

## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и  
стратегическому развитию  
Московского физико-технического  
института (государственного  
университета),  
доктор физико-математических наук



Аушев Тагир  
Абдул - Хамидович

«21» 2016 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию  
**Карсаниной Марины Владимировны**  
«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 поиска полезных ископаемых»

### **Общие положения**

Диссертационная работа М.В. Карсаниной выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте динамики геосфер Российской академии наук. Полный объем диссертации составляет 137 страниц с 57 рисунками и 10 таблицами, список литературы содержит 148 наименований.

### **Актуальность диссертационной работы**

В связи с повышением интереса к исследованию взаимосвязей между структурой и свойствами различных материалов в последние годы работы, посвященные получению трехмерных изображений и разработке численных методов моделирования свойств, являются очень востребованными. Цифровая петрофизика - одна из областей, в которой активно применяются подобные наработки, ставит своей целью определять свойства горных пород,

составляющих коллектора углеводородов, и моделировать процессы добычи нефти и газа по данным об их строении. Свойства пород, в особенности, определяющие фильтрационные характеристики, необходимы для параметризации моделей в масштабе месторождения. Традиционно такие характеристики измеряют в лаборатории по образцам керна. Однако стандартный подход часто требует слишком больших временных затрат (измерение относительных проницаемостей или проницаемости образцов нетрадиционных малопроницаемых коллекторов). Цифровые методы позволяют быстрое и эффективное решение проблемы определения физических и фильтрационных свойств пористых пород, но требуют детальной трехмерной информации о строении образцов.

С учетом данных позиций актуальность темы, раскрытой в диссертации М.В. Карсаниной не вызывает сомнения. Разработка предлагаемых подходов к стохастическому реконструированию трехмерных данных по данным двухмерных методов исследования отличающихся большей точностью, разрешением съемки и простотой получения изображений, позволяет получать точные данные о строении пород-коллекторов нефти и газа и определять их свойства с последующим использованием их в виде входных данных для моделирования свойств.

Основное внимание в работе уделено проработке теоретических аспектов процедуры стохастической реконструкции, ее адекватности и верификации на большой выборке реальных образцов пористых сред. Выводы и рекомендации по этим вопросам являются значительным шагом вперед, необходимым для успешного внедрения методов цифровой петрофизики в цикл исследования образцов и применением для решения реальных задач производства и повышения нефте и газоотдачи на месторождениях.

В методологическую основу исследований положены разнообразные современные методы: статистический анализ, моделирование в масштабе пор, параллельные вычисления, обработка данных рентгеновской микротомографии и РЭМ. Помимо фундаментального научного интереса описания структуры пористых сред и реконструкции структур по неполным данным, настоящая работа имеет значительные практические перспективы, связанные с расчетом свойств пород-коллекторов, создания пористых материалов с желаемыми свойствами и исследования сложных пористых структур с иерархическим строением.

### **Структура и краткое содержание диссертационной работы**

Диссертация состоит из Введения, пяти глав с разделами и Заключения.

Во Введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, перечислены результаты, полученные

в диссертации, определены практическая ценность и научная новизна работы, область применения результатов, указан личный вклад автора и использованный фактический материал, приведены сведения по оценке достоверности полученных результатов и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 работы М.В. Карсаниной выполнен обзор состояния проблемы, рассмотрены и систематизированы современные представления о стохастической реконструкции различных структур. Глава начинается общим определением пористых сред и многофазных материалов, которые и являются основными объектами исследования; приводятся примеры дисциплин, изучающих пористые структуры и актуальных практических задач. Затем дается первичное описание зависимостей между структурой и свойствами пористых сред. В последующих разделах описаны основные методы получения информации о трехмерном строении. Автор справедливо замечает, что ни одна из существующих методик не позволяет проводить исследования структуры на любом диапазоне размеров образца и разрешения съемки. На этом строится дальнейшее описание стохастических реконструкций и обосновывается их актуальность.

Глава 2 является методологической, в ней подробно описаны все методы и алгоритмы, используемые автором на разных этапах выполнения работы. Описание включает как математический аппарат расчета корреляционных функций и метод оптимизации имитацией «отжига», так и методы моделирования в масштабе пор, такие как: решение уравнения Стокса в трехмерной геометрии конечно-разностным методом, алгоритм экстракции сеточной модели, расчеты относительных проницаемостей и недарсианских проницаемостей в сеточных моделях.

Глава 3 посвящена разработке методов повышения точности стохастических реконструкций на основе корреляционных функций и состоит из двух частей. Первая описывает расчет корреляционных функций по направлениям и реконструкцию анизотропных структур. Во второй части представлен новый метод расчета весов вклада различных корреляционных функций в целевую функцию при использовании алгоритма «отжига». Значительные улучшения при использовании новых методов продемонстрированы с помощью набора двух и трехмерных изображений, в последнем случае также производится расчет проницаемости оригинальных и реконструированных изображений пористых сред.

В Главе 4 приведено чрезвычайно интересное с практической точки зрения описание моделирование структур пористых сред и материалов с желаемыми свойствами. На примере проницаемости показана возможность

подбора аналитических корреляционных функций для создания пористого материала с требуемой проницаемостью и характеристиками порового пространства.

Особое место в диссертационной работе занимает глава 5. Она посвящена верификации всех разработанных методик на примерах реальных пористых сред – почв, керамики, песчаников и образцов баженовской свиты. Каждому из пористых материалов посвящен свой раздел. Возможность описания и реконструкции структуры почв на основе изображений в шлифах исследуется в первом разделе. На основе анализа восьми различных почвенных структур показана универсальность подхода и впервые предложено использовать корреляционные функции для численного описания почвогрунтов. В следующем разделе с использованием трех образцов керамики проводятся стохастические реконструкции на основе набора из 27 корреляционных функций, рассчитанных по направлениям, с взвешиванием вклада каждой функции пропорционально максимальной энергии. На основе сравнения оригинала и модели на соответствие фильтрационных свойств показано, что для всех трех реконструкций исследуемых образцов, полученные численным методом величины проницаемости, отлично соответствовали результатам лабораторных измерений. Третий раздел посвящен определению газопроницаемости керогена в образцах сланцеподобных пород с помощью моделирования в масштабе пор по трехмерным реконструкциям на основе РЭМ изображений. С применением стохастических реконструкций и моделирования в масштабе пор впервые рассчитывается недарсианская проницаемость нанопористости керогена в отложениях баженовской свиты, полученные значения находятся в соответствии с лабораторными измерениями на ненарушенных образцах. В четвертом разделе показаны возможности определения фильтрационных характеристик песчаников с помощью гибридной реконструкция на основе методов частиц и корреляционных функций. Показано, что гибридный метод позволяет значительно ускорить скорость реконструкции и повысить точность для песчаников. Относительные проницаемости, рассчитанные по реконструкциям, находятся в отличном соответствии с характеристиками оригиналов. Глава заканчивается обсуждением, где на основе концепции информационного содержания корреляционных функций предлагаются основные направления будущей работы.

В Выводах кратко перечисляются основные результаты исследований.

### **Основные научные результаты**

Основные научные результаты, полученные автором, выражаются в защищаемых положениях и сводятся к следующим пунктам:

- Метод расчета корреляционных функций в ортогональных и диагональных направлениях без усреднения данных по пространству, который позволяет восстанавливать внутреннее строение анизотропных пористых сред и повышает точность реконструкций в целом.
- Способ расчета вклада каждой корреляционной функции при реконструкции пропорционально максимальной энергии в алгоритме оптимизации имитацией «отжига».
- Метод построения численных моделей пористых структур с желаемыми физическими свойствами на основе аналитически заданных корреляционных функций (на примере проницаемости).
- Метод численной оценки газопроницаемости керогена в отложениях баженовской свиты по данным стохастических реконструкций, полученным из двухмерных РЭМ изображений.

### **Значимость полученных результатов**

Диссертационная работа М.В. Карсаниной вносит ощутимый вклад в развитие как фундаментальных, так и прикладных аспектов геофизики и геофизических методов поиска полезных ископаемых.

Значимость результатов для науки заключается в разработке новых методов расчета корреляционных функций, в том числе по направлениям, что позволило реконструировать сложные анизотропные структуры естественных пористых сред. Также, автором впервые предложен расчет вклада корреляционных функций при реконструкции пропорционально максимальной энергии в алгоритме оптимизации имитацией «отжигом», что позволило значительно повысить точность и сходимость стохастических реконструкций.

Практическая ценность диссертационной работы определяется тем, что автором разработаны конкретные методики реконструкции структуры образцов пористых сред, включая породы-коллектора и нетрадиционные породы-коллектора, такие как баженовская свита, на основе двухмерных срезов, полученных в том числе с помощью РЭМ. По данным стохастических реконструкций, полученных автором, впервые рассчитаны недарсианские проницаемости керогена в отложениях баженовской свиты. На основе разработанных М.В. Карсаниной методов возможно рутинное определение физических свойств пористых сред по набору двухмерных изображений строения образцов.

### **Рекомендации по работе**

Считаем целесообразным продолжить работу по улучшению методов стохастической реконструкции. Автор работы самостоятельно указывает на некоторые существующие недостатки используемых методик и предлагает

возможные пути решения этих проблем. Также интересным направлением работы является исследование и реконструкция иерархических структур. Современные методы получения изображений не позволяют снимать образец необходимого размера и разрешения, требуя разномасштабные исследования его строения. Метод корреляционных функций и стохастической реконструкции мог бы эффективно справиться с подобными недостатками экспериментальных подходов. Интересным к будущей доработке представляется гибридный метод реконструкции, в особенности совмещенный не только с гранулометрическим составом, но и другими важными процессами генезиса осадочных пород. Отметим, что в целом разработанные М.В. Карсаниной методы могут найти свое применение в самом широком спектре приложений, поэтому автору следует уделить внимание публикациям в различных междисциплинарных журналах.

### **Замечания**

При ознакомлении с представленной работой были выявлены следующие замечания:

- 1) Для расчета корреляционных функций по направлениям автором выбраны ортогональные и диагональные направления. В тексте диссертации не дано достаточного обоснования выбора именно этих направлений. С увеличением количества направлений должно повыситься качество реконструкций, поэтому выбор только этих направлений может быть недостаточным.
- 2) При выполнении стохастических реконструкций в диссертации используется набор из различных корреляционных функций, включающий в себя двухточечную корреляционную и линейную функции для двух фаз. При этом при проведении конструкции пористых структур в Главе 4 используется только двухточечная корреляционная функция, рассчитанная по ортогональным направлениям. Такой выбор автора не совсем понятен и требует обоснования.
- 3) Для проверки точности реконструкции в различных главах и разделах используются различные метрики, начиная от распределения пор по размерам и заканчивая расчетом проницаемостей. Из-за этого по ходу чтения диссертации становится не понятно, согласуются ли точности реконструкций между различными приложениями метода стохастической реконструкции к разным объектам. Возникает вопрос – существует ли универсальная метрика и можно ли точно оценивать точность реконструкций в отдельно взятом случае и сравнивать их между собой?
- 4) Все реконструкции и анализ в диссертации построены вокруг бинарных изображений, где представлены только две фазы – поры и твердое вещество. Из описания индикаторной функции в Главе 2 и общего подхода к расчету

корреляционных функций, также на примере образцов баженовской свиты (несколько фаз, в том числе кероген с нанопористостью) кажется логичным проводить реконструкции для большего количества фаз. В работе отсутствует обсуждение возможности многофазных реконструкций и возможности разработанных методик для их реализации.

В целом, приведенные замечания не носят принципиального характера и не влияют на общее положительное впечатление от работы.

#### **Соответствие содержания диссертации указанной специальности**

В настоящей диссертационной работе представлены научно-практические разработки для расчета физических свойств пористых сред по двумерным данным о структуре на основе стохастических реконструкций и моделирования в масштабе пор. Разработанные методики и подходы используются для определения фильтрационных характеристик реальных образцов пористых сред и пород-коллекторов: почвогрунтов, песчаников, отложений баженовской свиты. Комплексный подход, представленный в работе, обеспечивает ускорение научно-технического прогресса и имеет важное народно-хозяйственное значение. Защищаемые положения в достаточной степени аргументированы и подкреплены фактическим материалом.

Таким образом, диссертационная работа М.В. Карсаниной на тему «Моделирование и реконструкция структуры и свойств пористых сред с помощью корреляционных функций» соответствует требованиям к специальности 25.00.10 – «геофизика, геофизические методы поиска полезных ископаемых».

#### **Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации**

Автореферат полностью и точно воспроизводит содержание диссертации. Основные материалы диссертации, аргументация защищаемых положений и выводы в полной мере отражены в автореферате.

#### **Заключение**

Диссертация Карсаниной Марины Владимировны «Моделирование и реконструкция структуры и свойств пористых сред с помощью корреляционных функций» представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу на тему, актуальную в научном и прикладном аспектах.

Защищаемые положения в достаточной степени аргументированы приведенным фактическим материалом и основаны на необходимых теоретических выкладках. Обсуждение и выводы достаточно обоснованы.

Диссертационная работа написана хорошим научным языком и аккуратно оформлена. Текст автореферата соответствует тексту диссертации.

Диссертация отвечает требованиям Положения о порядке присуждения научным и научно-педагогическим сотрудникам ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Карсанина Марина Владимировна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «геофизика, геофизические методы поиска полезных ископаемых»

Отзыв на диссертацию составлен доктором физико-математических наук Жмуром Владимиром Владимировичем и обсужден на заседании кафедры прикладной механики МФТИ «06» апреля 2016 г., протокол № 59.

Профессор кафедры  
прикладной механики МФТИ,  
доктор физ. – матем. наук, профессор



Жмур  
Владимир Владимирович

Заведующий кафедрой  
прикладной механики МФТИ,  
кандидат технических наук



Негодяев  
Сергей Серафимович

Почтовый адрес: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер.,9

Телефон: 8 (495) 408 7609

Адрес электронной почты: [snegod@mail.ru](mailto:snegod@mail.ru)

Организация – место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»