

На правах рукописи

УДК 532.546

Кузьмичев Алексей Николаевич

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ  
АНИЗОТРОПНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

Специальность

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена на кафедре нефтегазовой и подземной гидромеханики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М.Губкина»

**Научный руководитель:**

**Дмитриев Николай Михайлович**, доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Кузнецов Александр Михайлович**, доктор технических наук, ОАО НК «Роснефть», заместитель начальника управления Департамента научно-технического развития и инноваций

**Сагомонян Елена Артуровна**, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», доцент

**Ведущая организация:**

ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий - ВНИИГАЗ» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)

Защита состоится 8 декабря 2015г. в 15:00 час на заседании Диссертационного Совета Д.212.200.03 РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, дом 65, в аудитории 232.

Автореферат разослан «6» ноября 2015 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук, доцент

Кравченко М.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертационной работы

Проблема определения фильтрационно-емкостных свойств анизотропных сред относится к числу важнейших, так как, практически все реальные коллекторы углеводородного сырья, особенно с трудноизвлекаемыми запасами, проявляют анизотропию фильтрационно-емкостных свойств. Выявление, определение и учет анизотропии фильтрационных свойств требует как привлечения более сложных математических моделей описания фильтрационных течений, так и необходимости разработки и применения новых методик по лабораторному определению анизотропных характеристик пласта, коллектора углеводородного сырья.

Учет анизотропии фильтрационных свойств горных пород и применение новых методик лабораторного определения анизотропных фильтрационно-емкостных свойств позволит более адекватно описывать физические процессы, протекающие в пласте, и получить экспериментально тензорные характеристики коллекторов углеводородов.

Определение тензоров абсолютной, относительной и относительной фазовой проницаемости значительно повысит информативность и достоверность моделирования, применения различных методов повышения углеводородотдачи пластов и разработки месторождения в целом, а определение таких тензорных характеристик, как просветность, тензор характерных линейных размеров, функция распределения пор по радиусам, позволят определить структуру порового пространства коллектора. Что в свою очередь позволит улучшить показатели разработки, например, увеличить коэффициент извлечения углеводородов, выбрать оптимальное (по дебиту) направление проводки горизонтальных скважин, расстановку скважин и т.д. Поэтому разработка и применение методик экспериментального определения анизотропных фильтрационно-емкостных свойств пластов является актуальной проблемой.

## **Цель работы**

Создание теоретических основ комплексной методики лабораторного определения фильтрационно-емкостных свойств анизотропных пластов, позволяющей определять тензорные фильтрационно-емкостные характеристики коллекторов углеводородного сырья с анизотропными фильтрационными свойствами.

Проведение по разработанной методике комплексных лабораторных исследований фильтрационно-емкостных свойств на керновом материале Самарского месторождения.

Получение экспериментального подтверждения тензорного характера фильтрационно-емкостных свойств реальных пластов-коллекторов углеводородного сырья.

## **Объекты исследований**

Объектом исследования является керновый материал терригенных отложений Самарского месторождения с простой структурой порового пространства и высокими значениями абсолютной проницаемости и пористости.

## **Основные задачи исследования**

1. Разработка теоретических основ методики по комплексному экспериментальному (лабораторному) определению фильтрационно-емкостных характеристик анизотропных пластов, которая позволит определять тензорные характеристики, описывающие фильтрационные течения в анизотропных средах.
2. Проведение комплексных лабораторных исследований на образце керна Самарского месторождения и получение экспериментальных значений фильтрационно-емкостных (тензорных) свойств.
3. Экспериментальное подтверждение тензорного характера фильтрационно-емкостных свойств реальных пластов-коллекторов углеводородного сырья с привлечением экспериментальных данных, полученных на контрольном образце.

4. Использование нового обобщенного (двухстепенного) представления функций относительных фазовых проницаемостей и функций Леверетта, позволяющего непрерывно аппроксимировать результаты лабораторных исследований двухфазной фильтрации и капилляриметрии на керне на всем интервале подвижности обеих фаз.

### **Научная новизна**

1. Разработана методика по комплексному лабораторному определению фильтрационно-емкостных свойств анизотропных коллекторов углеводородного сырья, которая позволила провести исследования по определению функций плотности распределения пор по радиусам, тензоров просветности и характерных линейных размеров, капиллярных давлений, остаточных водонасыщенностей, относительных фазовых проницаемостей и функций Леверетта.
2. Получено экспериментальное подтверждение тензорного характера функций плотности распределения пор по радиусам, просветности, эффективного диаметра пор, функции Леверетта, капиллярного давления и относительных фазовых проницаемостей.
3. Предложено новое обобщенное представление функций относительных фазовых проницаемостей и Леверетта, которое позволяет непрерывно аппроксимировать сложное поведение кривых вблизи предельных значений водонасыщенности в пористой среде.

### **В диссертационной работе защищаются следующие положения:**

1. Разработанная методика комплексных лабораторных исследований фильтрационно-емкостных свойств на керне, которая позволяет установить наличие латеральной анизотропии и направление главных осей тензора коэффициентов проницаемости. Последнее обстоятельство позволяет определить тензорные характеристики фильтрационно-емкостных свойств коллекторов углеводородного сырья, используя методики для изотропных сред.

2. Экспериментальное подтверждение тензорного характера:
  - а) характерных линейных размеров (эффективных диаметров капилляров), просветности, функций плотности распределения пор по радиусам, определенных в результате проведения исследований керна методом рентгеновской компьютерной томографии;
  - б) капиллярного давления при проведении эксперимента по определению зависимостей капиллярного давления от водонасыщенности пористой среды;
  - в) фазовых и относительных фазовых проницаемостей для пористой среды с ортотропной симметрией фильтрационно-емкостных свойств по результатам эксперимента совместной стационарной фильтрации нефти и воды.
3. Новое обобщенное представление функций относительных фазовых проницаемостей и Леверетта, позволяющее непрерывно аппроксимировать экспериментальные данные вблизи предельных значений водонасыщенности.

#### **Личный вклад**

Личный вклад автора состоит в проведении комплексных лабораторных исследований и обработке результатов экспериментов. Остальные результаты были получены при равном участии соавторов.

#### **Достоверность результатов и выводов**

Полученные в работе результаты основаны на общих законах и принципах механики сплошных сред, подземной гидромеханики, физики пласта, кристаллофизики и теории нелинейных тензорных функций от нескольких тензорных аргументов.

Все предположения о тензорном характере фильтрационно-емкостных свойств анизотропных коллекторов подтверждены лабораторными исследованиями.

Экспериментальное подтверждение теоретических основ, о тензорном характере фильтрационно-емкостных свойств, позволяет сделать вывод о достоверности и обоснованности результатов и выводов диссертационной работы.

### **Практическая значимость работы**

1. Применение предложенной в работе методики определения анизотропных фильтрационно-емкостных свойств коллекторов углеводородного сырья позволяет получить тензоры абсолютных, фазовых и относительных фазовых проницаемостей, тензоров просветности и характерных линейных размеров, капиллярного скачка давления и функции Леверетта.
2. Экспериментально определенные тензорные характеристики позволят учитывать анизотропию как в гидродинамических расчетах и оценках эффективности методов интенсификации добычи углеводородного сырья, так и при моделировании разработки месторождения в целом для увеличения углеводородоотдачи пластов.
3. Тензорное представление функции распределения пор по радиусам, эффективного диаметра и просветности позволят описывать и моделировать структуру и геометрию порового пространства.
4. Подтверждение тензорного характера функций Леверетта приводит к отказу от универсальности представления функции от насыщенности и необходимости учета анизотропии фильтрационных свойств коллекторов углеводородного сырья.
5. Новое двухстепенное представление функций относительных фазовых проницаемостей и Леверетта позволяет непрерывно аппроксимировать экспериментальные данные на всем интервале подвижности обеих фаз. Предложенное представление функций обобщает обычно используемое одностепенное, в которое оно переходит, если вторую степень принять равной единице.

## Апробация работы

Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

1. «Нефть и Газ – 2008. 62-ая международная молодежная научная конференция», Москва, РГУ, 17-20 апреля 2008 г.;
2. «Нефть и Газ – 2010. 64-ая международная молодежная научная конференция», Москва, РГУ, 12-15 апреля 2010 г.;
3. «Нефть и Газ – 2011. 65-ая международная молодежная научная конференция», Москва, РГУ, 11-14 апреля 2011 г.;
4. «9-ая Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов», Москва, РГУ, 4-7 октября 2011 г.;
5. «Фундаментальные проблемы разработки месторождений нефти и газа», Москва, ИПНГ, 15-18 октября 2011 г.;
6. «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России. 9-ая Всероссийская научно-техническая конференция», Москва, РГУ, 30 января – 1 февраля 2012 г.;
7. «Науки о Земле: новые горизонты в освоении недр. 5-ая международная конференция и выставка EAGE в Санкт-Петербурге», Санкт-Петербург, Международный Деловой Центр, 2-5 апреля 2012 г.;
8. «Нефть и Газ – 2012. 66-ая международная молодежная научная конференция», Москва, РГУ, 17-20 апреля 2012 г.;
9. Российская техническая нефтегазовая конференция и выставка SPE по разведке и добыче, Москва, ВВЦ, павильон 75, 16-18 октября 2012г.;
10. Всероссийская молодежная конференция «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук», Москва, ИПНГ, 19-25 ноября 2012 г.;
11. «Нефть и Газ – 2013. 67-ая международная молодежная научная конференция», Москва, РГУ, 9-12 апреля 2013 г.;
12. «EAGE. 17-й Европейский симпозиум IOR - От фундаментальных исследований к разработке», Санкт-Петербург, 16 апреля 2013 г.;



13. «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России. 10-ая Всероссийская научно-техническая конференция», Москва, РГУ, 10 – 12 февраля 2014 г;
14. «Наноявления при разработке месторождений углеводородного сырья: от наноминералогии и нанохимии к нанотехнологиям», Москва, РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 10 – 12 ноября 2014 г;
15. Научный семинар кафедры газовой и волновой динамики механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (сентябрь 2014 г.);
16. Совещание по технологиям разработки ООО "ЛУКОЙЛ-Инжиниринг", 14 августа, 2015 г.;
17. XI Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, Казань, 20-24 августа, 2015 г.

В полном объеме диссертация докладывалась и обсуждалась на научном семинаре кафедры Нефтегазовой и подземной гидромеханики Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 12 работ. В том числе 3 статьи в изданиях, включенных в «Перечень российских рецензируемых научных журналов» ВАК Минобрнауки РФ, 9 тезисов и материалов Международных и Всероссийских конференций.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, содержащего 137 наименований. Работа изложена на 118 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков и 7 таблиц.

Автор выражает признательность своему научному руководителю д.т.н. профессору Дмитриеву Н.М. за помощь в работе, внимание и поддержку, а также

коллективу кафедры нефтегазовой и подземной гидромеханики РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, возглавляемому д.т.н. профессором В.В. Кадетом.

Автор выражает свою благодарность руководителю научного центра аналитических и специальных исследований керн (ОАО ВНИИнефть им. академика А.П. Крылова) к.т.н. А.Б. Баишеву и его коллективу за предоставление возможности для проведения лабораторных исследований по анализу керн, а также за полезные советы и рекомендации по их проведению.

Автор выражает признательность коллективу ООО «МИП ГУ «Петрофизика», в частности, к.г.-м.н. Ю.Г. Пименову и к.т.н. А.Э. Шумейко за помощь в проведении структурного моделирования образцов керн методом компьютерной томографии.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении диссертации** представлена изложенная выше общая характеристика работы, в которой обоснована ее актуальность и сформулированы цели, поставлены основные задачи исследований и определены методы их решения, изложены защищаемые положения и результаты, их научная новизна и апробация работы.

**В первой главе** изложены научные основы построения различных типов определяющих уравнений и исследованию фильтрационных течений однородных жидкостей в недеформируемых анизотропных средах, чему посвящено довольно значительное число работ, нашедших свое отражение в монографиях, обзорах и других публикациях. К числу первых теоретических и экспериментальных работ, в которых был отмечен эффект изменения проницаемости в зависимости от направления и обосновано обобщение закона Дарси на случай анизотропных сред, относятся работы Дж. Гриффитса, В. Джонсона и Дж. Бреотона, В. Джонсона и Р. Хагеса, Е. Преслера, Р. Сэлливана и других исследователей. Основы теории течения через анизотропные среды и методы решения задач рассматривались в работах В.И. Аравина, В.И. Аравина и С.Н. Нумерова, А.Т. Горбунова, Р.

Дахлера, М.Н. Дмитриева, Н.М. Дмитриева, С. Ирмея, В.В. Кадета, В.С. Козлова, Дж. Литвинишина, В.М. Максимова, Г.К. Михайлова, Ю.М. Молоковича, П.Я. Полубариновой-Кочиной, Б.К. Ризенкампа, Дж. Феррандона, Е.Г. Шешукова, Ф. Шаффернака, Г.В. Щербакова и других отечественных и зарубежных исследователей. Обзоры и работы по исследованию движения жидкостей и газов в анизотропных пластах приведены в монографиях Я. Бэра, Т.Д. Голф-Рахта, Д. Заславски, С. Ирмея, Р.Коллинза, М. Маскета, П.Я. Полубариновой-Кочиной, Е.С. Ромма, С.Н. Чернышова, Р.В. Шаймуратова, А.Э. Шейдеггера в фундаментальных обзорах, написанных большим коллективом авторов под редакцией П.Я. Полубариновой-Кочиной, а также Г.К. Михайловым и В.Н. Николаевским. Вместе с тем отмечается, что в перечисленных работах практически не рассматривались теоретические основы методики лабораторного определения тензоров абсолютных, фазовых и относительных фазовых проницаемостей, тензоров просветности и характерных линейных размеров, капиллярного скачка давления и функции Леверетта.

В **параграфе 1.1** даны определения геометрической симметрии пространства или фигуры и преобразования симметрии. Для описания и определения геометрической симметрии кристаллических фигур вводится кристаллографическая система координат и элементарная ячейка с общепринятыми параметрами кристалла. Дано определение кристаллографической системы координат, которая обычно выбирается в одном из узлов пространственной решетки в виде элементарного параллелепипеда, причем три некопланарные элементарные трансляции образуют ее базис. Обычно выбирается прямолинейная, правая кристаллографическая система координат, хотя, в общем случае, она может быть косоугольной с различными параметрами кристалла по различным осям.

В **параграфе 1.2** представлены все 32 класса (группы) точечной симметрии кристаллов, а также приведены их обозначения по А.В. Шубникову. Классы симметрии кристаллов разделяются на категории, системы и сингонии в зависимости от их геометрической симметрии, формы элементарной ячейки,

элементов симметрии. Основные элементы симметрии кристалла обозначаются в каждом классе симметрии вместе с названием. Так как кристаллографическая система координат может иметь косоугольный базис, что приводит к трудностям описания кристаллографической симметрии, задания и установления плоскостей симметрии, в параграфе приведены правила установления кристаллофизической системы координат.

В параграфе 1.3 вводится понятие решетки Бравэ для описания кристаллических решеток, а также представлен принцип выбора элементарных ячеек в решетках Бравэ.

В параграфе 1.4 формулируется основной постулат кристаллофизики - принцип Неймана. Применение принципа Неймана позволяет связать между собой геометрическую и физическую симметрии.

В параграфе 1.5 приведены типы симметрии физических свойств, задаваемых тензорами второго ранга с указанием их сингоний:

- 1) изотропный (включает в себя не только изотропные, но и анизотропные группы симметрии кубической сингонии);
- 2) трансверсально-изотропный (тетрагональная, тригональная и гексагональная сингонии);
- 3) ортотропный (ромбическая сингония);
- 4) моноклинный (моноклинная сингония);
- 5) триклинный (триклинная сингония).

В параграфе 1.6 рассмотрен обобщенный закон Дарси на случай анизотропных пористых сред. Для каждого из перечисленных типов симметрии выписаны представления тензора коэффициентов проницаемости.

В параграфе 1.7 определены понятия направленной проницаемости и направленного фильтрационного сопротивления. Направленная проницаемость  $k(n_i)$  определяется как взятое со знаком минус отношение проекции вектора скорости фильтрации на выбранное направление  $w_i n_i$  к модулю вектора градиента давления  $|\nabla_i p|$  и умноженное на динамический коэффициент вязкости:

$$k(n_i) = -\mu \frac{w_i n_i}{|\nabla_i p|} = -\mu \frac{n_i}{|\nabla_i p|} \left( -\frac{k_{ij}}{\mu} \nabla_j p \right) = k_{ij} n_i n_j. \quad (1.1)$$

Направленная проницаемость представляет собой скалярную функцию векторного аргумента. Формула (1.1) показывает, как тензор коэффициентов проницаемости позволяет определить значение проницаемости в любом выбранном направлении.

Для определения направленного фильтрационного сопротивления  $r_{ij}$  направление  $n_i$  выбирается вдоль вектора скорости фильтрации  $\vec{w}$ , а вектор градиента давления  $\vec{\nabla} p$  проецируется на это направление:

$$r(n_i) = -\frac{1}{\mu} \frac{\nabla_i p \cdot n_i}{|w_i|} = \frac{1}{\mu} \frac{n_i}{|w_i|} (-\mu r_{ij} w_j) = r_{ij} n_i n_j. \quad (1.2)$$

Также в **параграфе 1.8** приводятся соотношения, задающие направленную проницаемость для каждого типа анизотропии, записанные в кристаллофизической системе координат.

В **параграфе 1.9** рассмотрено геометрическое представление симметричных тензоров второго ранга на примере тензора коэффициентов проницаемости  $k_{ij}$ . Геометрическим представлением симметричного тензора второго ранга является центральная поверхность второго порядка, называемая характеристической поверхностью. Для тензора проницаемости такая поверхность задается уравнением:

$$k_{ij} x_i x_j = 1, \quad (1.3)$$

где  $x_i$  - координаты декартовой системы координат.

Для геометрической интерпретации симметричных тензоров второго ранга наряду с характеристическими поверхностями используются и указательные поверхности. Для тензора коэффициентов проницаемости указательная поверхность задается равенством:

$$k(\vec{n}) = k_{ij} n_i n_j. \quad (1.4)$$

где  $n_i$  - компоненты единичного вектора, вдоль которого определяется значение направленной проницаемости.

Во **второй главе** рассмотрена методика комплексного лабораторного определения фильтрационно-емкостных свойств анизотропных пористых сред на основе анализа керна.

В **параграфе 2.1** описана последовательность проведения комплекса лабораторных исследований керна по определению анизотропных фильтрационно-емкостных свойств, которая включает в себя:

1. Проведение торцевания промытого полноразмерного керна и обработки его боковой поверхности.
2. Выполнение разметки полноразмерного керна, по которой потом будет проводиться прозвучивание керна ультразвуковыми волнами.
3. Проведение прозвучивания керна ультразвуковыми волнами в точках разметки с помощью экспериментальной установки «Узор-2000».
4. Построение по измеренным скоростям ультразвуковых волн кривых в плоскостях перпендикулярных оси симметрии керна.
5. Определение латеральной анизотропии свойств керна и установление на керне главных направлений тензора коэффициентов проницаемости (максимальное и минимальное значения скоростей ультразвуковых волн в плоскости перпендикулярной оси симметрии керна) и вдоль оси симметрии керна.
6. Выпиливание кернов диаметром 2,54см по главным направлениям. Одно направление - вертикальное, два других - в плоскости перпендикулярной оси симметрии керна, а также по биссектрисе прямого угла (контрольный образец) между главными направлениями на плоскости.
7. Измерение на вырезанных 4-х образцах пористости и абсолютной проницаемости по газу.
8. Проведение на заготовленных 4 образцах рентгеновской компьютерной томографии. По результатам исследований на томографе определяются функции плотности распределения пор по радиусам, тензоры просветности и эффективного диаметра пор (характерного линейного размера).

9. Выполнение на всех образцах капилляриметрии и определение зависимостей капиллярного давления от водонасыщенности пористой среды.
10. Проведение эксперимента совместной стационарной фильтрации нефти и воды на каждом из 4-х образцов для определения относительных фазовых проницаемостей.
11. Выполнение обработки полученных результатов, сравнение экспериментальных и теоретических значений характеристик по измерениям на контрольном образце. Подтверждение тензорного характера определенных фильтрационно-емкостных свойств коллектора.

В **параграфе 2.2** приводится теоретическое обоснование необходимости изготовления кернов для контрольных измерений и проведения лабораторных исследований на них для подтверждения как тензорной природы фильтрационно-емкостных свойств, так и правильности выбора главных направлений тензора коэффициентов проницаемости.

В **параграфе 2.3** описана подготовка полноразмерного керна к исследованиям, в которой дано обоснование необходимых геометрических размеров образца, для проведения прозвучивания и дальнейших исследований, а также описано проведение разметки торцевой и боковой поверхностей керна.

В **параграфе 2.4** дается обоснования возможности использования ультразвукового метода для установления факта наличия латеральной анизотропии фильтрационных свойств.

Ультразвуковой метод выявления анизотропии фильтрационных свойств в пористых средах позволяет установить факт наличия анизотропии и определить главные направления тензора проницаемости без каких-либо структурных и механических нарушений образца, делающих невозможными дальнейшие исследования.

В **параграфе 2.5** описан стандартный метод определения абсолютной проницаемости по инертному газу. Приведены методы и аппаратура для лабораторного определения проницаемости по инертному газу. Дана

принципиальная схема прибора, на котором были проведены экспериментальные исследования.

В параграфе 2.6 приводятся результаты экспериментальных исследований по установлению анизотропии при определении функций плотности распределения пор по радиусам, эффективного диаметра и просветности с помощью метода рентгеновской компьютерной томографии. Описаны основные методы определения распределения пор по радиусам, а также преимущества использования метода рентгеновской томографии.

В параграфе 2.7.1 дано описание основных лабораторных методов определения зависимости кривых капиллярного давления от насыщенности в пористых средах. Показаны основные достоинства и недостатки каждого из перечисленных методов, в частности, для метода центрифугирования также представлены и наиболее распространенные способы расчета капиллярного давления и текущей насыщенности (метод Б.И. Тульбовича и метод Хасслера-Брунера).

В параграфе 2.7.2 рассматривается обобщение представления функции Леверетта на случай анизотропных сред, данное в статье М.Н. Дмитриева<sup>1</sup>. Обобщение включает в себя введение тензора капиллярных давлений  $p_{ij}^k$ , тензора  $R_{kl}$ , обратного тензору характерных линейных размеров, а также замену функции Леверетта  $J(s)$  на тензор четвертого ранга  $J_{ijkl}$  :

$$p_{ij}^k(s) = J_{ijkl}^* R_{kl}, \quad (2.1)$$

где

$$J_{ijkl}^* = a_n \cos \theta J_{ijkl}. \quad (2.2)$$

В которой показывается, что капиллярное давление  $p_{ij}^k$ , представляет тензор второго ранга.

В параграфе 2.8 рассматривается определение функций относительных фазовых проницаемостей в анизотропных пористых средах.

---

<sup>1</sup> Дмитриев М.Н. Модель двухфазной фильтрации Рапопорта-Лиса в анизотропных средах // Изв. РАН. МЖГ. 2011. № 2. С. 136-144



В параграфе 2.8.1 рассматривается обобщение закона Дарси для анизотропных сред при двухфазной фильтрации. Обобщенный закон Дарси для двухфазной фильтрации на случай анизотропных сред записывается в виде:

$$w_i^\alpha = -\frac{k_{ij}^\alpha}{\mu^\alpha} \nabla_j p^\alpha, \quad (2.3)$$

где  $\alpha = 1, 2$  и задает номер фазы,  $k_{ij}^\alpha$  - тензор коэффициентов фазовых проницаемостей для каждой из фаз. Тензор коэффициентов фазовых проницаемостей задает фильтрационные свойства при совместном течении двух однородных несмешивающихся жидкостей. Функция относительных фазовых проницаемостей задается как тензора четвертого ранга<sup>2</sup>:

$$k_{ij}^\alpha = F_{ijkl}^\alpha k_{kl}, \quad (2.4)$$

где  $F_{ijkl}^\alpha$  - тензор коэффициентов относительных фазовых проницаемостей симметричный по первой и второй паре индексов и их перестановке.

В параграфе 2.8.2 перечислены основные методы лабораторного определения относительных фазовых проницаемостей, в числе которых:

- численные эксперименты;
- определение ОФП по данным капилляриметрии;
- расчет данных нестационарного вытеснения (метод Велджа);
- расчет по данным метода совместной стационарной фильтрации;
- эмпирические зависимости, полученные в результате многочисленных обработок экспериментальных данных.

Сравнение результатов определения кривых относительных фазовых проницаемостей различными методами показало, что метод определения кривых относительных фазовых проницаемостей при совместной стационарной фильтрации нефти и воды может быть предложен как основной и является контрольным для других методов. Согласно ОСТ 39-235-89 «НЕФТЬ. Метод определения фазовых проницаемостей в лабораторных условиях при совместной стационарной фильтрации» эксперимент по определению относительных фазовых

<sup>2</sup> Дмитриев Н.М., Максимов В.М. О структуре тензоров коэффициентов фазовых и относительных проницаемостей для анизотропных пористых сред // Докл. РАН. 1998. Т.358, №3. С. 337-339

проницаемостей включает в себя последовательность опытов. Определение нефтенасыщенности при каждом режиме фильтрации проводится по уравнению материального баланса:

$$S_{ni} = S_{ni-1} + \frac{V_{нзак} - V_{нвыт} + \Delta f_{ni} V_m}{V_n}, \quad (2.5)$$

где  $S_{ni}, S_{ni-1}$  - нефтенасыщенность  $i$ -того и  $(i-1)$ -го режимов фильтрации,  $V_{нзак}, V_{нвыт}$  - объем нефти, закачанной и вытесненной из образца керна,  $V_m$  - мертвый объем кернодержателя и подводящих капиллярных трубок,  $\Delta f_{ni}$  - доля нефти в потоке в  $i$ -ом режиме. Значения фазовых проницаемостей определяются из уравнения Дарси:

$$k_i^\alpha = \frac{Q_i^\alpha \mu^\alpha l}{\Delta P_i F}, \quad (2.6)$$

где  $\alpha = 1, 2$  и задает номер фазы,  $k_i^\alpha$  - значения фазовых проницаемостей на  $i$ -том режиме фильтрации,  $Q_i^\alpha$  - расходы на  $i$ -том режиме фильтрации,  $\mu^\alpha$  - вязкость в условиях эксперимента,  $\Delta P_i$  - перепад давления на  $i$ -том режиме фильтрации,  $F$  - площадь поперечного сечения керна,  $l$  - длина керна.

В **третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований анизотропных фильтрационно-емкостных свойств на керне. Комплекс лабораторных исследований проводился по описанный во второй главе методике на образце экстрагированного и высушенного керна Самарского месторождения высотой 10 см и диаметром 10 см. Образец керна - кварцевый мелко-среднезернистый песчаник с размером зерен от 0,1 до 0,3 мм, в среднем 0,2 мм, присутствуют элементы кривой слоистости с толщиной слоев 1,5 мм, цемент глинистый кальцитового состава. Разметка образца полноразмерного керна по боковой поверхности проводилась с делением на 12 сегментов, т.е. через каждые 30 градусов. По высоте керна для проведения исследований было выделено 7 плоскостей с шагом 1,5 см между плоскостями. На торцевых поверхностях также были выделены 4 окружности для определения наличия неоднородностей в образце керна (Рис. 3.1, слева)

В параграфе 3.1 приводятся результаты по установлению факта наличия латеральной анизотропии тензора коэффициентов проницаемости на образце керна с помощью ультразвукового метода.

В параграфе 3.1.1 приведены результаты лабораторного определения скоростей распространения ультразвуковых волн в полноразмерном керне.

В параграфе 3.1.2 даны аппроксимации кривых, полученных при прозвучивании керна, производится выбор и, далее, подготовка направленных образцов керна меньшего диаметра для дальнейших лабораторных исследований. Результаты аппроксимации и пример выбора направленных образцов керна для сечения VI показаны на Рис. 3.1 (справа).

В параграфе 3.3 приведены результаты измерения пористости и определения тензора коэффициентов абсолютной проницаемости по газу.

В параграфе 3.3.1 приводятся результаты лабораторного определения абсолютной проницаемости и пористости на направленных кернех (Таблица 3.1).

В параграфе 3.3.2 для определения эффективной проницаемости контрольного образца керна используется приближенная формула, которая в дальнейшем сравнивается с экспериментальным значением абсолютной проницаемости. Такой подход позволяет подтвердить тензорную природу фильтрационно-емкостных характеристик и правильность выбора главных направлений.

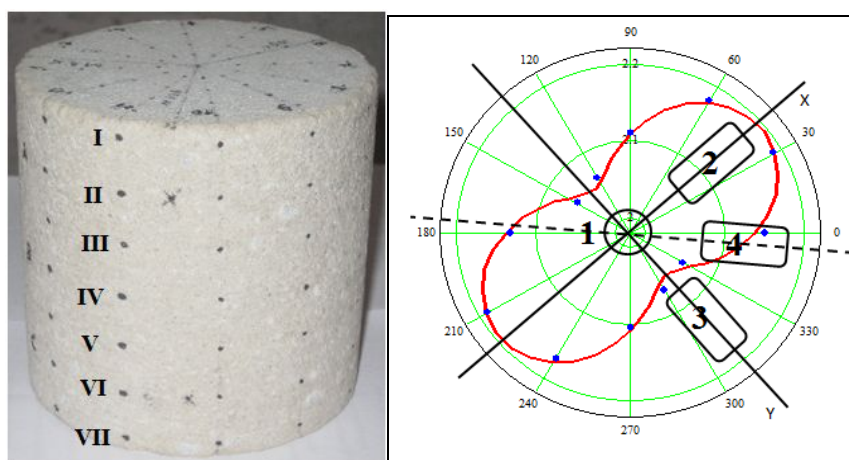


Рис. 3.1. Разметка боковой поверхности керна (слева) и расположение вырезанных образцов керна меньшего диаметра (справа)

Таблица 3.1. Значения пористости и абсолютной проницаемости

Образец		Экспериментальное значение проницаемости по газу, мД	Пористость, %
Вертикальный (1)		668	18,6
По направлению X (2)		689	
По направлению Y (3)		579	
Контрольный образец (4)	Эксп.	644	
	Теор.	638	

В параграфе 3.4 устанавливается анизотропия функции плотности распределения пор по радиусам, эффективного диаметра и просветности, а по контрольному образцу проводится экспериментальное подтверждение тензорной природы этих характеристик. Результаты сравнения экспериментальных и теоретических значений функций плотности распределения пор по радиусам для контрольного образца представлены на Рис. 3.2, а в Таблице 3.2 значения просветностей и эффективных диаметров.

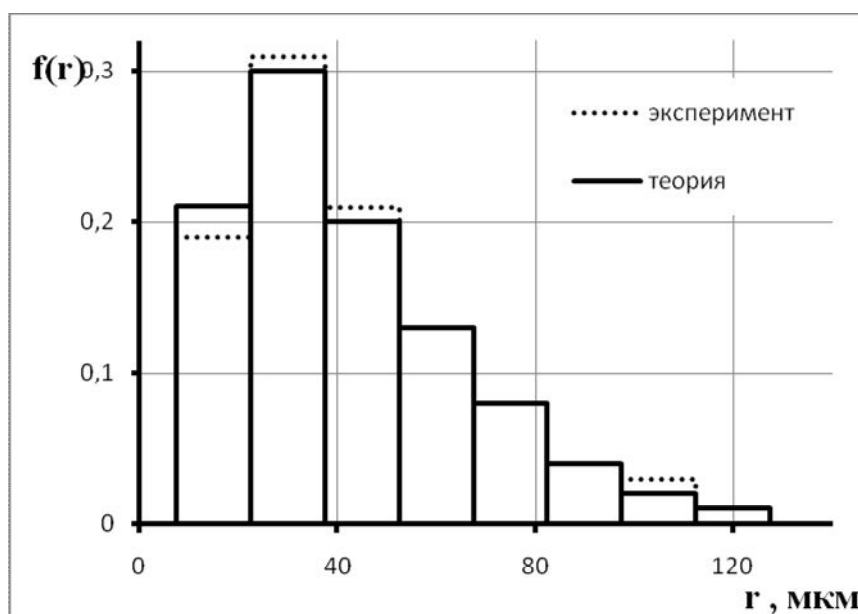


Рис. 3.2. Гистограммы сравнения экспериментального и теоретического значений распределения пор по радиусам для контрольного образца

Таблица 3.2. Значения эффективных диаметров и просветностей для каждого направления

Образец		Эффективный диаметр $d_{эф}$ ,	Просветность $s$ ,
		мкм	%
Вертикальный (1)		9,38	24,3
По направлению X (2)		10,0	22,5
По направлению Y (3)		9,26	21,6
Контрольный образец (4)	Эксп.	9,75	21,9
	Теор.	9,7	21,8

В параграфе 3.5 приведены результаты определения зависимостей капиллярного давления от водонасыщенности пористой среды и их аппроксимация (Рис. 3.3) с учетом представления функций Леверетта как тензора четвертого ранга, выписанный для ортотропного типа анизотропии по новой формуле:

$$J_i^* = \left[ a_i + \left( \frac{I_1(R)}{3R_i} - 1 \right) (s - s_{(i)*}) \right] \left( 1 - \left( \frac{s - s_{(i)*}}{1 - s_{(i)*}} \right)^{\frac{1}{\gamma_i}} \right)^{\beta_i}. \quad (3.1)$$

Также приведено сравнение теоретических и экспериментальных значений для контрольного образца (Рис. 3.4).

В параграфе 3.6 представлены результаты экспериментального определения относительных фазовых проницаемостей и их аппроксимация на ортотропных образцах керна (Рис. 3.5). Также как и для функций Леверетта при аппроксимации относительных фазовых проницаемостей по нефти использовалась двухстепенная формула:

$$\varphi_i^2 = \left[ b_i + \left( \frac{I_1(k)}{3k_i} - 1 \right) (s - s_{(i)*}) \right] \left( 1 - \left( \frac{s_{(i)*} - s}{s_{(i)*} - s_{(i)*}} \right)^{\frac{1}{\gamma_i}} \right)^{\beta_i}. \quad (3.2)$$

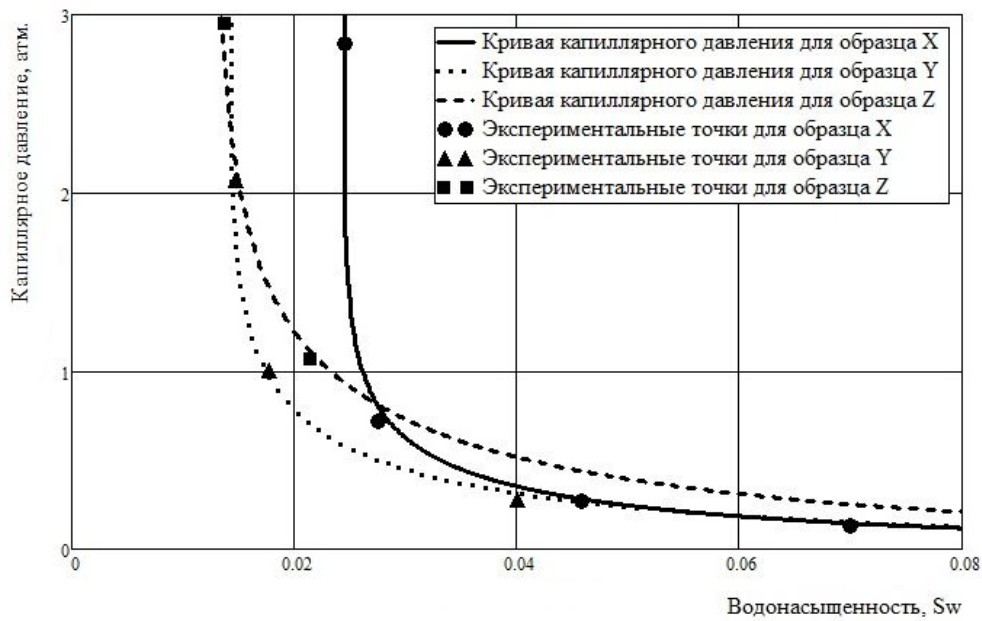


Рис. 3.3. Аппроксимация зависимостей капиллярного давления от водонасыщенности для образцов X, Y, Z



Рис. 3.4. Зависимость капиллярного давления от водонасыщенности для контрольного образца

Результаты сравнения теоретических и экспериментальных кривых относительных фазовых проницаемостей для нефти и воды, для контрольного образца вырезанного под углом в  $45^\circ$  в плоскости напластования, представлены на Рис. 3.6. Также проведена аппроксимация и сравнение ОФП по новой формуле

для эксперимента С.Г. Рассохина<sup>3</sup>, в котором использовались гептан (конденсированная фаза) и метан в качестве газовой фазы.

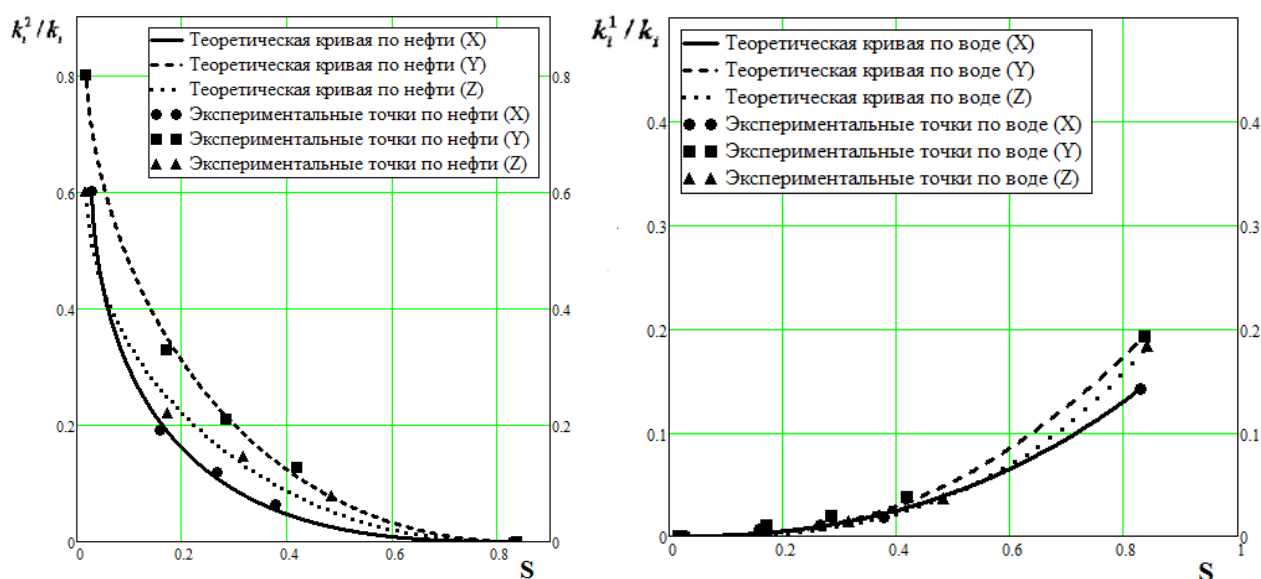


Рис. 3.5. Теоретические кривые и экспериментальные точки ОФП

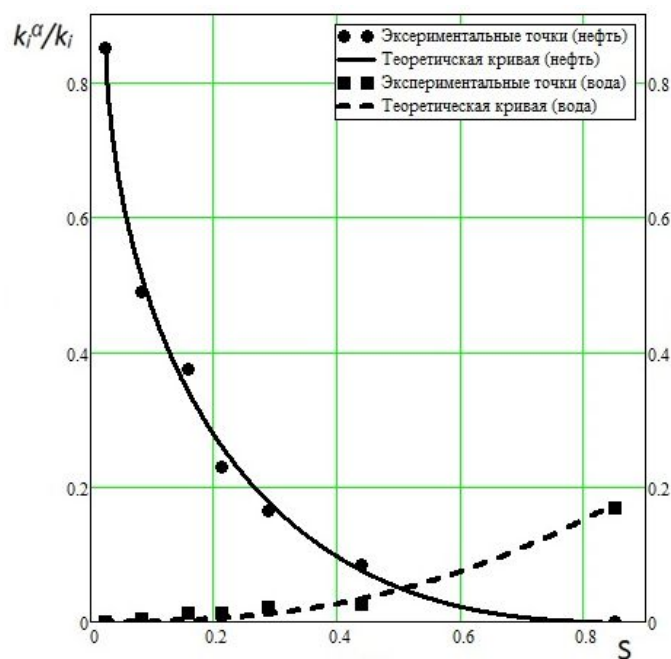


Рис. 3.6. Сравнение теоретической кривой с экспериментальными данными ОФП для контрольного образца.

<sup>3</sup> Дмитриев М.Н., Дмитриев Н.М., Кадет В.В., Кравченко М.Н., Рассохин С.Г. Двухфазная фильтрация в трансверсально-изотропной пористой среде: эксперимент и теория // Изв. РАН. МЖГ № 4, 2004, с. 92-97.

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате комплекса проведенных лабораторных исследований на реальном керновом материале Самарского месторождения и анализа полученных экспериментальных данных, можно сделать следующие основные выводы:

1. Предложена методика комплексного лабораторного исследования керна, позволяющая определять тензорные характеристики на направленных кернах, в том числе:
  - 1) при лабораторном исследовании керна получить большой объем информации о коллекторе за счет проведения комплексных лабораторных измерений, учитывающих анизотропию фильтрационно-емкостных свойств;
  - 2) повысить достоверность получаемых данных за счет подготовки контрольного образца керна для сравнения экспериментальных и теоретических значений определяемых тензорных характеристик.
2. Экспериментально подтверждена тензорная природа функций распределения пор по радиусам, физической просветности, эффективного диаметра, капиллярного давления, функций Леверетта и относительных фазовых проницаемостей.
3. Получено двухстепенное обобщение аппроксимирующих функций, которое позволяет описывать сложное поведение функции Леверетта и относительных фазовых проницаемостей вблизи предельных значений водонасыщенности пористой среды.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в журналах списка ВАК:*

1. Дмитриев М.Н., Дмитриев Н.М., Кузьмичев А.Н., Максимов В.Н. Двухфазная фильтрация в ортотропной пористой среде: эксперимент и теория // Изв. РАН. МЖГ. 2014. № 6. С. 94-100.



2. Дмитриев Н.М., Кравченко М.Н., Кузьмичев А.Н., Диева Н.Н. Экспериментальное и численное изучение анизотропии насыщенных пластов // Спецвыпуск журнала «Газовая промышленность» - Вузовская наука нефтегазовой отрасли. 2013. №692. С. 96-99.
3. Кузьмичев А.Н. Методика и результаты комплексных лабораторных исследований анизотропных фильтрационно-емкостных свойств коллекторов // Сборник трудов РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, № 3/272. 2013. с. 44-51.

***Доклады конференций:***

1. Кадет В.В., Дмитриев Н.М., Дмитриев М.Н., Кузьмичев А.Н. Определение коллекторских свойств анизотропных пластов. Теория и эксперимент. // Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием «Фундаментальные проблемы разработки месторождений нефти и газа», Москва, ИПНГ, 15-18 октября 2011. С. 62.
2. Кадет В.В., Дмитриев М.Н., Кузьмичев А.Н., Цыбульский С.П. Результаты комплексных лабораторных исследований анизотропных фильтрационно-емкостных свойств на керне // «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» 9-ая Всероссийская научно-техническая конференция, Москва, РГУ, 30 января – 1 февраля 2012 г. с.71.
3. Кадет В.В., Дмитриев Н.М., Кузьмичев А.Н. Определение латеральной анизотропии горных пород на керне // Науки о Земле: новые горизонты в освоении недр. 5-ая международная конференция и выставка EAGE в Санкт-Петербурге», Санкт-Петербург, Международный Деловой Центр, 2-5 апреля 2012 г.
4. Кадет В.В., Дмитриев Н.М., Кузьмичев А.Н. Тензорные характеристики фильтрационно-емкостных свойств анизотропных коллекторов // EAGE. 17-й Европейский симпозиум IOR - «От фундаментальных исследований к разработке», Санкт-Петербург, 16 апреля 2013 г.
5. Кадет В.В., Дмитриев Н.М., Кузьмичев А.Н., Цыбульский С.П. Методика и результаты комплексных лабораторных исследований анизотропных

фильтрационно-емкостных свойств на кернах // Российская техническая нефтегазовая конференция и выставка SPE по разведке и добыче, Москва, ВВЦ, павильон 75, 16-18 октября 2012г.

6. Кузьмичев А.Н., Цыбульский С.П. Лабораторные экспериментальные исследования фильтрационно-емкостных свойств анизотропных коллекторов // Труды 55-й научной конференции МФТИ, М.: МФТИ, 2012. С. 166-167.
7. Кузьмичев А.Н. Изучение анизотропии горных пород на керне // Тезисы докладов 9-ой Всероссийской конференции молодых ученых, специалистов и студентов «Новые технологии в газовой промышленности», Москва, РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 4-7 октября 2011г. 431 с.
8. Кузьмичев А.Н. Результаты экспериментального определения фильтрационно-емкостных свойств ортотропного песчаника // «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» 10-ая Всероссийская научно-техническая конференция, Москва, РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 10 – 12 февраля 2014. С. 61.
9. Дмитриев Н.М., Максимов В.М., Дмитриев М.Н., Мурадов А.В., Кузьмичев А.Н., Кравченко М.Н. // XI Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Тезисы доклада. Казань, 20-24 августа, 2015. с.1201-1203.