

Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
Институт автоматизации  
проектирования Российской  
академии наук

123056, Москва, ул. 2-я Брестская, д.19/18  
Телефон: (499)250-02-62  
Факс: (499)250-89-28  
E-Mail: icad@icad.org.ru

от 20.11.2020 № 11610 - 056  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИАП РАН,  
д.ф.-м.н.



Никитин И.С.

« 20 » ноября 2020 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

#### Актуальность темы диссертации

Теоретическое исследование течений неньютоновских вязких жидкостей в пористых средах необходимо для технологий производства композиционных материалов и конструкций методом инфузии (пропитки жидким связующим сухого армирующего каркаса) или RTM-методом (пропитки жидким связующим под давлением). Качество получаемых изделий в значительной степени зависит от параметров технологии: геометрических параметров конструкции, проницаемости и пористости сухого каркаса, давления пропитки, а также от реологии жидких связующих. При этом и требуется адекватное моделирование процесса движения неньютоновского жидкого связующего в пористых каркасах в условиях сложной геометрии с учетом множества упомянутых параметров. Поэтому диссертационная работа Ли Шугуана, в которой предложена новая методика многомасштабного моделирования фильтрационных процессов неньютоновских вязких жидкостей в трехмерных пористых структурах со сложной внутренней геометрией, имеет важное научное и прикладное значение.

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

07 12 2020

#### Краткий анализ содержания работы

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 117 наименований, которые изложены на 123 страницах, включает в себя 34 иллюстрации и 17 таблиц.

**Во введении** обсуждается актуальность темы диссертации, проводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, сформулированы цели и задачи исследования, представлены методы исследования, научная новизна, практическая значимость, достоверность научных результатов описана структура работы.

**В первой главе** рассматривается постановка математической модели многомасштабных процессов фильтрации неньютоновской вязкой жидкости в рамках модели Карро в пористых средах. Сначала формулируются основные допущения геометрических моделей микро- и макроструктуры пористой среды и неньютоновской вязкой среды, а затем вводится исходная система уравнений механики сплошной среды, описывающая течение несжимаемой неньютоновской вязкой жидкости. В диссертационной работе рассматривается неньютоновская вязкая жидкость в рамках модели Карро, определяющие соотношение которой зависит от второго инварианта тензора скорости деформации. Метод асимптотической гомогенизации применяется к исходным уравнениям режима медленного инерционного движения неньютоновских вязких жидкостей в пористой системе. Кратко представлены основные положения метода асимптотической гомогенизации, включая быстрые и медленные координаты, периодические условия, операторы осреднения и асимптотическое разложение по степеням малых параметров. На основе асимптотического разложения неньютоновской вязкости получается локальная задача описывающая движение неньютоновской жидкости в ячейке периодичности. Сформулирована математическая постановка локальных задач на ячейке периодичности в случае модели несжимаемой неньютоновской вязкой жидкости и обсуждается физическая интерпретация локальной задачи. В частности, на основе дополнения о симметрии ячейки периодичности получены и доказаны симметричные и антисимметричные граничные условия на  $1/8$  ячейке периодичности. На основе теории нелинейных тензорных функций определены нелинейный закон фильтрации и эффективная неньютоновская вязкость, а также сформулированы макроскопические задачи процесса фильтрации жидкостей с неньютоновской вязкостью.

**Во второй главе** разработаны численные алгоритмы решений локальных задач и расчета нелинейной закона фильтрации неньютоновской вязкой жидкости в рамках модели Карро. На основе постановки локальных задач процесса фильтрации неньютоновской вязкой жидкости к полученной системе вариационном уравнений применяется метод конечных элементов, основанный на использовании конечного элемента в форме тетраэдра с 44 степенями свободы: по 3 компоненты скорости и одному значению неньютоновской вязкости в каждом из 10 узлов и по одному значению давления в каждой вершине тетраэдра. Используется полином интерполяции, который удовлетворяет условию LBB, т.е. полином интерполяции второго порядка для скоростей и первого порядка – для давления. В частности, разработан метод расчета неньютоновской вязкости, и численный итерационный алгоритм для решения нелинейной локальной вариационной задачи в общей трехмерной формуле, вызванной неньютоновской вязкостью. На основе метода конечных элементов также получают соотношения для расчета пористости, компонент тензора проницаемости и эффективной вязкости.

**В третьей главе** изучаются численные моделирования процессов движения неньютоновской вязкой Карро жидкости в пористых средах. Сначала автор дал краткое описание разработанного программного комплекса, на основе которого протестировано течение ньютоновской жидкости в двух типичных пористых композитных структурах, что показало хорошее согласие между результатами численного определения проницаемости и законом Дарси. Далее разработанный программный комплекс использован для моделирования локальных задач фильтрации неньютоновских вязких жидкостей в двух типичных пористых композитных структурах. Затем путем вычисления компонент тензора проницаемости и эффективной вязкости анализируется нелинейный закон фильтрации. Результаты показывают, что коэффициенты тензора проницаемости и эффективная вязкость нелинейно зависят от степенного индекса модели Карро и градиента макродавления. Под действием фиксированного градиента макродавления с увеличением степенного индекса скорость фильтрации уменьшается. По мере увеличения значения градиента макродавления увеличивается, эффективная вязкость псевдопластической жидкости уменьшается, а эффективная вязкость дилатантной жидкости увеличивается.

**В заключении** диссертации отражены основные результаты и выводы.

### **Степень достоверности результатов проведенных исследований**

Достоверность проведенных исследований, результаты которых представлены в работе, обеспечена использованием в работе обоснованных подходов для построения математических моделей многомасштабных процессов фильтрации неньютоновской вязкой жидкости в рамках модели Карро в пористых средах.; использование современных методов и подходов для конструирования вычислительных алгоритмов, проведением значительного количества расчетов, в том числе валидационного характера.

### **Оценка новизны, научной и практической значимости проведенных исследований**

1. Разработаны физико-математическая модель течения несжимаемых неньютоновских вязких жидкостей и многомасштабная модель течения несжимаемой неньютоновской вязкой жидкости в рамках модели Карро в ПКС.
2. Разработан нелинейный закон фильтрации неньютоновских вязких жидкостей в пористой среде в целом.
3. Разработаны алгоритмы численного решения локальных задач течения неньютоновской жидкости в рамках модели Карро на ЯП пористых сред, алгоритмы расчета эффективной вязкости и компонентов тензора проницаемости.
4. Получены результаты численного моделирования локальных задач течения неньютоновской вязкой жидкости в рамках модели Карро на ЯП двух типовых пористых структур, показавшие эффективность предложенного алгоритма решения локальных задач.

5. Получены результаты численных расчетов пористости сред, эффективной неньютоновской вязкости и компонентов тензора проницаемости фильтрации неньютоновских вязких жидкостей Карро в пористых средах, на основе которых установлены эффекты влияния свойства неньютоновской вязкости жидкостей, градиента макродавления и анизотропии пористых сред на нелинейный закон фильтрации и эффективную вязкость неньютоновских вязких жидкостей.

Разработанная методика в полной мере реализована программно, ее эффективность продемонстрирована значительным числом численных расчетов. Данная методика является достаточно общей, поэтому результаты работы будут полезны для задач многомасштабного моделирования фильтрационных процессов неньютоновских вязких жидкостей в трехмерных пористых структурах со сложной внутренней геометрией. Конкретными потребителями могут являться академические и отраслевые научно-исследовательские и проектные институты и организации, занимающиеся разработкой технологий композиционных материалов.

#### **Полнота опубликования и апробации результатов исследований**

Основные результаты полностью отражены в 8 научных работах, в том числе в 2 статьях, включенных в перечень российских рецензируемых научных изданий, и 5 научных публикаций, включенных в международные базы данных Scopus или WebofScience.

#### **Замечания по содержанию диссертации**

1. Многомасштабная физико-математическая модель неньютоновских вязких жидкостей, протекающих через пористую структуру, рассматриваемая методом асимптотической гомогенизации, исключает корректное описание некоторых практически важных случаев, когда пористость композитной структуры при соответствующих распределениях давлений и температур становится непроницаемой. В частности, особенно очевидно влияние температуры на вязкость неньютоновских смол. Представленная модель и ее программная реализация не охватывает данную практически интересную область в технологии RTM, а также других технологий с пропиткой пористых композитных каркасов.

2. В физико-математической модели не предусмотрен учет капиллярных эффектов и поверхностного натяжения, которые вносят существенное влияние на фильтрацию уже при размерах поперечного сечения пор порядка 10 мкм. Предлагаемая модель называется многомасштабной, но на самом деле это только двухмасштабная модель. Фактически, большая часть процесса пропитки нацелена на трехмерный многонаправленный каркас из плетеного композитного материала, который в большинстве случаев имеет более трех масштабов. Поэтому трехмасштабное моделирование анизотропных композитных структур также особенно важно.

*Сделанные замечания ни в коей мере не снижают ценность диссертационной работы, значимости полученных в ней результатов и общей положительной оценки работы. Эти замечания являются рекомендацией автору по дальнейшему развитию математической модели.*

## **Заключение**

Обобщая вышесказанное, можно утверждать, что диссертационная работа Ли Шугуана является научно-квалификационной работой, в которой изложен комплекс результатов, дающих решение важной научно-технической задачи многомасштабного моделирования фильтрационных процессов неньютоновских вязких жидкостей в трехмерных пористых структурах со сложной внутренней геометрией. Работа выполнена на высоком научном уровне, ее результаты обладают новизной и научно-технической значимостью. Основные результаты диссертации прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях и в должной мере отражены в научных публикациях, включая издания из перечня ВАК Минобрнауки РФ (а также в наукометрические базы Scopus и WebofScience). Содержание диссертации и полученные результаты соответствуют паспорту специальности **01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»**. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 01.10.2018) «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, **Ли Шугуан**, безусловно, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности **01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»**.

Отзыв обсужден и одобрен на семинаре отдела информатизации, математического моделирования и управления ИАП РАН, протокол № 3/11 от 17.11.2020.

Главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.

**Н.Г. Бураго**

Старший научный сотрудник, к.т.н.

**А.Д. Никитин**

«20» ноября 2020г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Институт автоматизации проектирования РАН»

Адрес: 123056, Москва, 2-ая Брестская ул, д.19/18

Сайт: <http://www.icad.org.ru/>

Телефон: +7 (499) 250-02-62

Факс: +7 (499) 250-89-28, +7 (499) 250-95-54

Эл.почта: [icad.org.ru](mailto:icad.org.ru)