

Председателю
диссертационного совета Д 212.125.04,
д.ф.-м.н., доценту А.В. Наумову

125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,
Волоколамское шоссе, д.4



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «УГУ нефти и газа (НИУ)
имени И.М. Губкина», д.т.н., профессор

Мурадов А.В.

« 4 » мая 2017 г.

ОТЗЫВ

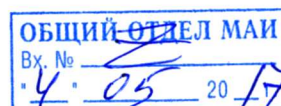
ведущей организации на диссертационную работу
Гарибьяна Бориса Александровича

«Математическое моделирование теплофизического эксперимента на основе численных методов расщепления и идентификации», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Диссертационная работа Гарибьяна Б.А. посвящена разработке математических моделей, приближенных методов и соответствующих алгоритмов моделирования теплофизического эксперимента. Эксперимент проводится нестационарным методом мгновенного нагрева источника цилиндрической формы и ставит целью идентифицировать характеристики теплопереноса твердых материалов при минимальном числе опытов. В работе также разрабатываются приближенные методы теоретического прогнозирования эффективных характеристик проводимости твердых материалов, основанные на методе элементарной ячейки теории обобщенной проводимости.

Актуальность темы

Исследование теплофизических и в частности переносных свойств веществ и материалов была и остается одной из важнейших задач теплофизики. Современные направления исследований в данной области связаны с одной стороны с повышением производительности и снижением стоимости физического метода измерений и обработки экспериментальных данных, а с другой стороны – с проведением комплексных исследований и привлечением методов теоретического прогнозирования. Применение более сложных математических моделей в качестве физической основы экспериментального метода и их численная реализация зачастую позволяют не только снизить стоимость экспериментальных исследований за счет компьютерного моделирования и сведения количества физических опытов к минимуму, но также повысить их точность. Применение теоретических методов необходимо для предварительного прогноза теплофизических характеристик, в первую очередь, новых материалов, которые находятся на стадии проектирования или синтеза. Упомянутые



аспекты отражены в диссертационной работе Гарибяна Б.А., поэтому выбранная соискателем тема исследования, безусловно, является актуальной и представляет проблемную прикладную задачу.

Цель и задачи

Целью работы является разработка физико-математических моделей, приближенных методов, алгоритмов и соответствующего комплекса программ варианта интегрированной технологии автоматизации эксперимента, проводимого методом мгновенного нагрева линейного источника теплоты, и развитие метода элементарной ячейки для идентификации и прогнозирования проводящих свойств твердых неоднородных материалов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи.

1) Разработать математические модели, численные методы и соответствующие алгоритмы решения прямых и обратных коэффициентных задач теплопереноса в областях с разрывами теплофизических характеристик, и применить их для идентификации коэффициента теплопроводности твердых материалов в эксперименте, проводимом методом мгновенного нагрева линейного источника теплоты.

2) Разработать математические модели, приближенно-аналитические, численные методы и алгоритмы теоретического прогнозирования переносных характеристик твердых неоднородных материалов на основе интеграла энергии.

3) Сформировать алгоритмическое и программное обеспечение в виде комплекса прикладных программ для моделирования теплопереноса и решения перечисленных выше задач идентификации и прогнозирования.

Структура и содержание

Диссертация изложена на 169 страницах, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 184 наименований, содержит 72 рисунка и 11 таблиц.

Во введении проведен обзор работ по теме исследования, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, обоснованы актуальность, научная новизна и практическая ценность работы, представлены положения, выносимые диссертантом на защиту.

В первой главе автор описал математические модели теплопереноса, основанные на дифференциальном уравнении теплопроводности параболического типа, виды тепловых режимов и их характеристики, привел классификацию экспериментальных методов исследования теплофизических характеристик веществ и материалов. Описаны методика и техника экспериментальных исследований, проводимых методом мгновенного нагрева линейного источника теплоты (МНЛИТ), известного также в литературе как метод нагретой нити. Дана физическая постановка задачи об идентификации тепловых характеристик твердых материалов с использованием метода МНЛИТ, оговорены все имеющиеся допущения и предположения. Приведены две упрощенные математические модели, лежащие в основе экспериментального метода и имеющие аналитические решения: задача о бесконечно тонком источнике, лежащем на поверхности раздела двух сред и задача о цилиндрическом источнике, окруженном концентрическими слоями двух сред. Анализируя данные идеализации и имея фактические экспериментальные данные, показывающие трудности применения метода МНЛИТ к твердым и особенно жестким материалам (вызванных перегревом источника за счет наличия в тепловой системе контактного сопротивления), автор обосновывает целесообразность разработки более

сложной математической модели теплового процесса, учитывающей фактор контактного сопротивления. Однако соответствующая система уравнений может быть разрешена только приближенно.

Во второй главе приведены математические модели влияющих факторов теплообмена в физически реальной тепловой системе метода МНЛИТ, среди которых обстоятельно рассматривается модель теплового процесса в системе «источник-образец-подложка». Для последней методом теплового баланса построена разностная схема, которая реализована экономичным методом переменных направлений с экстраполяцией по времени (МПНЭ). Описаны особенности реализации краевых условий, фигурирующих в математической постановке задачи теплопроводности. Условия сопряжения (4-го рода) из-за разрывов теплофизических и геометрических характеристик контактирующих сред, а также криволинейных границ контакта, представляют наибольшую сложность в реализации. Поэтому автор разработал модификацию конечно-разностной схемы метода, позволившую проходить границы сопряжения, сохраняя порядок аппроксимации на точном решении таким же, как в регулярном узле. Численным моделированием теплового процесса на функциональной координатной сетке получены распределения тепловых полей для различных рабочих параметров системы, по предложенному критерию оценен вклад главного влияющего на нагрев источника фактора – контактного сопротивления, выявлена связь параметров тепловой системы с попыткой уменьшить контактное сопротивление.

Поставлена задача об идентификации теплопроводности твердого образца сравнением результатов численного моделирования теплового процесса и реального лабораторного эксперимента. Данная задача идентификации решается численно в двух вариантах: восстановлением асимптоты регулярного режима и как коэффициентная обратная задача. В первом варианте автор использовал инструментарий регрессионного анализа, а во втором для решения соответствующей оптимизационной задачи предложил применить метаэвристический метод имитации отжига, который соответствующим образом модифицировал и настроил под задачу. В обоих вариантах решены задачи как с данными экспериментов на эталонных образцах, так и методические задачи, оценены погрешности оценивания. Указаны преимущества и недостатки предлагаемых методов.

В третьей главе на основе характеристики стационарного температурного поля – интеграла энергии автор разработал приближенно-аналитический и численный методы расчета эффективных характеристик переноса в гетерогенных средах, представляющих механические смеси. Используется метод элементарной ячейки теории обобщенной проводимости. Сформулированы основная задача проводимости, свойства эффективных проводимостей для бинарных неоднородных материалов, классифицированы типы их структур, описаны существующие методы и подходы к моделированию структур неоднородных материалов и процессов переноса в них. Далее описывается предлагаемый автором приближенно-аналитический метод решения основной задачи обобщенной проводимости на основе интеграла энергии, используемого для осреднения температурных полей в рамках элементарной ячейки и позволяет замкнуть систему уравнений проводимости. Обилие формул относительных эффективных коэффициентов теплопроводности объясняется тем, что геометрическая структура представительного элемента выделяется известными сечениями Рэлея – изотермическими и адиабатическими, которые выбираются исходя из феноменологических предположений о наиболее адекватной линейаризации температурных полей в рамках элементарной ячейки. Полученные соискателем (по предлагаемому им методу) приближенно-аналитические формулы эффективных коэффициентов теплопроводности бинарных материалов сопоставляются с формулами других авторов, а также с численными зависимостями, методику получения которых автор работы описывает в следующем разделе главы.

Предлагается математическая модель теплопереноса в рамках элементарной ячейки неоднородного материала. Общая методика численного расчета эффективного коэффициента теплопроводности состоит из двух этапов. На первом этапе численно, экономичным методом дробных шагов (МДШ), счетом на установление, решается соответствующая модели 3-мерная начально-краевая задача теплопроводности. На втором этапе, при достижении в рамках ячейки квазистационарного теплового режима, по предлагаемой автором формуле вычисляется эффективный коэффициент теплопроводности данной ячейки. Описаны метод и алгоритм вычислений, особенности реализации условий однозначности предлагаемой модели теплопереноса. Далее были проведены расчеты ЭКТ абстрактных ЭЯ со структурами разного типа, различными теплопроводностями и объемными концентрациями компонентов. Проанализированы результаты численного моделирования теплопереноса в рамках ячейки, исследована сходимость (по сгущению координатной и временной сеток, по значению уровня выхода на стационарный режим) численных зависимостей относительного эффективного коэффициента теплопроводности к точному решению. В качестве примеров приведены упрощенные расчеты коэффициента теплопроводности ряда твердых материалов в зависимости от различных плотностей концентрации или/и плотностей составляющих компонентов. Результаты расчетов верифицированы с известными справочными данными и хорошо с ними согласуются.

В четвертой главе автором описан разработанный комплекс программ оценивания и прогнозирования эффективного коэффициента теплопроводности твердых материалов. Приведена структурная схема комплекса программ, показан состав модулей и их взаимодействие в составе комплекса. Комплекс включает три вычислительных модуля, два из которых представляют базовые алгоритмы вычислений, соответствующие главам 2, 3 работы, а третий – комбинированные, позволяющие последовательно задействовать первые два модуля. Дано описание функциональных особенностей программных модулей, приведены алгоритмы решаемых задач, в том числе основной задачи проводимости для многокомпонентных материалов. Описан также интерфейс взаимодействия пользователя с программным комплексом.

В заключении сформулированы основные итоги диссертационного исследования.

Научная новизна и основные результаты

В работе получены важные новые результаты. Во-первых, предложена математическая модель теплопереноса в системе «источник - твердый образец - подложка» физического метода мгновенного нагрева линейного источника теплоты (МНЛИТ), где система представляется областями с разрывами 1-го рода теплофизических характеристик. Предложена и обоснована по аппроксимации и устойчивости модификация метода переменных направлений численного решения соответствующей задачи теплопроводности. Численное моделирование позволило провести оценку влияния на процесс переноса контактного сопротивления, а адаптированный под задачу метод имитации отжига – идентифицировать коэффициент теплопроводности твердого образца. Предлагаемая автором технология автоматизации экспериментальных исследований переносных свойств твердых материалов методом МНЛИТ выигрывает по точности перед традиционной моделью эксперимента, основанной на аналитическом решении упрощенной задачи теплопроводности. Во-вторых, в работе для решения основной задачи проводимости неоднородных материалов предлагается применять интеграл энергии. Сформированы алгоритм получения приближенно-аналитических формул проводимости в элементарной ячейке бинарного материала, где с помощью интеграла энергии замыкается основная система уравнений проводимости. Предложена математическая модель

теплопереноса в элементарной ячейке, также позволяющая вычислять ее проводимость, но лишенная ряда ограничений, свойственных приближенно-аналитическому подходу, который основан на моделировании геометрии представительного элемента сечениями Рэлея. В-третьих, сформирован комплекс прикладных программ, реализующий алгоритмы вышеуказанных моделей переноса, с помощью которого получены важные прикладные результаты по прогнозированию и идентификации коэффициентов теплопроводности твердых неоднородных материалов.

Полученные в работе основные результаты достоверны. Это подтверждается их верификацией с экспериментальными данными и известными в литературе зависимостями, а также рассмотрением достаточного количества примеров, в которых решаются методические задачи как численного моделирования, так и физических экспериментов с эталонными образцами.

Практическое значение

Полученные в работе результаты имеют выраженную прикладную направленность. Предлагаемый автором интегрированный подход (численное моделирование + лабораторный эксперимент + идентификация) в физическом методе мгновенного нагрева линейного источника теплоты применительно к твердым образцам служат необходимой основой для создания нового лабораторного стенда метода при сохранении его аппаратно-элементной базы. Сформированные методы прогнозирования эффективных переносных свойств неоднородных материалов с помощью интеграла энергии позволяют просто описывать геометрию их представительных элементов, получать соответствующие приближенно-аналитические и численные зависимости, рассчитывать времена установления. Разработанное алгоритмическое и программное обеспечение представляет компьютерную реализацию перечисленных выше прикладных задач: моделирования эксперимента, решения задачи параметрической идентификации модели, а также прогноза эффективных переносных характеристик неоднородных материалов.

Публикации по теме и личный вклад

Результаты работы опубликованы в шести статьях в рекомендованных ВАК РФ списке периодических изданий. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Исследования, результаты которых нашли отражение в представленной работе, проведены диссертантом лично в процессе изысканий. Из совместных публикаций в работе изложен материал, принадлежащий ее автору.

Замечания

По диссертации и автореферату имеются следующие замечания и вопросы.

1. В формулах (1.8), (1.9) диссертации и в формуле (1) автореферата обнаружена неверная запись порядков малости слагаемых: вместо O -большого следует писать o -малое. В противном случае, эти формулы не имеют того физического смысла, который автор в них вкладывает.
2. Во всей работе (и автореферате) при записи конечно-разностных схем, порядок их аппроксимации было бы корректнее приводить в правой части равенства, а разностный

аналог дифференциального уравнения теплопроводности – в левой части. Представление конечно-разностных схем в виде 3-диагональных СЛАУ, решаемых методом прогонки, вообще не должно содержать информацию о порядке аппроксимации.

Замечания 1 и 2 демонстрируют, что соискатель недостаточно владеет понятиями асимптотического сравнения порядка функций O -большое и o -малое.

3. В главе 2 приведена модель нестационарного нагрева источника цилиндрической формы, которая не учитывает явление термодепрессии. Остается непонятным, насколько адекватна предлагаемая модель.
4. В работе, как для решения задачи из главы 2, так и для задачи главы 3 не обоснован выбор в пользу метода конечных разностей. Возможно, метод конечных элементов (МКЭ) или метод конечных объемов (МКО) оказались бы более подходящими вариантами численной реализации моделей теплопереноса.
5. Теорема 2.1 сформулирована нечетко, т.е. в её тексте нет деления на условие теоремы и её доказательство.
6. В теореме 2.2 диссертации (и автореферата) говорится об абсолютной устойчивости разностной схемы «по входным данным и по правым частям». Слова «по правым частям» писать не следует, поскольку входные данные определяются как граничные и начальные условия, а также правые части. В доказательстве теоремы 2.2 обращение к работе [71] требует уточнения; неясно, какую из доказанных в книге теорем диссертант имел в виду, непонятна их применимость в данном случае. Это ставит под сомнение доказательство устойчивости разностной схемы.
7. В автореферате (в отличие от диссертации) не указан точный вид приближенно-аналитических зависимостей относительных эффективных теплопроводностей, приводимых для верификации полученных автором результатов, что затрудняет восприятие этих результатов.
8. Формула (14) автореферата содержит уточняющий параметр b , но в идентичной формуле (3.14) диссертации этот параметр отсутствует. В автореферате имеются неверные ссылки на формулы, например, ссылка на формулу (14) на странице 16 во втором абзаце.
9. В тексте диссертации имеется несколько несоответствий ссылок списку цитируемых источников, а в самом списке присутствуют источники, на которые автор ни разу не ссылается, например, [68], [70], [113], [122].

Известная монография О.М. Алифанова [1] приведена в списке дважды, причем второй раз в виде англоязычной версии [165].

В списке источников отсутствует следующая монография, являющаяся, на наш взгляд, ключевой работой по построению и исследованию разностных схем экономичных численных методов группы расщепления, используемых в диссертации: Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Аддитивные схемы для задач математической физики. – М.: Наука, 2001. – 319 с.

Наконец, список источников содержит недостаточно работ, посвященных осреднению тепловых полей в композиционных материалах (например, монография Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах. – М., Наука, 1984. – 352 с.).

Заключение

Представленная диссертация соискателя Гарибяна Б.А. является законченной научно-квалификационной работой. Автореферат диссертации в достаточной степени отражает содержание и суть исследования.

При рассмотрении работы было высказано мнение (д.т.н., проф. М.Г. Сухарев), что замечания 1, 2 не позволяют дать положительной оценки диссертации, и в текст работы необходимо внести исправления. Однако большинство членов кафедры согласилось с положительной оценкой работы: диссертация Гарибяна Бориса Александровича на тему «Математическое моделирование теплофизического эксперимента на основе численных методов расщепления и идентификации» удовлетворяет паспорту заявленной специальности, требованиям ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, предъявляемым на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а автор диссертации – Гарибян Борис Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Диссертационная работа Гарибяна Б.А. обсуждалась 20.04.17 на научном семинаре кафедры «Прикладной математики и компьютерного моделирования» факультета «Автоматики и вычислительной техники» ФГБОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» 20 апреля 2017 года, протокол № 3.

Заведующая кафедрой
«Прикладной математики и
компьютерного моделирования»
д.т.н., профессор



Р.Д. Каневская

К.т.н., доцент



Т.М. Жукова

К.т.н., доцент



С.С. Арсеньев-Образцов

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина»

119991, Москва, Ленинский проспект, д. 65, к. 1.

Телефон: +7(499) 507-8888,

E-mail: com@gubkin.ru

Веб-сайт: <http://www.gubkin.ru>

