

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертацию 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**

Армированные композиционные материалы широко применяются во многих областях промышленности, таких как автомобилестроение, авиационная промышленность и др. В настоящее время технология RTM (Resin Transfer Molding), основанная на пропитке сухого армирующего материала жидким связующим, является одной из самых распространенных методов производства армированных композиционных материалов. Следовательно, надежное математическое моделирование течения жидких связующих в пористых композитных структурах чрезвычайно важно для оптимизации процесса проектирования и производства композитов. Диссертационная работа Ли Шугуана посвящена разработке методики многомасштабного моделирования течений неньютоновских вязких жидкостей в пористых композитных структурах с помощью метода асимптотической гомогенизации.

С одной стороны, обычно жидкие связующие, такие как фенольная смола и эпоксидная смола, представляют собой растворы высокомолекулярных полимеров со сложной пространственной структурой, поэтому вязкость жидких связующих оказывается неньютоновской. С другой стороны, в подавляющем большинстве работ исследование процессов течения жидкости в пористых средах изучается либо экспериментально, либо с помощью различных эмпирических и приближенных соотношений для описания локальных процессов фильтрации в рамках феноменологической теории фильтрации. Чрезвычайно сложно

Отедел документационного  
обеспечения МАИ

«08» 12 2020 г.

определить проницаемость неньютоновской вязкой жидкости в пористой структуре, потому что течение неньютоновской жидкости в композитной структуре со сложной микроструктурой зависит от взаимосвязи микроструктуры пористой среды и реологии неньютоновской жидкости. Прямой расчет таких течений является достаточно сложной задачей, в силу чего для решения задачи данного класса обычно используется тот или иной метод асимптотической гомогенизации. Центральное место в рассматриваемой работе занимает метод асимптотической гомогенизации, который позволяет получать математически обоснованные осредненные уравнения для гомогенизированных сред на основе асимптотического анализа точных исходных уравнений механики сплошной среды.

На основе сказанного можно заключить, что тема диссертационной работы является актуальной как с теоретической, так и с практической точек зрения.

### **Научная новизна диссертационной работы**

В диссертационной работе получен ряд новых результатов, касающихся процесса фильтрации неньютоновских вязких жидкостей в пористых средах. Исследована математическая модель многомасштабного процесса фильтрации несжимаемых неньютоновских вязких жидкостей в рамке модели Карро в пористых средах с использованием метода асимптотической гомогенизации и анизотропной нелинейной тензорной функции на основе фундаментальных законов механики сплошной среды. Разработаны алгоритмы численного решения локальных задач течения неньютоновских вязких жидкостей на ячейке периодичности, алгоритмы расчета эффективной неньютоновской вязкости, пористости пористых сред и компонентов тензора проницаемости. Получены результаты численного моделирования локальных течений неньютоновских вязких жидкостей в рамке модели Карро на ячейке периодичности для двух типовых пористых структур. На основе численных результатов установлены эффекты влияния свойства неньютоновско-вязкости жидкостей, градиента макродавления и анизотропии пористых сред на нелинейный закон фильтрации и эффективную вязкость.

## **Теоретическая и практическая значимость**

В диссертационной работе Ли Шугуана теоретическое положение метода асимптотической гомогенизации получено дальнейшее развитие и применительно к задачам фильтрации неньютоновских вязких жидкостей в периодических пористых структурах. Разработан программный комплекс для численного моделирования процессов локальной фильтрации неньютоновской вязкой жидкости в рамках модели Карро в пористой среде и расчета макроскопических свойств фильтрации. С помощью программного комплекса изучены эффекты влияния реологических свойств неньютоновской вязкости жидкостей, градиента макродавления и анизотропия пористых сред на нелинейный закон фильтрации и эффективную вязкость в двух типичных пористых структурах.

## **Степень достоверности и обоснованности научных результатов**

Достоверность и обоснованность полученных результатов гарантируется строгостью и обоснованностью используемого математического аппарата, а также валидацией и верификацией разработанных математических моделей, вычислительных алгоритмов и их программной реализации. Результаты исследования представлены в рецензируемых изданиях, в том числе входящих в перечень ВАК РФ, а также докладывались на международных конференциях.

## **Содержание диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, а общий объем работы составляет 123 страницы, содержит 34 иллюстрации и 17 таблиц. Использованная литература включает 117 наименований.

Во **введении** рассматривается актуальность темы диссертации, объясняются цели и задачи исследования, представлены методы исследования, научная новизна, практическая значимость, научная значимость, надежность и обоснованность научных результатов, а также описывается структура диссертации.

**Первая глава** посвящена разработке физико-математической модели многомасштабных процессов фильтрации неньютоновской вязкой жидкости в рамках модели Карро в пористых композитных средах. Вначале вводятся основные

предположения геометрических моделей микро- и макроструктуры пористой среды и неньютоновской вязкой среды, а также вводится исходная система уравнений механики сплошной среды, используемая для описания течения несжимаемой неньютоновской вязкой жидкости. Введено определяющее соотношение неньютоновской вязкости, зависящее от второго инварианта тензора скорости деформации, которое называется моделью Карро. Асимптотическое разложение неньютоновской вязкости, полученное на основе определенного соотношения, подставляется в исходную систему, и получается локальная задача, описывающая движение неньютоновской жидкости в ячейке периодичности. В случае модели несжимаемой неньютоновской вязкой жидкости даются математическая постановка и физическая интерпретация локальных задач на ячейке периодичности. В частности, чтобы уменьшить вычислительную сложность, дополнение о симметрии ячейки периодичности используется для получения и доказательства симметричных и антисимметричных граничных условий на  $1/8$  ячейке периодичности. С помощью нелинейной тензорной функции определены нелинейный закон фильтрации и эффективная неньютоновская вязкость, а также сформулирована глобальная задача процессов фильтрации неньютоновских вязких жидкостей.

**Вторая глава** посвящена разработке численного алгоритма для решения локальных процессов фильтрации неньютоновской вязкой жидкости в рамках модели Карро и расчета нелинейной закона фильтрации. Формулируется вариационная постановка локальных задач фильтрации неньютоновской вязкой жидкости в рамках модели Карро. Для решения вариационной постановки локальных задач используется метод конечных элементов, который удовлетворяет требованиям решения задачи о течении несжимаемой жидкости, называемом условием LBB. В частности, не только дается метод расчета неньютоновской вязкости в общей трехмерной формуле, но и разрабатывается численный итерационный алгоритм для решения нелинейной вариационной формы локальных задач, вызванной неньютоновской вязкостью. Также получают соотношения для конечно-элементных расчетов пористости, компонент тензора проницаемости и эффективной вязкости.

**Третья глава** посвящена численному исследованию процессов фильтрации неньютоновской вязкой жидкости в рамках модели Карро в двух типичных пористых структурах с использованием разработанного программного комплекса. Сначала кратко объясняется разработанный программный комплекс, и численные результаты проницаемостей ньютоновской жидкости в двух типичных пористых композитных структурах получены с помощью программного комплекса, которые хорошо согласуются с законом Дарси. Затем решаются локальные задачи фильтрации неньютоновских вязких жидкостей в пористых композитных структурах, и результаты показали, что реологии жидкостей оказывают значительные влияния на локальные процессы фильтрации. На основе расчета коэффициентов тензора проницаемости и эффективной вязкости обсуждаются влияния градиента макродавления и степенного индекса модели Карро на нелинейный закон фильтрации. Результаты показывают, что степенный индекс модели Карро и градиент макродавления играют очень важную роль в макроскопических свойствах процесса фильтрации, таких как тензор проницаемости и эффективная вязкость, и нелинейно определяют макроскопические свойства фильтрации.

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

Автореферат и опубликованные работы в целом правильно отражают основное содержание диссертационной работы.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В разделе 1.3.6 главы 1 предлагается нелинейный закон фильтрации в форме нелинейных тензорных функций, при которых компоненты тензора проницаемости являются функцией, нелинейно зависящей от макродавления и неньютоновской вязкости. Такое утверждение представляется здравым, потому что оно является нелинейным продолжением закона Дарси. К сожалению, в данной диссертации не приводится конкретный вид нелинейной тензорной функции.

2. В разделе 1.3.7 главы 1 предлагается скалярная функция, называемая эффективной вязкостью неньютоновской вязкой жидкости, которая нелинейно зависит от градиента давления и модели неньютоновской вязкости. Однако в

данной диссертации не приводятся конкретная форма нелинейной скалярной функции и ее связь с определяющим соотношением неньютоновской вязкости.

3. Для решений локальных задач фильтрации неньютоновских вязких жидкостей (раздел 1.3.3, стр. 42) используется линеаризованный итерационный алгоритм. Однако устойчивости и сходимости итерационного алгоритма не приводятся.

4. Проницаемость численного расчета сравнивается с законом Дарси для проверки адекватности математической модели. Но закон Дарси - это только качественный эмпирический вывод, а не количественный результат. Поэтому проверка адекватности математической модели не завершена.

5. Кое-где встречаются досадные опечатки (“в пористых структур”, в третьей строке шестой части заключения, стр. 112; “изя”, стр. 20), но их количество незначительно и не приводит к недоразумениям.

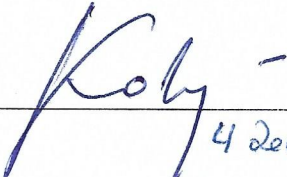
Научная ценность диссертационной работы не уменьшена сделанными замечаниями. Представленная к защите диссертация является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», посвящена актуальной теме и выполнена на высоком научном уровне. Полученные в работе результаты обладают новизной, представляют научный, практический и методический интерес, соответствуют пунктам 7 и 18 паспорта специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Считаю, что представленная диссертационная работа Ли Шугуана соответствует 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

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой  
вычислительной математики

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Московский государственный университет имени  
М.В.Ломоносова»,

 / Кобельков Георгий Михайлович  
4 декабря 2020г.

Подпись Г.М. Кобелькова заверяю

Декан мех-мат ф-та МГУ, чл.-корр. РАН  / А.И. Шафаревич /



Адрес: 119992, Москва, ГСП-2, Ленинские Горы, МГУ, механико-математический  
факультет

Тел.: (499)9391244

E-mail: kobelkov@dodo.inm.ras.ru