

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

Диссертационный совет: Д 212.125.14

Соискатель: Ли Шугуан

Тема диссертации: Моделирование движений неньютоновских вязких жидкостей в пористых средах на основе метода асимптотической гомогенизации

Специальность: 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Решение диссертационного совета по результатам защиты: На заседании 25 декабря 2020 года, протокол № 11, диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, и принял решение присудить Ли Шугуану ученую степень кандидата физико-математических наук.

Присутствовали: Красильников П.С. – *председатель*, Гидаспов В.Ю. – *ученый секретарь*, а также члены диссертационного совета: Холостова О.В., Бардин Б.С., Бишаев А.М., Колесник С.А., Косенко И.И., Котельников В.А., Котельников М.В., Маркеев А.П., Никитченко Ю.А., Овчинников М.Ю., Ревизников Д.Л., Рябов П.Е., Формалев В.Ф., Ципенко А.В.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.14, д.ф.-м.н., доцент



В.Ю. Гидаспов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.125.14 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 25 декабря 2020 г. № 11.

О присуждении Ли Шугуану, гражданину Китайской Народной Республики (КНР), ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Моделирование движений неньютоновских вязких жидкостей в пористых средах на основе метода асимптотической гомогенизации» по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы» принята к защите «22» октября 2020 года, протокол № 8, диссертационным советом Д 212.125.14 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)»), Министерство образования и науки РФ, 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, приказы Минобрнауки РФ: о создании диссертационного совета № 714/нк от 02.11.2012.

Соискатель Ли Шугуан, 1990 года рождения, окончил в 2015 году «Харбинский инженерный университет» по специальности «Теория систем». С 09.2015 по 07.2016 учился на подготовительном факультете федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

С 09.2016 по настоящее время является очным аспирантом кафедры «Вычислительная математика и математическая физика» (ФН-11) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический

университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) на кафедре «Вычислительная математика и математическая физика» (ФН-11).

Научный руководитель – заведующий кафедрой «Вычислительная математика и математическая физика» (ФН-11) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), доктор физико-математических наук, профессор Димитриенко Юрий Иванович.

Официальные оппоненты:

1. Кобельков Георгий Михайлович, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вычислительная математика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ им. М.В. Ломоносова).

2. Борисов Виталий Евгеньевич, гражданин Российской Федерации, 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).

Оппоненты дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт автоматизации проектирования РАН» (ИАП РАН), в своем положительном заключении, подписанном старшим научным

сотрудником, кандидатом технических наук Никитиным А.Д., главным научным сотрудником, доктором физико-математических наук Бураго Н.Г. и утвержденном директором ИАП РАН, доктором физико-математических наук Никитиным И.С., указала, что диссертацию следует признать законченным научным исследованием, которое выполнено на высоком научном уровне и посвящено решению актуальной проблемы. Автореферат и публикации соискателя с достаточной полнотой и правильностью отражают содержание диссертации. Тематика диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы». Диссертация удовлетворяет всем требованиям Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842 «О порядке присуждения ученых степеней» и заслуживает положительной оценки, а её автор, Ли Шугуан, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

На диссертацию поступили отзывы:

Отзыв на диссертацию ведущей организации.

Замечания по 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.

**Отзыв на диссертацию официального оппонента, д.ф.-м.н.,
профессора Кобелькова Георгия Михайловича.**

Замечания по диссертации:

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 структурах”, в третьей строке шестой части заключения, стр. 112; “изя”, стр. 20), но их количество незначительно и не приводит к недоразумениям.

**Отзыв на диссертацию официального оппонента, к.ф.-м.н.,
Борисова Виталия Евгеньевича.**

Замечания по диссертации:

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.

На автореферат диссертации поступил 1 отзыв.

1. Заместитель начальника центрального конструкторского бюро машиностроения (ЦКБМ), начальник отделения АО «ВПК «НПО машиностроения»», кандидат технических наук, Новиков Андрей Евгеньевич.

Отзыв положительный. По автореферату имеются следующие замечания:

1. Не совсем понятно обоснование правомерности построений (9), принятых на странице 7, - введение малого параметра $\kappa \rightarrow 0$ в безразмерные критерии Эйлера, Рейнольдса и Карро, поскольку, строго говоря, при использовании теоретических положений метода малого параметра необходимо определить и другие (в общем случае не геометрические) параметры $\kappa_i \ll 1, i = \overline{1,3}$, отличные от κ .
2. Было бы интересно знать, в силу каких физико-химических допущений бензол рассматривается в качестве неньютоновской жидкости, поскольку при нормальных условиях этот углеводород принадлежит классу ньютоновских жидких сред (страница 12).

Выбор официальных оппонентов обосновывается их компетентностью в области тем, затрагиваемых в диссертационном исследовании.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вычислительная математика» ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» Кобельков Георгий Михайлович – автор более 100 работ. Область научных интересов: численные методы решения задач математической физики, в частности, уравнений теории упругости, гидродинамики, эллиптических уравнений и т.д. Для уравнений Навье-Стокса вязкой несжимаемой жидкости в переменных «скорость-давление» им предложены математически обоснованные методы расчета; для краевых задач для эллиптических уравнений и уравнений теории упругости с сильно меняющимися

коэффициентами предложены итерационные методы со скоростью сходимости не зависящей от разброса этих коэффициентов.

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), Борисов Виталий Евгеньевич – автор более 30 работ. Область научных интересов: численные методы решения задач математической физики, исследования в области механики жидкости, газа и плазмы, теория фильтрации.

Выбор ведущей организации – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт автоматизации проектирования РАН» (ИАП РАН) – обусловлен ее положением как одной из передовых организаций, создающих программные продукты по численному моделированию процессов в механике сплошных сред, астрономии, физике, медицине. Данная организация является одним из ведущих предприятий России и также осуществляет научное сотрудничество с зарубежными партнерами.

Соискатель имеет 8 опубликованных научных работ по теме диссертации, из них 2 работы опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, входящих в список, рекомендуемый ВАК, а также 5 научных работ, включенных в международные базы данных Scopus или Web of Science, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. Работы опубликованы в соавторстве, при этом вклад соискателя был определяющим, а опубликованные результаты получены либо лично соискателем, либо при его непосредственном участии. В опубликованных работах излагаются основные положения диссертационной работы.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Димитриенко Ю.И., Ли Шугуан, Конечно-элементное моделирование неизотермического стационарного течения неньютоновской жидкости в сложных областях // Математическое моделирование и численные методы. 2018. № 2(18). С. 70–95.
2. Димитриенко Ю.И., Ли Шугуан, Моделирование проницаемости неньютоновских жидкостей в трехмерных композитных структурах на основе метода асимптотической гомогенизации // Математическое моделирование и численные методы. 2019. № 3(23). С. 19–38.
3. Dimitrienko Yu.I., Li S.G., Modeling of Non-Newtonian resin flows in Composite Microstructures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019, Vol. 683(1): 012008.
4. Dimitrienko Yu.I., Li S.G., Mathematical Simulation of local transfer for non-Newtonian fluid in porous fabrics // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019, Vol. 1392(1): 012023.
5. Li S.G., Numerical analysis for fourth-order compact conservative difference scheme to solve the 3D Rosenau-RLW equation // Computers & Mathematics with Applications. 2016. Vol. 72(9). P. 2388-2407.
6. Li S.G., Wu X.G., L^∞ error bound of conservative compact difference scheme for the generalized symmetric regularized long-wave (GSRLW) equations // Computational and Applied Mathematics. 2018. Vol. 37(3). P. 2816-2836.
7. Li S.G., Numerical study of a conservative weighted compact difference scheme for the symmetric regularized long wave equations // Numerical Methods for Partial Differential Equations. 2019 Vol. 35(1). P. 60-83.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **Разработана** многомасштабная модель процессов течения несжимаемой неньютоновской жидкости в рамках модели Карро в пористых композитных структурах.

- **Сформулированы** локальные задачи течения несжимаемой неньютоновской жидкости в рамках модели Карро в ячейках периодичности.
- **Предложены** нелинейный закон фильтрации и эффективная вязкость неньютоновских жидкостей в пористых средах в целом.
- **Показано**, что постановка локальных задач фильтрации неньютоновских вязких жидкостей формально в точности отличается от стационарной задачи течения некоторой фиктивной линейно-вязкой несжимаемой среды, поскольку их решения зависят не только от внутренней геометрии пор, но и от связи между реологиями жидкости и приложенными нагрузками.
- **Сформулирована** вариационная постановка локальных задач течения неньютоновской жидкости в рамках модели Карро, с помощью которой разработан численный итерационный алгоритм решения локальных задач в общей трехмерной постановке.
- **Получены** результаты численного моделирования локальных процессов течения неньютоновской жидкости в рамках модели Карро на ячейке периодичности типовых композитных структур, показавшие эффективность предложенного алгоритма решения локальных задач и вычисления параметров проницаемости.
- **Получены** результаты численных расчетов нелинейного закона фильтрации неньютоновской жидкости в рамках модели Карро в пористых средах. Результаты расчетов показывают, что коэффициенты проницаемости нелинейно зависят от степенного индекса и градиента макродавления.
- **Получены** результаты численных расчетов эффективной вязкости в целых пористых средах.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в следующем. Соискателем разработано программное обеспечение для многомасштабного моделирования процессов фильтрации неньютоновской

жидкости в рамках модели Карро, реализующее предложенные в диссертации физико-математические модели локальных процессов и алгоритмы численных расчетов нелинейного закона фильтрации и эффективной вязкости в целой пористой системе.

В работе предложена методика многомасштабного моделирования движения неньютоновской жидкости в рамках модели Карро в пористых средах со сложной внутренней микроструктурой, представляющая интерес с точки зрения исследования технологических процессов при производстве композиционных материалов на основе пропитки армирующего материала жидким связующим в оснастке. Данный подход использует асимптотический анализ системы точных исходных уравнений механики сплошной среды, что дает возможность избежать экспериментального исследования образцов с целью определения проницаемости, а также использования приближенных моделей для описания локальных процессов движения сред. Предложенная методика дает возможность непосредственно рассчитывать параметры процессов неньютоновской жидкости в рамках модели Карро в пористых средах на основе численного решения локальных задач для конкретной модели геометрии микроструктуры пористой среды.

Достоверность научных результатов исследования гарантируются использованием теоретически обоснованного математического аппарата, апробированных численных методов и фундаментальных законов механики сплошной среды, а также адекватность ряда результатов численного моделирования в работе проверяется посредством сравнения с существующими результатами закона Дарси. Результаты диссертации отражены в рецензируемых журналах, в том числе, входящих в Перечень ВАК и доложены на международных конференциях.

Личный вклад.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям постановления Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения ученых степеней», так как является самостоятельно выполненной, завершенной

научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи многомасштабного моделирования процессов течения неньютоновских вязких жидкостей в пористых композитных структурах.

На заседании «25» декабря 2020 года протокол № 11 диссертационный совет принял решение присудить Ли Шугуану ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 9 докторов наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, проголосовали: за - 16, против - нет, недействительных бюллетеней - нет.

Председатель диссертационного совета
Д 212.125.14, д.ф.-м.н., профессор

П.С. Красильников

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.125.14, д.ф.-м.н., доцент

В.Ю. Гидаспов

25 декабря 2020 г.

Начальник отдела УДС МАИ
Т.А. Аникина

