**Максименко Антон Александрович. Микромеханический анализ течения неньютоновских жидкостей и взвесей в пористой среде : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 01.02.05.- Москва, 2001.- 109 с.: ил. РГБ ОД, 61 01-1/885-3**

-Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина Кафедра нефтегазовой й подземной гидромеханики

на правах рукописи

Максименко Антон Александрович

**Микромеханический анализ течения неньютоновских жидкостей и взвесей в пористой среде**

*специальность 01.02.05* - *механика жидкости, газа и плазмы*

***Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук***

Научный руководитель д.т.н., проф. Кадет В.В.

Москва 200J г.

**Содержание**

[**ВВЕДЕНИЕ 3**](#bookmark3)

1. [**ПРИНЦИПЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ФЛЮ­ИДОВ В РЕШЕТОЧНЫХ МОДЕЛЯХ ПОРИСТЫХ СРЕД 26**](#bookmark4)
   1. [Перколяционный подход и модель эффективной среды 26](#bookmark5)
   2. Комбинированная модель расчета проводимости капиллярной решетки 29
   3. [Определение порометрической кривой с использованием предложенной модели 37](#bookmark17)
2. [**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ДВУХФАЗНОГО ВЫТЕСНЕНИЯ 42**](#bookmark18)
   1. [Расчет фазовых проницаемостей 42](#bookmark19)
   2. [Фазовые проницаемости в случае доминирования капиллярных сил . . 48](#bookmark24)
   3. [Фазовые проницаемости при преобладании гидродинамических сил . . 53](#bookmark25)
3. [**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛЬНОГО ОПИСАНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ НЕ­НЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ 58**](#bookmark26)
   1. [ВЫВОД УРАВНЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ ФЛЮИДА В КАПИЛЛЯРНОЙ РЕШЕТКЕ С УЧЕТОМ ЕГО РЕОЛОГИИ 58](#bookmark27)
      1. [Вязкопластическая жидкость 59](#bookmark28)
      2. [Степенная жидкость 62](#bookmark30)
   2. [АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ФАЗОВЫХ ПРОНИЦАЕМОСТЕЙ В ПРОЦЕС­СЕ ПОЛИМЕРНОГО ЗАВОДНЕНИЯ 64](#bookmark33)
      1. [Моделирование разовой закачки полимерного раствора и посто­янного полимерного заводнения 65](#bookmark35)
      2. [Оценка эффективности применения полимерного заводнения . . 69](#bookmark37)

[**4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЗВЕСЕЙ И ЭМУЛЬСИЙ В ПО­РИСТЫХ СРЕДАХ 72**](#bookmark39)

1. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПИСАНИЯ ФИЛЬТРАЦИИ ВЗВЕСЕЙ

И ЭМУЛЬСИЙ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ 72

1. [Эмпирические модели 73](#bookmark41)
2. [Модели анализа траектории частиц 74](#bookmark43)
3. [Решеточные модели 75](#bookmark44)
4. [МАКРОСКОПИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЗВЕСЕЙ И ЭМУЛЬСИЙ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ОСАЖДЕНИЯ ЧА­СТИЦ НА МИКРОУРОВНЕ 77](#bookmark45)
5. [Общие положения развиваемой модели 77](#bookmark46)
6. [Метод расчета по предложенной модели 81](#bookmark49)
7. [Сравнение результатов численных расчетов с эксперименталь­ными данными 83](#bookmark51)

[**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ 96**](#bookmark52)

[**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 98**](#bookmark53)

**ВВЕДЕНИЕ**

Актуальность темы. Развитие современных технологий разработки и эксплуатации месторождений углеводородов невозможно без углу­бленного исследования фильтрации в продуктивных пластах. Для при­менения новых методов интенсификации извлечения углеводородного сырья, связанных с активным воздействием на структуру коллектора и характер совместного течения флюидов, становится все более важ­ным умение адекватно описывать указанные объекты и процессы.

При рассмотрении процесса переноса на базе классических моделей сплошной среды все разнообразие структур горных пород определяется в уравнениях, описывающих фильтрацию, только различными значе­ниями коэффициентов проницаемости и пористости. При этом сами значения проницаемости и пористости берутся из лабораторных из­мерений, а возможная эволюция структуры среды в процессе течения учитывается посредством эмпирических зависимостей для этих коэф­фициентов. В рамках такого подхода основой для анализа многофазной фильтрации служат фазовые проницаемости флюидов, которые тре­буют весьма трудоемкого экспериментального определения. При этом полученные экспериментальные кривые являются интегральными фе­номенологическими характеристиками, что в свою очередь не позво­ляет проанализировать влияния на них структуры порового простран­ства и физических свойств флюидов, а также установить соответству­ющие закономерности. Аналогичная ситуация возникает и при необхо­димости учитывать различные факторы физико-химического взаимо­действия флюидов со средою, таких как осаждение частиц на скелете породы , их вынос с поверхности пор и т.п. В этом случае приходит­ся записывать некоторые дополнительные эмпирические соотношения, не позволяющие адекватно связывать особенности взаимодействий с изменением общих параметров процесса фильтрации.

При этом является очевидным, что и структура порового простран­ства, и реология флюидов, и природа взаимодействия флюидов с по­родой оказывают существенное влияние на характер фильтрации. Для описания особенностей процесса переноса в микронеоднородной пори­стой среде целесообразно использовать пространственные решеточные модели. В этих моделях хаотическая неоднородная структура порового пространства породы заменяется некоторой решеткой из проводящих элементов таким образом, чтобы геометрия решетки наилучшим обра­зом отражала характер расположения пор и поровых каналов в реаль­ной среде. Проводимость связей в решетке задается функцией плотно­сти распределения капилляров по радиусам, получающейся на основе порометрических исследований образцов породы и соответствующей распределению пор среды по размерам.

Решение статических и динамических задач о протекании флюидов в решеточных структурах может быть, например, проведено посред­ством прямого численного моделирования. Однако подобные методы требуют больших затрат машинного времени, что ограничивает их

практические и исследовательские возможности, а также является су­щественным препятствием для улучшения точности вычислений. К то­му же численное моделирование не позволяет получать аналитические закономерности общего характера в виде функциональных соотноше­ний.

Таким образом, возникает необходимость развития теоретического подхода к моделированию процесса фильтрации флюидов в микроне- однородной пористой среде, который позволил бы получать аналити­ческие зависимости макроскопических параметров фильтрационного процесса (абсолютной и фазовых проницаемостей и т.д.) от геометрии порового пространства, реологии флюидов и особенностей взаимодей­ствия флюидов со скелетом породы. В конечном итоге это дало бы воз­можность связывать природу течения флюидов на микроуровне (в от­дельных поровых элементах) с макроскопическими законами фильтра­ции (во всей пористой среде), известные микро-характеристики про­цесса с его общими закономерностям.

Цель работы. Развитие на базе решеточного моделирования анали­тического подхода к расчету параметров процесса переноса флюидов с различными свойствами в микронеоднородных средах. Построение на его основе модели фильтрации взвесей и эмульсий, позволяющей анализировать эволюцию поровой структуры в процессе течения и из­менение общих параметров фильтрационного процесса.

Основные задачи исследования. В рамках проведенного исследова­ния решались следующие основные задачи:

Разработка аналитического метода расчета коэффициентов абсолют-

ной и фазовых проницаемостей с учетом особенностей геометрии поро- вого пространства и реологии фильтрующихся флюидов.

Исследование влияния параметров режима двухфазного вытеснения на поведение кривых фазовых проницаемостей.

Анализ эффективности изменения реологии вытесняющего агента для увеличения коэффициента нефтеотдачи.

Исследование влияния параметров распределения твердых частиц (ка­пель эмульсии) фильтрующейся взвеси (эмульсии) на изменения про­ницаемости породы.

Построение динамической модели течения взвесей и эмульсий, учиты­вающей особенности процесса осаждения частиц на микроуровне.

Научная новизна. Построена обобщенная модель для описания про­водимости решеточных структур, учитывающая геометрию порового пространства, насыщенность фильтрующимися флюидами и их рео­логию. Представлены новые методы расчета коэффициентов фазовых проницаемостей для ньютоновских, вязкопластических и степенных жид­костей, а также величины предельного градиента для фильтрации вяз­копластической жидкости. Разработана новая модель фильтрации взве­сей и эмульсий в решеточных моделях пористых сред, в рамках кото­рой получены соотношения для расчета параметров, характеризующих протекающие процессы.

Практическая ценность результатов работы определяется их при­кладной направленностью. Коэффициенты абсолютной и фазовых про­ницаемостей являются основными характеристиками, используемыми при разработке технологических схем эксплуатации месторождений.

Этим определяется важность достоверного метода расчета абсолютной и фазовых проницаемостей, позволяющего учитывать влияние особен­ностей микроструктуры породы и свойств флюида. Развитый в диссер­тационной работе аналитический метод позволяет проводить адекват­ную оценку поведению кривых фазовых проницаемостей более доступ­ным и быстрым способом, чем посредством лабораторных измерений или прямых численных расчетов. Предложенная в диссертации модель фильтрации взвесей и эмульсий дает возможность легко определять степень изменения проницаемости породы при осаждении частиц на ее скелете. Это является чрезвычайно актуальным для анализа коль- матации призабойных зон нагнетающих скважин, а также может быть использовано для выработки рекомендаций по очистке технической во­ды от механических примесей перед ее закачкой в пласт.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладыва­лись и обсуждались на научно-технических конференциях ’’Актуаль­ные проблемы состояния и развития нефтегазового комплекса России” (Москва, 1999, 2001), на ежегодной конференции Европейской ассоци­ации инженеров-геологов (Хельсинки, Финляндия, 1999), на ”111 меж­дународной конференции по вычислительной и прикладной механике” (Москва, 2000), на 16-ом международном конгрессе по вычислительной и прикладной математике и компьютерному моделированию (Лозанна, Швейцария, 2000), на научных семинарах кафедры нефтегазовой и под­земной гидромеханики (РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина).

Содержание работы

В первой главе диссертационной работы дается подробное изложе-

ние развиваемого теоретического подхода к описанию течения флюидов в решеточной модели неоднородной пористой среды.

Следует отметить, что различают два вида неоднородных сред: ми- кронеднородные и макронеоднородные [1]. Под микронеоднородной под­разумевают среду, характеризуемую на достаточно больших масшта­бах одинаковыми свойствами порового пространства (пористостью, рас­пределением пор по размерам и т.п.) и проводимостью. У макронеод- нородной среды различные участки могут отличаться по своим свой­ствам. В диссертационной работе рассматриваются решеточные моде­ли микронеоднородных сред. Построение и расчет таких моделей явля­ется одним из эффективных методов исследования процесса переноса в пористой среде [2].

Решеточные модели представляют собой дискретное описание про­цесса течения флюида. Исторически такому подходу предшествовали модели фильтрации, основанные на механике сплошной среды. Модели сплошной среды представляют классический инженерный подход. Для описания процесса течения флюида в них используются [3, 4] диффе­ренциальные уравнения механики сплошной среды, а также различ­ные эмпирические соотношения, коэффициенты в которых являются осредненными параметрами, характеризующими те или иные макро­скопические свойства среды. Определение коэффициентов происходит посредством экспериментальных измерений. Такой подход в описании процесса переноса берет свое начало от классических опытов А.Дарси по фильтрации воды через песчаные фильтры. Модели сплошной сре­ды получили широкое распространение, поскольку являются удобными

для инженерных расчетов. Однако они не позволяют адекватно опи­сывать те процессы, в которых важно учесть влияние особенностей структуры порового пространства, а также взаимодействие фильтрую­щихся флюидов со скелетом породы. Устранить этот недостаток можно с помощью использования дискретных моделей.

Дискретный подход развивают для моделирования процесса перено­са на микроуровне, чтобы затем получить его макроскопическое описа­ние. Дискретные модели основаны на различных геометрических пред­ставлениях структуры порового пространства среды. Общий характер структуры пористых сред определяют размерно-геометрическими фак­торами. Реальная пористая среда имеет стохастическую структуру, в которой размеры пор и поровых каналов, а также их взаимное рас­положение и соединение носят случайный характер [5]. Особенности геометрии и пространственного расположения пор составляют основу для геометрического моделирования пористых структур [6]. Наиболь­шее практическое применение для пористых сред нашли глобулярные модели (упаковки шаров) и модели полых цилиндров (капиллярные модели) [7, 8]. В первом случае пористую среду представляют в виде регулярной или нерегулярной укладки шаров одинакового или различ­ного радиуса [9], в которой сами шары служат моделью элементарных частиц скелета, а пространство между ними имитирует пористое про­странство.

В капиллярных моделях поровое пространство представляется сово­купностью капилляров различного сечения, протяженности и ориента­ции в пространстве. В первых капиллярных моделях пористая структу­ра заменялась пучком параллельных цилиндрических капилляров [8]. Такая модель не могла учитывать естественных для реальных сред из­вилистости пор, что привело к необходимости усложнить модель пуч­ка капилляров таким образом, чтобы радиус капиллярных трубок и их извилистость могли иметь случайный [9] характер. Однако и это не позволяло адекватно описывать структуру порового пространства, по­скольку игнорировало пространственную взаимосвязанность пор. Наи­более полно пористую структуру большинства сред отражают реше­точные модели с регулярной или случайной геометрией [6]. В регуляр­ной решеточной модели пористая среда представляется в виде правиль­ной двумерной или трехмерной решетки. Узлы решетки, которые моде­лируют поры, соединяются капиллярами, представляющими собою по- ровые каналы. Симметрия решетки задается определенным сочетани­ем узлов и связей. Основные характеристики решетки для моделирова­ния конкретной пористой среды получают из экспериментальных поро- метрических исследований кернов [10]. Регулярные решеточные модели допускают наличие случайного распределения различных характери­стик основных структурных элементов (размеров пор и капилляров, их корреляции), сохраняя определенную закономерность в образовании узлов и связей. В нерегулярных решетках уже их сочетание также но­сит случайный характер. Большая адекватность решеточных моделей реальным пористым средам предопределила их распространение в по­следнее время для описания самых разнообразных физико-химических процессов, протекающих в пористых средах: фильтрования, вытесне­ния, дисперсии, адсорбции и десорбции, и т.д. [1].

Идея использовать решеточные модели пористой среды для описа­ния процесса фильтрации появилась в конце 50-х годов [11]. Однако только спустя более двадцати лет были развиты [12] систематические подходы для получения нерегулярной решетки, эквивалентной данной микронеоднородной породе. Построенная на базе данных подходов ре­шетка со случайной геометрией имела переменное координационное чи­сло (количество связующих элементов, исходящих из узла). Впослед­ствии численные эксперименты, проведенные в работах [13, 14], по­казали, что если среднее значение координационного числа случайной решетки близко по значению координационному числу регулярной ре­шетки. то эффективные проводящие свойства решеток являются прак­тически идентичными. Учитывая этот факт, целесообразно проводить моделирование пористой среды на основе регулярных решеток, т.к. они проще в описании.

Встречающиеся в различных исследованиях решеточные модели мож­но разделить на те, что были развиты с использованием математиче­ского аппарата и компьютерных расчетов, и те, в которых решеточ­ная структура пор и поровых каналов создавалась натуральным обра­зом. Последние использовались для визуального изучения течения в решеточной структуре. Первые подобные модели были сконструиро­ваны еще в 50-х годах для изучения несмешивающегося вытеснения нефти солевым раствором [1] в однослойной упаковке шариков, распо­ложенной между двумя стеклами.

Вскоре для моделирования процесса вытеснения в пористой среде стали использовать выгравированную в стекле двумерную решетку.

Для этого были развиты технологии, позволяющие изготавливать ре­шетки с заданной геометрией [15]. Экспериментальные работы по на­глядному изучению двухфазной фильтрации в таких решетках стали особенно полезными для получения более ясного представления о ходе процесса вытеснения одного флюида другим [16].

Среди математических описаний проводимости решетки стоит от­метить модели, основанные на аналитических подходах. Эти подходы получили свое развитие из теоретического описания проводимости раз­личных решеточных структур, которые и стали основой для определе­ния абсолютной проницаемости пористой среды. Наиболее значимые из них использовали теорию эффективной среды или теорию перколяции. Теория эффективной среды включает в себя феноменологическую ме­тодику для определения общих свойств неупорядоченной среды посред­ством ее замены на гипотетическую однородную среду с теми же прово­дящими свойствами [17]. В терминах решеточной модели это означает, что решетка из различных по значению проводимости элементов заме­няется решеткой элементов с одинаковой проводимостью (эффективной решеткой). При этом общая проводимость эффективной решетки экви­валентна исходной. Основные соотношения, позволяющие определить проводимость элементов эффективной решетки для заданной исход­ной решетки, были предложены в [18, 19] для регулярной решетки из электрических проводников. Впоследствии модель эффективной среды распространили для анизотропной [20] и нерегулярной [21] решетки, а также на случай, когда нужно учитывать проводимость не только связующих элементов, но и узлов решетки [22]. В [23] было показано, что теория эффективной среды адекватно описывает проводимость ре­шетки только вдали от порога протекания, т.е. когда проводимость решетки не стремится к нулю. Предлагались различные дополнитель­ные модификации этой теории [24, 25], включая применение методов ренормализации [26], с целью улучшения результатов ее использова­ния вблизи порога протекания (при стремлении общей проводимости к нулю). Однако в рамках этих модификаций не было представлено аналитических соотношений для определения проводимости решетки.

Исследования процесса возникновения протекания по решетке, со­стоящей из проводящих и непроводящих элементов, легли в основу теории перколяции [27, 28]. В рамках этой теории представлен ряд асимптотических соотношений, характеризующих параметры прово­дящего кластера (соединенных между собою проводящих элементов, по которым происходит протекание) вблизи порога протекания. Один из первых методов для описания проводимости решетки, использую­щий теорию перколяции, был развит в [29]. В нем предполагалось, что протекание в решетке со случайным распределением проводящих эле­ментов происходит главным образом только по элементам с проводимо­стью, большей некоторого критического значения, определяемого поро­гом протекания по данной решетке. На основе данного метода в рабо­тах [30, 31] были предложены соотношения для описания проводимости решетки. Однако эти соотношения не учитывали вид функции распре­деления проводимости элементов решетки, а также сеточную струк­туру [32] проводящего кластера. Более адекватный подход к определе­нию проводимости решетки, учитывающий вышеуказанные факторы, получил свое развитие в [33]. Он основывался на представлении о нере­гулярной сеточной структуре проводящего кластера [34] в окрестности порога протекания. В данном подходе были выведены аналитические зависимости для расчета проводимости решетки с заданной функцией распределения проводимости элементов решетки. Представленные за­висимости позволяли хорошо описывать проводимость вблизи порога протекания, но теряли свою точность при удалении от порога проте­кания, вследствие чего возникала необходимость вводить поправочные коэффициенты [35].

Предлагаемый в первой главе диссертационной работы аналитиче­ский метод объединяет в себе перколяционный подход [35] для опре­деления проводимости (проницаемости) решеточной модели в окрест­ности порога протекания и модель эффективной среды [18], использо­вание которой вдали от порога протекания является более оправдан­ным [23]. Это позволяет адекватно рассчитывать общую проводимость решетки при любом распределении проводимости ее элементов, то есть аналитически определять абсолютную проницаемость пористой среды при ее моделировании капиллярной решеткой с заданной функцией рас­пределения капилляров по радиусам.

Во второй главе диссертационной работы проводится обобщение развиваемого подхода на случай определения фазовых проницаемостей при совместном течении флюидов. Важность кривых фазовых проница­емостей для задания режимов разработки месторождений стало причи­ной развития огромного количества методов моделирования двухфаз­ной фильтрации [2].

Лабораторное определение фазовых проницаемостей на реальных образцах пород (кернах) весьма трудоемко. К тому же оно не позволяет выявить влияние различных факторов (структуры порового простран­ства, реологии флюидов и т.п.) на измеряемые величины. Для этих целей широко используются математические модели. Большинство та­ких моделей, основанных на решеточном представлении среды, явля­ются или продолжением описанных выше аналитических моделей для определения проводимости решетки, или используют прямые числен­ные расчеты двухфазного вытеснения в капиллярной решетке (имита­ционные модели), или же учитывают только в общих чертах динамику процесса вытеснения (модели инвазионной перколяции, диффузионно­ограниченного роста и т.п.).

В основе имитационных моделей двухфазного вытеснения в капил­лярной решетке лежит численный расчет поля давлений в узлах ре­шетки [36]. При моделировании первоначально предполагается, что с одной стороны решетки постоянно находится вытесняющий флюид, а вытесняемый заполняет всю решетку. Процесс вытеснения модели­руется по шагам, посредством последовательного вытеснения одного флюида другим из определенных капилляров. При этом выбор капил­ляров, которые на каждом шаге заполняются вытесняющим флюидом, зависит от рассчитанного поля давлений и условия возможности осу­ществить вытеснение из капилляра. Данное условие определяется тем, какие силы учитываются при вытеснении. В первых имитационных мо­делях, вследствие слабого развития вычислительной техники, расчет поля давления производился приближенными аналитическими спосо­бами. При этом рассчитывалось даже не само давление, а его перепад на каждом капилляре [36]. Таким образом в [37, 38, 39] моделировалось вытеснение с учетом капиллярных сил, а в [40, 41] рассматривался случай преобладание гидродинамических сил. В процессе численного моделирования определялись распределения вытесняющего и вытесня­емого флюида по капиллярам решетки, что могло быть использовано для расчета фазовых проницаемостей. Так в [42] фазовые проницае­мости определялись как доля суммарного потока каждого флюида в капиллярах в общем потоке, а в [43, 44, 45] для этого использовались соотношения для проводимости перколяционного кластера. При этом первые имитационные модели по своей сути описывали не динамику за­полнения среды, а лишь возможную картину распределения флюидов в решетке после достижения равновесного состояния [36]. Впоследствии с развитием возможностей компьютерных вычислений появились много­численные работы [46, 47, 48] по численному моделированию двухфаз­ного течения в решетках с самой разнообразной геометрией, отража­ющие динамику процесса при различных режимах вытеснения. Нерав­новесные модели вытеснения с учетом капиллярных сил представлены в [49, 50], численные расчеты режимов двухфазного вытеснения при различных значениях капиллярного числа и отношения вязкости флю­идов были сделаны в [51, 52]. В целом представленные имитационные модели позволяют глубже понимать и анализировать развитие процес­са вытеснения, а также делать необходимые количественные расчеты его общих параметров. Однако недостатком подобных моделей явля­ется невозможность получения аналитических результатов, а также очень большие временные затраты на вычисление, особенно на трех­мерных решетках.

Одновременно с развитием имитационных моделей получили ши­рокое распространение численные модели, которые в общих чертах описывают динамику двухфазного вытеснения при различных режи­мах. В этих моделях заполнение решетки вытесняющим флюидов опре­деляется только заданным алгоритмом движения флюида на каждом шаге. Основными такими моделями являются инвазионная перколя- ция [53, 54], диффузионно-ограниченная агрегация (DLA) [55] и модель anti-DLA [56]. Для инвазионной перколяции в [57, 51] было показано ее соответствие вытеснению при доминировании капиллярных сил (ка­пиллярной пропитки), что послужило основой для детальных исследо­ваний структуры инвазионного кластера [58], а также развитием раз­личных модификаций этой модели для описания процесса образования оставшихся изолированными целиков вытесняемого флюида [59, 60, 61]. Адекватность модели диффузионно-ограниченной агрегации про­цессу образования ” вязких пальцев” при неустойчивом вытеснении, ко­гда преобладают гидродинамические силы, и вязкость вытесняющего флюида много меньше вытесняемого, отмечена в [62, 63]. При обрат­ном соотношении между вязкостями флюидов наблюдается ’’поршневое вытеснение”, которое в целом описывается моделью anti-DLA [56, 64]. Таким образом, эти модели позволяют получить приближенное распре­деление флюидов по капиллярной решетке при различных режимах те­чения без проведения прямых численных расчетов вытеснения, а также дают возможность применять элементы теории фракталов [65, 66] для описания структурных свойств образующихся при вытеснении класте­ров. Все это можно использовать в моделях аналитического описания фазовых проницаемостей.

Имеющиеся аналитические модели для определения фазовых прони­цаемостей, как правило, обобщают зависимости, выведенные ранее для описания проводимости капиллярной решетки, на случай совместного течения флюидов, поэтому имеют уже упоминавшиеся выше недостат­ки. Так модели, включающие аналитические соотношения для расчета фазовых проницаемостей на основе теории эффективной среды (метода самосогласованного поля), получили свое развитие в работах [67, 68, 69]. Принципы аналитического определения фазовых проницаемостей, использующие теорию перколяции и модель Шкловского-де-Жена [34] для структуры перколяционного кластера, изложены в [70, 71].

Выводимые во второй главе диссертационной работы аналитиче­ские соотношения для расчета фазовых проницаемостей включают с себя результаты перколяционного подхода и модели эффективной сре­ды и таким образом корректно описывают фазовые проницаемости при любом значении насыщенности.

Третья глава диссертационной работы посвящена описанию особен­ностей фильтрации неныотоновских жидкостей. Анализ практики раз­работки многих нефтяных месторождений показывает, что фильтра­ция пластовых флюидов не всегда удовлетворяет закону Дарси. Дан­ный факт объясняется повышенным содержанием в нефтях смолисто- асфальтеновых веществ, которые увеличивают плотность и вязкость нефти. При фильтрации таких нефтей нарушается линейный закон вяз-

кого трения Ньютона, поэтому их называют неньютоновскими (или аномальными) [72]. Чтобы придать подвижность такого рода нефтям необходимо преодолеть некоторое пороговое (предельное) значение гра­диента давления. Поэтому для описания их движения в пористой сре­де чаще всего используют закон фильтрации с предельным градиен­том [73, 74], в котором само значение предельного градиента обычно определяют из экспериментов.

Помимо пластовых флюидов неньютоновские свойства могут также проявлять и различные вещества, закачиваемые в продуктивные пла­сты с целью увеличения добычи углеводородного сырья. Так, в част­ности, получают распространение методы повышения нефтеотдачи с использованием полимерных растворов [75], реология которых носит неньютоновский (степенной) характер.

Вследствие своей прикладной важности теоретическое изучение филь­трации неньютоновских жидкостей приобрело самостоятельное значе­ние [74, 4]. Влияние неньютоновской реологии флюида на его фазо­вую проницаемость исследовалось в экспериментальных работах [72]. Как отмечалось в [76], анализ экспериментальных данных показывает, что значение предельного градиента зависит не только от вязкопла­стических свойств флюидов и структуры порового пространства, но и от насыщенности породы данным флюидом. Таким образом, для об­щего описания фильтрации вязкопластической жидкости необходимо знать конкретный вид зависимостей как фазовых проницаемостей, так и предельного градиента от вышеуказанных факторов. В [77] значения фазовых проницаемостей и предельного градиента определялись на ба­зе прямых численных расчетов течения вязкопластической жидкости через капиллярную решетку. Однако такой подход, как и эксперимен­тальные измерения, не позволяет получить общий вид функциональ­ных соотношений для задания данных параметров. Аналитические со­отношения для определения зависимости фазовых проницаемостей от реологии флюида были предложены в [78, 35] с использованием перко- ляционного подхода. Поскольку для вывода соотношений в этих рабо­тах использовались те же принципы, что и для описания течения нью­тоновских флюидов, то по уже указанным ранее причинам полученные соотношения не позволяют корректно определять поведение основных параметров фильтрации при больших значениях насыщенности флю­идом.

Учитывая этот факт, в третьей главе настоящей работы на базе развитого в первой главе подхода выводятся уравнения фильтрации вязкопластических и степенных жидкостей, адекватно описывающие течение неньютоновских флюидов при любых значениях насыщенно­сти. В рамках полученных уравнений выписываются аналитические соотношения для расчета фазовых проницаемостей в зависимости от заданной реологии флюидов и значения насыщенности фаз, а также для определения предельного градиента давления для случая течения вязкопластической жидкости.

В качестве примера использования полученных зависимостей в тре­тьей главе проводиться расчет фазовых проницаемостей при филь­трации полимерного раствора с заданной реологией. В качестве ис­ходных данных берутся результаты применения полимерного заводне-

ния с целью повышения нефтеотдачи на Покамасовском месторожде­нии [79]. При этом моделируется два варианта использования полимер­ного раствора: разовая закачка полимера и постоянное заводнение [80]. Для этих двух вариантов на базе полученных выражений для фазо­вых проницаемостей проводиться оценка эффективности применения полимерного раствора для увеличения доли нефти в потоке и коэффи­циента нефтеотдачи, рассчитанных в рамках модели Бакли-Леверетта. При этом выявляется хорошее соответствие модельных расчетов сред­ним значениям оцениваемых параметров, взятых из эксперименталь­ных данных по использованию рассматриваемого полимерного раство­ра на промысле [79].

В четвертой главе диссертационной работы исследуется фильтра­ция взвесей и эмульсий, в процессе которой взвешенные в жидкости твердые частицы или капли эмульсии осаждаются на поверхности по- ровых каналов. Рассматриваемые процессы относятся к широко изуча­емым явлениям массопереноса в горных породах [81]. Данные явления представляют собою комплекс различных физико-механических или физико-химических процессов, протекающих в процессе движения жид­костей, содержащих механические или химические примеси, в горных породах. Главной особенностью этих процессов является вытеснение пластовых флюидов, сопровождающееся взаимодействием (массообме- ном) между движущимися жидкостями и горной породою. При этом природа взаимодействий может быть различной. Так, исследования фильтрации жидкости (растворов), при которой имеет место физико­химическое взаимодействие (сорбция, ионный обмен, растворение и т.п.),

занимают центральное место в современных проблемах гидрогеологии в связи с происходящими промышленными загрязнениями подземных вод [82]. Эти исследования основываются на хорошо развитом теоре­тическом аппарате подземной гидродинамики с учетом процессов кон­вективной диффузии (дисперсии) и кинетики массообмена [83, 84].

Другое направление исследований процессов массопереноса связано с определением изменений общих характеристик горной породы при осаждении на ее скелете механических частиц, присутствующих в ви­де взвеси в фильтрующихся жидкостях. Такие задачи возникают при изучении образования глинистых корок на стенках скважин, а так­же кольматации призабойной зоны скважины при циркуляции буро­вого раствора. В [85] представлены теоретические исследования этих явлений, в рамках которых получены эмпирические соотношения для описания эволюции проницаемости призабойной зоны и глубины про­никновения частиц бурового раствора, полученные на базе эксперимен­тальных наблюдений.

Проблема проникновения взвешенных частиц вглубь породы с по­следующим их осаждением на поверхности поровых каналах также исследуется для моделирования удаления механических примесей из жидкости при ее фильтрации через различные фильтры. Однако наи­более активно эта задача изучается в связи с использованием техно­логии закачки воды в нагнетательные скважины для увеличения неф­теотдачи. Техническая вода, нагнетаемая в продуктивные пласты для вытеснения нефти, обычно содержит взвешенные частицы различных размеров. Проникновение частиц в глубину пласта и осаждение их в поровых каналах приводит зачастую к серьезному уменьшению прони­цаемости породы. Поэтому обычно необходимо очищать воду перед за­качкой в пласт, чтобы предотвратить значительные нарушения прово­дящих свойств породы вследствие осаждения. При этом степень очист­ки технической воды зависит от двух факторов: стоимости работ по удалению механических примесей и допустимого значения изменения проницаемости. Таким образом, важно установить зависимость изме­нения проницаемости от концентрации взвешенных частиц и их раз­меров как для непосредственной оценки возможного ухудшения прово­дящих свойств пористой среды, так и для выработки рекомендаций по предварительной очистке закачиваемой в скважины воды.

Среди моделей, развитых для расчетов вышеуказанных изменений, можно выделить следующие основные группы: эмпирические модели, модели траєкторного анализа и решеточные модели. Эмпирические мо­дели [86]-[89] рассматривают процесс фильтрации жидкости с взве­шенными частицами на основе макроскопических уравнений механи­ки сплошной среды, которые дополняются различными эмпирическими соотношениями, устанавливающими связь между изменениями основ­ных параметров процесса. При этом значения коэффициентов, входя­щих в уравнения, необходимо каждый раз измерять экспериментально при изменении условий фильтрации. Эмпирические модели удобны в силу простоты расчетов по ним, но они не позволяют адекватно объ­яснять влияние характеристик взвешенных частиц или геометрии да­рового пространства на изменение общих параметров процесса.

В моделях траєкторного анализа [90, 91] скелет породы представля­ется в виде упаковки единичных объектов различной формы (сфериче­ской, цилиндрической и т.п.). Осаждение частицы на единичном объек­те рассчитывается на базе решения задачи об обтекании жидкостью с взвешенными частицами твердого тела. При этом силы, действующие на частицы в жидкости, могут быть различными (гравитационными, гидродинамическими, вандерваальсовскими и т.п.). Модели траєктор­ного анализа приводят к более глубокому пониманию процесса осажде­ния на уровне отдельных пор и дают возможность аккуратно опреде­лять изменение концентрации осажденных частиц. Однако эти моде­ли имеют ряд ограничений в использовании. Одним из них является некорректное описание изменения проницаемости породы, связанное с использованием в подобных моделях формулы Козени-Кармана, выве­денной для идеального грунта. Так же стоит отметить, что в моделях траєкторного анализа рассматриваются монодисперсные частицы, в то время как в реальности они имеют различные распределения по раз­мерам.

В решеточных моделях [92]-[94] процесс осаждения частиц изучает­ся на основе представления среды капиллярной решеткой. При этом осаждение моделируется в каждом отдельном капилляре решетки с использованием данных о распределении капилляров по радиусам и частиц по размерам, а также с учетом особенностей взаимодействия частиц со скелетом породы. Большинство решеточных моделей [92, 94] предлагают прямые численные расчеты движения частиц через ка­пиллярную решетку. Такой подход, помимо того, что является очень трудоемким и требующим больших временных затрат на вычисление, не позволяет получать функциональные зависимости для расчета из­менения параметров процесса.

Поэтому в четвертой главе диссертационный работы предлагается комплексная модель, объединяющая макроскопическое описание про­цесса фильтрации посредством уравнений механики сплошной среды и решеточное моделирование осаждения частиц на микроуровне. Ис­пользование макроскопических уравнений позволяет быстро рассчи­тать развитие процесса во времени. А анализ осаждения на микроуров­не дает возможность определить коэффициенты уравнений, зависящие от условий и характера осаждения в поровых каналах.

Осаждению частиц, имеющих различное распределением по разме­рам, посвящен ряд экспериментальных работ [95]. Поэтому имеется возможность сравнить данные экспериментальных наблюдений по из­менению проницаемости среды, концентрации осажденных частиц и частиц в жидкости с численными расчетами этих параметров в рам­ках развиваемой в четвертой главе модели.

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

1. Построена новая модель переноса неоднородных систем в решеточ­ных структурах, адекватно описывающая их проводящие свойства во всем диапазоне изменения параметра порядка. Данная модель являет­ся основой для теоретического анализа широкого спектра процессов многофазной фильтрации.
2. На базе построенной модели получены аналитические соотношения для расчета фазовых проницаемостей в случаях течений ньютоновских, вязкопластических и степенных жидкостей. При этом для вязкопласти­ческого флюида выведены зависимости, определяющие величину пре­дельного градиента в зависимости от насыщенности решетки рассма­триваемым флюидом.
3. В случае двухфазной фильтрации предложен способ расчета функ­ций распределения каждого флюида по капиллярам решетки для раз­личных режимов течения. Проведен сравнительный анализ интеграль­ных характеристик инвазионного режима двухфазного течения флюи­дов с различной реологией.
4. Построена комплексная модель движения взвесей и эмульсий в ре­шеточных структурах, сочетающая макроскопическое описание филь­трации таких двухфазных систем и микромеханическое моделирование взаимодействия частиц взвеси (капель эмульсии) с поверхностью поро- вых каналов. Представлены общие закономерности влияния структу­ры порового пространства и вида распределения частиц взвеси (капель эмульсии) по размерам на изменение проницаемости среды и концен­трации частиц в проходящем потоке.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Sahimi М. Flow phenomena in rock: from continuum models to fractals, percolation, cellular automata, and simulating annealing// Rev. Mod. Phys., vol. 65, No. 4, 1993, pp. 1393-1534.
2. Sahimi M. Flow and Transport in Porous Media and Fracture Rock. VCH, Weinheim, Germany, 199-5. 482 p.
3. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов **В.**М. Подземная гидромеханика,- М.: Недра, 1993.- 414 с.
4. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. - М.:Недра, 1984. 207 с.
5. Марморштейн Л.М. Коллекторские и экранирующие свойства осадочных по­род при различных термодинамических условиях. Л.: Недра, 1975. 159 с.
6. Плаченов Т.Г., Колосенцев С.Д. Порометрия. - Л.: Химия, 1988. 176 с.
7. Моделирование пористых материалов. Новосибирск: СО АН СССР, 1976. 190 с.
8. Ромм Е.С. Структурные модели порового пространства горных пород. Л.: Не­дра, 1985. 240 с.
9. Шейдеггер А.Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. М.: Госто- птехиздат, 1960. 250 с.
10. Черемской П.Г. Методы исследования пористости твердых тел. М.: Энерго- атомиздат, 1985. 112 с.
11. Fatt I. The Network Model of Porous Media. I, И, III// Pet. Trans., 1956. V. 207. P. 144-181
12. Lin C., Cohen M.H. Quantitative methods for microgeometric modeling// J.Appl. Phys., vol. 53, 1982. p. 4152-4165.
13. Jerauld G.R., Davis H.T., Scriven L.E. Stability Fronts of Permanent Form in Immiscible Displacement//Paper SPE 13164, presented at the 59th Annual Conference of the Society of Petroleum Engineers, Houston, Texas, 1984.
14. Jerauld G.R., Hatfield L.E., Srcriven L.E., Davis H.T. Percolation and conduction on Voronoi and triangular networks: a case study in topological disorder//J.Phys. C, vol. 17, 1984. p. 1519-1530.
15. Buckley J.S. Multiphase displacements in mic.romodels in Interfacial Phenomena in Petroleum Recovery. Surfactant Science Series, Vol. 36 Marcel Dekker, New York, 1991. p. 157 -189.
16. Avraam D.G., Payatakes A.C. Flow regimes and relative permeabilities during steady-state two phase flow in porous media// J. Fluid Mech. 293, 1995. pp. 207- 236.
17. Landauer R. The electrical resistance of binary metallic mixtures// J.Appl.Phys., vol. 23, 1952, p.779-784
18. Киркпатрик С. Перколяция и проводимость// Теория и свойства неоднород­ных материалов,- М.:Мир,1977. Вып.7. С.240-292.
19. Kirkpatrick S. Classical transport in disordered media: scaling and cffective- medium theories //Phys.Rev.Lett., 1971. Vol. 27, No. 25, pp. 1722-1725.
20. Bernasconi J. Conduction in anisotropic disordered systems: Effective-medium theory// Phys. Rev. B, vol. 9, 1974. pp. 4575-4579.
21. Sahimi М., Scriven L.E., Davis H.T. On the improvement of the effective-medium approximation to the percolation conductivity problem// J.Phys. C, vol. 17, 1984. p.1941-1948.
22. Koplik J. Creeping flow in two-dimensional networks// J.Fluid. Mech., vol. 119,
23. p.219-247.
24. Koplik J. On the effective medium theory of random linear networks// J.Phys. C. vol. 14, 1981. p.4821-4837.
25. Sheng P. Pair-cluster theory for the dielectric constant of composite media// Phys.Rev. B, vol. 22, 1980. p. 6364-6368.
26. Sahimi M. Effective-medium approximation for density of states and the spectral dimension of percolation networks// J.Phys. C, vol. 17, 1984. p.3957-3966.
27. King P.R. The use of renormalization for calculation effective permeability// Transp. Porous Media, No. 1, 1989. pp. 37-58.
28. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Теория протекания и проводимость сильно неод­нородных систем //Успехи физических наук, 1975. Т.117. Вып.З. С.5-24.
29. Кестен X. Теория просачивания для математиков. - М.: Мир, 1986. 391 с.
30. Anibegaokar V., Halperin В.I., Langer J.S. Hopping conductivity in disordered systems// Phys. Rev. B, vol. 4, 1971. pp. 2612-2620.
31. Shante V.K.S. Hopping conduction in quasi-one-dimensional disordered compounds// Phys.Rev. B, vol. 16, 1977. p. 2597-2612.
32. Katz A.J., Thompson A.H. Quantitative prediction of permeability in porous rock//Phys.Rev. B, vol. 34, 1986. p.8179-8181.
33. de Gennes P.G., Guyon E. Lois generates pour l’injection d’un guide dans un milieu poreux aleatoire//J.Mech., vol. 17, 1978. p. 403
34. Селяков В.И. Эффективная проницаемость неоднородной среды// Динамика многофазных сред: Матер. 7-го Всесоюз. семинара. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1985. С. 199-203.
35. Gennes P.G.de. Scaling Concepts in Polymer Physics, Cornell University Press, Ithaca&London, 1979. (Переведена на русский язык: - П. де-Жен. Идеи скей- линга в физике полимеров.- М.:Мир, 1982. 368 с.)
36. Селяков В.И., Кадет В.В. Перколяционные модели процессов переноса в ми- кронеоднородных средах. - М.:Недра, 1995. 222 с.
37. Панфилов М.Б., Туваева И.В. Перколяционные модели процессов вытеснения жидкостей в случайно-неоднородных средах// М.: Препринт 12 ИПНГ АН СССР, 1991. 91 с.
38. Ентов В.М., Фельдман А.Я., Чен-Син Э. Моделирование процесса капилляр­ного вытеснения в пористой среде// Изв. АН СССР, Программирование, 1975 3, С.67-74
39. Larson R.G., Scriven L.E., Davis Н.Т. Percolation theory of two phase flow in porous media// Chem.Eng.Sci., v.36, No. 1, 1981. pp. 57-73.
40. Панфилов М.Б. Влияние структуры пористой среды на остаточную газона- сыщенность при капиллярном впитывании жидкости// Известия АН СССР, МЖГ, 5, 1981. С.128-133.
41. Singhal А.К., Somerton W.H. Quantitative modeling of immiscible displacement in porous media: a network approach// Rev.Inst.Fr.Petr., vol. 32, No. 6, 1977. pp. 897-920.
42. Mohanty K.K., Davis H.T., Scriven L.E. Physics of oil entrapment in water-wet rock// Paper SPE 9406 presented at the 55th Annual Conference of the Society of Petroleum Engineers, Dallas, Texas, 1980.
43. Ентов B.M., Фельдман А.Я., Чен-Син Э. Численное моделирование равнове­сия движения несмешивающихся жидкостей в сетке капилляров на ЭВМ// М. Деп.ВИНИТИ 24.06.80, 3608-80, 1980. 24 с.
44. Heiba A.A., Sahimi М., Scriven L.E., Davis Н.Т. Percolation Theory of Two-Phase Relative Permeability//Paper SPE 11015 presented at the 57th Annual Meeting of the Society of Petroleum Engineers, New Orleans, Louisiana, 1982.
45. Chandler R., Koplik J., Lerman K., Willemsen J.F. Capillary displacement and percolation in porous media// J. Fluid Mech. 119, 1982. p. 249.
46. Перколяционные характеристики ветвящихся моделей пористых сред// Изве­стия АН СССР, МЖГ, 6, 1990. С.128-136.
47. Koplik J., Lasseter T.J. Two-phase flow in random network models of porous media// Soc.Pet.Eng.J., vol. 25, 1985. p.89-100.
48. Dias M.M., Payatakes A.C. Network models for two-phase flow in porous media// J. Fluid Mech. 164, 1986. pp. 305-358.
49. Leclerc D.F., Neale G.H. Monte Carlo simulations of radial displacement of oil from a wetted porous medium: fractals, viscous fingering and invasion percolation// J.Phys. A, vol. 21, 1988. p. 2979-2994.
50. Манучарянц Э.О., Мишина А.Ю., Юдин В.А. Моделирование неравновесного вытеснения двух несмачивающихся жидкостей в сетке капилляров на ЭВМ// М.: Деп. в ВИНИТИ 23.04.85, 3748-85, 1985. 48 с.
51. Ентов В.М., Чен-Син Э. Макромеханика двухфазного течения в пористых сре­дах/ / Численные методы решения задач фильтрации многофазной несжимае­мой жидкости, Новосибирск, 1987. С.120-129.
52. Lenormand R., Touboul Е., Zarcone С. Numerical models and experiments on immiscible displacement in porous media// J. Fluid Mech. 189, 1988. pp. 165-187.
53. Blunt М., King P.R. Macroscopic parameters from simulations of pore scale flow//Phys.Rev. A, vol. 42, 1990. p.4780-4787.
54. Lenormand R., Bories S. Description d’un mechanisme de connexion de liaisons destine a l’etude du drainage avec piegeage en miliue poreux// C.R.Acad.Sci. B, Paris, v.291, 1980, pp.279-280.
55. Wilkinson D., Willemsen J.F. Invasion Percolation: A new Form of Percolation// J. Phys. A 16, 1983. pp. 3365-3371.
56. Witten T.A., Sander L.M. Diffusion limited aggregation// Phys.Rev. B, vol. 27,
57. pp. 5686-5697.
58. Paterson L. Diffusion-limited aggregation and two-fluid displacement in porous media// Phys. Rev. Lett. 52, 1984. pp. 1621-1624.
59. Lenormand R., Zarcone C., Sarr A. Mechanisms of the displacement of one fluid by another in the network of capillary ducts// J. Fluid Mech. 135, 1983. pp. 337-353.
60. Chayes J.T., Chayes L., Newman C.M. The stochastic geometry of invasion percolation// Commun. Math. Phys., v.101, 1985. P.383-407.
61. Нелокальные модели проникающей перколяции// Труды конф. ИПНГ АН СС­СР, Звенигород, 11-15 марта 1991 г., - М.: изд. ИПНГ АН СССР, 1991, 21 с.
62. Панфилов М.Б., Панфилова И.В. Макрокинетическая модель процесса цели- кообразования при двухфазном вытеснении жидкостей в пористой среде// Изв.РАН МЖГ, 3, 1995. С.92-101.
63. Панфилов М.Б. Макрокинетика целикообразования в циклической модели эф­фективной среды// Изв.РАН МЖГ, 2, 1995. С.92-98.
64. Maloy K.J., Feder J., Jossang T. Viscous fingering fractals in porous media// Phys. Rev. Lett. 55, 1985. pp. 1885-1891.
65. Oxaal U. Fractal viscous fingering in inhomogeneous porous models// Phys.Rev. A, vol. 44, 1991, p.5038-5051.
66. Sherwood J.D. Unstable fronts in a porous medium// J.Comp. Phys., vol. 68,1987. pp. 485-500
67. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. Freeman, San Francisco, 1983. 468 p.
68. Bunde A., Havlin S. Fractals and Disordered Systems. Springer, Berlin, 1991. 408 p.
69. Хейфиц Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых телах. М.: Хи­мия, 1982. 320 с.
70. Зак С.А., Чен-Син Э. Определение относительных фазовых проницаемостей по капиллярным кривым с помощью теорию перколяции// Методы повышения нефтеотдачи пластов, М.: Тр.ВНИИ, вып. 96, 1986. С.194-201.
71. Хавкин А.Я., Хайдина М.П., Никифоров И.Л. Расчеты влияния структуры порового пространства на относительные фазовые проницаемости и нефтеот­дачу// Нефтяная и газовая промышленность, 1995, 1, С.53-56.
72. Кадет В.В., Сепяков В.И. Перколяционная модель двухфазного течения в по­ристой среде// Изв. АН СССР, Механика жидкости и газа, , 1987. С. .
73. Ентов В.М., Шефтер Ю.Г. Исследование влияния структуры и свойств пори­стой среды на характеристики двухфазного течения с помощью перколяци- онной модели// Численные методы решения задач фильтрации многофазной несжимаемой жидкости, Новосибирск, 1988. С.96-100.
74. Девликамов В.В., Хабибуллин З.А., Кабиров М.М. Аномальные нефти. М.: Не­дра, 1975. 167 с.
75. Мирзаджанзаде А.Х., Ковалев А.П., Зайцев Ю.В. Особенности эксплуатации месторождений аномальных нефтей. М.: Недра, 1972. 200 с.
76. Бернадинер М.Г., Ентов В.М. Гидродинамическая теория фильтрации ано­мальных жидкостей. М.: Наука, 1975. 199 с.
77. Власов С.А., Краснопевцева Н.В., Каган Я.М., Фомин А.В., Рязанов А.А. Но­вые перспективы полимерного заводнения в России// Нефтяное хозяйство, *№* 5, 1998. С. 46-49.
78. Ентов В.М., Панков В.Н., Панько С.В. Математическая теория целиков оста­точной вязкопластичной нефти. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1989. 193 с.
79. Велихова Н.В., Данилова Н.А., Ентов В.М., Чен-Син Э.П. Моделирование не­равновесной и нелинейной фильтрации в сетке капилляров// Численное ре­шение задач фильтрации многофазной несжимаемой жидкости. Новосибирск: Изд. ин-та техн. и прикл. мех., 1977. С. 17-24.
80. Кадет В.В., Попов А.Е., Селяков В.И. Влияние пластических свойств флюидов на фазовые проницаемости// Изв. АН СССР, МЖГ, *№* 2, 1991. С. 110-115.
81. Создание технологического комплекса (технология и оборудование) для интен­сификации добычи нефти и увеличения нефтеотдачи пластов на основе био­полимеров, производимых на нефтепромысле. // Отчет научно-технического объединения ”Итин” Инженерной академии РФ. Государственная научно- техническая программа ’’Прогрессивные технологии комплексного освоения топливно-энергетических ресурсов недр России”. - М., 1996.
82. Балакин В.В., Власов С.А., Фомин А.В. Моделирование полимерного заводне­ния слоистонеоднородного пласта// Нефтяное хозяйство, *№* 1, 1998. С. 47-48.
83. Алексеев B.C., Коммунар Г.М., Шержуков Б.С. Массоперенос в водонасыщен­ных горных породах, М.: ВИНИТИ, 1989. 140 с.
84. Мироненко В.А., Мольский Е.В., Румынии В.Г. Изучение загрязнения подзем­ных вод в горнодобывающих районах. Л.: Недра, 1988. 278 с.
85. Веригин Н.Н., Шержуков Б.С. Диффузия и массообмен при фильтрации жид­костей в пористых средах. ’’Развитие исследований по теории фильтрации в СССР”. М.: Наука, 1969. С. 237-313.
86. Бондарев Э.А., Николаевский В.Н. Конвективная диффузия в пористых средах с учетом явления адсорбции. ’’Прикл. мех. и техн. физика”, *№,* 1962. С. 128- 134.
87. Михайлов Н.Н. Информационно-технологическая геодинамика околоскважин- ных зон. М.: Недра, 1996. 339 с.
88. Gruesbeck С., Collins R.E. Entertainment and Deposition of Fine Particles in Porous Media // SPE J., 1982. P. 847.
89. Soo H., Radke C.J A Filtration Model for the Flow of Dilute, Stable Emulsion in Porous Media. I: Theory// Chem.Eng. Sci, 1986. V. 41. *№* 2. P. 263.
90. Wennberg K.E., Sharma M.M. Determination of the Filtration Coefficient and Transition Time for Water Injection Wells // SPE 38181, 1997.
91. Шехтман Ю.М. Фильтрация малоконцентрированных суспензий. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 212 с.
92. Payatakes А.С., Tien С., Turian R.M. A new Model for Granular Porous Media. I: Model Formulation// AIChE J., 1973. V. 19. *№* 1. P. 58.
93. Mackie R.I., Horner R.W., Jarvis R.J. Dynamic Modeling of Deep-Bed Filtration// AIChE J., 1987. V. 33. *№* 11. P. 1761.
94. Todd A.C., Somerville J.E., Scott G. The Application of Depth of Formation Damage Measurements in Predicting Water Injectivity Decline// SPE 12498, 1984.
95. Sharma M.M., Yortsos Y.C. Transport of Particle Suspensions in Porous Media// AIChE J., 1987. V. 33. *№* 10. pp. 1636-1663.
96. Rege S.D., Fogler H.S. A Network Model for Deep Bed Filtration of Solid Particles and Emulsion Drops// AIChE J., 1988. V. 34. *№* 11. P. 1761.
97. Soo H., Radke C.J. Flow of Dilute Stable Liquid and Solid Dispersion in Underground Porous Media// AiChE J., 1985. V. 31. *№* 11. P. 1926.
98. Эфрос A.JI. Физика и геометрия беспорядка. - М..’Наука, 1982. 272 с.
99. Соколов И.М. Размерности и другие геометрические критические показатели в теории протекания //Успехи физических наук, 1986. - Т.150. - Вып.2. - С.221- 255.
100. Займан Дж. Модели беспорядка. М.:Мир, 1982. 591 с.
101. Абдульманов И.Г., Глушко С.П., Кадет В.В., Селяков В.И. Электропорометри- ческий метод восстановления функции распределения капилляров по радиусам. // ПМТФ. - 4. - 1988
102. Глушко С.П., Кадет В.В., Ростовский Н.С., Метод ртутной электропороме- трии. // ПМТФ. - 1.-1991.
103. Hardy Н.Н. Jots - a mathematical model of microscopic fluid flow in porous media// Transp. Porous Media, No. 1, 1990. pp. 27-48.
104. Jerauld G.R., Salter S.J. The effect of pore-structure on hysteresis in relative permeability and capillary pressure: pore-level modelling// Transp. Porous Media, No. 2, 1990. pp. 103-152.
105. Кадет В.В., Шапиро А.А. Определение инерционных и вязкостных потерь при нелинейной фильтрации жидкости в пористой среде //Фильтрации неоднород­ных систем. - М.:ВНИИГАЗ, 1988. - С. 20-26.
106. Host-Madsen J., Hogh-Jensen К. Laboratory and numerical investigation of immiscible multiphase flow in soil// J. Hydrology 135, 1992. pp. 13-52.
107. Yanuka M. Percolation theory approach to transport phenomena in porous media// Transp. Porous Media 7, 1992. pp. 265-282.
108. Yortsos Y.C., Satie C., Bacri J.-C., Salin D. Large-scale percolation theory of

drainage// Transp. Porous Media, No. 10, 1993. pp. 171-195.

1. Saez A.E. The effective homogeneous behaviour of heterogeneous porous media// Transp. Porous Media, No. 3, 1989. pp. 213-238.
2. Bryant S., Blunt M. Prediction of relative permeability in simple porous media//

Phys. Rev. A 46 (4), 1992. pp. 2004-2011.

1. Kalaydjian F. Origin and quantification of coupling between relative permeabilities for two-phase flows in porous media// Transp. Porous Media, No. 3, 1990. pp. 215- 230.
2. Кадет В.В., Селяков В.И., Мусин М.М., Мусин P.M. Анализ эффективности заводнения с учетом характера течения жидкости на микроуровне // Нефтяное хозяйство. - 12. - 1995.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.
4. Кадет В.В., Полонский Д.Г. Закон течения вязкопластической жидкости в по­ристой среде с учетом инерционных потерь// Изв. РАН, МЖГ, *№* 1, 1999. С. 68-73.
5. Багринцева К.И. Карбонатные породы - коллекторы нефти и газа. - М.: Недра, 1977. 231 с.
6. Wilkinson W.L. Non-Newtonian fluids. Fluid mechanics, mixing and heat transfer.- Pergamon press, London, 1960.
7. Синайский Э.Г. Гидродинамика физико-химических процессов, М.: Недра, 1997. 335 с.



5) из конечно-разностной аппроксимации уравнения (4.5) и заданных