

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. проректора по научной работе
Федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский авиационный
институт (национальный
исследовательский университет)»,

Д.т.н., профессор

Равикович Ю.А.



«_____» 2022 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Ткачева Василия Константиновича «Математическое моделирование процессов теплопереноса в локально равновесных и неравновесных условиях», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2.– «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Актуальность темы диссертации

Известно, что классические математические модели процессов теплопереноса в твердых телах и жидкостях основаны на уравнениях параболического типа, в которых не учитывается молекулярно – атомное строение вещества. Неучёт внутреннего строения среды связан с тем, что при выводе уравнений параболического типа принимаются допущения о локальном термодинамическом равновесии и о неразрывности (сплошности) среды. Поэтому, в классических моделях обнаруживается бесконечная скорость переноса теплоты, мгновенное изменение искомой функции и др., определяемые как парадоксы классической теории. Математические модели теплопереноса, построенные на таких уравнениях, приводят к значительным погрешностям при определении теплового состояния тела, особенно в быстропротекающих

процессах, например, в условиях теплового удара. В связи с этим, тему диссертации, посвящённой разработке новых локально – неравновесных моделей переноса теплоты, основанных на отказе от указанных выше допущений, то есть с учётом молекулярно – атомарного строения вещества, следует считать актуальной.

Научная новизна работы

1. На основе модифицированного закона теплопереноса Фурье, учитывающего скорости изменения теплового потока и градиента температуры, разработана математическая модель локально – неравновесного теплообмена в движущейся жидкости.

2. Используя модифицированную формулу закона Ньютона, учитывающую скорости и ускорения касательного напряжения и градиента одного из компонентов вектора скорости, разработана математическая модель локально – неравновесной гидродинамики в движущейся жидкости.

3. На основе определения фронта теплового и гидродинамического возмущения, разработаны математические модели динамического и теплового ламинарных и турбулентных пограничных слоёв, позволяющие находить их толщины, а также профили скоростей, температур и тепловых потоков.

4. Используя дополнительную искомую функцию и дополнительные граничные условия, получено приближенно-аналитическое решение задачи теплообмена в движущейся жидкости при зависимости вязкости от температуры

5. Используя теорию электрогидравлической аналогии, разработана математическая модель, позволяющая определять скорости, давления и расходы в движущихся жидкостях применительно к разветвлённым многокольцевым трубопроводным системам различного назначения.

Обоснование достоверности полученных результатов

Достоверность научных положений и выводов диссертации основывается на использовании при выводе определяющих дифференциальных уравнений моделей классических законов сохранения (теплового и массового балансов, равновесия движения), а также модифицированных формул эмпирических законов Фурье и Ньютона. Достоверность подтверждается также сравнением полученных в диссертации результатов с известными точными аналитическими решениями с решениями других авторов, а также с результатами экспериментальных исследований.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в определении новых неизвестных особенностей протекания процессов теплопереноса и гидродинамики, не описываемых классическими моделями. В частности, показана невозможность мгновенного установления граничного условия первого рода. Следовательно, величина коэффициентов теплоотдачи ограничена некоторым верхним пределом, зависящим от физических свойств тела, который невозможно превысить ни при каких условиях теплообмена с окружающей средой. Показано, что при исследовании нанообъектов в кристаллах наблюдается баллистический перенос теплоты, свидетельствующий о зависимости свойств среды от размеров объекта (в области наноразмерных величин). Применительно к гидродинамике показан пульсирующий характер изменения скорости движущейся жидкости, что подтверждается многочисленными экспериментальными исследованиями.

Практическая значимость состоит в том, что разработанные в диссертации теоретические методы использованы при построении компьютерных моделей теплосетей гг. Саратова и Тольятти, позволяющих выполнять оценку их текущего состояния, а также проектировать новые участки теплосетей.

Структура и объем работы

Диссертация включает 5 глав, выводы, список литературы (135 наименований), приложения; изложена на 152 страницах основного текста, содержит 60 рисунков.

Во введении обоснована актуальность избранной темы, даётся цель работы и задачи исследований, приводится оценка новизны, достоверности и практической ценности, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации представлен обзор работ по тематике диссертации, в котором отмечены имеющиеся проблемы в данном направлении исследований и отмечены возможные пути их преодоления. И, в частности, показано, что, несмотря на наличие большого числа теорий, отсутствует единая, непротиворечивая теория локально – неравновесных процессов.

Во второй главе диссертации приводятся результаты получения точного и приближенно-аналитического решения двумерной стационарной задачи теплопроводности в прямоугольном сечении для бесконечного бруса с источником теплоты. Для задачи с постоянными физическими свойствами и источником теплоты получено аналитическое решение в форме ряда по базисным функциям. Показано, что метод получения приближенно-аналитического

решения, основанный на определении дополнительной искомой функции и дополнительных граничных условий, позволяет получать решения краевых задач с переменными по координатам физическими свойствами среды и внутренними источниками теплоты.

В третьей главе диссертации приводятся результаты решения задачи гидродинамики, по определению профиля скорости при одномерном нестационарном течении жидкости в канале с учётом зависимости вязкости от поперечной координаты. Для получения приближенного аналитического решения используются дополнительные граничные условия и дополнительная искомая функция, что позволяет свести исходное уравнение в частных производных к обыкновенному дифференциальному уравнению относительно дополнительной искомой функций. Такой подход позволяет существенно упростить как процесс получения решения, так и окончательное выражение для него, применительно к нелинейным краевым задачам. Аналогичный метод был применён и к решению краевой задачи теплопроводности с переменными по координате физическими свойствами среды, также рассмотренной в третьей главе.

В четвёртой главе диссертации приводятся результаты анализа аналитического решения краевых задач динамического и теплового (ламинарного и турбулентного) пограничных слоёв. Решения основаны на определении фронтов динамического и теплового возмущения и дополнительных граничных условий, которые задаются на соответствующих фронтах. Физический смысл дополнительных граничных условий состоит в том, что их выполнение искомым решением эквивалентно выполнению на фронте возмущения исходного уравнения краевой задачи. Практическая ценность таких решений в том, что на их основе в диссертации получено критериальное уравнение, позволяющее определять коэффициенты теплоотдачи в широком диапазоне числа Рейнольдса.

В той же главе представлены также результаты разработки математической модели локально – неравновесного теплообмена в движущейся жидкости с учётом двухфазного запаздывания в формуле закона Фурье для теплового потока. Анализ численных исследований полученной модели позволил заключить о невозможности мгновенного установления граничного условия первого рода – его принятие ограничено некоторым временным участком. Кроме того, показано, что при больших значениях безразмерного коэффициента релаксации наблюдается баллистический перенос теплоты, при котором температурные кривые в пределах толщины канала превращаются в изотермы. Отметим,

что большие значения коэффициента релаксации при прочих равных условиях наблюдаются при малой ширине плоского канала.

Метод двухфазного запаздывания в формуле закона Ньютона для касательного напряжения был также использован и для построения локально - неравновесной модели, описывающей распределение скорости в движущейся жидкости, в которой определяющим уравнением является модифицированное уравнение Навье – Стокса.

В пятой главе диссертации приводятся основные положения, связанные с разработкой компьютерных моделей разветвлённых многокольцевых трубопроводных сетей различного назначения. В их основу положена электрогидравлическая аналогия, базирующаяся на двух законах Кирхгофа, используемых при расчётах электрических сетей. Важной проблемой, связанной с построением компьютерных моделей, является их идентификация, заключающаяся в максимальном приближении компьютерной модели к реальной гидравлической сети по сопротивлению оказываемому процессу переноса жидкости. Для её выполнения используются экспериментальные данные по расходам и давлениям реальной сети. Используя эти данные, подбираются такие гидравлические сопротивления элементов сети (трубы, насосы, задвижки и проч.), чтобы результаты, полученные на модели, совпадали с экспериментальными данными. Процесс идентификации представляет сложный и трудоемкий итеративный процесс, который в диссертации автоматизирован посредством создания соответствующих компьютерных программ.

В заключении сформулированы основные выводы, свидетельствующие об успешном решении поставленных задач для достижения цели работы.

Рекомендации по использованию диссертации

Результаты работы могут быть использованы в проектных организациях и конструкторских бюро, связанных с разработкой и проектированием промышленного оборудования, в машиностроении, авиационной и космической технике.

Результаты диссертации рекомендуется использовать в следующих организациях:

1. Самарский государственный технический университет (г. Самара);
2. Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (г. Самара);
3. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) МАИ (г. Москва);
4. Московский технологический университет (г. Москва);

5. Ульяновский государственный технический университет (г. Ульяновск);
6. Казанский научный центр РАН (г. Казань);
7. Уфимский государственный авиационный технический университет (г. Уфа);
8. Ракетно – космический центр «Прогресс».

Замечания по диссертации

1. Уравнения динамического и теплового пограничных слоёв записаны не полностью, так как не учитывается уравнение неразрывности, вертикальная компонента вектора скорости и производная давления вдоль канала. В работе всюду принят постоянный перепад давления, что может вызвать погрешность.

2. Что означает термин дополнительные функции для одного уравнения с одной искомой функцией? Для какого дополнительного уравнения они строятся? Это относится и к дополнительным граничным условиям, что они означают физически?

3. Необходимо объяснить термин локально-неравновесный. Неравновесие между чем и чем? Локальное неравновесие по времени или по пространственной переменной?

Публикации и соответствие содержания диссертации и автореферата

Работа прошла достаточную апробацию – по теме диссертации опубликовано 24 печатные работы, из которых 5 статей опубликованы в зарубежных журналах, индексируемых в системе Web of Science, 2 – в журналах, состоящих в системе Scopus, 6 статей из перечня ВАК, зарегистрированы 2 программы для ЭВМ.

Основные результаты работы докладывались на десяти российских и международных конференциях.

Автореферат полностью отражает основные положения и результаты диссертации.

Работа написана понятным научно – техническим языком, содержит большой объём теоретических исследований, подтверждённых графической информацией. Автор продемонстрировал владение математическим аппаратом, навыки программирования прикладных технических задач, способность анализировать сложные аналитические уравнения и результаты исследований.

Заключение по диссертации

Диссертационная работа Ткачева Василия Константиновича на тему: «Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в локально равновесных и неравновесных условиях» представляет законченное научное исследование, соответствующее специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». В целом по актуальности, научной новизне, объёму материалов, научной ценности теоретических и экспериментальных исследований, а также практическому значению полученных результатов, выполненная работа отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Ткачёв Василий Константинович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Отзыв утверждён на расширенном заседании кафедры «Вычислительная математика и программирование» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) протокол № 11 от «05» марта 2022 года.

Заведующий кафедрой «Вычислительная математика и программирование», кандидат физико-математических наук, доцент



Крылов
Сергей
Сергеевич

Отзыв составлен:

Заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры «Вычислительная математика и программирование», доктор физико – математических наук, профессор



Формалёв
Владимир
Фёдорович

Докторская диссертация защищена в 1990 году по специальности 05.13.16 – Применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях.

Профессор кафедры «Вычислительная математика и программирование», доктор физико-математических наук, доцент



Колесник
Сергей
Александрович

Докторская диссертация защищена в 2016 году по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Адрес: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4. Тел. 8 (499) 158-43-33.

Официальный сайт: <https://mai.ru/>. Эл. почта: mai@mai.ru.