

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИВМиГ СО РАН, д.ф.-м.н.

Марченко М. А./

декабрь 2021 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Янбарисова Руслана Маратовича

на тему «Методы конечных объемов для гидродинамических задач в областях с не разрешаемыми сеткой границами» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.6 – вычислительная математика.

Диссертационная работа Янбарисова Р. М. посвящена разработке новых конечно-объемных методов для задач фильтрации и гидродинамики. В рамках диссертационной работы рассматриваются математические модели диффузии и двухфазной фильтрации в областях с крупными трещинами, течения неньютоновских жидкостей со свободной поверхностью.

Особенностью рассматриваемых моделей является необходимость применения специальных методов учета особенностей задач, таких, как крупные трещины в задачах фильтрации, и свободная поверхность в задачах гидродинамики неньютоновских жидкостей. В работе предлагаются способы построения такого рода специальных методов, заточенных на физически корректный учет особенностей задач. В рамках диссертационной работы проведено тестирование разработанных автором вычислительных комплексов программ на верификационных экспериментах. Показано соответствие полученных расчетов экспериментальным данным. В результате проведенных исследований получены новые результаты, имеющие научную и практическую ценность, включающую в себя возможность применения разработанных методов для решения различных инженерных задач, связанных с моделированием процессов нефтедобычи, биопринтинга и другими задачами.

Актуальность темы исследования. Для задач фильтрации и гидродинамики с геометрическими особенностями, не разрешаемыми расчетными сетками, и при этом значительно влияющими на поведение численного решения, необходимо адаптировать существующие или предлагать новые методы или модели решения. В данной работе затронуты оба подхода.

Метод вложенных дискретных трещин был предложен относительно недавно (около 10 лет назад) и обладает привлекательными для исследователей свойствами, такими, как простота реализации, возможность легкого внедрения в уже существующие симуляторы фильтрации, расширяемость подхода на многофазную и многокомпонентную фильтрацию. Предлагаемый в данной работе метод является адаптацией подхода, добавляющей к этим преимуществам корректный учет полного тензора проницаемости внутри пористой среды.

Представление свободных поверхностей с помощью функций уровня является широко применяемым подходом моделирования течений жидкостей благодаря его корректному учету топологических изменений жидких областей (таких, как, например, слияние двух капель) и вычислительной эффективности. Представление многоклеточных сфероидов из стволовых клеток твердо-жидкостной моделью, введенной в работе, является новым и перспективным подходом для моделирования их компрессии, разрезания и слияния. Существующие модели основаны на представлении сфероидов твердыми моделями, что не позволяет качественно описывать процессы слияния сфероидов, наблюдаемые экспериментально.

Содержание диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, двух глав и заключения. Объем работы составляет 117 страниц, включая 9 таблиц и 40 рисунков. Список литературы содержит 100 наименований.

Во введении обозначены цели и задачи исследования, актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Описаны методы, применяемые в ходе работ, перечислены выносимые на защиту положения, приведен список публикаций.

В первой главе предлагается монотонный метод вложенных дискретных трещин для задач диффузии и двухфазной фильтрации в областях с крупными трещинами. Метод основан на использовании нелинейных конечно-объемных схем для дискретизации потоков внутри пористой среды. Трещины учитываются с помощью дополнительных неизвестных модели, вводимых в каждой ячейке области, пересекаемой поверхностью трещины; при этом расчетная сетка области не перестраивается под положение трещин, что декларируется как одно из преимуществ подхода.

Для задачи диффузии доказаны монотонные свойства предложенного метода в случаях трещин с проницаемостью выше и ниже окружающей ее пористой среды. Доказанные монотонные свойства подтверждены расчетами в рамках разработанного автором программного комплекса моделирования. Также приводятся результаты верификационных трехмерных экспериментов и производится их сравнение с другими известными методами учета трещин.

В конце первой главы рассматривается расширение предложенного подхода на математическую модель двухфазной фильтрации. В рамках численного эксперимента продемонстрированы преимущества монотонного метода по сравнению с оригинальным методом вложенных дискретных трещин.

Во второй главе предлагается полунеявная численная схема для моделирования течений вязкопластичных и вязкоэластичных жидкостей со свободной поверхностью. Численная схема состоит из обновления положения жидкой области и полностью неявного метода решения динамических уравнений в ней. Вязкопластичные жидкости описываются уравнениями Хершеля-Балкли, вязкоэластичные жидкости – уравнениями жидкости Олдройда-Б. Дискретное представление свободной поверхности основано на использовании функции уровня.

Предложенные модели разработаны в программном комплексе Flocree численного моделирования жидкостей со свободной поверхностью на сетках типа восьмиричное дерево. Проведена верификация разработанных моделей с помощью расчетов и сравнении их результатов с экспериментальными и численными данными из литературы.

Также предложена новая математическая модель вязкоэластичного материала, основанная на совмещении моделей вязкоэластичной жидкости Олдройда-Б и гиперупругого твердого тела нео-Гука. Данная модель была успешно применена на задаче компрессии многоклеточных сфероидов из стволовых клеток.

В заключении приводятся основные результаты диссертации.

Научная новизна. Все результаты диссертации, вынесенные на защиту, являются новыми. Автором была предложена монотонная модификация метода вложенных дискретных трещин для задач фильтрации в пористых трещиноватых средах, позволяющий как учитывать анизотропность тензора проницаемости пористой среды, так и наличие крупных проводящих и/или блокирующих трещин. Для задачи диффузии доказаны теоремы о сохранении неотрицательности / удовлетворении дискретного принципа максимума для переменной давления как в области пористой среды, так и в трещинах.

Предложена новая твердо-жидкостная модель вязкоэластичного материала, примененная для задачи компрессии сфероидов и имеющая перспективные приложения для задач биопринтинга.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты данной работы могут быть использованы для описания многофазных течений в трещиноватых средах, для подбора параметров эластичности многоклеточных сфероидов. Разработанные математические модели могут быть использованы в научной работе в ИВМ РАН, Сеченовском университете, ИБРАЭ РАН и других научных организациях, а также в практической работе специалистами в моделировании нефтедобычи, распространении радиоактивных отходов, регенеративной биомедицине.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации. Достоверность применяемых в работе математических методов не вызывает сомнений. Разработанные в ходе выполнения работ программные комплексы были верифицированы на известных задачах механики сплошных сред для проверки адекватности результатов. В ходе работы над диссертацией соискатель активно участвовал во всероссийских и международных конференциях,

представлял свои результаты в рецензируемых научных изданиях, включая международные.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ в рецензируемых изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и/или Web of Science. Из них 2 работы опубликованы в журналах ВАК по списку специальности, и 4 опубликованы в международных журналах из первого квартиля. Материал диссертации полно представлен в опубликованных работах.

В ходе рассмотрения текста диссертации возникли следующие **замечания:**

1). Использование полностью неявного метода решения уравнений Навье-Стокса является вычислительно трудоемкой задачей, и с точки зрения производительности существуют более экономичные подходы, например, методы расщепления. В тексте диссертации не приведены причины применения чисто неявных методов.

2). Несколько странно выглядит п.1.8 с кратким описанием комплекса программ после п.1.7, в котором этот комплекс фигурирует в выводах к первой главе. Собственно, в диссертациях по специальности 1.1.6 – «Вычислительная математика» не требуется упоминание о программном комплексе.

3). Непривычно оформлен список литературы – по порядку упоминания источника. Такое оформление свойственно скорее небольшим статьям, а в диссертационных работах затрудняет анализ списка литературных источников.

Сделанные замечания не меняют общей положительной оценки проделанной работы. Диссертация содержит новые результаты, имеющие научную и практическую значимость для решения широкого класса инженерных задач.

Заключение о диссертации. Диссертационная работа Янбарисова Руслана Маратовича является законченным научно-квалификационным

исследованием, в котором предлагаются методы решения задач фильтрации и гидродинамики в областях, не разрешаемых расчетными сетками. Работа отвечает паспорту научной специальности 1.1.6 – «Вычислительная математика». Выносимые на защиту результаты работы обладают научной новизной, личный вклад автора в их получение не подлежит сомнению. Диссертация отвечает требованиям Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Янбарисов Руслан Маратович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.6 – «Вычислительная математика».

Диссертационная работа Янбарисова Р. М. была заслушана и одобрена на заседании совместного семинара Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук и кафедры Вычислительной математики Новосибирского государственного университета 17 декабря 2021 года, протокол № 3 - 2021.

Полное название организации: ФГБУН Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН

Адрес: 630090, Новосибирск, Просп. Академика Лаврентьева, 6

Сайт организации: <https://icmmg.nsc.ru>

Электронная почта: contacts@sscc.ru

Телефон: +7 (383) 330-83-53

Зав. лабораторией Математических задач химии,
зав. кафедрой вычислительной математики НГУ
д.ф.-м.н., профессор



Юрий Миронович Лаевский

Подпись Ю.М. Лаевского заверяю
Ученый секретарь ИВММ СО РАН
к.ф.-м.н.

Л.В. Вшивкова