

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию М. В. Карсаниной
«Моделирование и реконструкция структуры и свойств пористых сред с
помощью корреляционных функций», представленную на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10
«Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых»**

Рассматриваемая диссертационная работа посвящена математическому моделированию трехмерной микроструктуры сред, состоящих из многих фаз, на основе использования метода корреляционных функций. Целью диссертационной работы Карсаниной М.В. является разработка эффективных методов стохастического моделирования для задач описания основных свойств многофазных сред, таких как анизотропия, пористость, проницаемость и характерный масштаб неоднородностей.

Актуальность этой работы не вызывает сомнений. Высокая востребованность методов стохастического моделирования для решения задач математического описания структуры пород-коллекторов, в особенности осадочных пород с высоким содержанием органического вещества, в областях углеводородных месторождений, а также большое количество нерешенных проблем в данной области, обуславливает научную и практическую значимость поставленной задачи.

Содержание диссертации:

Введение включает в себя обоснование актуальности и практической значимости темы диссертации, формулировку цели работы, описание основных методов исследования, изложение научной новизны, структуры и содержания работы, апробацию результатов, перечисление публикаций автора по теме.

В первой главе дается общий литературный обзор современных методов изучения свойств сложно-построенных пористых сред, состоящих нескольких фаз. Обзор охватывает методы лабораторного исследования образцов таких сред и математические методы моделирования их свойств на основе численного решения классических систем

дифференциальных уравнений в частных производных и применения так называемых сеточных и решеточных моделей среды. Приведена классификация типов структур многофазных сред и дан обзор лабораторных методов, позволяющих визуализировать структуру на различных масштабах как в двумерном, так и в трехмерном вариантах. Приведен краткий анализ количественных методов описания структуры многофазных сред.

В следующих главах приводится более детальное рассмотрение каждого этапа построения стохастических моделей и примеры их построения для реальных многофазных сред.

Вторая глава посвящена обзору специфических деталей математического аппарата, позволяющего моделировать динамику многофазных сред. Вводится понятие корреляционной функции как математического ожидания от произведения индикаторных функций и описываются ее свойства. Излагается процедура построения случайной среды с целью приближения к заданной целевой корреляционной функции, в основе которой лежит решение задачи поиска минимума суммы квадратов невязок между пробными и целевыми значениями корреляционных функций. Большая размерность аргументов и множество локальных минимумов целевой функции создают большие вычислительные трудности при поиске минимума. Для их преодоления используется классический метод случайного поиска «имитация отжига», основанный на аналогии с процессом формирования кристаллической структуры с минимальной энергией при медленном охлаждении образца. Приводится список аналитически задаваемых целевых корреляционных функций для случайных сред с различными свойствами. Сравнение свойств искусственно построенных сред с реальными средами производится путем вычисления ряда количественных характеристик кластеров точек различных фаз среды. Альтернативным методом конструирования двухфазной случайной среды является так называемый гибридный метод, в котором производится упаковка множества сталкивающихся твердых сфер, случайные размеры которых заданы в соответствие с вероятностным распределением, удовлетворяющим определенному гранулометрическому закону. Этот метод допускает обобщение на взаимодействующие частицы эллипсоидальной формы и на трехфазную среду, когда в результате столкновения частиц твердой фазы образуется третья фаза – «глина».

Для сравнения проницаемостей искусственно построенной случайной среды и реальных сред используются результаты численного решения уравнений движения Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости в пористой среде методом конечных разностей. Еще одним способом верификации искусственных случайных сред является использование сеточных моделей, в которых пористая среда конструируется как множество сфер, соединенных каналами круглой, четырехугольной или треугольной форм. После построения такой случайной среды ее проницаемость вычисляется с использованием простой формулы для гидравлической проводимости каналов и последующим решением системы линейных уравнений для потоков флюидов, что резко уменьшает время для вычисления проницаемости по сравнению с численным решением систем уравнений Навье-Стокса. При вычислении проницаемости среды с тонкими капиллярами, заполненными газообразной фазой используются формулы для проводимости каналов, учитывающие зависимость длины свободного пробега молекулы от давления. При этом система уравнений для нахождения потоков становится нелинейной и для ее решения используется итерационный метод Ньютона, стартующий из решения линеаризованной системы.

В третьей главе рассматриваются методы, позволяющие конструировать искусственные периодические среды с заданными свойствами анизотропии. Анизотропия случайной среды учитывается с помощью усреднения индикаторных функций пикселей (помимо обычных ортогональных направлений) по диагональным направлениям различной ориентации и минимизации взвешенной целевой функции методом «имитации отжига». Предлагаются эвристические методы выбора весов целевой функции, ускоряющие сходжение процедуры «отжига» для поиска глобального минимума, эффективность которых проверяется с помощью вычислительных экспериментов.

В четвертой главе рассматриваются методы конструирования трехпараметрического семейства двухкомпонентной пористой среды с заданными объемными долями фаз и с аналитически заданной корреляционной функцией. Для каждого образца среды из этого семейства находилась проницаемость путем численного решения уравнения Навье-Стокса методом конечных разностей. Используемый метод расчета свойств искусственной пористой среды может быть использован при создании как материалов для фильтров с заданными свойствами, так и строительных материалов с заданной теплопроводностью.

В пятой главе рассматриваются задачи моделирования четырех типов реальных многофазных случайных сред.

Первый тип среды относится к 8 разновидностям почвы из Среднерусской возвышенности. Применялась ранее изложенная методика, основанная на использовании анизотропных моделей корреляционных функций, минимизации целевой функции методом «имитации отжига» с последующим сравнением искусственных и реальных сред методом морфометрического анализа. Особое внимание было уделено форме и ориентации пор. Проанализировано влияние нестационарности случайного поля характеристик среды на точность ее реконструкции. Искусственно построенные случайные среды, реконструирующие структуру реальных почв, могут быть использованы в дальнейшем для оценок свойств теплопроводности и способности удержания влаги.

В качестве второго типа среды исследовались три образца пористой керамики, для которых рассматривалась задача построения трехмерной модели. С помощью конечно-разностного решения уравнения Навье-Стокса для пористой среды оценивалась проницаемость искусственных сред для газообразной фазы с последующим сравнением этой характеристики для образцов реальных сред, что показало их хорошее совпадение.

Третьим типом рассматриваемых сред являются осадочные породы с высоким содержанием органического вещества (керогена). Исследованы три образца сланцеподобных пород, являющихся коллектором углеводородов из известного месторождения в Западной Сибири – так называемой баженовской свиты. Для реконструкции среды использовалась трехмерная сеточная модель и модель стохастических реконструкций, описанные во второй главе диссертации, и оценивалась газопроницаемость среды.

Наконец, четвертым типом среды является песчаник. При реконструкции в качестве образцов использовались 3 типа песчаника, взятых из области газового месторождения. Структура среды моделировалась совокупностью сфер, диаметр которых брался случайным образом в соответствии с гранулометрическим законом, полученным в результате морфометрического анализа реальных образцов. Далее оценивалась проницаемость искусственной среды и сравнивалась с показателями реальных сред.

В конце пятой главы проведен анализ причин расхождения оценок свойств искусственных случайных сред, полученных с помощью различных методов моделирования, и реальных сред, взятых в качестве образцов, и представлены некоторые пути уменьшения этих расхождений в качестве программы дальнейших работ.

В **заключении** представлены основные результаты работы.

К числу наиболее интересных **результатов** работы можно отнести следующие:

1. Создан алгоритм реконструкции случайных сред, позволяющий воспроизвести свойства анизотропии.
2. Разработан метод оценки свойства проницаемости среды для газообразной фазы, учитывающий структуру микроскопических каналов и влияние длины свободного пробега молекул газа.

Научная новизна диссертации заключается в:

1. Разработке методики исследования основных свойств случайных сред на основе математического моделирования их структуры и последующего численного решения уравнений движения вязкой несжимаемой жидкости в пористой среде.
2. Разработке методов, позволяющих существенно ускорить решение задач моделирования структуры случайных сред, основанных на процедуре минимизации целевых функционалов способом «имитации отжига».
3. Исследовании свойств случайных сред с большим содержанием органического вещества, таких как керогены в областях углеводородных месторождений и почвы.

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается сравнением с результатами опубликованных работ, включающих как теоретические, так и экспериментальные исследования, использованием математически обоснованных методов моделирования структуры и свойств случайных сред, апробированных на широком классе

задач, а также сопоставлением результатов анализа образцов искусственных сред с заданными свойствами и реальных объектов.

Практическая значимость рассматриваемой диссертации следует из необходимости построения современных стохастических моделей геологических сред, как для нужд разработки углеводородных месторождений, так и для широкого круга других задач наук о Земле (тектонофизика, литология, подземная флюидодинамика и т.д.).

По диссертационной работе можно, однако, сделать **замечания**, часть из которых носит чисто редакционный характер:

1. При введении понятия корреляционной функции по формулам (2.2), (2.3) и (2.5) не написано явно, что угловые скобки означают операцию взятия математического ожидания (усреднения) от произведения индикаторных функций, а сами индикаторные функции внутри угловых скобок разделены запятыми, что также может привести к неправильному пониманию смысла корреляционной функции.
2. В формулах (2.8)-(2.10) обозначения φ_{ij} и φ_i используются до объяснения их смысла как объемной доли той или иной фазы.
3. Страница 110 – опечатка, вместо «кероген» написано «керосин».
4. Из текста диссертации часто бывает неясно, какова доля личного вклада диссертанта в разработку программного обеспечения, используемого при моделировании структуры и свойств случайных сред, выполненного группой исследователей с участием диссертанта.

Указанные замечания не снижают достоинств работы, выполненной на весьма высоком научном уровне.

Заключение. Диссертационная работа Карсаниной Марины Владимировны является законченной научно-квалификационной работой, основные результаты диссертации в должной мере отражены в научных публикациях в изданиях, включенных в перечень ВАК, и прошли апробацию на международных и российских конференциях, автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Карсанина Марина Владимировна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Официальный оппонент
Доктор физ.-мат. наук, заведующий лабораторией
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
Любушин Алексей Александрович

123242, Москва, ул. Б. Грозитская 10, стр 1

Подпись д.ф.-м.н. А.А. Любушина удостоверяю
Ученый секретарь ИФЗ РАН
к.ф.-м.н.



В.В. Погорелов.