряжения задаются постоянными или соответствуют атмосферным условиям.

В исследованиях академика В.И. Осипова, В.Н. Соколова, В.В. Еремеева изучались фильтрационные, компрессионные и деформационные свойства глинистых пород в зависимости от химического состава и рН насыщающей их жидкости под воздействием различной величины эффективных напряжений. Авторы отмечают, что вышеперечисленные свойства глинистых пород в существенной степени зависят от типа контактов между частицами. Данные исследования проводились на образцах пластичных глин и глинистых покрышек месторождений углеводородов.

Исследованию механико-химических явлений в горных породах посвящены научные труды академика П.А. Ребиндера и его коллег, в которых изучались изменение предела прочности и увеличение скорости механического бурения скважин за счет добавления различных химических веществ (понижителей твердости) в буровой раствор. Однако в работах этих авторов не исследовалось изменение ФЕС и ФМС пород-коллекторов под воздействием данных явлений.

И.Л. Мархасин и его коллеги рассмотрели аспекты физико-химической механики применительно к продуктивному нефтяному пласту: рассматривались адсорбционные свойства пластовой нефти; адсорбционные процессы на границе нефть–твердая фаза; оборудование и методы для изучения свойств граничных слоев нефти и твердой фазы; влияние граничного слоя нефти на фильтрацию в пористой среде.

В работах Н.Н. Михайлова, В.М. Максимова изучалось изменение проницаемости терригенных образцов керна до и после фильтрации физико-химически активной жидкости и при вариации эффективных напряжений. Следует отметить, что в качестве нагнетаемого флюида использовалась вода с добавлением ПАВ. В то же время данные авторы не исследовали изменение ФМС образцов керна под воздействием механико-химических эффектов и его влияние на напряженное состояние пласта.

Наиболее яркие эффекты влияния механико-химических явлений на техногенное изменение природных ФЕС и ФМС пласта-коллектора могут быть получены при воздействии на пласт агрессивными жидкостями, например, минеральными кислотами. В научных публикациях C.N. Fredd, S.H. Fogler, M.L. Hoefner, J. Deng, H.H. Abass, F. Civan, P.C. Хисамова, В.Г. Салимова, Г.П. Хижняка, и др. показаны результаты изучения характера изменений фильтрационных свойств образцов керна под воздействием кислотных реагентов, однако влияние напряженного состояния и условий прокачки кислотного раствора на физико-механические свойства пород-коллекторов не изучалось.

Учет химических эффектов при гидродинамическом моделировании процессов, связанных с разработкой месторождений углеводородов, на примере кислотного воздействия и нагнетания низкоминерализованных вод рассмотрен в работах M. Economides, S.L. Bryant, Y. Chen, M. Sharma, M.K.R. Panga, L. Nghiem, C. Dang, Z. Chen, B. Kohse, A.D. Hill, R.S. Schechter, P.Д. Каневской, И.А. Вольнова, С.Ю. Жучкова, А.Б. Золотухина, А.С. Смирнова и др. Однако в работах данных авторов не рассматривалось влияние физико-химически активных жидкостей на физико-механические свойства пород-коллекторов и напряженно-деформированное состояние пласта.

С учетом проведенного анализа научных публикаций вышеперечисленных исследователей, для выявления и детализации механизмов техногенного изменения природных свойств коллектора под воздействием механико-химических эффектов, автором были проведены специальные лабораторные эксперименты с карбонатными и терригенными образцами керна. Всего было проведено несколько серий экспериментальных исследований: на образцах карбонатного коллектора с гранулярным и трещиноватым типом пористости при фильтрации воды и воздействии постоянной и изменяющейся нагрузки; на образцах терригенного коллектора, которые также подвергались совместному воздействию фильтрации кислотного реагента и

изменяющихся эффективных напряжений. Лабораторные исследования проводились на специальных сертифицированных установках, позволяющих длительно фильтровать физико-химически активную жидкость и создавать постоянные или изменяющиеся эффективные напряжения в образцах керна.

Первая серия экспериментов проводилась для выявления закономерностей проявления механико-химических эффектов при воздействии на пласт водными растворами. Исследовались изменения наиболее структурно чувствительного параметра – водопроницаемости.

Карбонатные образцы керна насыщались моделью пластовой воды (минерализация  $294 \text{ г/дм}^3$ ) с последующей фильтрацией пресной воды, используемой в системе поддержания пластового давления (минерализация  $0.49 \text{ г/дм}^3$ ). В экспериментах с трещиноватыми образцами керна при воздействии *постоянных напряжений* и нагнетании *пресной воды* с неизменной минерализацией было выявлено несколько характерных участков зависимости изменения проницаемости образцов от величины прокачанных поровых объемов и минерализации профильтровавшейся воды (рис. 1). Здесь на первом участке фиксировалось резкое снижение проницаемости трещинного образца при увеличении эффективных напряжений до их значений в пластовых условиях, при этом наблюдалось небольшое повышение минерализации профильтровавшейся воды, связанное с растворением легкорастворимых минеральных образований. На втором участке проницаемость трещин увеличивалась, что было вызвано, помимо растворения легкорастворимых компонент скелета, еще и выносом легких частиц породы под воздействием фильтрующейся маломинерализованной смеси нагнетаемой и пластовой воды. На третьем участке формировалось монотонное снижение проницаемости, связанное с разрушением и растворением выступов стенок трещин породы, под совместным воздействием концентрированных эффективных напряжений в окрестности выступов и фильтрации пресной воды, минерализация профильтровавшейся смеси вод при этом монотонно убывала. Процессы смешивания пластовой воды с нагнетаемой и растворения минерального комплекса оставались незавершенными, что видно по динамике минерализации профильтровавшейся воды, т.е. проницаемость трещины могла снижаться еще больше при увеличении объемов фильтрации.

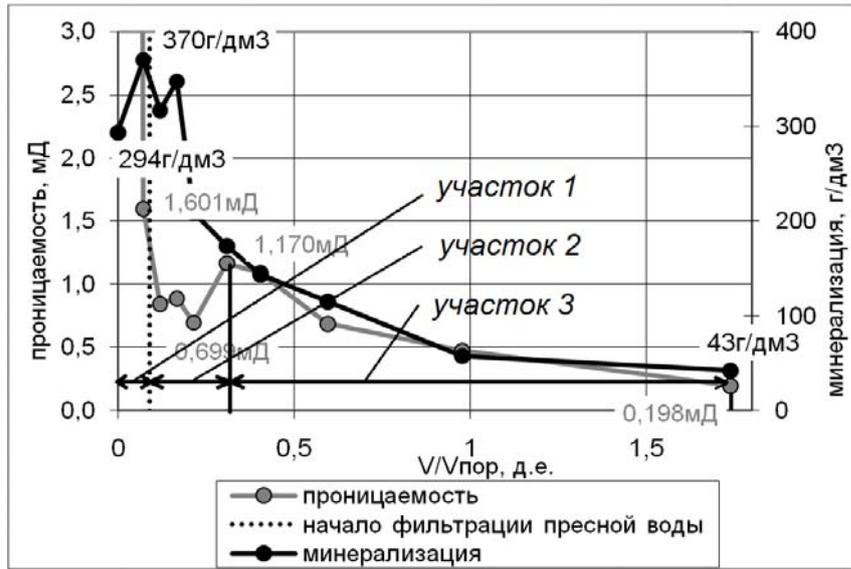


Рис. 1. Изменение проницаемости образца керна с трещиной и минерализации профильтрованной воды в зависимости от вытесненного порового объема

В связи с тем, что минерализация пластовой воды весьма высокая, из данных экспериментов сложно определить – какие минералы растворяются из скелета породы, поэтому часть отобранных для эксперимента образцов изначально насыщалась дистиллированной водой и через них фильтровали также дистиллированную воду. При этом образцы подвергались воздействию нескольких циклов нагрузки-разгрузки и выдержке при постоянных эффективных напряжениях (рис. 2).

После насыщения образцов и фильтрации дистиллированной воды было получено, что из образцов растворяются следующие соли: NaCl (до 18.5 ммоль/дм<sup>3</sup> – для гранулярного образца, до 78.8 ммоль/дм<sup>3</sup> – для образца с трещиной), соли кальция (до 6.6 ммоль/дм<sup>3</sup> – для гранулярного образца, до 7.8 ммоль/дм<sup>3</sup> – для образца с трещиной), соли магния (до 1.74 ммоль/дм<sup>3</sup> – для гранулярного образца, до 1.7 ммоль/дм<sup>3</sup> – для образца с трещиной). Присутствие в растворе профильтрованной воды солей кальция и магния говорит о растворении породообразующих минералов образцов керна.

В образце с гранулярным типом пористости (см. рис. 2,а) изменение проницаемости происходило только при увеличении или уменьшении эффективных напряжений, что было вызвано чисто механическим эффектом (проявление физико-химического растворения не наблюдалось). Дополнительно это подтверждалось тем, что

выдержка образца под постоянным эффективным напряжением практически не изменяла величину проницаемости.

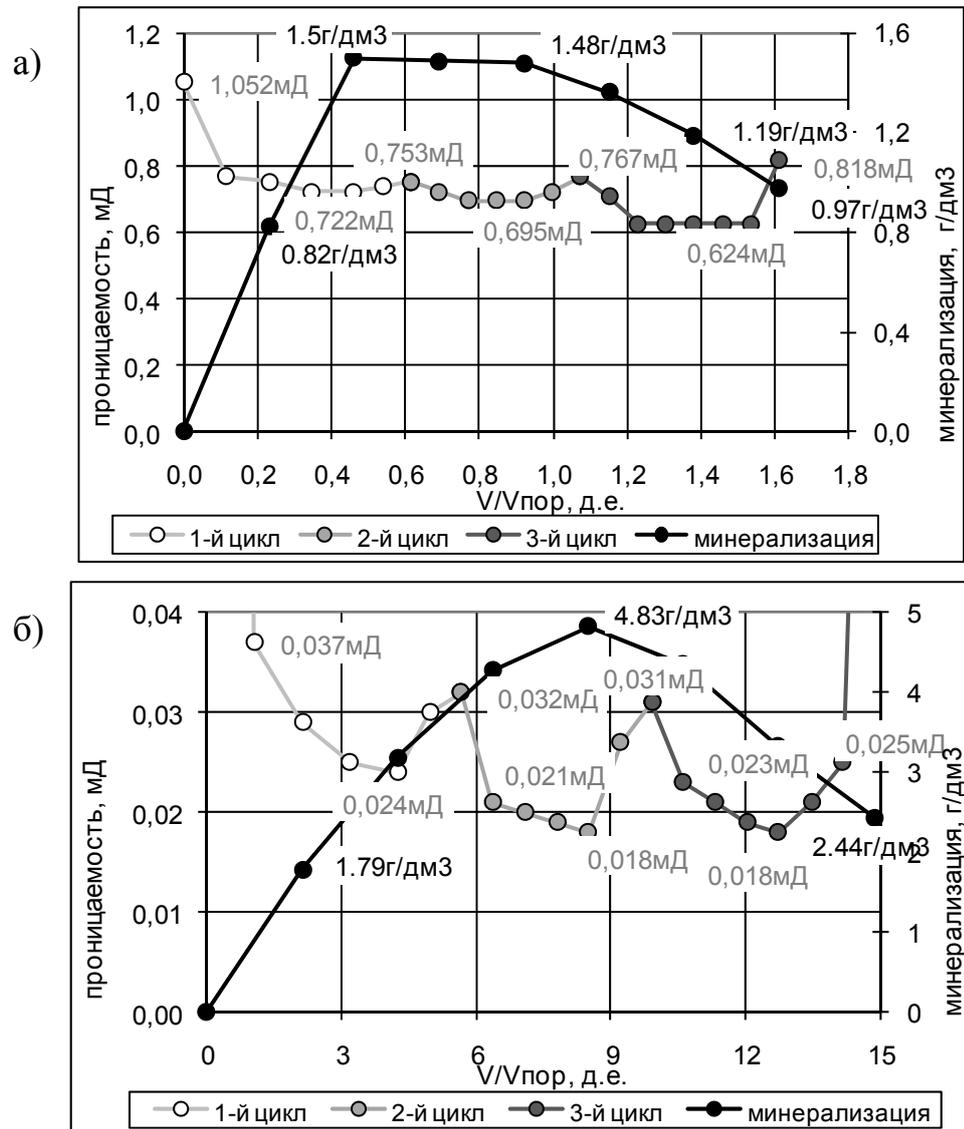


Рис. 2. Изменение проницаемости гранулярного образца (а) и образца ядра с трещиной (б) и минерализации профильтрованной воды в зависимости от вытесненного порового объема

Для образца ядра с трещиной был получен несколько другой результат (см. рис. 2,б). Как и пористый образец, образец с трещиной существенно реагировал на увеличение и уменьшение напряжений (механический эффект), при этом длительная выдержка образца при постоянных эффективных напряжениях тоже приводила к постепенному снижению проницаемости. Данный эффект вызван локальным растворением – при совместном воздействии эффективных напряжений и фильтрации дистиллированной воды сводообразующие контакты трещин (под воздействием локальных концентраций напряжения) начинали разрушаться и интенсивно

растворяться, что приводило к их смыканию и снижению проницаемости образца в целом (наблюдалось проявление механико-химического эффекта).

Проведенные лабораторные эксперименты с карбонатными образцами керна показали значимое влияние механико-химических эффектов на проницаемость породы, обусловленное микродеформациями, разрушением и растворением берегов трещин на сводообразующих контактах, под воздействием локальной концентрации напряжений в окрестности контактов. Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что для трещиноватых карбонатных коллекторов длительное нагнетание низкоминерализованной воды должно приводить к уменьшению приемистости нагнетательных скважин, что подтверждается промысловой практикой. Проведенные экспериментальные исследования влияния механико-химических эффектов на проницаемость как пористых, так и трещиноватых образцов керна позволяют констатировать, что для прогноза изменений фильтрационно-емкостных свойств пород-коллекторов необходим совместный учет воздействий фильтрации воды и изменяющихся эффективных напряжений, включающих циклы их увеличения-уменьшения и выдержки при заданных параметрах опытов, отвечающих конкретным пластовым условиям. Полученные результаты экспериментов с карбонатными образцами керна были использованы автором для создания модели изменения проницаемости трещиноватого коллектора при совместном воздействии изменяющихся эффективных напряжений и фильтрации воды.

Автором был проведен специальный цикл исследований для выявления закономерностей проявления механико-химических эффектов под воздействием агрессивных флюидов, в качестве которых использовались типичные кислотные растворы. В этой серии экспериментов изучалось изменение ФЕС и ФМС при совместном воздействии кислотных растворов и переменных эффективных напряжений.

Для проведения первой серии экспериментов с терригенными образцами керна и фильтрацией кислотного раствора предварительно изготавливалась группа из пяти образцов диаметром 30 мм и высотой 60 мм из одного цельного куска исходного кернового материала. В задачу входило сопоставление влияния различного количества закачиваемых поровых объемов кислотного реагента на проницаемость и на упругие и прочностные свойства образцов. В качестве кислотного реагента использовалась глинокислота – смесь соляной и плавиковой кислот (12% HCl + 3% HF).

Эксперименты проводились в следующей последовательности: первоначально через образец фильтровали керосин для определения начального значения нефтепроницаемости, затем закачивали различный поровый объем кислотного реагента (10, 50, 75 и 100 поровых объемов) и выдерживали образцы, насыщенные кислотным раствором, 4 часа без фильтрации. В конце эксперимента снова нагнетали керосин до стабилизации проницаемости для очистки образца от продуктов реакции. В результате лабораторных исследований было установлено, что при нагнетании кислоты происходит резкое снижение проницаемости (рис. 3).

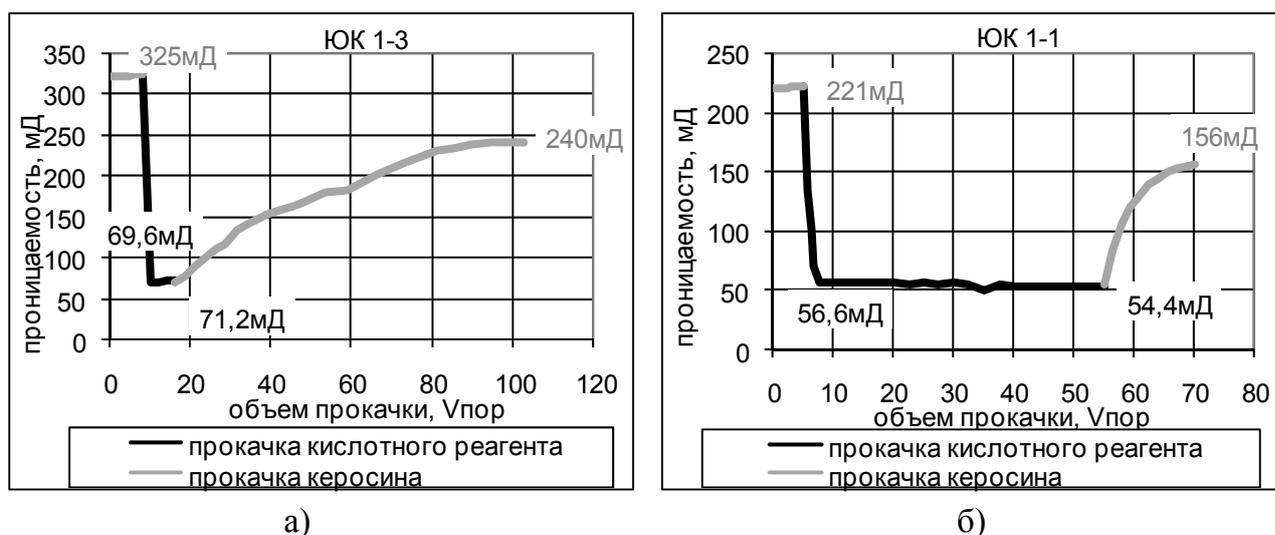


Рис. 3. Зависимость изменения проницаемости от прокачанных поровых объемов керосина и глинокислотного реагента для образцов: а) ЮК 1-3 (10 поровых объемов кислотного реагента); б) ЮК 1-1 (50 поровых объемов кислотного реагента)

Эффект снижения проницаемости автор объясняет микродеформированием контактов твердых частиц при фильтрации кислотного реагента и воздействии эффективных напряжений. Контактная концентрация напряжений увеличивает локальную растворимость, что снижает сопротивление контактов сжатию под действием напряжений. Также отмечается эффект увеличения неподвижной водонасыщенности в результате реакции кислотной композиции с минеральным скелетом. Увеличение остаточной водонасыщенности приводит к дополнительному снижению фазовой проницаемости по нефти (керосину). В целом наблюдается снижение проницаемости в зависимости от количества прокачанных поровых объемов глинокислотного раствора (рис. 4). Параллельно с изучением проницаемости исследовались деформационные свойства. После фильтрационных исследований образцы помещали в установку для определения их упругих и прочностных свойств

статическим методом. Экспериментально показано влияние механико-химических эффектов на изменение исходных деформационных свойств пласта. В результате экспериментов установлено, что деформационные свойства, а именно: модуль упругости, коэффициент Пуассона, модуль объемного сжатия и предел прочности при сжатии – имеют тесную корреляционную связь с количеством закачаных поровых объемов кислотного реагента (рис. 5).

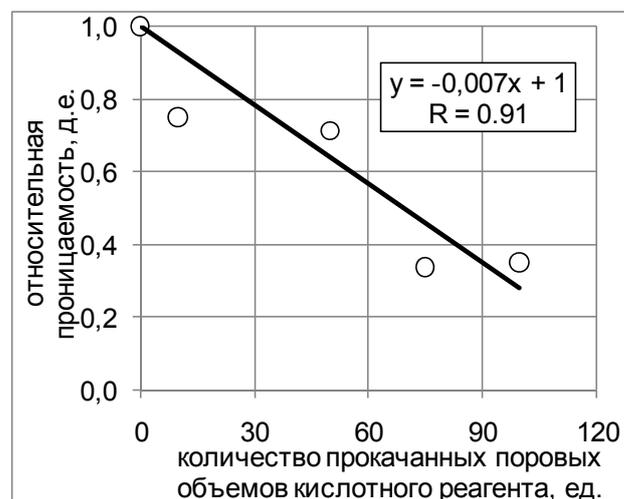
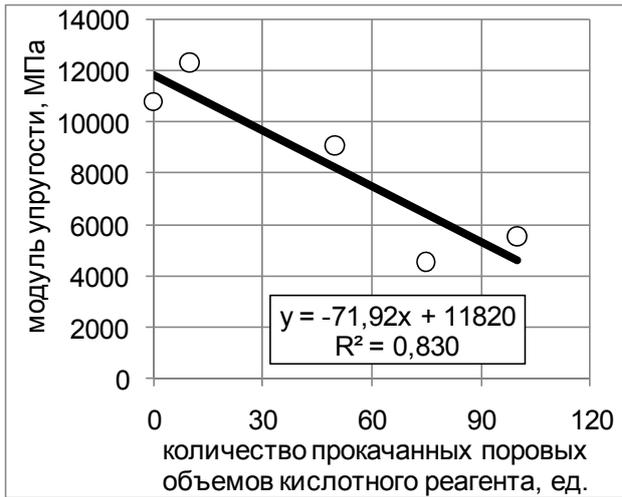


Рис. 4. Относительное снижение проницаемости образцов керна в зависимости от прокачанных поровых объемов глинокислотного реагента

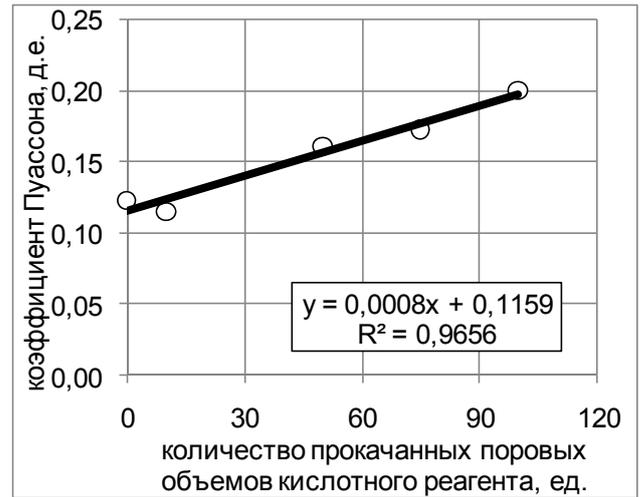
Как видно из рис. 5, величины модуля упругости, предела прочности и модуля объемного сжатия уменьшаются с увеличением объемов закачиваемой кислоты. При этом наибольшее снижение наблюдалось для модуля упругости – почти в три раза (см. рис. 5,а), модуль объемного сжатия уменьшался почти в два раза (см. рис. 5,в). Меньше всего снизилась величина предела прочности при сжатии – примерно на 30% (см. рис. 5,г). Для коэффициента Пуассона, наоборот, наблюдался рост почти в 2 раза (см. рис. 5,б). Такие результаты исследований говорят о том, что после воздействия кислотного реагента порода становится менее прочной и более деформируемой.

Для установления зависимости изменений проницаемости от эффективных напряжений и от объема прокачанной кислотной композиции автором была проведена следующая серия экспериментов. Четыре образца керна (диаметром 30 мм и высотой 30 мм) были взяты из одного цельного куска исходного керна материала. Данные образцы испытывались для определения влияния сопряженного воздействия фильтрации различных поровых объемов глинокислотного раствора и изменяющихся эффективных напряжений на проницаемость породы-коллектора.

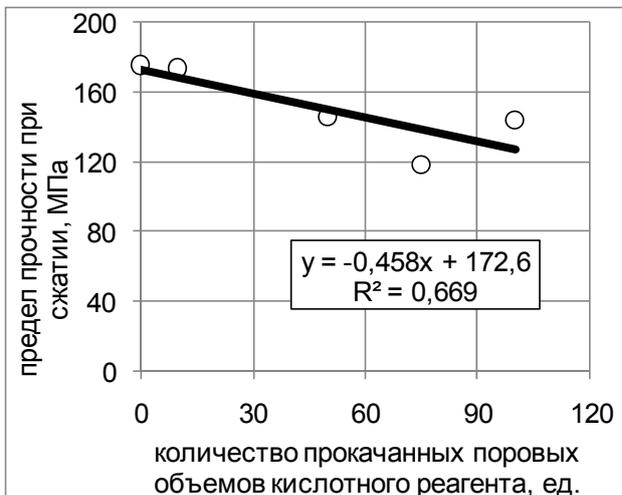
Через образцы фильтровался тот же кислотный реагент, что и в предыдущих исследованиях, – в количестве 10, 50 и 100 поровых объемов, а затем образцы выдерживались 4 часа без фильтрации. При этом один из них не подвергался кислотному воздействию. Величина эффективных напряжений изменялась от 5 до 17 МПа.



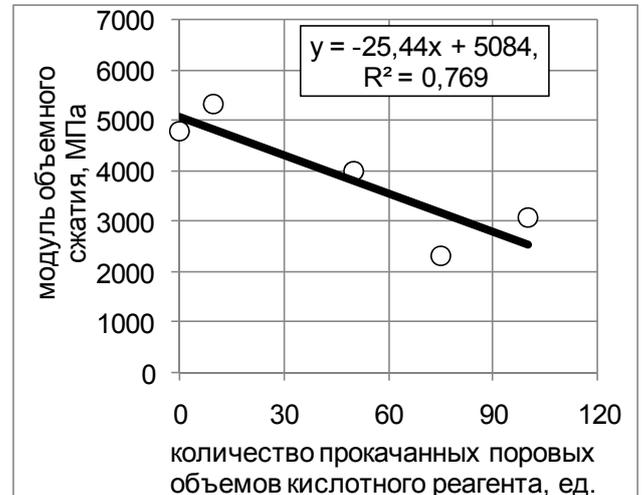
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Зависимость статического модуля упругости (а), коэффициента Пуассона (б), предела прочности при сжатии (в) и модуля объемного сжатия (г) образцов керна от количества прокачанных поровых объемов глинокислотного реагента

После статистической обработки результатов экспериментов было получено, что наиболее близко описывает связь проницаемости с эффективными напряжениями и количеством закачанных поровых объемов кислотного реагента следующая зависимость:

$$K_{np} = K_0 \left( 1 - \frac{a \sigma_{эфф}}{b + \sigma_{эфф}} \right), \quad (1)$$

где  $K_0$  – проницаемость образцов керна для эффективных напряжений, близких к нулю, [мД];  $a$  – безразмерный варьируемый коэффициент;  $b$  – варьируемый коэффициент [МПа];  $\sigma_{эфф}$  – эффективные напряжения [МПа].

При этом было установлено, что для исследуемой коллекции образцов коэффициенты  $a$  и  $b$  соотношения (1) также зависят от объемов закачиваемой кислоты:

$$a = 0.0019V_{\text{пор}} + 0.56, \quad b = 2.338 - 0.01V_{\text{пор}}, \quad (2)$$

где  $V_{\text{пор}}$  – безразмерное количество поровых объемов кислотного реагента [ед.].

Автором были получены корреляционные соотношения, описывающие изменение упругих и прочностных свойств в зависимости от прокачанных поровых объемов кислотного реагента, а также аналитическая модель изменения проницаемости (1) при совместном воздействии нагнетаемого кислотного реагента и изменяющихся эффективных напряжений, эти связи были использованы для численного моделирования техногенных изменений околоскважинной зоны пласта.

На рис. 6 представлены результаты обработки экспериментальных исследований изменения проницаемости образцов керна под воздействием кислотного реагента (в относительных единицах) в зависимости от количества прокачанных поровых объемов кислотного реагента и изменяющихся эффективных напряжений в виде аппроксимирующих функций.

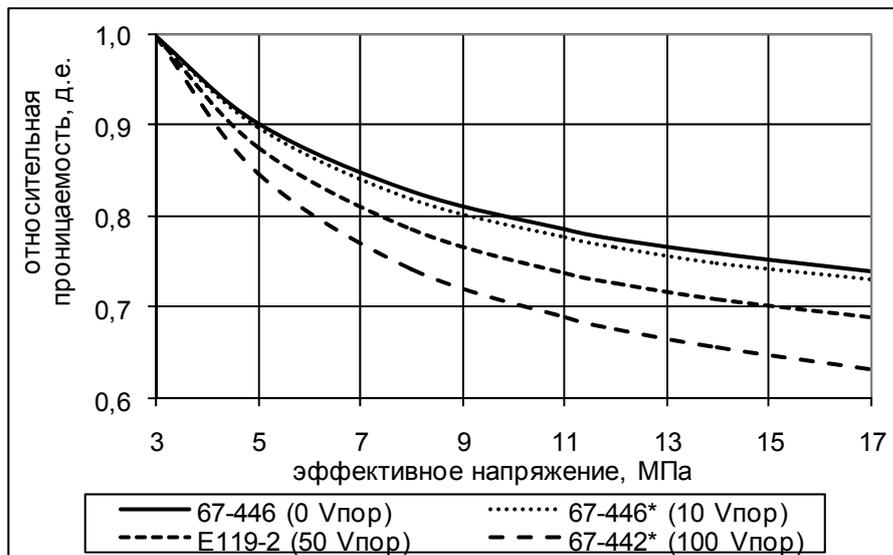


Рис. 6. Изменение относительной проницаемости образцов керна в зависимости от эффективных напряжений после фильтрации кислотного реагента различного порового объема ( $V_{\text{пор}}$ ) (кривые нормированы к значению проницаемости при эффективном напряжении 3 МПа)

Таким образом, разработанная автором методика обработки результатов экспериментальных исследований механико-химических явлений служит основой для построения эмпирических моделей изменения упругих и прочностных свойств, а также моделей проницаемости терригенных пород-коллекторов с участием кислотного

реагента при совместном воздействии кислотного раствора и изменяющихся эффективных напряжений.

***Второе защищаемое положение.** Современный лабораторно-методический комплекс для исследований изменения фильтрационных, упругих и прочностных свойств пласта под воздействием механико-химических эффектов при фильтрации агрессивных жидкостей и изменяющихся эффективных напряжениях. Основные направления повышения информативности промысловых исследований механико-химических явлений при сопряженном влиянии геомеханических нагрузок и нагнетании физико-химически активного флюида.*

Анализ существующих научных трудов, посвященных техногенному изменению ФЕС и ФМС пород-коллекторов, а также лабораторные исследования, проведенные с образцами керна, позволили обосновать и разработать оригинальный лабораторно-методический комплекс для изучения влияния механико-химических эффектов на изменение ФЕС и ФМС коллекторов нефти и газа. Проведение экспериментов включает в себя несколько этапов: 1) предварительный этап исследований (отбор исходного кернового материала, разработка программы исследований, подготовка образцов керна, подготовка физико-химически активных жидкостей); 2) проведение длительных фильтрационных и деформационных экспериментальных исследований; 3) анализ и обработка результатов экспериментов.

Основу комплекса составляют длительные специальные экспериментальные исследования фильтрационных и механических свойств горных пород с применением сертифицированного кислотоустойчивого лабораторного оборудования, позволяющего изучать данные свойства коллектора в пластовых условиях (рис. 7).

При длительных исследованиях на образцы керна одновременно воздействуют эффективные напряжения (постоянные или изменяющиеся) и фильтрация физико-химически активных жидкостей. Длительность экспериментов задается в программе исследований образцов керна и определяется техническими возможностями лабораторного оборудования, а также временем стабилизации величин фильтрационных или механических свойств в процессе проведения эксперимента.

В зависимости от моделируемого экспериментально технологического процесса (ГРП, нагнетание ПАВ или кислотного раствора, воздействие бурового раствора на горные породы и др.) в исследованиях применяются физико-химические жидкости

различного химического состава. Для изучения механизма взаимодействия флюида и скелета породы могут быть отобраны пробы фильтрующейся жидкости и проведен ее химический анализ.

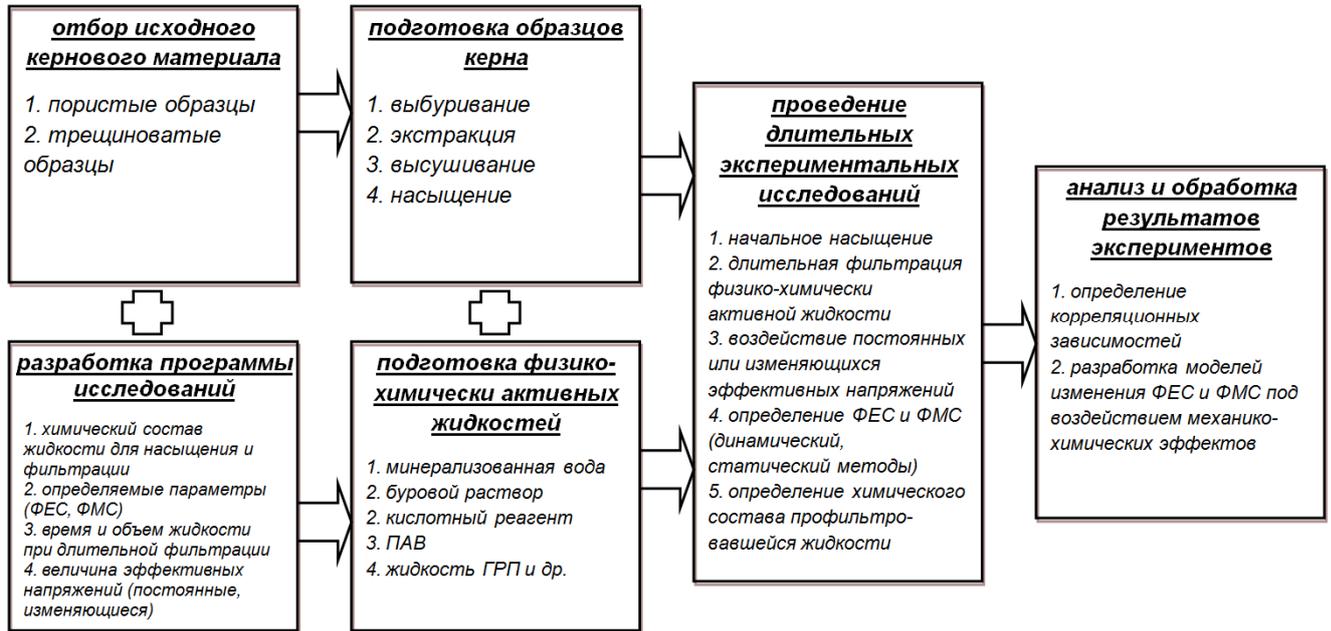


Рис. 7. Схема лабораторно-методического комплекса для исследований изменения фильтрационных, упругих и прочностных свойств пласта под воздействием механико-химических эффектов при фильтрации физико-химически активных жидкостей и варьирующихся эффективных напряжений

На заключительном этапе исследований производится анализ и обработка результатов с целью нахождения корреляционных зависимостей между задаваемыми и определяемыми параметрами и разрабатываются эмпирические модели изменения ФЕС и ФМС пласта под воздействием механико-химических эффектов.

На основе результатов проведенных экспериментов на образцах керна и анализа научных публикаций была разработана принципиальная схема основных направлений повышения информативности промысловых исследований механико-химических явлений при сопряженном влиянии геомеханических нагрузок и нагнетании физико-химически активного флюида (рис. 8).

Показано, что такие эффекты в существенной степени могут влиять на различные процессы, сопровождающие разработку месторождений нефти и газа: бурение скважин, производство ГРП, изменение ФЕС и ФМС пласта при фильтрации физико-химически активных жидкостей (КС, ПАВ, низкоминерализованная вода, буровой раствор и др.), изменение основных технологических показателей работы скважин. Учет механико-химических эффектов на основе предложенных автором направлений повышения

информативности промысловых исследований, в целом, позволит увеличить эффективность разработки нефтяных и газовых месторождений.



Рис. 8. Основные направления повышения информативности промысловых исследований механо-химических явлений при сопряженном влиянии геомеханических нагрузок и нагнетании физико-химически активного флюида

*Третье защищаемое положение. Научное обоснование и методические решения по созданию комплекса аналитических моделей, описывающих: а) изменение проницаемости трещиноватого коллектора при длительной фильтрации пресных вод и изменяющемся напряженном состоянии продуктивного пласта; б) изменение фильтрационно-емкостных свойств гранулярного коллектора в процессе фильтрации пресной воды и при вариациях эффективных напряжений.*

Результаты экспериментальных исследований воздействия механо-химических явлений на фильтрационные свойства образцов керна были обработаны с целью

построения моделей изменения данных свойств при длительной фильтрации воды и изменяющихся напряжениях.

Породу-коллектор *гранулярного типа* можно представить в виде модели, состоящей из сферических частиц (рис. 9). На контактах частиц возникают концентрации напряжений, и ввиду их малой площади здесь имеет место высокий химический потенциал. Поэтому при фильтрации воды преимущественно именно на этих участках происходит растворение твердых частиц породы.

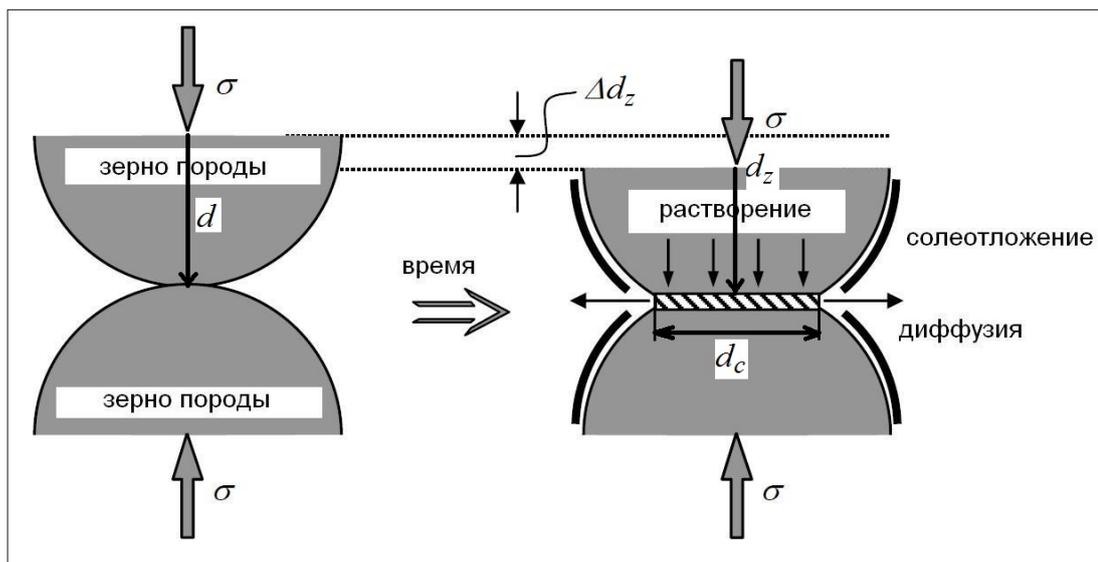


Рис. 9. Схема растворения твердых сферических частиц на контактах

Изменение массы растворенного твердого вещества на контактах частиц с течением времени, по данным Н. Yasuhara, может быть выражено через следующее соотношение:

$$\frac{dM_{diss}}{dt} = \frac{3\pi V_m^2 (\sigma_a - \sigma_c) k_+ \rho_g d_c^2}{4RT}, \quad (3)$$

где производная  $dM_{diss}/dt$  характеризует скорость изменения массы растворенного вещества с течением времени [кг/с];  $V_m$  – молярный объем твердых частиц [м<sup>3</sup>/моль];  $\sigma_a$  – напряжение на контакте [Па];  $\sigma_c$  – критическое напряжение [Па];  $k_+$  – скорость растворения твердых частиц [моль/(м<sup>2</sup>·с)];  $\rho_g$  – плотность твердых частиц породы [кг/м<sup>3</sup>];  $d_c$  – диаметр контакта [м];  $R$  – универсальная газовая постоянная [Дж/(моль·К)];  $T$  – температура системы [К].

С использованием зависимости (3) была построена модель изменения пористости и проницаемости гранулярного терригенного коллектора. Варьируемыми параметрами в

соотношении (3) являются скорость растворения твердых частиц породы  $k_+$  и их диаметр ( $d$ ), влияющий на величину диаметра контакта ( $d_c$ ). При обработке результатов экспериментальных исследований учитывалось, что  $k_+$  является функцией, зависящей не только от эффективных напряжений, но и от времени фильтрации воды. В связи с этим, для описания изменения данной величины на основе лабораторных экспериментов использовалась следующая зависимость:

$$k_+ = a \left( 1 - \frac{t}{b + t} \right), \quad (4)$$

где  $t$  – время фильтрации воды [с];  $a$  – варьируемый коэффициент [моль/(м<sup>2</sup>·с)];  $b$  – варьируемый коэффициент [с].

Было установлено, что коэффициенты  $a$  и  $b$  для используемой модели зависят от средних прикладываемых эффективных напряжений:

$$a = a_1 \sigma_{cp}, \quad (5)$$

$$b = -b_1 \sigma_{cp} + b_2, \quad (6)$$

где  $a_1$  – варьируемый коэффициент [моль/(МПа·м<sup>2</sup>·с)];  $b_1$  – варьируемый коэффициент [с·МПа<sup>-1</sup>];  $b_2$  – варьируемый коэффициент [с];  $\sigma_{cp}$  – среднее эффективное напряжение [МПа].

После адаптации модели на основе этих величин строились графики изменения фильтрационно-емкостных свойств гранулярного терригенного коллектора в относительных единицах (рис. 10). Полученные аналитические зависимости изменения пористости и проницаемости гранулярного коллектора использовались в дальнейшем при численном моделировании техногенных изменений околоскважинной зоны нагнетательной скважины и динамики ее приемистости.

Механизм растворения породы на контактах может быть применен и для описания изменения проницаемости *трещиноватой* горной породы-коллектора, находящейся под воздействием фильтрации воды и изменяющихся эффективных напряжений. В таком случае контакты стенок трещины представляются в виде окружностей различного диаметра (рис. 11).

Общая площадь таких контактов характеризуется безразмерным коэффициентом площади контактов ( $R_c$ ), который определяется через отношение суммарной площади

всех контактов стенок трещины на текущий момент времени ( $A_c^t$ ) к площади сечения трещины ( $A_t^t$ ):

$$R_c = \frac{A_c^t}{A_t^t} \quad (7)$$

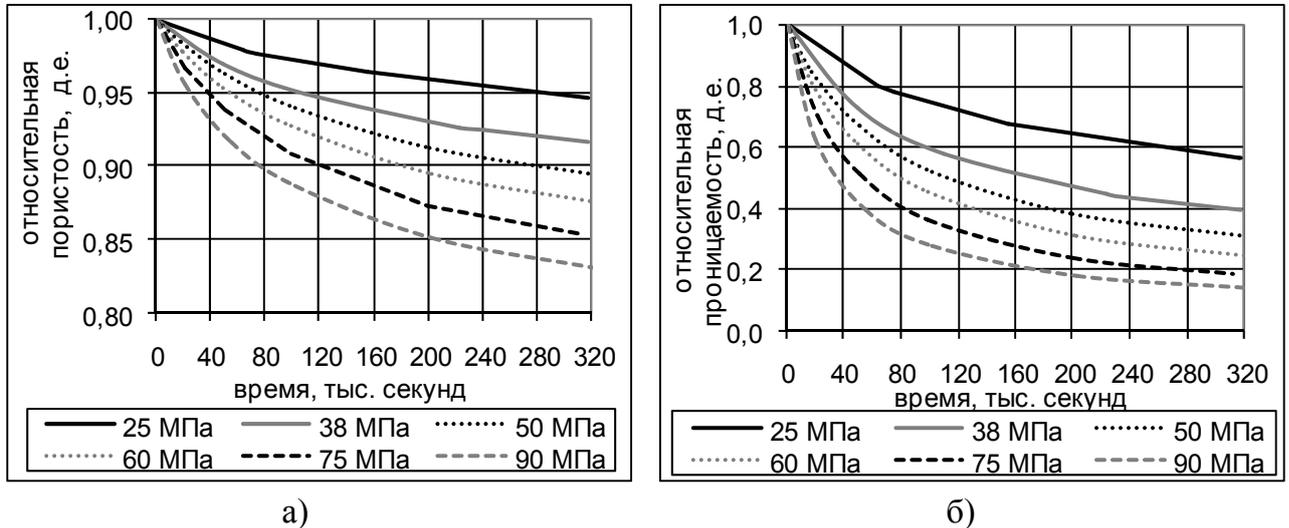


Рис. 10. Модельное изменение относительной пористости (а) и относительной проницаемости (б) образцов керна в зависимости от эффективных напряжений

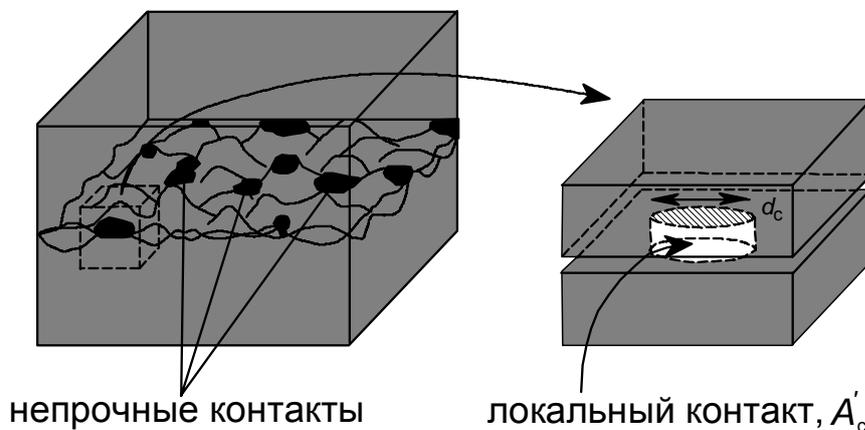


Рис. 11. Идеализированное представление контакта. Площадь, показанная в виде  $A_c^t$  (в правой части), представляет собой площадь контакта соприкосновения стенок трещины из левой части рисунка

Коэффициент площади контактов определялся на основе экспериментальных исследований образцов керна с трещиной. Данный параметр имеет тесную связь со средней или гидравлической шириной трещины, которая, в свою очередь, вычислялась через проницаемость трещины. Наиболее близко зависимость ширины трещины от коэффициента площади контактов описывает следующее соотношение (Н. Yasuhara):

$$b = a_1 + a_2 e^{\frac{R_{c0} - R_c}{a_3}}, \quad (8)$$

где  $b$  – ширина трещины [мкм];  $R_{c0}$  – начальный (минимальный) коэффициент площади контактов [д.е.];  $a_1$  – варьируемый коэффициент [мкм];  $a_2$  – варьируемый коэффициент [мкм];  $a_3$  – безразмерный варьируемый коэффициент [ед.].

С использованием соотношений (3), (7), (8) обрабатывались результаты экспериментов с трещиноватыми образцами керна. Некоторые из корреляционных соотношений представлены на рис. 12, из которого видно, что с увеличением площади контактов величина ширины трещины стремится к постоянному значению, что говорит о завершении процесса растворения.

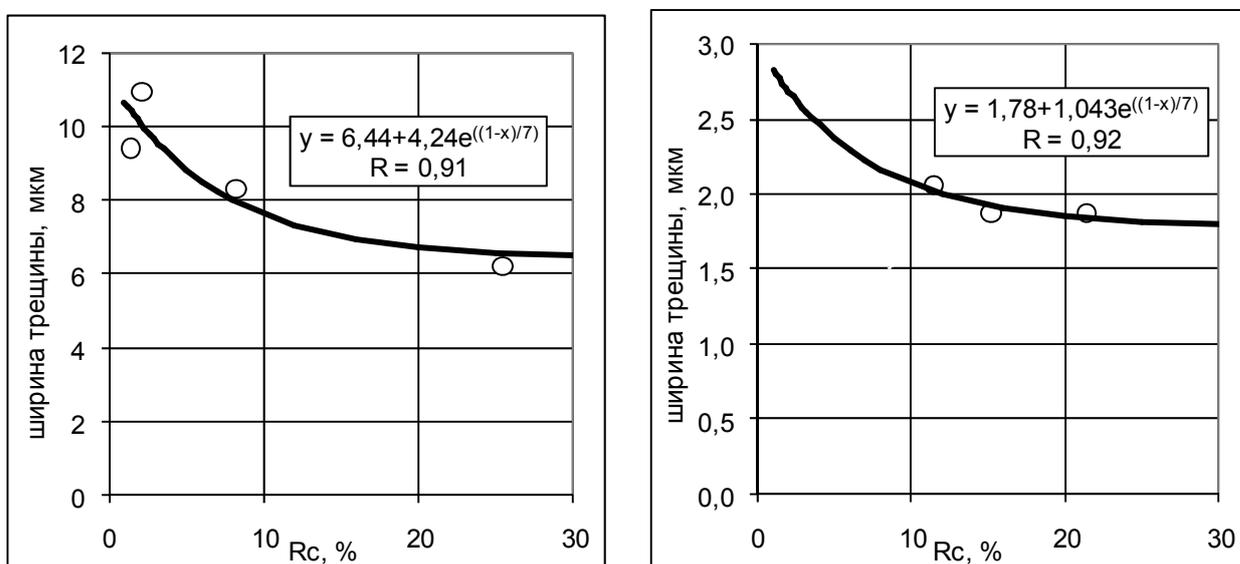


Рис. 12. Изменение ширины трещины в зависимости от коэффициента площади контактов для двух образцов керна

На основе полученных корреляционных зависимостей (см. рис. 12) появляется возможность построения модели изменения ширины трещины в зависимости от объема профильтровавшейся воды и изменяющихся эффективных напряжений.

Однако при обработке результатов экспериментов над образцом с трещиной, находящемся под воздействием циклической нагрузки, было обнаружено, что совокупность соотношений (3), (7), (8) описывает изменение ширины трещины только в сторону ее уменьшения (пластические или необратимые деформации породы), т.е. не может спрогнозировать частичное восстановление проницаемости при уменьшении эффективных напряжений (упругие деформации).

В связи с этим автором диссертации было предложено разделить величину ширины трещины на две составляющие:

$$b = a_1 b_{mech} - a_2 \Delta b_{ps}, \quad (9)$$

где  $b_{mech}$  – механическая (упругая) составляющая ширины трещины [мкм];  $\Delta b_{ps}$  – уменьшение ширины трещины под воздействием растворения [мкм];  $a_1$  и  $a_2$  – определяемые безразмерные коэффициенты.

Коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$  вычисляются таким образом, чтобы отклонение экспериментальной динамики ширины трещины от модельной было минимальным. На рис. 13 для примера показано экспериментальное и расчетное изменение ширины трещины в зависимости от времени эксперимента. Хорошо видно довольно близкое совпадение значений данного параметра, полученных в результате лабораторных исследований и на основе модели изменения ширины трещины, включающей механическую (упругую) и механико-химическую (пластическую) составляющие.

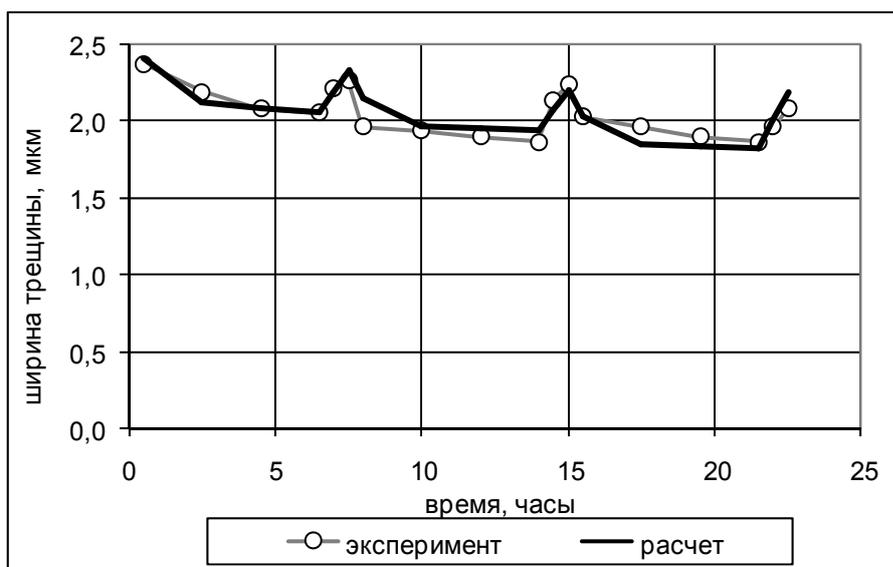


Рис. 13. Изменение экспериментального и расчетного значений ширины трещины в зависимости от времени эксперимента

Разработанные модели изменения ФЕС трещиноватых и гранулярных коллекторов при длительной фильтрации физико-химически активных жидкостей и изменяющихся эффективных напряжениях были использованы автором для численного моделирования околоскважинной зоны продуктивного пласта.

**Четвертое защищаемое положение.** *Научное обоснование, комплекс методических решений и алгоритмов численного моделирования околоскважинной зоны*

*продуктивного пласта, находящейся под воздействием физико-химически активных флюидов и меняющихся эффективных напряжений.*

На основе моделей техногенного изменения ФЕС и ФМС пород-коллекторов под воздействием механико-химических явлений, описанных ранее, было выполнено численное моделирование изменения пористости и проницаемости гранулярного терригенного коллектора в околоскважинной зоне. Специально разработанный алгоритм расчета процессов пороупругости и фильтрации жидкости в динамике позволили определить геометрические параметры гранулярных сферических частиц в процессе уплотнения породы.

Для расчетов использовалась осесимметричная конечно-элементная схема околоскважинной зоны нагнетательной скважины, радиус которой задавался равным 0.108 м, радиус контура питания – 250 м. В связи с тем, что скорость растворения в воде частиц терригенной породы весьма низкая и существенно зависит от температуры системы, были получены варианты расчетов при разном времени нагнетания воды и температуры. Очевидным является тот факт, что максимальное снижение фильтрационно-емкостных свойств будет происходить при максимальной температуре и наибольшем времени фильтрации жидкости.

На рис. 14 для примера приведено изменение абсолютной и относительной проницаемости в околоскважинной зоне при температуре 100 °С. Видно, что максимальное снижение проницаемости пласта достигает 30% и происходит при наибольшем времени фильтрации нагнетаемой жидкости, т.е. когда она достигает контура питания.

Также следует обратить внимание на то, что максимум снижения данного параметра находится не на стенке скважины, а на некотором удалении от него (несколько метров), что связано с неравномерным распределением эффективных напряжений в околоскважинной зоне и изменяющейся областью фильтрации воды.

На рис. 15 показано изменение относительного коэффициента приемистости скважины в зависимости от времени нагнетания воды и различной температуры системы. В данном случае максимальное снижение приемистости скважины также соответствует максимальной температуре и составляет около 12%. Следует ожидать более существенного снижения проницаемости и приемистости нагнетательных

скважин для гранулярного карбонатного коллектора, более подверженного процессам растворения.

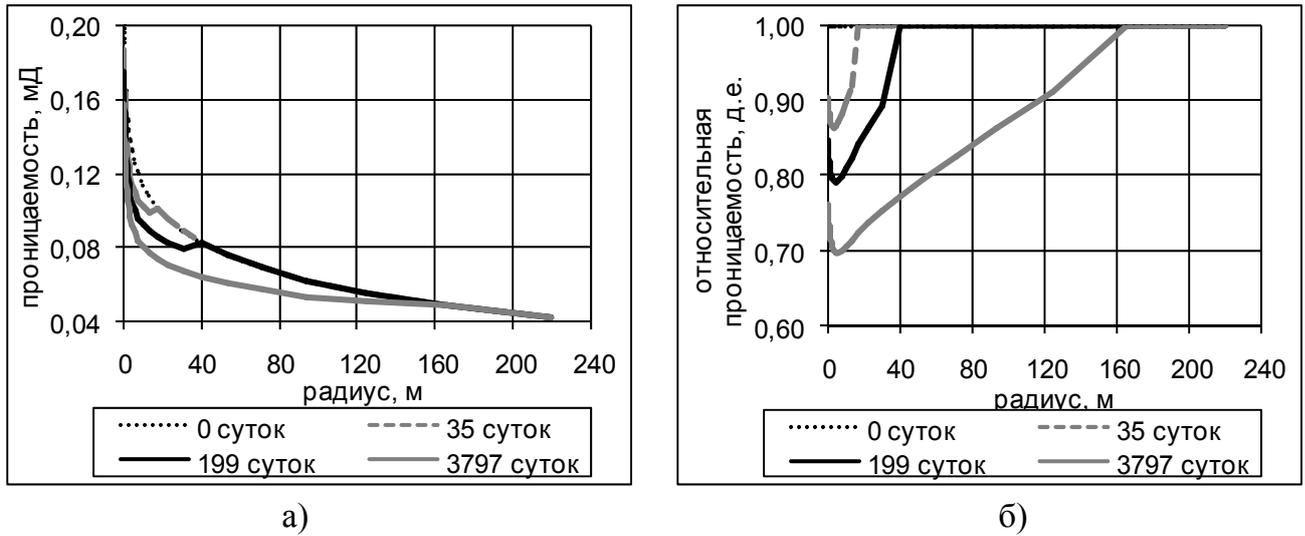


Рис. 14. Изменение абсолютной (а) и относительной (б) проницаемости коллектора вдоль радиальной координаты, в зависимости от времени фильтрации нагнетаемой воды при температуре 100 °С

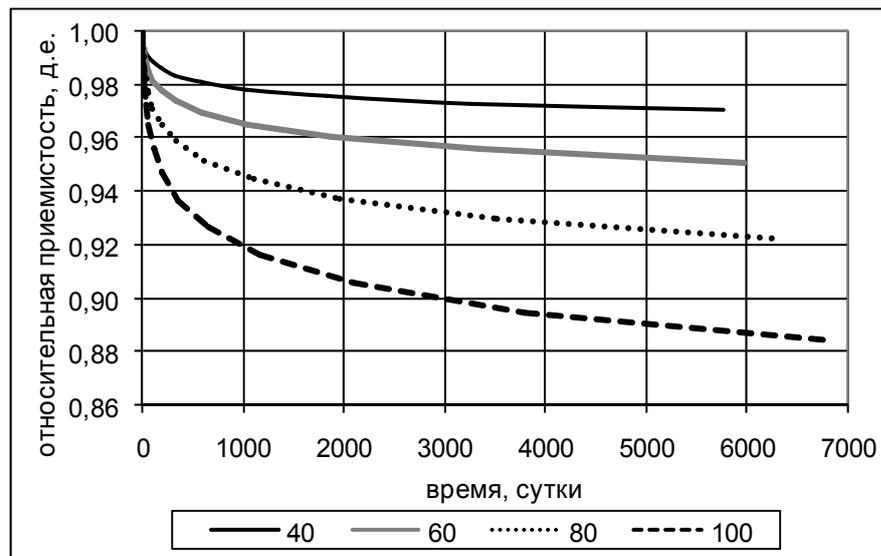


Рис. 15. Изменение относительной приемистости скважины в зависимости от времени нагнетания воды и температуры (°С)

На следующем этапе выполнено численное моделирование изменений околоскважинной зоны терригенного коллектора порового типа под воздействием кислотного реагента. Для этого использовались аналитические соотношения изменения модуля упругости и коэффициента Пуассона в зависимости от прокачанных поровых объемов кислотного реагента, а также модель изменения проницаемости при совместном воздействии изменяющихся эффективных напряжений и различных

объемов нагнетаемой глинокислоты, полученные ранее. Как и в предыдущем расчете, для моделирования околоскважинной зоны использовалась осесимметричная конечно-элементная схема с такими же геометрическими характеристиками.

Моделирование осуществлялось по специально разработанному алгоритму, который включал поочередное решение задач пороупругости и фильтрации жидкости, а также пересчет упругих свойств и проницаемости на каждый момент времени фильтрации кислоты в зависимости от ее объема.

В связи с тем, что при увеличении объема прокачиваемого глинокислотного реагента меняются упругие характеристики коллектора, как следствие, должно меняться и его напряженное состояние и проницаемость. На рис. 16 представлено изменение модуля упругости и коэффициента Пуассона в процессе закачки кислотного реагента вдоль радиальной координаты. Хорошо видно, что происходит весьма существенное уменьшение модуля упругости – более чем в десять раз и увеличение коэффициента Пуассона более чем в два раза.

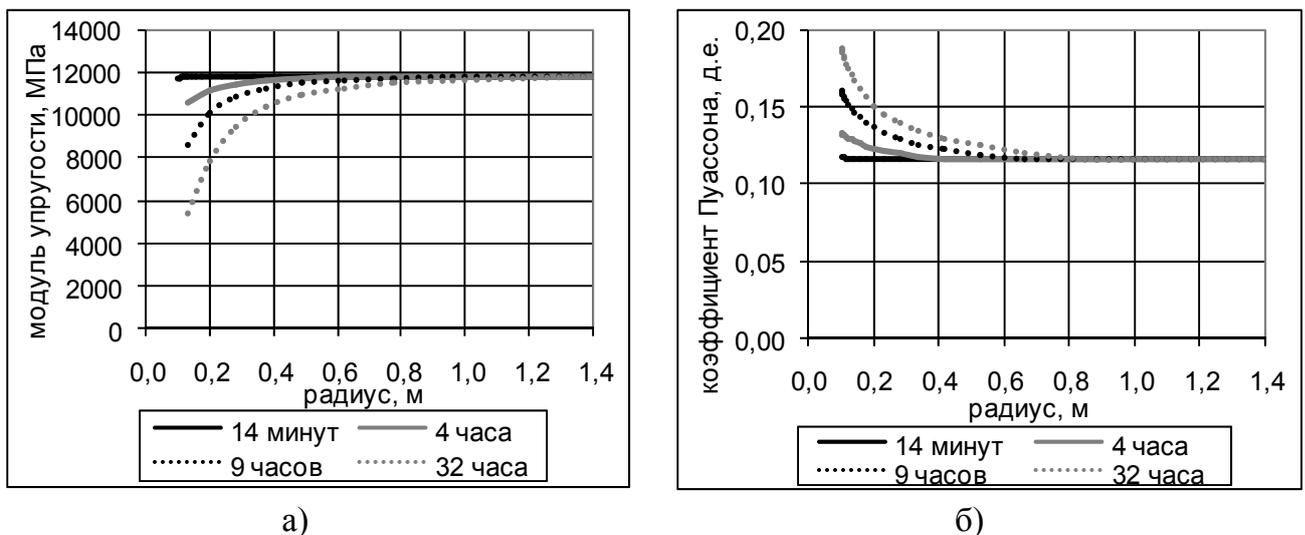


Рис. 16. Изменение модуля упругости (а) и коэффициента Пуассона (б) пород-коллекторов в околоскважинной зоне вдоль радиальной координаты в зависимости от времени нагнетания кислотного реагента с репрессией 5 МПа

Установленные закономерности можно рассматривать как явление ослабления напряженного состояния в околоскважинной зоне. Ослабление происходит за счет влияния кислотных составов на деформационные свойства.

Как уже отмечалось, следствием фильтрации глинокислоты и изменения напряженного состояния околоскважинной зоны является изменение проницаемости коллектора. В результате моделирования было получено, что при существующих

объемах закачки кислотного реагента проницаемость околоскважинной зоны может снизиться более чем на 10% (рис. 17). Полученные результаты влияния кислотного реагента на упругие свойства породы-коллектора и на его проницаемость необходимо учитывать при производстве и проектировании операции ГРП, т.к. вышеприведенные факторы могут оказывать весьма существенное воздействие на эффективность данного геолого-технологического мероприятия и параметры трещин гидроразрыва.

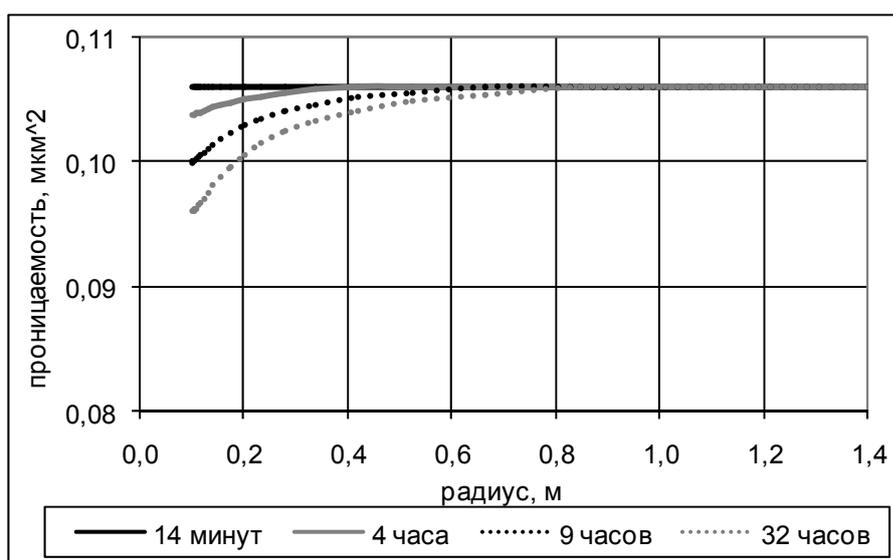


Рис. 17. Изменение проницаемости пород-коллекторов в околоскважинной зоне в зависимости от времени нагнетания кислотного реагента с репрессией 3 МПа вдоль радиальной координаты

Далее было проведено моделирование изменения коэффициента продуктивности добывающей скважины в зависимости от депрессии до и после проведения кислотной обработки околоскважинной зоны. Для этого использовались зависимости (1) и (2), полученные ранее. Результаты моделирования представлены на рис. 18. Как видно из рис. 18, после воздействия кислотным реагентом происходит снижение коэффициента продуктивности добывающей скважины при одинаковых депрессиях на величину 10–11%.

Для анализа влияния анизотропии на техногенные изменения пласта использовалась модель трещинного коллектора с разнонаправленной системой трещин. Предполагалось, что в пласте имеются две системы вертикальных трещин, направленных ортогонально друг другу. Начальная ширина трещин одинаковая. Для моделирования околоскважинной зоны трещиноватого коллектора строилась плоская конечно-элементная схема в виде сектора круга с углом  $90^\circ$  и радиусом 250 м с круглым вырезом в углу сектора, имитирующего скважину с радиусом 0,108 м.

Для реализации модели был разработан специальный алгоритм с последовательным циклическим расчетом процессов пороупругости и фильтрации воды. Помимо этого, в алгоритме учитывалась модель изменения ширины трещин при совместном воздействии фильтрации воды и изменяющихся эффективных напряжений.

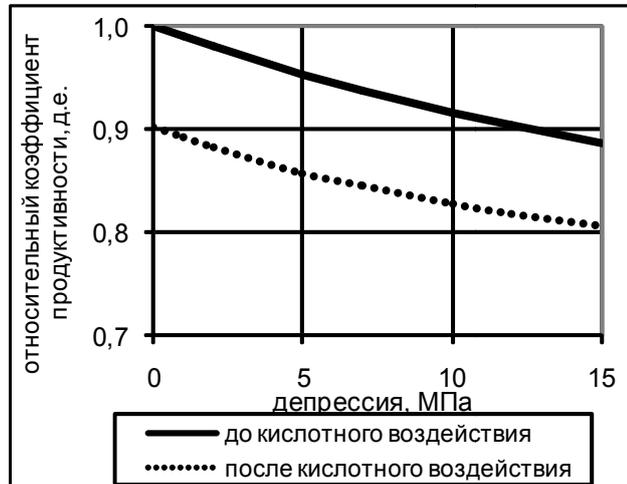


Рис. 18. Изменение относительного коэффициента продуктивности добывающей скважины в зависимости от депрессии до и после кислотного воздействия

В результате расчетов получена динамика проницаемости для каждой системы трещин с учетом времени нагнетания воды от ее начальной области фильтрации до конечной границы моделируемой области (т.е. достижения контура питания). На рис. 19, 20 представлена динамика снижения проницаемости одной из систем трещин, направленных вдоль оси  $x$  (см. рис. 19,а) в зависимости от времени.

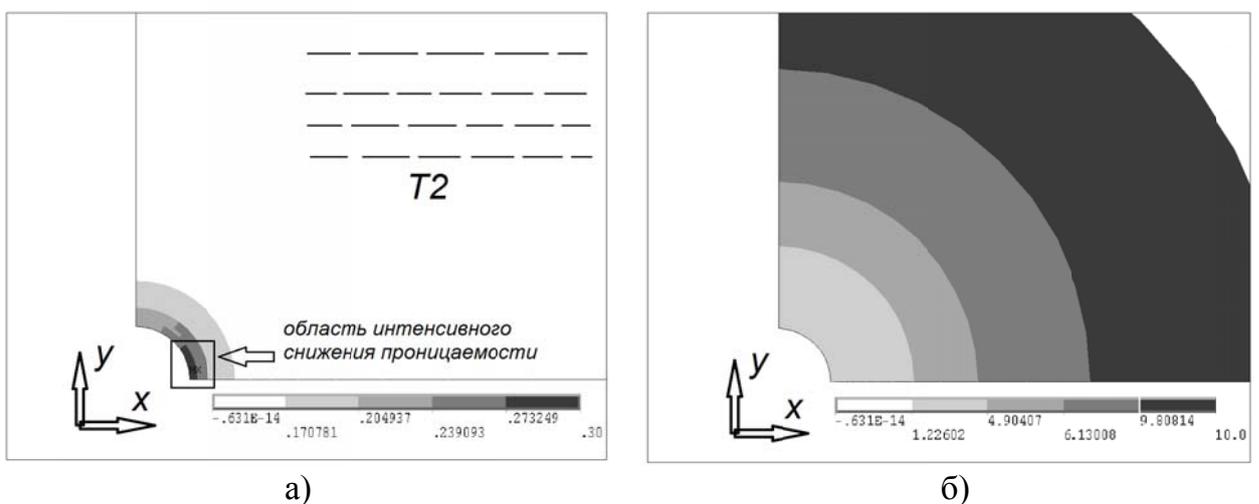


Рис. 19. Динамика величины снижения проницаемости (мД) для одной из вертикальных систем трещин вдоль оси  $x$  с течением времени: а) через 25 минут; б) через 1 сутки

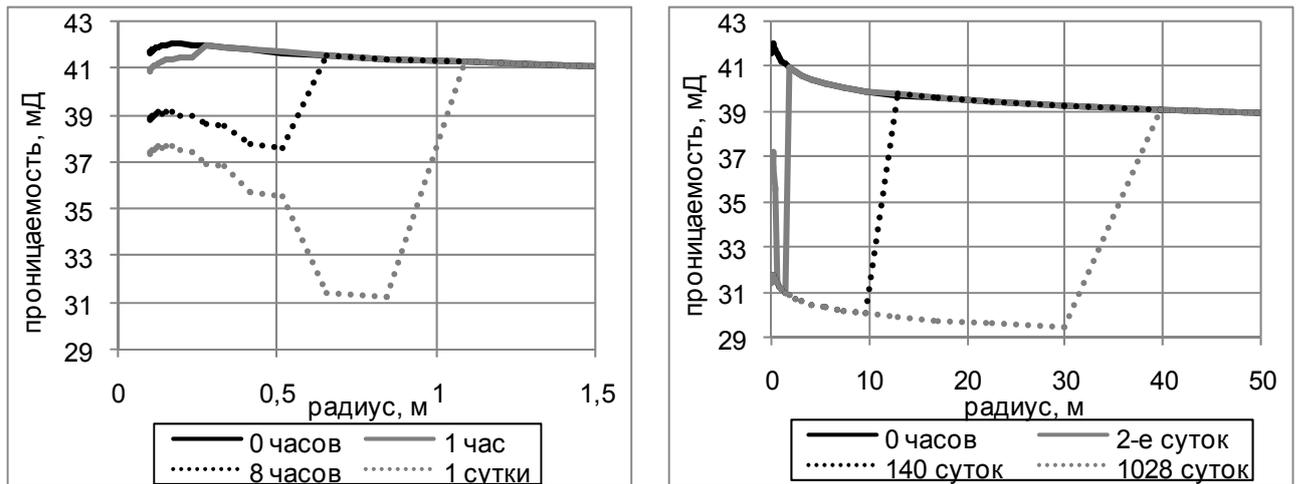


Рис. 20. Динамика проницаемости для одной из вертикальных систем трещин вдоль оси  $x$  (см. рис. 19) с течением времени

В начальный период времени максимальное снижение проницаемости наблюдается на правом участке стенки скважины (см. рис. 19,а), что связано с максимальными напряжениями для данной системы трещин в этой области. Однако затем изменение проницаемости происходит достаточно равномерно вдоль радиальной координаты и имеет максимальное значение на границе области фильтрации нагнетаемой воды (см. рис. 19,б).

Более наглядно такой результат виден в том случае, когда проницаемость по данной системе трещин представлена в виде графиков-сечений вдоль координаты  $x$ . Из рис. 20 видно, что предельное снижение проницаемости в околоскважинной зоне достигается примерно через сутки после начала нагнетания воды. В дальнейшем, с каждым расчетным шагом проницаемость на границе области фильтрации резко снижается до предельного значения, что связано с большими объемами фильтрующегося флюида и расчетным шагом во времени.

Окончательный результат моделирования представлен динамикой относительной приемистости нагнетательной скважины (рис. 21). Наиболее резко снижение данной характеристики происходит в первые 20 суток нагнетания воды и составляет около 15% от первоначального значения (см. рис. 21). Предельное снижение приемистости скважины достигает 25%. Следует отметить, что максимальное уменьшение приемистости нагнетаемой скважины может быть гораздо больше при других характеристиках изменения проницаемости трещин.

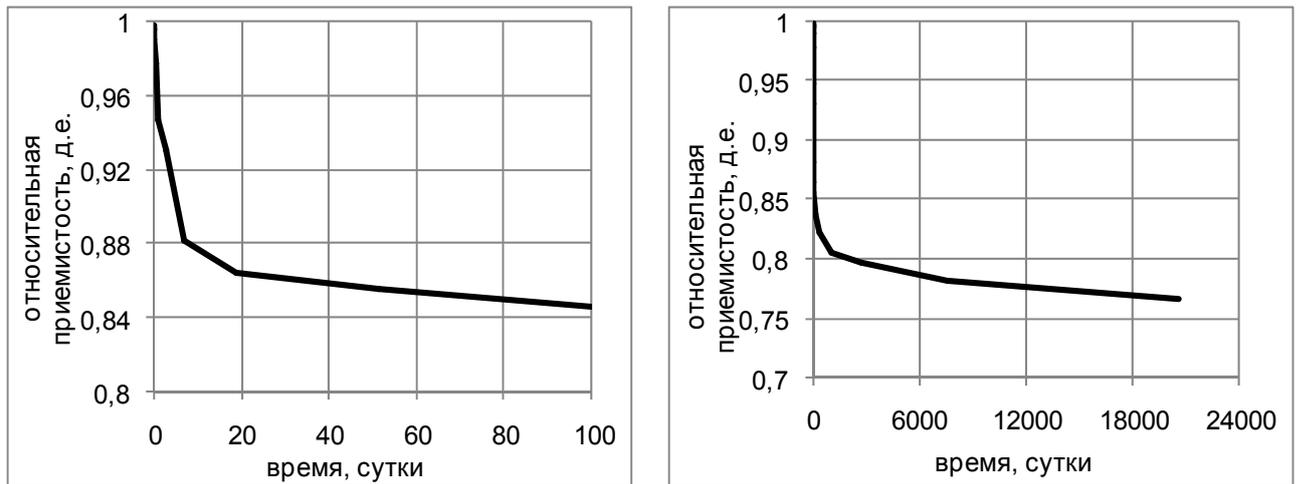


Рис. 21. Динамика относительной приемистости для модельной скважины с течением времени

На заключительном этапе моделирования использовались реальные промысловые данные динамики приемистости нагнетательных скважин, с помощью которых осуществляется закачка пресной воды в терригенные и карбонатные продуктивные объекты (рис. 22). Следует отметить, что при моделировании динамики приемистости нагнетательных скважин принимался во внимание эффект изменения проницаемости только вследствие растворения породы на контактах при совместном воздействии фильтрации воды и эффективных напряжений, т.е. не учитывались эффекты изменения ФЕС под воздействием механических примесей в воде, засорения околоскважинной зоны и других механизмов снижения проницаемости.

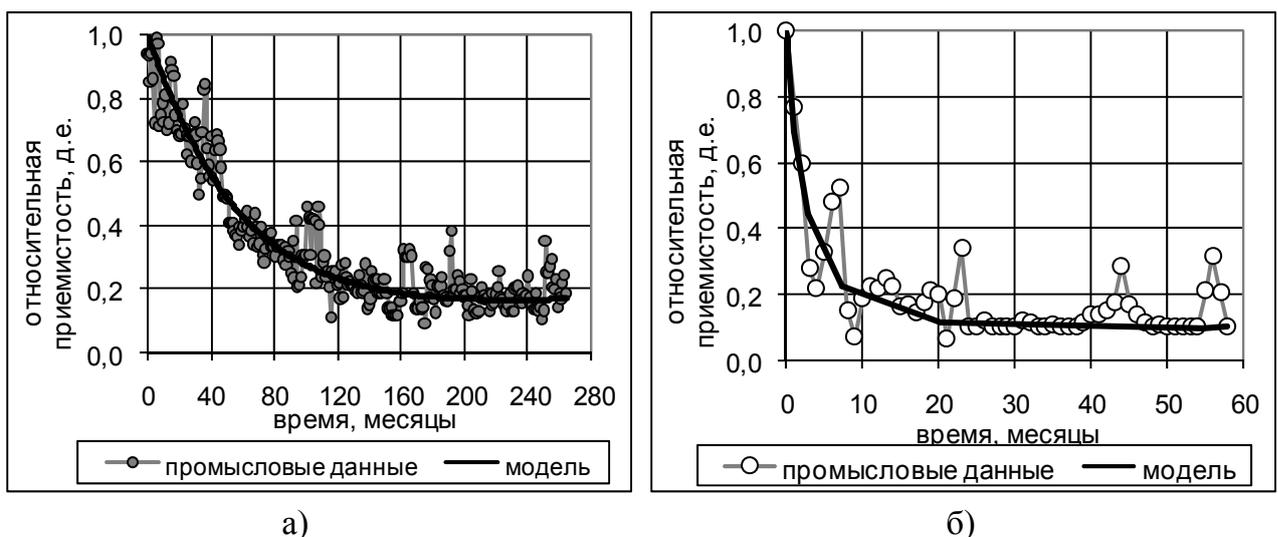


Рис. 22. Реальная и модельная динамика относительной приемистости некоторых скважин при нагнетании пресной воды в поровый терригенный (а) и трещиноватый карбонатный (б) коллекторы

Несмотря на это, видно, что модельная динамика приемистости скважин довольно близко совпадает с реальными промысловыми исследованиями. При этом для терригенного порового коллектора (см. рис. 22,а) скорость снижения закачки воды гораздо меньше, чем для карбонатного трещиноватого коллектора (см. рис. 22,б), что вызвано, прежде всего, меньшей скоростью растворения частиц песчаника по сравнению с выступами стенок трещин в карбонатной породе-коллекторе.

Близкое совпадение промысловых и модельных динамик приемистости скважин свидетельствует о достоверности используемых аналитических и численных моделей, алгоритмов и методических подходов при моделировании изменения проницаемости гранулярного и трещиноватого коллекторов с учетом совместного воздействия нагнетаемой воды и эффективных напряжений. Разработанные научно-теоретические методы могут быть использованы при прогнозе изменения фильтрационно-емкостных свойств в околоскважинной зоне нагнетательных скважин, а также динамики их приемистости.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате исследований, проведенных в рамках данной диссертационной работы, дано теоретическое обоснование принципов и методик изучения механико-химических явлений при физико-химических и геомеханических воздействиях на пласты-коллекторы и показано возможное практическое использование результатов экспериментальных работ для повышения эффективности разработки месторождений углеводородов:

1. На примере экспериментов с образцами керна пород-коллекторов, отличающихся по литологии, структуре и геометрии порового пространства, исследованы следствия усиления геомеханических эффектов при совокупном воздействии переменных напряжений и маломинерализованных агентов заводнения карбонатных пород, а также кислотных агентов обработки терригенных коллекторов, выражающиеся в аномальной растворимости и микродеформации участков контактов породы.
2. На основе проведенных лабораторных экспериментов предложен и апробирован современный лабораторно-методический комплекс для исследований изменения фильтрационных, упругих и прочностных свойств

пласта под воздействием механико-химических эффектов при фильтрации физико-химически активных жидкостей и варьирующихся эффективных напряжениях.

3. Результаты лабораторного моделирования механико-химических эффектов позволили разработать принципиальную схему основных направлений повышения информативности промыслово-геологического анализа механико-химических явлений при реализации физико-химических и геомеханических воздействий на пласт, которые включают различные процессы, связанные с разработкой месторождений нефти и газа: бурение скважин, производство ГРП, изменение фильтрационно-емкостных и физико-механических свойств пласта при фильтрации физико-химически активных жидкостей (кислота, ПАВ, низкоминерализованная вода, буровой раствор и др.), изменение основных технологических показателей работы скважин.
4. Разработаны и апробированы аналитические модели, описывающие изменение деформационных свойств, пористости и проницаемости при длительной фильтрации воды или кислотной обработки пласта-коллектора:
  - модель изменения ширины и проницаемости трещин при фильтрации воды в трещиноватом коллекторе и изменяющихся эффективных напряжениях;
  - модель трансформации фильтрационно-емкостных свойств гранулярного коллектора при воздействии механико-химических эффектов в процессе фильтрации пресной воды и вариациях эффективных напряжений;
  - модель изменения физико-механических свойств и проницаемости терригенного коллектора под воздействием кислотного реагента и изменяющегося напряженно-деформированного состояния пласта.
5. Разработаны методики и алгоритмы численного моделирования околоскважинной зоны продуктивного пласта, находящегося под воздействием физико-химически активных флюидов и меняющихся эффективных напряжений, описывающие:
  - влияние механико-химических эффектов на проницаемость, упругие и прочностные свойства, а также напряженно-деформированное состояние продуктивного пласта и продуктивность или приемистость скважин при кислотной обработке околоскважинной зоны терригенного коллектора;

- изменение фильтрационно-емкостных свойств гранулярного коллектора в околоскважинной зоне под воздействием механико-химических эффектов в процессе фильтрации низкоминерализованной воды, позволяющие прогнозировать изменение приемистости нагнетательных или продуктивности высокообводненных добывающих скважин;
- влияние механико-химических эффектов на ширину и проницаемость систем анизотропных трещин при фильтрации низкоминерализованной воды в трещиноватом коллекторе для прогноза изменения приемистости нагнетательных или продуктивности высокообводненных добывающих скважин.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Изменение напряженно-деформированного состояния и фильтрационно-емкостных свойств трещинного продуктивного объекта при щелевой перфорации / Ю. А. Кашников, С. Г. Ашихмин, С. В. Гладышев, С. Н. Попов, С. В. Матяшов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2002. – № 11. – С. 15–21.
2. Численное моделирование индикаторных диаграмм скважин для коллектора трещинно-порового типа / Ю. А. Кашников, С. Г. Ашихмин, С. Н. Попов, А. Ю. Назаров, С. В. Матяшов // Нефтяное хозяйство. – 2003. – № 6. – С. 62–65. – (Scopus).
3. Влияние трещинной проницаемости коллектора на показатели работы скважин АГКМ / Ю. А. Кашников, С. Н. Попов, С. Г. Ашихмин, А. Ф. Ильин, И. В. Алексеева, А. К. Токман // Газовая промышленность. – 2003. – № 9. – С. 56–60.
4. Попов С. Н. Численное моделирование индикаторных диаграмм скважин, вскрывших ачимовские отложения / С. Н. Попов, Ю. А. Кашников // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2005. – № 9–10. – С. 40–44.
5. Попов С. Н. Моделирование динамики дебитов скважин Астраханского газоконденсатного месторождения (ГКМ) с учетом трещинной составляющей проницаемости / С. Н. Попов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2005. – № 9–10. – С. 54–57.
6. Попов С. Н. Газогидродинамическое моделирование и прогноз продуктивности новых скважин восточного участка АГКМ / С. Н. Попов // Известия вузов. Нефть и газ. – 2005. – № 6. – С. 26–34.
7. Изменения фильтрационно-емкостных и физико-механических свойств терригенных коллекторов при продолжительном действии повышенного эффективного давления / Ю. А. Кашников, С. В. Гладышев, С. Н. Попов, О. Ю. Кашников // Известия вузов. Нефть и газ. – 2006. – № 1. – С. 25–32.
8. Исходное напряженное состояние и параметры трещин ГРП терригенных продуктивных объектов севера Пермского Края / Ю. А. Кашников, С. Г. Ашихмин, С. В. Гладышев, С. Н. Попов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2007. – № 10. – С. 46–51.

9. Гладышев С. В. Прогноз напряженно-деформированного состояния горного массива методом конечных элементов при разработке Шершневского месторождения нефти на основе трехмерной геологической модели / С. В. Гладышев, С. Н. Попов, Д. В. Шустов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического института. Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2008. – № 3. – С. 44–54.

10. Прогноз напряженно-деформированного состояния горного массива методом конечных элементов при разработке Шершневского месторождения нефти на основе трехмерной геологической модели / С. В. Гладышев, С. Н. Попов, Д. В. Шустов, В. В. Вальков, А. А. Согорин, В. Б. Терентьев // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2008. – № 8. – С. 55–58.

11. Кашников Ю. А. Гидродинамическое моделирование разработки турнейско-фаменского объекта Шершневского месторождения с учетом геомеханического эффекта деформирования трещин / Ю. А. Кашников, С. Н. Попов, С. В. Гладышев // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2009. – № 10. – С. 50–56.

12. Анализ динамики дебитов скважин, эксплуатирующих турнейско-фаменские продуктивные объекты месторождений севера Пермского края / Ю. А. Кашников, С. Н. Попов, С. В. Гладышев, В. В. Плотников // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2009. – № 10. – С. 56–61.

13. Геомеханические и геодинамические проблемы, сопровождающие разработку месторождений углеводородов / Ю. А. Кашников, С. Г. Ашихмин, С. В. Гладышев, С. Н. Попов // Записки горного института. – 2010. – Т. 188. – С. 153–157.

14. Оптимизация параметров и сроков ввода системы поддержки пластового давления с учетом изменения фильтрационно-емкостных свойств пластов / О. Ю. Кашников, С. В. Гладышев, С. Н. Попов, Ю. А. Кашников // Нефтяное хозяйство. – 2010. – № 5. – С. 80–83. – (Scopus).

15. Попов С. Н. Метод моделирования призабойной зоны скважины, учитывающий изменение проницаемости трещин в зависимости от эффективных напряжений / С. Н. Попов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2011. – № 10. – С. 40–43.

16. Попов С. Н. Моделирование деформаций перфорационных отверстий при различных режимах работы эксплуатационной скважины / С. Н. Попов // Известия вузов. Нефть и газ. – 2011. – № 5. – С. 59–62.

17. Абрамова О. П. Проблемы повышения достоверности компьютерных моделей природного и техногенного солеотложения в геологической среде [Электронный ресурс] / О. П. Абрамова, Л. А. Абукова, С. Н. Попов // Современные проблемы науки и образования : электрон. науч. журн. – 2011. – № 4. – Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=4734>. – (Дата обращения: 22.05.2019).

18. Попов С. Н. Численное моделирование техногенного солеотложения при закачке морской воды в продуктивный пласт на примере месторождения Жетыбай (Казахстан) / С. Н. Попов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2012. – № 2. – С. 48–53.

19. Экспериментальное и численное моделирование взаимодействия пластовых и технических вод при разработке месторождения им. Ю. Корчагина / С. В. Делия, Л. А. Абукова, О. П. Абрамова, Л. А. Анисимов, С. Н. Попов, И. В. Воронцова // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2012. – № 10. – С. 34–41.

20. Особенности взаимодействия коллекторов, пластовых и технических вод при разработке нефтегазоконденсатного месторождения им. Ю. Корчагина / С. В. Делия, Л. А. Абукова, О. П. Абрамова, Л. А. Анисимов, С. Н. Попов, И. В. Воронцова // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 3. – С. 18–22. – (Scopus).

21. Попов С. Н. Геохимическое взаимодействие пластовых и нагнетаемых вод с трещиноватыми карбонатными коллекторами / С. Н. Попов // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 5. – С. 76–79. – (Scopus).

22. Попов С. Н. Определение условий нагружения для лабораторных испытаний цилиндрических образцов керна на основе численного моделирования напряженно-деформированного состояния / С. Н. Попов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2013. – № 5. – С. 40–44.

23. Попов С. Н. Современные возможности компьютерного моделирования процессов солеотложения и выщелачивания при эксплуатации месторождений углеводородов / С. Н. Попов // Известия ВУЗов. Нефть и газ. – 2013. – № 5. – С. 39–43.

24. Попов С. Н. Некоторые особенности влияния взаимодействия карбонатных коллекторов, пластовой и нагнетаемой воды на фильтрационно-емкостные и физико-механические свойства пород / С. Н. Попов // Нефтепромысловое дело. – 2013. – № 5. – С. 25–28.

25. Попов С. Н. Определение поля напряжений в ачимовских отложениях Уренгойского НГКМ на основе анализа и обработки результатов проведения ГРП / С. Н. Попов, А. В. Кошелев, М. Г. Жариков // Газовая промышленность. – 2013. – Спец. вып. № 3/696. – С. 82–86.

26. Попов С. Н. Изменение физико-механических свойств пород ачимовских отложений Уренгойской группы месторождений в зависимости от пористости / С. Н. Попов, Р. Ш. Зарипов, А. В. Паршуков // Газовая промышленность. – 2013. – № 8. – С. 45–47.

27. Попов С. Н. Вариации прочностных свойств пород ачимовских отложений Уренгойской группы месторождений в зависимости от пористости / С. Н. Попов // Нефтепромысловое дело. – 2014. – № 12. – С. 38–42.

28. Попов С. Н. Влияние механохимических эффектов на проницаемость трещин при моделировании циклической закачки воды в карбонатные коллекторы / С. Н. Попов // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 8. – С. 77–79. – (Scopus).

29. Попов С. Н. Разработка геомеханической модели для прогноза изменения фильтрационно-емкостных свойств коллекторов трещинно-порового типа в процессе снижения пластового давления (на примере ачимовских отложений месторождений нефти и газа Крайнего Севера) / С. Н. Попов, С. В. Мазанов, М. Г. Жариков // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2015. – № 6. – С. 47–55.

30. Попов С. Н. Модель изменения фильтрационно-емкостных свойств коллектора трещинно-порового типа при его деформировании в процессе снижения пластового давления (на примере ачимовских отложений месторождений нефти и газа Крайнего Севера) / С. Н. Попов, С. В. Мазанов, М. Г. Жариков // Вестник ЦКР Роснедра. – 2015. – № 3. – С. 17–29.

31. Попов С. Н. Влияние механохимических эффектов на фильтрационно-емкостные и физико-механические свойства пород-коллекторов / С. Н. Попов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2015. – № 8. – С. 49–61.

32. Михайлов Н. Н. Вариации фильтрационно-емкостных и физико-механических свойств пород-коллекторов под воздействием механохимических эффектов / Н. Н. Михайлов, С. Н. Попов // Вестник ЦКР Роснедра. – 2015. – № 3. – С. 30–38.

33. Михайлов Н. Н. Влияние нелинейных эффектов на параметры сжимаемости пород-коллекторов / Н. Н. Михайлов, С. Н. Попов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 3. – С. 50–57.

34. Попов С. Н. Разработка модели изменения проницаемости трещин под воздействием механохимических эффектов при нагнетании воды в карбонатный коллектор / С. Н. Попов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 5. – С. 28–35.

35. Влияние кислотных составов на упруго-прочностные свойства терригенных коллекторов Пермского края / П. Н. Рехачев, В. В. Плотников, Н. Н. Барковский, Д. В. Белоглазов, Н. Н. Михайлов, С. Н. Попов // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 7. – С. 100–104. – (Scopus).

36. Попов С. Н. Исследование компрессионных свойств пород-коллекторов нефтяных месторождений, разрабатываемых ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» / С. Н. Попов, А. С. Кусайко, И. А. Озун // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 7. – С. 31–35.

37. Попов С. Н. Исследование деформационных и прочностных свойств пород-коллекторов нефтяных месторождений, разрабатываемых ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» / С. Н. Попов, А. С. Кусайко, И. А. Озун // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 9. – С. 50–56.

38. The effect of acid treatments on the bottom zone of clastic reservoir rocks of Perm Region / V. V. Plotnikov, P. N. Rehachev, N. N. Barkovsky, N. N. Mikhailov, S. N. Popov // SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition SPE-2016, 24–26 October 2016 : Proceedings. – Moscow, Russia, 2016. – Paper SPE-182063-MS. – 14 p. – <https://doi.org/10.2118/182063-MS>. – (Scopus).

39. Popov S. N. Analysis and processing of the results of laboratory experiments to investigate fracture permeability changes under the influence of mechanochemical effects of water injection into carbonate reservoir / S. N. Popov, N. N. Mikhailov, V. V. Plotnikov // SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition SPE-2016, 24–26 October 2016 : Proceedings. – Moscow, Russia, 2016. – Paper SPE-182068-MS. – 11 p. – <https://doi.org/10.2118/182068-RU>. – (Scopus).

40. Зайцев М. В. Влияние механохимических факторов поражения пласта на производительность скважин / М. В. Зайцев, Н. Н. Михайлов, С. Н. Попов // Нефтепромысловое дело. – 2017. – № 6. – С. 33–38.

41. Попов С. Н. Анализ эффективности ГРП в нагнетательных скважинах (на примере одного из месторождений Северной Африки) / С. Н. Попов, Е. И. Метляев // Нефтепромысловое дело. – 2017. – № 8. – С. 33–38.

42. Попов С. Н. Анализ и обработка результатов экспериментальных исследований проницаемости образцов керна при совместном воздействии кислотного состава и изменяющихся эффективных напряжений / С. Н. Попов, Н. Н. Михайлов, В. В. Плотников // Нефтепромысловое дело. – 2017. – № 8. – С. 38–42.

43. Попов С. Н. Численное моделирование изменения проницаемости и напряженно-деформированного состояния прискважинной зоны продуктивного пласта при совместном воздействии кислотного состава и изменяющихся эффективных напряжений / С. Н. Попов, О. Ю. Сметанников // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2017. – № 12. – С. 45–53.

44. Попов С. Н. Разработка численной модели околоскважинной зоны гранулированного коллектора, учитывающей изменение фильтрационно-емкостных свойств под воздействием нагнетаемой воды и изменяющихся эффективных напряжений / С. Н. Попов, О. Ю. Сметанников // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2018. – № 8. – С. 52–59.

Публикации в других изданиях:

45. Попов С. Н. Численное моделирование индикаторных диаграмм скважин для коллектора трещинно-порового типа / С. Н. Попов, О. Ю. Кашников // XXXI-я научно-практическая конференция горно-нефтяного факультета ПГТУ : тезисы докладов. – Пермь, 2002. – С. 59–60.

46. Попов С. Н. Влияние изменения пластового давления на фильтрационно-емкостные свойства терригенных коллекторов Шершневого месторождения / С. Н. Попов, С. В. Гладышев, О. Ю. Кашников // 75 лет пермской нефти : материалы XXXIII-й научно-практической конференции горно-нефтяного факультета ПГТУ. – Пермь, 2004. – С. 170–173.

47. Попов С. Н. Газогидродинамическое моделирование и прогноз продуктивности новых скважин северо-западного участка Астраханского ГКМ с учетом

изменения проницаемости трещин / С. Н. Попов // СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2006 : тезисы докладов VII-й международной молодежной научной конференции. – Ухта, 2006. – С. 228–232.

48. Кашников О. Ю. Изменения фильтрационно-емкостных и физико-механических свойств терригенных коллекторов при продолжительном действии повышенного эффективного давления / О. Ю. Кашников, С. В. Гладышев, С. Н. Попов // СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2006 : тезисы докладов VII-й международной молодежной научной конференции. – Ухта, 2006. – С. 212–216.

49. Моделирование разработки Астраханского ГКМ с учетом деформирования трещин / Ю. А. Кашников, С. Н. Попов, С. В. Гладышев, А. К. Токман, О. В. Тинакин // Проблемы бассейнового и геолого-гидродинамического моделирования : тезисы докладов научно-практической южнороссийской конференции. – Волгоград, 2006. – С. 89–90.

50. Гладышев С. В. Прогноз напряженно-деформированного состояния горного массива методом конечных элементов при разработке Шершневого месторождения нефти на основе трехмерной геологической модели / С. В. Гладышев, С. Н. Попов, Д. В. Шустов // Проблемы комплексного освоения месторождений полезных ископаемых в Пермском крае : материалы краевой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Пермь, 2007. – С. 174–184.

51. Попов С. Н. Определение параметров трещиноватости пород-коллекторов и моделирование индикаторных диаграмм скважин, эксплуатирующих турнейско-фаменские продуктивные отложения Сибирского, Шершневого и Архангельского месторождений Пермского края / С. Н. Попов // XV-й конкурс научно-технических разработок среди молодежи предприятий и организаций топливно-энергетического комплекса : сборник работ победителей конкурса. – М., 2007. – С. 201–204.

52. Попов С. Н. Разработка совместной геомеханической и гидродинамической модели турней-фаменского объекта Шершневого месторождения с учетом изменения проницаемости трещин / С. Н. Попов, С. В. Гладышев, Ю. А. Кашников // Научные исследования и инновации. – 2010. – Т. 4, № 1. – С. 3–5.

53. Попов С. Н. Влияние деформаций трещин на динамику дебита скважин [Электронный ресурс] / С. Н. Попов // Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика :

электрон. науч. журн. – 2011. – Вып. 1(3). – Режим доступа: [http://oilgasjournal.ru/vol\\_3/popov.html](http://oilgasjournal.ru/vol_3/popov.html). – (Дата обращения: 22.05.2019).

54. Попов С. Н. Определение зон трещиноватости пласта на основе акустического широкополосного каротажа / С. Н. Попов // География, геоэкология, геология: опыт научных исследований : материалы VIII-й международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Киев, 2011. – С. 48–49.

55. Попов С. Н. Некоторые особенности гидродинамического моделирования продуктивных объектов трещинно-порового типа на примере месторождений севера Пермского края / С. Н. Попов // Актуальные вопросы проектирования разработки месторождений углеводородов : материалы II-го научно-технического семинара. – М. : ГАЗПРОМ ВНИИГАЗ, 2011. – С. 9.

56. Попов С. Н. Численное моделирование влияния солеотложений на фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов / С. Н. Попов // Фундаментальные проблемы разработки месторождений нефти и газа : материалы всероссийской конференции с международным участием. – М., 2011. – С. 53.

57. Попов С. Н. Некоторые особенности моделирования индикаторных диаграмм скважин, вскрывших коллектор трещинно-порового типа / С. Н. Попов // Новые Подходы и Достижения в науках о Земле : материалы 4-ой международной конференции молодых ученых и студентов. – Баку : Институт геологии Национальной Академии наук Азербайджана, 2011. – 2 с.

58. Попов С. Н. Современные возможности прогноза техногенного солеотложения при разработке месторождений углеводородов [Электронный ресурс] / С. Н. Попов, Г. Ю. Исаева // Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика : электрон. науч. журн. – 2011. – Вып. 2(4). – Режим доступа: [http://oilgasjournal.ru/vol\\_4/popov.html](http://oilgasjournal.ru/vol_4/popov.html). – (Дата обращения: 22.05.2019).

59. Попов С. Н. Прогноз влияния техногенного солеотложения на фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов на основе совместного гидродинамического и геохимического моделирования [Электронный ресурс] / С. Н. Попов // Конференция, посвященная 25-летию со дня основания ИПНГ (молодежная секция) : тезисы докладов. – М. : Институт проблем нефти и газа РАН, 2012. – Режим доступа: <http://ipng.ru/publications/confarticles/3970>. – (Дата обращения: 22.05.2019).

60. Попов С. Н. Численное моделирование взаимодействия пластовых и технических вод на примере лабораторного эксперимента / С. Н. Попов // Актуальные проблемы геологии, планетологии и геоэкологии: материалы всероссийской молодежной конференции. – Новочеркасск : Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт), 2012. – 17–18 с.

61. Попов С. Н. Влияние взаимодействия пластовых и технических вод на фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов (на основе экспериментального и численного моделирования) / С. Н. Попов // Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность: материалы IV-й научно-практической конференции. – М. : ГАЗПРОМ ВНИИГАЗ, 2012. – С. 17.

62. Попов С. Н. Лабораторные исследования влияния взаимодействия карбонатных коллекторов, пластовой и нагнетаемой воды на фильтрационно-емкостные и физико-механические свойства пород / С. Н. Попов // II-я Ежегодная Конференция молодых специалистов ИПНГ РАН: тезисы докладов. – М. : Институт проблем нефти и газа РАН, 2012. – С. 10–11.

63. Прогноз взаимодействия коллекторов, пластовых и технических вод при разработке нефтегазоконденсатного месторождения им. Ю. Корчагина [Электронный ресурс] / Л. А. Абукова, О. П. Абрамова, С. Н. Попов, Л. А. Анисимов // Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика: электрон. науч. журн. – 2012. – Вып. 2(6). – Режим доступа: [http://oilgasjournal.ru/vol\\_6/abukova.html](http://oilgasjournal.ru/vol_6/abukova.html). – (Дата обращения: 22.05.2019).

64. Попов С. Н. Численное моделирование влияния солеотложений на фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов [Электронный ресурс] / С. Н. Попов // Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика: электрон. науч. журн. – 2012. – Вып. 1(5). – Режим доступа: [http://oilgasjournal.ru/vol\\_5/popov.html](http://oilgasjournal.ru/vol_5/popov.html). – (Дата обращения: 22.05.2019).

65. Кошелев А. В. Определение напряженного состояния ачимовских отложений Уренгойского НГКМ на основе анализа и обработки результатов проведения ГРП / А. В. Кошелев, М. Г. Жариков, С. Н. Попов // Приоритетные направления развития Уренгойского комплекса: сборник научных трудов. – М. : Недра, 2013. – С. 186–196.

66. Зарипов Р. Ш. Анализ и обработка результатов лабораторных исследований физико-механических свойств образцов керна ачимовских отложений месторождений Уренгойского комплекса / Р. Ш. Зарипов, С. Н. Попов, А. В. Паршуков // Приоритетные

направления развития Уренгойского комплекса : сборник научных трудов. – М. : Недра, 2013. – С. 196–202.

67. Попов С. Н. Геохимические и геомеханические эффекты, возникающие при взаимодействии пластовых и нагнетаемых вод с трещинными карбонатными коллекторами / С. Н. Попов // Проблемы геологии и освоения недр : материалы XVII-го международного научного симпозиума студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова. – Томск, 2013. – С. 317–318.

68. Попов С. Н. Некоторые особенности изменения фильтрационно-емкостных и физико-механических свойств карбонатных пород-коллекторов под воздействием нагнетаемой воды и циклической нагрузки / С. Н. Попов // Трофимуковские чтения-2013 : материалы всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых. – Новосибирск, 2013. – С. 349–352.

69. Попов С. Н. Некоторые особенности упругих и прочностных свойств ачимовских отложений Уренгойской группы месторождений / С. Н. Попов // Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность : материалы V-й международной молодежной научно-практической конференции. – М. : ГАЗПРОМ ВНИИГАЗ, 2013. – С. 47.

70. Попов С. Н. Изменение упругих и прочностных свойств ачимовских отложений Уренгойской группы месторождений в зависимости от пористости / С. Н. Попов // III-я Ежегодная Конференция молодых специалистов ИПНГ РАН : тезисы докладов. – М. : Институт проблем нефти и газа РАН, 2013. – С. 34–36.

71. Попов С. Н. Разработка геомеханической модели деформирования ачимовских отложений Уренгойского НГКМ с позиции коллектора трещинно-порового типа / С. Н. Попов // Моделирование газовых и нефтегазоконденсатных месторождений : материалы молодежной научно-практической конференции. – М. : ГАЗПРОМ ВНИИГАЗ, 2014. – С. 50.

72. Михайлов Н. Н. Экспериментальные и теоретические исследования влияния механохимических эффектов на фильтрационно-емкостные, упругие и прочностные свойства пород-коллекторов [Электронный ресурс] / Н. Н. Михайлов, С. Н. Попов // Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика : электрон. науч. журн. – 2015. – Вып. 1(11). – Режим доступа: [http://oilgasjournal.ru/vol\\_11/popov.html](http://oilgasjournal.ru/vol_11/popov.html). – (Дата обращения: 22.05.2019).

73. Абукова Л. А. Некоторые особенности экспериментального и численного моделирования взаимодействия коллекторов, пластовых и технических вод при разработке одного из месторождений УВ шельфа Каспийского моря / Л. А. Абукова, О. П. Абрамова, С. Н. Попов // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы II-й всероссийской научной конференции с международным участием. – Владивосток, 2015. – С. 175–178.

74. Михайлов Н. Н. Проявление механохимических эффектов при экспериментальном моделировании нагнетания воды в трещиноватые карбонатные коллекторы / Н. Н. Михайлов, С. Н. Попов // Нефтепромысловая химия: материалы II-й международной научно-практической конференции. – М., 2015. – С. 94–97.

75. Михайлов Н. Н. Влияние механохимических эффектов на фильтрационно-емкостные и физико-механические свойства пород при экспериментальном моделировании нагнетания воды в трещиноватые карбонатные коллекторы / Н. Н. Михайлов, С. Н. Попов // Теория и практика применения методов увеличения нефтеотдачи пластов: материалы V-го международного научного симпозиума. – М., 2015. – С. 21.

76. Михайлов Н. Н. Лабораторные исследования влияния кислотной обработки продуктивного пласта на его физико-механические свойства и проницаемость / Н. Н. Михайлов, В. В. Плотников, С. Н. Попов // Geopetrol 2016: труды X-й международной научно-технической конференции. – Польша, Закопане, 2016. – С. 773–777.

#### Патенты:

77. Способ исследования проницаемости образцов кернa с трещинами. Патент РФ №2620872 / Попов С.Н., Михайлов Н.Н.

78. Способ исследования влияния кислотных обработок на свойства пород-коллекторов. Патент РФ №2620323 / Попов С.Н., Михайлов Н.Н. Плотников В.В.

79. Способ исследования пористости и проницаемости образцов кернa. Патент РФ №2625536 / Попов С.Н.