

Отзыв официального оппонента

кандидата физико-математических наук

Борисова Виталия Евгеньевича

на диссертационную работу

Богданова Ильи Олеговича

«Двухмасштабное моделирование пространственных течений жидкостей и газов в пористых композитных структурах»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность темы диссертации

В настоящее время композиционные материалы с пористой структурой получают все большее распространение в различных областях промышленности. В частности, широко применяются в машиностроении, энергетике, авиационно-космической отрасли, медицине и т.д. Одновременно с этим в связи с постоянным усложнением решаемых задач возникает необходимость создания соответствующих физико-математических моделей и методов моделирования процессов, связанных с их производством и использованием. Разработке одного из таких методов посвящена диссертационная работа И.О. Богданова, в которой рассматривается методика двухмасштабного моделирования пространственных течений жидкостей и газов в пористых композиционных материалах.

Движение жидкой и газовой фаз в пористой среде в общем случае описывается системой уравнений Навье–Стокса, в которой искомые функции имеют в качестве области определения поровое пространство материала со сложной внутренней геометрией. Прямой расчет таких течений является достаточно сложной задачей, в силу чего для решения задач данного класса обычно используется тот или иной метод осреднения. Центральное место в рассматриваемой работе занимает метод асимптотического осреднения, ранее хорошо зарекомендовавший себя при решении задач механики композиционных материалов, теории многослойных пластин и пр. Метод асимптотического осреднения привлекателен тем, что позволяет получать математически обоснованные осредненные уравнения для гомогенизированных сред на основе асимптотического анализа точных исходных уравнений (многофазной) механики сплошной среды. Кроме того, в отличие от чисто феноменологических подходов теории фильтрации, он позволяет определить основные характеристики пористой среды (пористость и коэффициенты проницаемости), основываясь исключительно на геометрической форме пор. Это крайне важно для композиционных материалов со сложной микроструктурой, поскольку погрешности при

определении проницаемости крайне негативно влияют на адекватность результатов, получаемых при решении макроскопической задачи фильтрации.

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

Научная новизна полученных результатов

Полученные в диссертационной работе результаты являются новыми. В частности, разработаны физико-математическая модель слабосжимаемой жидкости и двухмасштабная модель процесса вытеснения газа из пористой среды слабосжимаемой жидкостью в трехмерной постановке. Предложен конечно-элементный алгоритм решения локальных задач пространственного течения жидкости и газа на ячейке периодичности композитных структур и алгоритм расчета тензора проницаемости. Разработан численный алгоритм решения глобальной задачи о вытеснении газа из пористой композитной структуры слабосжимаемой жидкостью, основанный на итерационном процессе Ньютона-Рафсона в сочетании с методом конечных элементов.

Практическая значимость диссертационной работы

Соискателем разработан программный комплекс для численного моделирования двухмасштабных процессов течения жидкостей и газов в пористых композитных структурах, реализующий разработанные физико-математические модели и алгоритмы численного решения локальных и макроскопических задач.

В работе продемонстрирована методика численного расчета тензора проницаемости типовых тканевых композитных структур. Анализ базируется на асимптотическом анализе уравнений Навье-Стокса и решении полученных локальных задач на основе метода конечных элементов. При этом не делаются какие-либо эмпирические допущения о характере локальных процессов фильтрации. Описанная в работе методика двухмасштабного моделирования процессов фильтрации может быть полезна при проектировании композиционных материалов, изготавливаемых на основе методов RTM (пропитки армирующего каркаса жидким связующим под давлением).

Степень обоснованности и достоверности научных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается строгостью и обоснованностью используемого математического аппарата и проведенной автором 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 всероссийских и международных конференциях.

Содержание диссертационной работы

Работа изложена на 133 страницах, содержит 32 иллюстрации и 11 таблиц. Библиография включает 115 наименований. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка использованной литературы.

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.

Первая глава диссертации начинается с введения основных допущений и описания геометрических моделей макро- и микроструктуры пористой среды. Далее приводится общая постановка задачи фильтрации газа и слабосжимаемой жидкости на основе системы уравнений Навье–Стокса. В работе рассматриваются две модели слабосжимаемой жидкости, которые автор называет «классической» и «обобщенной». Отличие между ними заключается в том, что во второй модели вместо опорного давления, задаваемого в классической модели как некоторая эмпирическая константа, вводится гидростатическая часть давления жидкости, независимая от ее плотности и определяемая из решения отдельной задачи. При этом исходная система уравнений оказывается незамкнутой и для ее определения соискатель представляет искомые функции в специальном аддитивном виде. Подстановка введенных таким образом соотношений в исходную систему и ее разделение на две замкнутые системы дает в итоге искомую постановку задачи фильтрации для обобщенной модели слабосжимаемой жидкости.

К системам уравнений применяется метод асимптотического осреднения, суть которого состоит во введении малого геометрического параметра, равного отношению характерных размеров ячейки периодичности и всей пористой среды, и двух типов безразмерных координат: «быстрых» (локальных) и «медленных» (глобальных). Все искомые функции полагаются функциями этих координат, а решение исходной задачи ищется в виде асимптотических разложений по степеням малого параметра. Подстановка этих рядов в исходные системы уравнений дает локальные задачи на ячейке периодичности для газа и слабосжимаемой жидкости. После ряда преобразований в работе показывается, что все локальные задачи нулевого уровня для газа и слабосжимаемой жидкости (классической и обобщенной) приводятся к одной и той же форме, представляющей собой искомую локальную задачу на $1/8$ ячейки периодичности.

Далее описывается процедура осреднения локальных уравнений, которая приводит к классическому закону фильтрации Дарси и нестационарным нелинейным уравнениям фильтрации в гомогенизированной области. Постановка дополняется уравнением движения поверхности раздела фаз. Для решения полученной задачи о пространственном движении слабосжимаемой жидкости, вытесняющей газ из пористой среды, используется метод введения динамических независимых координат, которые выбираются таким образом, чтобы решение производилось в фиксированной области.

Вторая глава диссертации посвящена рассмотрению численных методов решения локальной и глобальной задач течения жидкости и вытесняемого ею газа в пористой среде. Для решения локальных задач используется метод конечных элементов. Для этого первоначально на основе вариационного принципа Хеллингера-Рейсснера формулируется вариационная постановка задачи. Дальнейшая процедура получения результирующих систем линейных алгебраических уравнений основана на использовании тетраэдрального конечного элемента с 34 степенями свободы. После преобразования всех интегралов, входящих в вариационную постановку локальной задачи, к матричному виду, получается искомая несимметричная система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для каждого конечного элемента.

Численная постановка макроскопической задачи также осуществляется на основе метода конечных элементов и процедура ее получения в целом схожа с той, что использовалась при численном решении локальной задачи. Однако глобальная задача фильтрации является нелинейной, поэтому ее вариационная постановка формулируется на основе метода Ньютона-Рафсона относительно приращения давления. Кроме того, вариационная задача также дополняется вариационным уравнением для расчета гидростатического давления для обобщенной модели слабосжимаемой жидкости и уравнением для определения положения плоской границы раздела фаз. Применение к вариационной постановке метода конечных элементов позволяет сформулировать искомую несимметричную СЛАУ для каждого конечного элемента, а использование метода Эйлера с левыми разностями для уравнения движения плоской поверхности раздела фаз дает кубическое уравнение относительно положения границы в зависимости от продольной координаты образца.

Вторая глава завершается описанием общего итерационного алгоритма решения макроскопической задачи фильтрации.

В **третьей главе** диссертационной работы основное внимание уделено анализу результатов решения локальных задач на ячейках периодичности для различных моделей микроструктуры пористой среды, а также результатов

решения макроскопической задачи о вытеснении газа из пористой среды слабосжимаемой жидкостью.

В начале главы дается краткое описание разработанного программного комплекса для моделирования локальных и макроскопических процессов фильтрации, приводятся основные принципы работы с ним. Для проверки корректности результатов решения локальных задач проведено тестирование программного обеспечения для случая задачи о течении вязкой жидкости в цилиндрическом канале (задача Пуазейля), имеющей аналитическое решение. Сравнение численного и аналитического решений показало хорошее согласование результатов.

Далее представлены результаты ряда вычислительных экспериментов по моделированию локальных процессов фильтрации в порах различной конфигурации. Рассмотрены процессы течения сред в порах в форме шаров, соединенных узкими цилиндрическими каналами по одному и по трем направлениям, проанализировано влияние побочных каналов. Рассмотрен процесс течения в порах, образованных переплетением волокон, в случае течения перпендикулярно плоскости волокон и в плоскости волокон. Во всех случаях получены распределения полей давления и скорости течения, а также численно рассчитаны пористость и компоненты тензора проницаемости каждой пористой структуры.

Глава завершается описанием результатов моделирования макроскопического процесса вытеснения газа из порового пространства слабосжимаемой жидкостью на примере технологии RTM для производства композиционных материалов. При этом анализировалось время полного заполнения образца в форме параллелепипеда из нескольких слоев стеклоткани при использовании классической и обобщенной моделей слабосжимаемой жидкости, в роли которой выступала ненасыщенная полиэфирная смола. При этом использовались данные о проницаемости и пористости материала наполнителя, численно рассчитанные ранее при решении локальных задач.

В заключении диссертационной работы кратко отражаются основные результаты и выводы.

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

Замечания по диссертационной работе

1. Для численного решения несимметричных систем линейных алгебраических уравнений в работе используется один из итерационных методов крыловского типа BiCGStab (раздел 2.3). Хотелось бы обратить внимание автора, что обычно методы данного класса используются совместно с процедурой предобуславливания, существенно улучшающей сходимость алгоритмов, что позволяет сократить полное время расчета. Для конечномерных задач высокой сеточной размерности, типичной для современных приложений (сотни тысяч – миллионы уравнений), применение предобуславливания является просто необходимым.
2. В разделе 3.1.2 автором проведено тестирование программного комплекса с использованием единственной тестовой задачи. Следовало также провести сравнение с известными данными для других модельных пористых сред (в частности, можно было рассмотреть модельную пористую среду, состоящую из упаковки шаров или параллельных цилиндров, для которых применимо соотношение типа Козени–Кармана) или рассмотреть синтетические тесты.
3. На рисунках с результатами расчетов 3.3, 3.8–3.21 следовало более аккуратно отобразить легенду рисунков, сделав ее более информативной, поскольку в представленном виде она является трудноразличимой.
4. На рис. 3.26 помимо численных результатов представлены графики прогнозируемого времени заполнения пористой среды жидкостью. При этом в тексте работы не описан способ получения этих данных.
5. Автору следовало более подробно продемонстрировать преимущества разработанной обобщенной модели слабосжимаемой жидкости.

Приведенные выше замечания не влияют на общую положительную оценку работы. В диссертации затронуты важные и актуальные проблемы. Работа выполнена на высоком научном уровне, написана грамотно, понятным языком, текст работы хорошо структурирован, четко прослеживается логика исследования, сделанные заключения и выводы обоснованы.

Соответствие содержания диссертации специальности

Диссертация Богданова Ильи Олеговича является законченным научно-квалификационным исследованием, в котором получены новые, актуальные и практически значимые результаты. Диссертация соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Богданов Илья Олегович, 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)

28 августа 2018 г.

Борисов Виталий Евгеньевич

Адрес организации: 125047, г. Москва, Миусская пл., 4
Телефон: +7 (495) 250-79-24,
e-mail: narelen@gmail.com

Личную подпись кандидата физико-математических наук Борисова Виталия Евгеньевича заверяю.

Ученый секретарь

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,

к.ф.-м.н.



Александр Иванович Маслов