

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Ли Шугуана

«Моделирование движений неньютоновских вязких жидкостей в пористых средах на основе метода асимптотической гомогенизации», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

**Актуальность темы исследования.** Исследование движения неньютоновских жидкостей в пористых средах является важной и сложной задачей современной гидромеханики, решение которой требуется во многих отраслях промышленности. В частности, одним из наиболее представительных примеров является метод RTM (пропитки наполнителя жидким связующим под давлением) для производства армированных композиционных материалов и конструкций. На этапе проектирования изделий из композиционных материалов для оптимизации технологии производства и улучшения качества изделий возникает необходимость адекватного моделирования процесса движения жидких связующих в материале наполнителя с учетом их сложных реологических свойств. При этом непосредственное использование уравнений Навье-Стокса для прямого численного моделирования пропитки с детальным разрешением микроструктуры композита требует использования расчетных сеток огромной размерности и практически невозможно.

Один из способов решения данной проблемы состоит в использовании метода асимптотической гомогенизации, предложенного Н.С. Бахваловым и эффективно применявшегося для решения различных задач механики композитов и теории многослойных пластин и оболочек. Он позволяет получать осредненные уравнения фильтрации для гомогенизированной среды на основе законов сохранения механики сплошной среды с использованием решения задач в отдельной поре, без применения феноменологических теорий на основе эмпирических модификаций закона Дарси. Такой подход к моделированию течений жидкостей в пористых структурах получил название многомасштабного моделирования, под которым понимается совместное исследование течения жидкостей в отдельных порах и в пористой среде в целом.

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

07 12 2020

Развитие данного метода для многомасштабного моделирования процесса фильтрации неньютоновских вязких жидкостей в трехмерных пористых композитных структурах, несомненно, является актуальной задачей, как с теоретической, так и с практической точек зрения.

**Содержание диссертационной работы.** Диссертация Ли Шугуана состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 123 страницах, содержит 34 иллюстрации и 17 таблиц. Список литературы содержит 117 наименований.

**Во введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируются цель и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, основные новые научные результаты, описана структура работы.

**В первой главе** представлено описание разработанных математических моделей многомасштабных процессов фильтрации неньютоновской вязкой жидкости в рамках модели Карро в трехмерных пористых композитных средах. Вводятся основные допущения геометрических моделей микро- и макроструктуры пористых сред и неньютоновских вязких жидкостей. Математическая модель, описывающая течение несжимаемых неньютоновских вязких жидкостей, состоит из уравнений сохранения и определяющих соотношений для неньютоновской вязкости, зависящих от второго инварианта тензора скоростей деформаций в рамках модели Карро. Согласно общей концепции метода асимптотической гомогенизации решение исходной задачи ищется в виде рядов по степеням малого параметра, зависящего от двух типов координат: «быстрых», описывающих процессы в пределах повторяющейся области в периодической среде (ячейке периодичности), и «медленных», соответствующих глобальной структуре. Сформулированы математическая постановка и физическая интерпретация локальных задач фильтрации несжимаемой неньютоновской вязкой жидкости на ячейке периодичности. Далее с целью уменьшения вычислительных затрат с помощью симметричного/антисимметричного продолжения выводятся граничные условия для  $1/8$  ячейки периодичности.

На основе теории нелинейных тензорных функций представлены нелинейный

закон фильтрации и значение «эффективной» неньютоновской вязкости, описывающие макроскопические свойства фильтрации. В конце главы сформулирована глобальная задача процесса фильтрации неньютоновской вязкой жидкости в рамках метода асимптотической гомогенизации.

**Во второй главе** описаны разработанные численные алгоритмы для решения локальных задач в рамках метода асимптотической гомогенизации, расчетов средней скорости фильтрации и значения «эффективной» вязкости. На первом этапе решения формулируется вариационная постановка для локальной задачи фильтрации неньютоновских вязких жидкостей, которая далее решается с помощью метода конечных элементов. В виду нелинейности задачи разработан специальный итерационный алгоритм ее решения, осуществляющий расчет неньютоновской вязкости в общей трехмерной постановке, описан численный метод определения характеристик реологии жидкости и пористости среды.

**В третьей главе** представлены результаты численного моделирования фильтрации неньютоновских вязких жидкостей в рамках модели Карро в двух типовых пористых композитных структурах. В начале главы кратко описан разработанный программный комплекс, а также результаты его применения для моделирования течений ньютоновской жидкости, которые рассматривались в качестве валидационных. Далее представлены результаты моделирования локальных задач фильтрации неньютоновских вязких жидкостей в двух типовых пористых композитных структурах. На основе расчета компонентов тензора проницаемости и «эффективной» вязкости был произведен анализ нелинейного закона фильтрации неньютоновских вязких жидкостей.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы и выводы.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в разработанной многомасштабной модели течений несжимаемой неньютоновской вязкой жидкости (в рамках модели Карро) в пористых средах на основе метода асимптотической гомогенизации; результаты численного моделирования показывают влияние реологии неньютоновских вязких жидкостей на процесс фильтрации.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в разработанной методике многомасштабного моделирования течений несжимаемой неньютоновской вязкой жидкости в пористых средах, которая может быть полезна при проектировании композиционных материалов, изготавливаемых на основе методов RTM.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается строгостью и обоснованностью используемого математического аппарата и подтверждена сравнением полученных результатов численного моделирования с известными данными. Результаты исследования представлены в рецензируемых изданиях, в том числе входящих в Перечень ВАК РФ, а также докладывались на международных конференциях.

#### **Замечания по диссертационной работе:**

1. Тестирование разработанного программного комплекса (раздел 3.1.2) проводилось только в рамках проверки выполнения закона Дарси для течения ньютоновской жидкости в двух типовых пористых композитных структурах. Следовало также провести более полное сравнение с известными данными, в частности, количественное сравнение значений проницаемости модельных сред.

2. В разделе 3.3 на рис. 3.21 и 3.23 показано, что зависимости между средней скоростью фильтрации, «эффективной» вязкостью и градиентом макродавления являются нелинейными. Было бы полезно сравнить получившиеся расчетные зависимости с аналитическими моделями, основанными на обобщении закона Дарси для неньютоновских жидкостей.

3. Работа содержит значительное количество опечаток и ошибок верстки. В частности, содержимое таблиц, рисунков и подписей к ним должны располагаться на одной странице.

Замечания по диссертационной работе носят рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Автореферат отвечает основному содержанию диссертации, дает правильное представление о полученных в процессе выполнения работы результатах.

Диссертационная работа Ли Шугуана является законченным научно-квалификационным исследованием, посвященным решению актуальной задачи и выполненным на высоком научном уровне. Диссертация соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Ли Шугуан, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН).

24 ноября 2020 г.

Борисов Виталий Евгеньевич

Адрес: 125047, Москва, Миусская пл., д.4, ИПМ им. М.В.Келдыша РАН

Тел.: +7 (495) 250-79-24

e-mail: narelen@gmail.com

Подпись Борисова Виталия Евгеньевича удостоверяю

Ученый секретарь

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

к.ф.-м.н.



Александр Иванович Маслов