

## **ОТЗЫВ** научного руководителя

о диссертационной работе Ли Шугуана на тему «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»

Ли Шугуан является выпускником китайского университета «Харбинский инженерный университет», который он окончил в 2015 году по специальности «Теория системы». С сентября 2015 по июль 2016 он учился на подготовительном факультете ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана. Затем с 09.2016 по настоящее время Ли Шугуан продолжил свое обучение в очной аспирантуре на кафедре «Вычислительная математика и математическая физика» (ФН-11) ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана. За время обучения в аспирантуре им полностью сданы экзамены кандидатского минимума. В 2020 году была завершена диссертационная работа. В ходе работы над диссертацией Ли Шугуан продемонстрировал глубокие знания о области механики жидкости и газа, а также владение математическим аппаратом и вычислительной техникой.

**Актуальность темы диссертации.** Течение неньютоновских вязких жидкостей в пористых средах играет важную роль во многих технологических процессах, таких как производство композиционных материалов RTM-методом (пропитки жидким связующим под давлением). В то же время, качество композитных конструкций, полученных с помощью RTM-методов, в значительной степени зависит от параметров технологии изготовления: геометрических параметров конструкции, проницаемости и пористости сухого каркаса, давления пропитки, а также от вязкости жидких связующих. Обычно жидкие связующие сильно неоднородны и состоят из крупных молекул, образующих сложные пространственные структуры. Такие жидкие связующие, как правило, проявляют свойства неньютоновских жидкостей. Поэтому чрезвычайно важной является задача адекватного моделирования течения неньютоновских вязких жидкостей в пористых средах, имеющих

сложную пространственную геометрическую форму пор.

В подавляющем большинстве работ исследование процессов течения жидкостей в пористых структурах изучается в рамках феноменологической теории фильтрации, в основе которой лежит закон Дарси и его модификации. В феноменологической теории фильтрации, с помощью либо экспериментов, либо различных эмпирических и приближенных соотношений для описания локальных процессов фильтрации, получаются довольно грубые оценки реальных процессов, происходящих внутри пор со сложной геометрией, свойственной композитам, что приводит к большим отклонениям при определении проницаемости. В связи с этим важной частью исследования фильтрации является анализ локальных процессов течения жидкости в отдельной поре и вывод осредненных уравнений фильтрации на основе механики сплошной среды, а не на основе феноменологических подходов. Такой подход к моделированию течений сред в пористых средах получил название многомасштабного моделирования, в основе которого лежит метод асимптотической гомогенизации.

В пористых средах течение неньютоновских вязких жидкостей зависит от сложной связи между микроструктурой среды и реологией жидкости. В этой связи многомасштабное моделирование течения неньютоновско-вязких жидкостей в пористых средах является довольно сложной и чрезвычайно актуальной темой исследования.

**Новые результаты, полученные в диссертационной работе:**

1. Разработана физико-математическая модель течения несжимаемых неньютоновских вязких жидкостей в пористых средах на основе общих уравнений механики сплошной среды, модели Карро для неньютоновских вязких жидкостей с использованием метода асимптотической гомогенизации.

2. Разработаны алгоритмы численного решения локальных задач течений неньютоновских вязких жидкостей на ячейке периодичности пористых сред, алгоритмы расчета эффективной неньютоновской вязкости, пористости сред и компонентов тензора проницаемости.

3. Разработан нелинейный закон фильтрации неньютоновских вязких жидкостей в пористых средах на основе анизотропной нелинейной тензорной функции.

4. Получены результаты численного моделирования локальных течений неньютоновской вязкой жидкостью в рамках модели Карро на ячейке периодичности для 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 неньютоновской вязкой жидкости в рамках модели 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.

**Достоверность и обоснованность** гарантируются использованием теоретически обоснованного математического аппарата и фундаментальных законов механики сплошной среды, а также подтверждена сравнением полученных результатов численного моделирования с известными результатами.

**Теоретическая и практическая значимость** состоит в том, что дальнейшее развитие теоретических положений метода асимптотической гомогенизации применено к задачам механики неньютоновских вязких жидкостей в периодических пористых структурах. Разработан программный комплекс для моделирования многомасштабных процессов фильтрации неньютоновской вязкой жидкости в рамках модели Карро в пористых средах, реализующий разработанные физико-математические модели локальных процессов в отдельной ячейке периодичности и алгоритмы численных расчетов нелинейного закона фильтрации и эффективной вязкости в пористой системе в целом. Получены численные результаты расчета компонентов тензора проницаемости для двух типовых пористых структур, установлены эффекты влияния реологических свойств неньютоновской вязкости, градиента макродавления и анизотропия пористых сред на нелинейный закон фильтрации и эффективную вязкость.

Ли Шугуан начал заниматься научно-исследовательской работой с 1-го курса обучения аспирантуры в ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана. За время обучения в аспирантуре им получен ряд новых научных результатов. Результаты научных исследований Ли Шугуана отражены в 8

научных публикациях, в том числе в 2 статьях в ведущих научных журналах из перечня ВАК РФ, в 5 статей в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus или Web of Science.

Считаю, что Ли Шугуан состоялся как исследователь, способный решать сложные научные задачи математического и численного моделирования с применением современных компьютерных технологий. Диссертация Ли Шугуана «Моделирование движений неньютоновских вязких жидкостей в пористых средах на основе метода асимптотической гомогенизации» соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы», и автор Ли Шугуан заслуживает присуждения ему искомой степени.

Научный руководитель  
заведующий кафедрой «Вычислительная математика и  
математическая физика» (ФН-11)  
ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
доктор физико-математических наук, профессор,

Ю.И. Димитриенко

20.01.2020.

Подпись Ю.И. Димитриенко заверяю



Почтовый адрес: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1,

Телефон: 8 (499) 263-60-18,

Факс: 8(499)265-79-18

e-mail: dimit.bmstu@gmail.com