

УТВЕРЖДАЮ

Директор, заведующий отделом
трубопроводных систем

энергетики № 50 ИСЭМ СО РАН,
чл. корр. РАН

Стенников Валерий Алексеевич



_____ 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации «Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук» (ИСЭМ СО РАН) на диссертационную работу Филимонова Сергея Анатольевича «Гибридный метод для совместного решения многомерных и сетевых задач гидродинамики и теплообмена», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Актуальность темы исследования

Трубопроводные и гидравлические системы (ТПГС) представлены весьма широким спектром объектов, различающихся назначением, масштабами и условиями функционирования. Они занимают важное и все возрастающее значение в энергетике, промышленности, городском хозяйстве, коммунально-бытовой сфере и многих других отраслях экономики. Эффективность решения задач их создания, развития и функционирования напрямую связана с уровнем применения методов математического и компьютерного моделирования. Одна из основных проблем, возникающих на этом пути, связана с обеспечением рационального сочетания адекватности применяемых моделей реальным характеристикам ТПГС и вычислительной эффективности методов их моделирования.

Моделирование режимов ТПГС даже небольшой (по числу элементов) размерности с помощью полномасштабной пространственной модели, в целях обеспечения наибольшей адекватности результатов расчета, может потребовать многих часов даже на суперкомпьютере. Использование быстродействующих

«сетевых» методов расчета теории гидравлических цепей, когда течение на каждом элементе сети считается одномерным, не обеспечивает требуемой точности при наличии элементов сложной конфигурации с неизвестными гидравлическими или теплофизическими характеристиками, которые в том числе могут зависеть от параметров искомого режима. В особенности эти трудности проявляются для «компактных» ТПГС, когда местные потери давления (или температуры) в отдельных узлах (или аппаратах) доминируют над линейными потерями на протяженных участках труб или каналов. Определение характеристик таких узлов экспериментальным путем на всем диапазоне возможных сочетаний режимных параметров представляет собой самостоятельную задачу высокой трудоемкости и не всегда возможно в производственных условиях.

В связи с этим актуальность диссертационной работы, направленной на интеграцию моделей одномерных и пространственных течений, а также методов теории гидравлических цепей и методов прикладной гидродинамики для расчета режимов в ТПГС сложной структуры не вызывает сомнений.

Общая характеристика работы

Основной текст диссертации состоит из введения, 5 глав и заключения, содержит 70 рисунков и 11 таблиц, изложен на 137 страницах. Стиль изложения ясный, грамотный, хотя текст диссертации и содержит отдельные опечатки.

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи и научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту положения.

В первой главе *«Обзор методов моделирования гидродинамики и теплообмена в объектах, состоящих из «компактных» и протяженных элементов»* представлен анализ современного состояния проблемы построения гибридных моделей гидродинамики в России и за рубежом. Приведен ряд примеров применения таких моделей в разных областях (медицина, водное хозяйство, энергетика). Дана краткая характеристика существующих подходов к сопряжению разномасштабных гидродинамических моделей, особенностей и недостатков этих подходов.

Вторая глава *«Описание математической модели гидродинамики и теплообмена для построения гибридного метода»* посвящена математическому описанию пространственных и одномерных моделей гидродинамики и теплообмена, используемых автором для разработки гибридной математической модели. Приведено описание разных по масштабу методов моделирования потокораспределения в гидродинамических системах, а именно:

метод контрольного объема для пространственной части модели и модифицированный автором метод узловых давлений для моделирования сетевой части модели, с последующим объединением их в общий алгоритм на базе единой системы линейных алгебраических уравнений, блок-схема которого предложена автором. На внутреннем цикле итераций в алгоритме используется возможность декомпозиции модели тепломассообмена на модели гидродинамики и теплообмена.

Третья глава *«Тестирование гибридного метода и его реализации»* посвящена тестированию предложенного гибридного метода, реализованного в виде программного модуля «NetFlow», путем сравнения результатов расчетов с эталонными решениями (при полностью пространственной модели) и результатами измерений на реальных объектах. Описание тестовых задач дается от более простых к более сложным: изотермическое ламинарное течение, изотермическое турбулентное течение, неизотермическое течение, моделирование «гибридного теплообменника», моделирование сопряженного теплообмена. В целом результаты тестирования: 1) дают удовлетворительное совпадение результатов расчетов на пространственной и гибридной моделях; 2) показывают приемлемое для практики совпадение с результатами замеров; 3) демонстрируют резкое (в разы) сокращение времени счета в случае применения гибридной модели; 4) в целом подтверждают корректность применения предложенного метода в широкой области условий задачи моделирования.

Четвертая глава *«Примеры решения практических задач»* посвящена применению предложенного автором метода для решения практических и научных задач, на примерах: системы межкорпусных газоходов алюминиевого завода; теплообмена в блоке прямых микроканалов; теплообмена при охлаждении электронного чипа с древовидной системой микроканалов. В целом результаты, изложенные в этой главе, демонстрируют: 1) дополнительное подтверждение адекватности предложенного метода на реальных объектах; 2) практическую значимость его применения для отыскания наиболее рациональных режимов работы этих объектов; 3) широкую область применения.

Пятая глава *«Архитектура программного комплекса SigmaFlow. Интеграция модуля NetFlow»*. Дается характеристика реализации предложенного автором гибридного метода в виде программного модуля NetFlow, а также – его интеграции в программный комплекс SigmaFlow для решения задач гидродинамики и теплообмена. Программный модуль NetFlow расширяет функционал SigmaFlow за счет возможности одномерного и разномасштабного моделирования гидравлических сетей при объединении

пространственных и сетевых элементов в единую (гибридную) модель. Приведены блок-схемы программного модуля и его основных составляющих.

Научная новизна

1. Предложен новый способ «разномасштабного» моделирования ТПГС путем объединения одномерных и пространственных моделей разных элементов системы в единую «гибридную» модель установившихся гидравлических и тепловых режимов.

2. Разработан новый метод численного расчета поля давлений и скоростей для такой гибридной модели с использованием единой процедуры коррекции давлений по всем элементам ТПГС.

3. Предложена оригинальная «гибридная» модель теплообменника, обеспечивающая резкое понижение размерности модели и трудоемкости расчета по сравнению с полномасштабной трехмерной моделью.

4. Предложенная «гибридная» модель теплообменника впервые применена в составе «гибридной» модели ТПГС при расчетах как гидравлического, так и теплового режимов.

Степень достоверности и обоснованности результатов и выводов

Достоверность основных результатов и выводов определяется квалифицированным использованием фундаментальных законов гидродинамики, гидравлики и тепломассообмена, всесторонним тестированием разработанных моделей и методов на условных и реальных объектах путем сравнения получаемых результатов с эталонными расчетами, аналитическими решениями и экспериментальными данными. Положительным опытом практического применения разработанных моделей, методов и программ.

Основные научные результаты докладывались на 14 всероссийских (в том числе с международным участием) семинарах и конференциях.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическое значение работы состоит в объединении возможностей сетевых методов теории гидравлических цепей для расчета потокораспределения (в отношении быстродействия) и пространственных методов моделирования процессов тепломассообмена (в отношении точности).

Практическая значимость результатов работы определяется:

1) возможностью резкого сокращения времени и трудоемкости моделирования ТПГС по сравнению с существующими CFD методами практически без потери точности получаемых результатов;

2) наличием программных реализаций («SigmaNet», «NetFlow» и «SigmaFW»), пригодных для практического применения, и имеющих свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ;

3) возможностью применения для широкого класса типов ТПГС и их представителей (систем технологического назначения, вентиляции, тепло-, водо-, газоснабжения, газоудаления, смазки механизмов, охлаждения и др.);

4) потенциальной применимостью на разных стадиях анализа и принятия решений при проектировании, эксплуатации, наладке ТПГС, а также в научных исследованиях и в учебном процессе;

5) наличием справок о практическом применении в ООО «КТМ», ООО «ТОРИНС», Институте инженерной физики и радиоэлектроники, ООО СТАРК Инжиниринг.

Соответствие паспорту научной специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и отвечает формуле специальности, как минимум, по следующим пунктам областей исследования:

П.1 – «Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений».

П.2 – «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий».

П.4 – «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»

Замечания по диссертационной работе и автореферату

1. В диссертации предложена новая «гибридная» модель ТПГС, объединяющая разнородные элементы с одномерным или пространственным описанием течений и процессов теплообмена рабочей среды. Однако в задачах исследования и результатах эта самостоятельная часть работы не выделена.

2. Отсутствует раздел специально посвященный постановке задачи. Употребляемый изначально термин «гидродинамическая модель» вводит в заблуждение, так как на самом деле рассматриваются стационарные, а не динамические режимы.

3. Одно из условий применимости предлагаемых моделей и методов – в роли расчетной схемы ТПГС выступает простой граф. Граф называется простым, если в нем нет петель и параллельных ребер. В схемах ТПГС

параллельные ребра типичный случай, а их наличие не является препятствием для проведения расчетов.

4. В формуле (2.14) автор пытался обобщить уравнения теплового баланса в узле и материального баланса для многокомпонентной среды. При этом непонятны пояснения к обозначениям «источник компоненты», «величина компоненты» и др., а также роль слагаемого s_i в случае многокомпонентной среды. Возможно, новая компонента появляется в результате химической реакции, однако об этом ничего не сказано.

5. Предлагаемый в диссертации «гибридный» метод является итерационным, однако нигде не приводится статистики по количеству итераций расчета.

6. В работе имеются убедительные примеры практического применения предложенных разработок. Однако отсутствует методика такого применения, регламентирующая этапы: подготовки информации, разработки структуры модели (какая часть сетевая, а какая пространственная), верификации модели, анализа и интерпретации результатов расчетов, способов обнаружения нарушений в режимах, разработки мероприятий по их устранению и повышению общей эффективности работы моделируемой системы.

7. К сожалению, в тексте диссертации имеются отдельные опечатки и неточности, затрудняющие ее восприятие. Обозначения некоторых параметров в разных главах пересекаются. Например, « ξ_M – коэффициент местного сопротивления» (стр. 31) и «Производная по направлению $\xi \dots$ » (стр. 43); « λ – коэффициент теплопроводности» (стр. 46) и « λ – коэффициент сопротивления трения» (стр. 60). «Через трубу протекает жидкость со следующими свойствами: плотность задана равной $\rho = 1 \text{ кг/м}^3 \dots$ » (Стр. 61). Много инженерного жаргона «источниковый член», «стыковочные ветви», «решается стационарное течение» и др. Выводы по главам отсутствуют.

Заключение

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Диссертационная работа Филимонова Сергея Анатольевича является законченной научно-квалификационной работой, обладающей внутренним единством, содержащей новое решение актуальной научной задачи – моделирования сложных гидравлических систем, содержащих в себе нестандартные элементы. Она удовлетворяет критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученых степеней (пункты 9, 10, 11, 13 и 14 раздела «II. Критерии, которым должны отвечать диссертации на соискание ученых степеней» постановления правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842).

Диссертационная работа соответствует специальности 05.13.18, поставленная цель соответствует полученным результатам, содержание автореферата и опубликованные работы соответствуют содержанию

диссертации. Научные положения, выносимые на защиту достаточно полно отражены в опубликованных работах.

Филимонов Сергей Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» за выполненную научно-квалификационную работу, в рамках которой разработан и реализован гибридный алгоритм, позволяющий эффективно моделировать сложные гидродинамические объекты, состоящие одновременно из протяженных и компактных элементов.

Доклад Филимонова Сергея Анатольевича по теме диссертации заслушан, отзыв рассмотрен и утвержден на открытом заседании отдела трубопроводных систем энергетики № 50 ИСЭМ СО РАН, протокол №1 от «28» мая 2018 г. Присутствовало 21 человек. Голосовали: «за» – 21 человек, «против» – 0 человек, «воздержались» – 0 человек.

Отзыв подготовили:

Главный научный сотрудник,
зав. лаб. трубопроводных и
гидравлических систем №51
ИСЭМ СО РАН, д.т.н.

28.05.18

Дата

Подпись

Новицкий
Николай
Николаевич

Старший научный сотрудник,
лаб. трубопроводных и
гидравлических систем №51
ИСЭМ СО РАН, к.т.н.

28.05.18

Дата

Подпись

Токарев
Вячеслав
Вадимович

Сведения об организации

«Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук» (ИСЭМ СО РАН)

Адрес: 664033, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д.130

Телефон: +7 (3952) 500-646

Факс: +7 (3952) 42-67-96

Email: info@isem.irk.ru

