

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Лаврухина Ефима Валерьевича

на тему: «Математические методы обработки изображений пористых сред при отсутствии размеченных данных»

по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Актуальность темы исследования

Как известно, к настоящему времени в области добычи углеводородного сырья, прежде всего, нефти, складывается ситуация с ухудшением структуры запасов. В этой связи, возникает все большая необходимость в данных о свойствах горных пород пластов-коллекторов с трудно извлекаемыми запасами (ТРИЗ) нефти. Более того, и применительно вообще к любым типам коллекторов всегда имеется нехватка данных о свойствах горной породы, особенно по относительной фазовой проницаемости (ОФП). Решение этой проблемы может обеспечить технология цифровых исследований керна (технология «Цифровой керн» (ЦК)).

Назначение ЦК – получение свойств горной породы посредством математического моделирования процессов на уровне пустотного пространства горной породы. Моделирование проводится с использованием цифровых моделей, которые, как правило, строятся на основе компьютерной томографии керна. Как правило, такие цифровые модели (цифровые двойники) являются результатом обработки (сегментации) томографических изображений. Собственный опыт, а также анализ литературных данных показывают, что задача сегментации томографических данных может решаться различными методами, при этом конечный результат часто существенно зависит как от выбора метода, так и от его настроек. Во многом такая ситуация связана с тем, что для осуществления качественной сегментации не хватает данных, на которых предварительно этот процесс

отработан, т.е. обучающих данных. Особенно это важно для методов сегментации, опирающихся на применение машинного обучения. Таким образом, имеет место проблема качества обработки томографических изображений.

Автор диссертации при обосновании актуальности темы совершенно справедливо обращает внимание на то, что «необходимо решать множество задач по обработке изображений различных пространственных масштабов». Это связано с тем, что практическая значимость результатов исследований ядра во многом зависит от представительности исследуемых образцов. Физические эксперименты в этом смысле ограничены размерами ядеродержателей, в то время как математические эксперименты таких ограничений не имеют. Однако, имеет место проблема построения качественной многомасштабной модели ядра на основе изображений на разных масштабах. Принципиальное значение здесь играет анализ внутренней структуры горной породы, в частности, анализ однородности – эти вопросы также рассматриваются в диссертации.

Учитывая вышесказанное, **тема диссертационной работы Лаврухина Е.В., связанная с математическими методами обработки изображений пористых сред является, безусловно, актуальной.**

Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списков литературы, рисунков и таблиц. В конце каждой главы даются выводы к ним.

Диссертация написана на 169 стр., содержит 39 рисунков и 7 таблиц.

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследований, формулируется цель работы и четыре задачи для ее достижения, приводится описание научной новизны и практической значимости полученных результатов, раскрываются методология и методы исследований, приводятся основные положения, выносимые на защиту, аргументируется достоверность

полученных результатов, даются сведения об апробации работы и личном вкладе автора, а также сведения о публикациях, объеме и структуре работы. Таким образом, формат введения является вполне стандартным для диссертации, однако обращает на себя внимание то, насколько скрупулезно автор описывает личный вклад. Согласно этому описанию, все исследования проведены автором самостоятельно или с его преобладающим участием.

Первая глава содержит информацию о том, что такое пористые среды (в контексте изображений пористых сред), какие данные используются для моделирования пористых сред, а также детальную информацию по статистическому описанию пористых сред. Это связано с тем, что среди трех описанных семейств моделей, применимых к пористым средам, основное внимание в работе уделяется именно статистическим характеристикам изображений пористых сред. При этом акцент делается на корреляционные функции (КФ).

Во **второй главе** рассматривается задача кластеризации изображений пористых сред на основе КФ. Автор справедливо обращает внимание на то, что структура большинства пористых сред имеет иерархический характер, а эффективное моделирование на уровне пор может быть возможным, если для описания пористой среды применить универсальные КФ. При этом автор отмечает, что КФ позволяют не только сжимать информацию о структуре пористой среды, но и позволяют решать другие задачи, например, задачу слияния иерархических структур пористых сред. Согласно автору, создание единой многомасштабной модели может быть выполнено с использованием стохастической реконструкции, причем методы, основанные на КФ имеют ряд преимуществ. Итогом второй главы является методология, предложенная автором. Эта методология основывается на КФ, векторы которых преобразовываются в параметрическое представление, что позволяет существенно сжимать информацию по изображениям.

Особенности и результаты применения предложенной автором методологии описаны в **третьей главе** применительно к задаче выделения

однородных областей на изображениях пористых сред. По сути в главе представлен новый метод оценки однородности пористой среды по ее изображениям. Показано, что использование КФ позволяет оценивать степень однородности образцов породы и автоматически выделять в ней однородные зоны по предварительно заданному числу таких зон. Этот метод базируется на решении задачи кластеризации для множества фрагментов изображения. Приводится алгоритм метода и дается детальное описание его шагов. Далее приводятся результаты применения метода для искусственных и реальных образцов пористых сред.

Четвертая глава посвящена задаче сегментации КТ-изображений пористых сред. Важно, что автор критически подходит к анализу существующих методов сегментации, как в автоматическом режиме, так и при участии оператора. Отмечается, что «для того, чтобы избежать ошибок оператора и исключить неаккуратность автоматических методов, можно использовать методы машинного обучения с учителем, в том числе с обучением моделей нейронных сетей» при этом уточняется, что «самая большая проблема для методов обучения с учителем — это отсутствие разметки для обучения». Собственно из этой проблемы и вытекает задача, рассматриваемая в главе – обоснование способа обучения модели сверточной нейронной сети без разметки, когда в качестве истинной сегментации используются результаты работы алгоритмов без учителя, настроенные оператором. Состоятельность предложенного способа показана на нескольких примерах для семи образцов пористой среды. При этом оценка качества сегментации получена с использованием известных метрик компьютерного зрения и с использованием результатов моделирования течения в цифровых моделях пористых сред для определения насыщенной гидравлической проводимости пористых сред.

В пятой главе говорится о построении синтетического сегментированного КТ изображения пористой среды – по сути процессе синтетической томографии, который позволяет нивелировать проблему

методов сегментации с учителем, а именно проблему отсутствия достаточного количества качественно размеченных данных. В главе подробно описан подход к математическому моделированию процесса синтетической томографии и предложен алгоритм «построения универсальной сегментационной модели», который автор преподносит как общую схему решения проблемы сегментации. Это связано с тем, что по мнению автора для каждого этапа алгоритма «существует множество открытых вопросов». Ответ на один из возможных таких вопросов рассматривается в главе как результат специального исследования.

Последняя, **шестая глава** посвящена описанию «программного комплекса для первичного анализа КТ-изображений пористых сред». Программный комплекс состоит из трех модулей, а именно: (1) «Анализ пустотного пространства», (2) «Сегментация томографических изображений» и (3) «Синтетическая томография». В данные модули заложены методы и алгоритмы, в т.ч. разработанные автором диссертации и суть которых излагается в предыдущих главах диссертации. Автор указывает, что «полностью реализовал функционал программного модуля «Анализ пустотного пространства», реализовал математическую модель томографа в ПМ «Синтетическая томография» и принял участие в разработке функционала ПМ «Сегментация томографических изображений», графический интерфейс модулей разрабатывался отдельно, без непосредственного участия автора в программировании». В главе дается детальное описание особенностей каждого модуля, а также дается информация по производительности модуля «Синтетическая томография».

В **заключении** приведены основные результаты работы. Они сформулированы в четыре пункта и согласуются с материалами, приведенными в главах диссертации.

Список литературы включает 187 наименований.

В целом можно сказать, что диссертация Лаврухина Е.В. хорошо структурирована и обладает внутренним единством. Результаты диссертации

в достаточном количестве опубликованы в рецензируемых изданиях. Автореферат диссертации в полной мере отражает содержание диссертации.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, в достаточной степени обоснованы. Это следует из корректности выполненных вычислительных экспериментов и достаточной аргументированности разработанных методов моделирования.

Оценка достоверности и научной новизны результатов

Результаты диссертации можно считать достоверными и обладающими научной новизной. Достоверность результатов обусловлена широким спектром положительных примеров тестирования разработанных методов с использованием как синтетических, так и реальных данных. Новизна результатов диссертации обеспечивается сопоставлением результатов автора диссертации с аналогичными результатами других исследователей – видно, что автор хорошо ориентируется в своей области исследований.

Практическая значимость результатов исследования

Практическая значимость темы исследований Лаврухина Е.В. связана с тем, что от качества обработки изображений пористых сред во многом зависят все результаты после создания цифровой модели зерна. Так, например, при прямом моделировании многофазного течения, корректность цифрового двойника кардинально влияет (среди прочих факторов) на кондиционность определения свойств горной породы, в частности ОФП. Это связано с тем, что задаваемая в цифровой модели зерна структура внутреннего пространства горной породы обуславливает характер многофазного течения в пустотном пространстве, а именно выраженность струйного и/или четочного режима течения фаз.

Другими практически значимыми аспектами результатов исследований Лаврухина Е.В. является возможность построения цифровых моделей ядра по неполным данным, а также возможность оценки качества сегментации по синтетической томографии.

Можно сказать, что в совокупности полученные Лаврухиным Е.В. результаты позволяют существенно повысить значимость технологии ЦК для практического применения.

Замечания по диссертационной работе

1. Применительно к модели, описанной в разделе 2.1.2 диссертации, говорится о наборе из трех базисных функций, сумма которых дает аппроксимацию корреляционной функции. Из текста не понятно почему именно такой набор базисных функций выбран и какие значения имеют веса к ним применительно к различным пористым средам.
2. Согласно текста диссертации, «для оценки качества сегментации можно сравнивать гидродинамические свойства оригинальной пористой среды против полученной с помощью сегментации» (стр.90). По всей видимости, речь идет о сопоставлении измеренных в лаборатории значений проницаемости горной породы с определенными на основе численного моделирования. При этом для расчета проницаемости использовано численное решение уравнения Стокса методом конечных разностей. Отмечается (стр.105), что «на тестовых образцах ошибка по гидравлическим свойствам получилась в диапазоне от 5% до 130%». Не понятно какую часть в этой ошибке собственно обеспечивает качество сегментации, а какую часть обеспечивают факторы, связанные с численным моделированием течения на уровне пор.
3. В главе 6 дается информация по производительности модуля «Синтетическая томография», в то время как по двум остальным модулям она не приводится.

4. В заключении, пункт 2 говорится о том, что «разработан полуавтоматический метод получения разметки для задачи сегментации пористых сред». Не совсем понятно каким образом этот метод используется применительно к функциональности модуля «Сегментация томографических изображений», в котором судя по тексту (стр.132) реализованы «несколько классических локальных методов сегментации».

Общая оценка диссертационной работы

Диссертация Лаврухина Ефима Валерьевича «Математические методы обработки изображений пористых сред при отсутствии размеченных данных» представляет собой работу, которую можно рассматривать как завершённое научное исследование. Достигнутые результаты имеют практическую значимость и научную новизну.

Указанные замечания к диссертации не снижают уровня и значимости выполненных исследований. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.2.2 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп.2.1 – 2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, **соискатель Лаврухин Ефим Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-**

матема Тических наук по специальности 1.2.2 – Матема Тическое
моделирова НИ, численные методь и комплексы программ.

Официальный оппонент:

доктор технических наук,
старший эксперт, Управление научно-технического развития
ООО «Тюменский нефтяной научный центр»

Степанов Сергей Викторович

17 июня 2024 г.

Контактные данные:

Тел. +7 3452 52 90 90 (доб. 6638); e-mail: SV_Sepanov@tnnc.rosneft.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

05.13.18 - Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»

Адрес места работы:

625048, г. Тюмень, ул. Максима Горького, 42

ООО «Тюменский нефтяной научный центр» (ООО «ТННЦ»)

Тел.: +7 3452 52 90 90; e-mail: tnnc@tnnc.rosneft.ru

Подпись сотрудника ООО «ТННЦ»

Сергея Викторовича Степанова удосто

Сергей Викторович Степанов

17.06.2024