

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу С.А. Филимонова «Гибридный метод для совместного решения многомерных и сетевых задач гидродинамики и теплообмена», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Течения несжимаемой жидкости и теплообмен играют огромную роль в природе и технике. Эффективным методом, предназначенным для изучения сложных многопараметрических процессов, является вычислительный эксперимент. Диссертационная работа Филимонова С.А. посвящена актуальной задаче – разработке гибридного метода исследования сложных систем, состоящих из «компактных» и протяженных элементов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (104 наименования) и двух приложений.

Во введении излагаются основные положения диссертационной работы. В первой главе рассматриваются примеры применения разномасштабных методов моделирования кровеносной системы, моделирования речных систем и энергетических установок. Разномасштабные модели применялись в отдельных программных продуктах. Проведенный обзор показал актуальность разработки гибридного метода расчета, реализованного в одном программном комплексе.

Вторая глава посвящена описанию математических моделей гидродинамики, используемых в гибридном методе. Гидравлическая цепь состоит из набора узлов и ветвей и представляется в виде ориентированных графов. В узлах обеспечиваются законы сохранения массы и энергии, на ветвях выполняется закон количества движения. Основополагающей величиной в модели гидравлической цепи является гидравлическое сопротивление. Выделены три режима течения (ламинарный, переходный и турбулентный) и выбраны три основные формулы для определения коэффициента сопротивления трения. Коэффициенты местного сопротивления элемента сети определяются эмпирическим путем или с использованием численных экспериментов.

Пространственные течения и теплообмен в «компактных» объектах описываются уравнениями Рейнольдса. Дискретизации уравнений сохранения выполнены методом контрольного объема. Так как в моделях гидродинамики оперируют разреженными матрицами, то способ хранения данных основан на представлении матрицы данных в виде графа. Для

объединения разномасштабных моделей предложена SIMPLE- подобная процедура гибридного метода. Реализовано сопряжение теплообмена между разномасштабными моделями.

Третья глава посвящена тестированию гибридного метода. Первый тест – задача о движении жидкости в трубе круглого сечения для ламинарного и турбулентного режимов течения. В качестве эталонного решения использовались результаты, полученные с помощью полностью пространственной модели. В разномасштабном варианте половину трубы заменили сетевым элементом. В ламинарном режиме векторные поля скоростей для пространственной и гибридной разномасштабной моделей практически совпали. Исследована зависимость сопротивления трения для разных режимов течения разномасштабной модели трубы. В области ламинарного режима течения рассчитанные значения коэффициента трения совпали с аналитическим решением, а в области турбулентного режима – с кривой Блазиуса.

В качестве второго теста была решена задача о ламинарном течении жидкости по разветвляющимся каналам. Сравнивались две модели: система каналов в полностью пространственной постановке и разномасштабная гибридная модель, в которой вся система (кроме одного тройника) представлена в виде сети. Получено хорошее совпадение по перепадам давления, расходам и распределениям скоростей вдоль различных сечений. Результат тестирования показал адекватность применения гибридного метода и для задач с турбулентным режимом течения. Предложенный метод в сравнении с существующими методами позволяет значительно сократить вычислительные затраты (до 8 раз).

Предложена оригинальная модель «гибридного теплообменника» для расчетов сопряженного теплообмена, основанная на формировании источников членов в уравнении сохранения энергии.

В четвертой главе приводятся примеры решения практических задач. Первый пример – задача выравнивания расходов от каждой ванны четырёх бригад (в каждой более 20 ванн). Особенностью газохода является наличие центрального сборного коллектора. Моделирование такой задачи в рамках одного из основных способов невозможно. Применялась разномасштабная модель. После процедуры определения дополнительного сопротивления регулируемых заслонок был проведен повторный расчет. В результате общее разрежение в системе выросло на 20 %. Рассмотрены два примера использования разработанного программного модуля в моделировании микроканальных теплообменников. Первый теплообменник состоит из 15 микроканалов прямоугольного сечения. Охлаждаемая поверхность имеет размеры, соответствующие размерам типичных элементов микросхем.

Такие системы могут использоваться для охлаждения процессоров ЭВМ. Были выполнены расчеты в полной пространственной постановке и в разномасштабном варианте. Результаты расчетов в различных постановках согласуются с экспериментом.

Второй микротеплообменник представляет собой блок охлаждения электронного чипа системой разветвленных микроканалов. Получено хорошее совпадение результатов расчетов по пространственной и гибридной моделях. Время расчетов в разномасштабной постановке в среднем на 40 % меньше.

В главе 5 представлена общая архитектура программного комплекса SigmaFlow, а также интеграция в него разработанного программного модуля NetFlow, предназначенного для решения задач гидродинамики и теплообмена в системах, состоящих из протяженных и «компактных» элементов.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы. В приложении 1 приводятся четыре справки об использовании результатов диссертационной работы, в приложении 2 – три свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Можно выделить следующие наиболее значимые результаты работы:

1. Предложен эффективный численный метод сопряжения сетевых и пространственных моделей в одну общую разномасштабную модель.
2. Разработана математическая модель «гибридного теплообменника» для расчетов теплового взаимодействия между сетевыми и пространственными моделями гидродинамики и теплообмена.
3. Разработан и реализован программный модуль NetFlow, предназначенный для моделирования задач гидродинамики и теплообмена в системах, состоящих из протяженных и «компактных» элементов.
4. Результаты применения разработанного программного обеспечения NetFlow в решении практических и научных задач.

Основные результаты являются новыми.

По содержанию и оформлению диссертации имеются следующие замечания:

- нечеткие выражения: «решается стационарное течение несжимаемой среды» (стр. 39), «например, реализацию модуля расчета жидкости со свободной поверхностью» (стр. 118);
- уравнения (2.21) – уравнения Рейнольдса;
- не указаны обозначения а), б) на рисунках 3.10, 4.17;
- на рис. 5.6а показаны выходы, но нет входа,
- в автореферате неправильно указан номер раздела (стр. 11).

Указанные замечания не снижают общую положительную оценку работы. Достоверность результатов, выносимых на защиту, подтверждается сравнением результатов расчетов с аналитическими решениями, с эталонными расчетами и с экспериментальными данными. Практическая значимость исследований подтверждается справками об использовании результатов диссертационной работы С.А. Филимонова и свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Положения, выносимые на защиту, новизна и практическая значимость работы отчетливо сформулированы, содержание автореферата соответствует тексту диссертации. Результаты работы хорошо представлены на семинарах и конференциях, достаточно полно отражены в публикациях.

Диссертация С.А. Филимонова представляет собой законченную научно-квалификационную работу и отвечает критериям, установленным в п. 9-11, 13-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор, Филимонов Сергей Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 - математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:

главный научный сотрудник отдела Вычислительных моделей в гидрофизике
Федерального бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»
Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук — обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (ИВМ СО РАН)

д.ф.-м.н., профессор

Вел-

В.М. Белолипецкий

31 мая 2018 г.

ФИО: Белолипецкий Виктор Михайлович

660036, г. Красноярск, Академгородок, д.50. стр. 44.

Рабочий телефон: +7 (391) 2905139. E-mail: belolip@icm.krasn.ru

д.ф.-м.н. по специальности 05.13.16 – применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях.

05.13.18 - математическое моделирование и численные методы и комплексы программ.
Подпись В.М. Белолипецкого заверяю

Ученый секретарь ИВМ СО РАН

к.ф.-м.н.



В.В.

А.В. Вяткин