

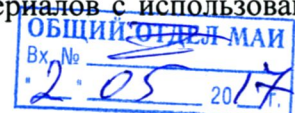
ОТЗЫВ

официального оппонента доцента Благодравова Л.А. на диссертацию Гарибьяна Бориса Александровича «Математическое моделирование теплофизического эксперимента на основе численных методов расщепления и идентификации» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертационная работа Гарибьяна Бориса Александровича посвящена анализу экспериментальных и теоретических способов определения теплофизических свойств твердых материалов. Работа состоит из двух частей, одна из которых содержит детальный анализ условий измерения теплопроводности материалов с помощью хорошо зарекомендовавшего себя метода мгновенного нагрева линейного источника теплоты. Целью анализа было создание технологии автоматизации эксперимента для оценивания эффективного коэффициента теплопроводности. Вторая часть работы посвящена разработке приближенно-аналитических, а также численных методов прогнозирования эффективных коэффициентов теплопроводности (ЭКТ) твердых неоднородных материалов. То-есть первая часть работы посвящена усовершенствованию конкретного метода прецизионных измерений ЭКТ. Вторая часть работы направлена на создание эффективных способов расчета ЭКТ неоднородных, в частности, композитных материалов. Актуальность работы не вызывает сомнений, поскольку точные данные о теплофизических свойствах авиационных материалов всегда востребованы. Нужно отметить, что программно-математическое сопровождение стало неотъемлемой частью современного эксперимента. Математическая обработка данных эксперимента часто происходит в процессе выполнения эксперимента или, как принято, в онлайн-режиме.

Вводная часть диссертации включает в себя весьма обширный и подробный литературный обзор работ, которые автор диссертации привлекает для анализа современного состояния вопросов, поднимаемых им в связи с формулируемой задачей: математическое моделирование процессов в контактных зондовых методах измерения теплофизических параметров твердых материалов, а также теоретические методы прогнозирования теплопроводности на основе теории обобщенной проводимости. Работа автора представляет развитие идей и подходов, предложенных ранее профессорами Г.Г.Спириным и В.Ф.Формалёвым.

Первая глава диссертации посвящена анализу особенностей реализации контактного зондового метода определения теплопроводности твердых материалов с использованием



импульсного нагрева исследуемого образца. Здесь сразу следует отметить основную особенность такого рода экспериментов, которая заключается в отсутствии возможности обеспечить идеальный термический контакт между нагревателем (проволочным зондом) и образцом. Подобная проблема отсутствует в экспериментах с жидкими образцами. Наличие даже плотно прижатой мягкой подложки не обеспечивает беспрепятственной передачи тепла образцу. Автор анализирует и другие факторы, влияющие на точность измерений. В частности, влияние собственной теплоемкости зонда на определяемые значения теплопроводности образца, а также вклад в тепловой баланс радиационной составляющей.

К сожалению, автор не учитывает влияние теплового расширения зонда на результаты измерения. Анализируя неблагоприятные факторы, влияющие на точность измерений, автор приходит к необходимости создания модели более сложной, но в большей степени соответствующей реальным условиям эксперимента. Проанализированы известные 2-мерные математические модели, отвечающие данной физической постановке и имеющие аналитическое решение: 1) задача о бесконечно тонком источнике, расположенном на поверхности раздела двух полуограниченных сред; 2) задача о цилиндрическом источнике, заключенном в концентрических слоях двух сред. Выдвинута идея о разработке математической модели теплового процесса, позволяющей учесть влияние контактного термического сопротивления (КТС), возникающего из-за наличия зазоров между средами источника, твердого образца и упруго-деформируемой подложки, а также шероховатостей последних. Описаны и классифицированы погрешности измерений и вычислений, отмечено, что неучет моделями фактора КТС при измерении теплофизических свойств твердых образцов, является источником методических погрешностей.

Вторая глава диссертации посвящена разработке модели, в которой учитываются все перечисленные в первой главе неблагоприятные факторы, влияющие на реальный теплообмен. Поставлена задача идентификации коэффициента теплопроводности в методе мгновенного источника. Сформулирована математическая модель теплового процесса, протекающего при реализации метода мгновенного нагрева линейного источника. Подробно изложена разработка разностной схемы, метод и алгоритм вычислений. Особое внимание автор уделил моделированию фактора контактного термического сопротивления. В задаче же идентификации коэффициента теплопроводности можно выделить два подхода. Первый подход представляет собой восстановление асимптотического поведения временной зависимости приращения средней температуры источника теплоты по известной сетке, отражающей эволюцию температурного поля. Асимптота в логарифмическом масштабе аппроксимируется линейной функцией. Из углового коэффициента асимптоты

рассчитывается теплопроводность образца при известном значении теплопроводности подложки.

Второй подход представляет собой решение обратной задачи о нахождении такого коэффициента теплопроводности, который при известных прочих параметрах модели, может привести к время-температурной сеточной зависимости, близкой к время-температурной сеточной зависимости, известной из эксперимента. Оценивание решения происходит через сравнение модельной сеточной зависимости с экспериментальной с последующей коррекцией текущего решения, т.е. с применением итерационной процедуры. В завершение главы автор сравнивает оба подхода. Результаты идентификации коэффициентов теплопроводности нескольких твердых материалов, полученные по предлагаемым методам, при начальной температуре эксперимента равной 300 К, согласовывались с эталонными значениями исследуемых образцов. Погрешности восстановленных значений теплопроводности для первого метода составляли $4\div 6\%$, что сопоставимо с погрешностью, которую дают измерения по стандартной методике физического метода мгновенного линейного источника тепла, а для второго метода – $1\div 3\%$, то есть значительно меньше. Второй метод, однако, существенно проигрывает первому по вычислительно-временным затратам. Заканчивая рассмотрение второй главы диссертации, следует отметить важное обстоятельство, состоящее в том, что без изменения аппаратно-элементной базы физического метода измерений, используя численное моделирование, можно давать более точные оценки требуемых параметров. При этом количество самих экспериментов можно свести к минимуму.

Третья глава диссертации посвящена разработке приближенно-аналитических и численных методов теоретического расчета коэффициента теплопроводности твердых неоднородных материалов методом элементарной ячейки на основе интеграла энергии. Приведена постановка основной задачи теории обобщенной проводимости. Предложена классификация бинарных неоднородных материалов (БНМ) по основаниям типов их структур. Автором отмечено свойство обращения относительного эффективного коэффициента теплопроводности (формула (3.1)), заключающееся в том, что формула остается инвариантной, если поменять местами компоненты при сохранении значений их теплопроводности и концентраций. Предложена оригинальная классификация типов бинарных неоднородных структур. В рамках этой классификации выделено четыре основных класса: слоистые, пронизывающие, изолированные, взаимопроникающие. В дальнейшем автор использует геометрические модели структур этих классов.

Описана методика решения задачи теории обобщенной проводимости для БНМ, в которой замыкание основной системы уравнений происходит через усреднение тепловых потоков в элементарной ячейке с помощью интеграла энергии. Дан соответствующий алгоритм. Далее приведен ряд утверждений о свойствах усреднений, описаны и обоснованы два принципа получения формул относительных ЭКТ для элементарных ячеек, имеющих структуру сложной геометрии. Предложенный алгоритм применен для получения приближенно-аналитических формул ЭКТ БНМ с элементарными ячейками различной геометрии: изотропные изолированные включения, пронизывающие компоненты, взаимопроницающие компоненты, плоско-волоконистый тип, зернистые и связанные структуры. Полученные новые формулы проанализированы и верифицированы с соответствующими данному классу структур зависимостями, известными из литературы. В качестве иллюстраций приведены графики относительных ЭКТ от объемной концентрации менее проводящего компонента. Предложена методика численного восстановления ЭКТ бинарных сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии.

Сформулирована трехмерная начально-краевая задача теплопроводности с граничными условиями 4-го рода, описывающая теплоперенос в рамках элементарной ячейки неоднородного материала. Описана методика, предложен оригинальный алгоритм применения интеграла энергии (стр. 132), позволяющий по распределению квазистационарного температурного поля в элементарной ячейке, полученному численным моделированием теплопереноса, рассчитать ее ЭКТ. Методом теплового баланса разработана консервативная разностная схема, которую предложено реализовать численно экономичным методом мелких шагов. Подробно описаны метод и алгоритм вычислений, а также особенности численной реализации условий сопряжения. Результаты вычисления относительных ЭКТ для абстрактных элементарных ячеек со структурами различного типа показаны на графиках вместе с зависимостями, полученными приближенно-аналитическим методом. Благоприятное впечатление оставляет обстоятельство проведения исследования сходимости приближенного решения к точному в трех вариантах: 1) сгущение координатной сетки; 2) сгущение временной сетки; 3) изменение порогового уровня выхода решения на стационарный тепловой режим. Рассмотрены примеры упрощенного расчета коэффициента теплопроводности некоторых материалов: наполненных клеев, пены – полиуретанов, углепластиков, парафиновой засыпки, а также бинарных металлических сплавов с ограниченной растворимостью компонентов на примере двойной системы Al-Mg при температурах 20...100...200°C. Во всех случаях расчетные значения были верифицированы со справочными данными и удовлетворительно им соответствовали. Видно, что автор диссертации владеет многими приемами современной прикладной математики. Он добросовестно

ссылается на многочисленные работы, поспособствовавшие корректной формулировке задач, получении приближенно-аналитических решений и созданию численных моделей. Число цитируемых работ немного не достаёт до двухсот.

Четвертая глава представляет собой описание программно-алгоритмического комплекса, включающего в себя решение теплофизической задачи с использованием линейного источника тепла, определения эффективного коэффициента теплопроводности неоднородных материалов различной геометрии внутренней структуры. В описании рассмотрено назначение комплекса, взаимодействие программных модулей, их методический, алгоритмический состав и решаемые задачи, а также интерфейс взаимодействия с пользователем. Объем программного кода составляет около 20 тысяч строк.

По работе следует сделать несколько замечаний.

– Подробно анализируя особенности метода линейного источника, представляющего собой тонкую проводящую нить, автор не упоминает о других экспериментальных методах. Известны работы, в которых используются в качестве зонда тонкие металлические пленки, нанесенные способом напыления на поверхность твердых диэлектрических образцов. Такой способ зондирования как будто в меньшей степени зависит от качества термического контакта. Автор в диссертации не упоминает об этих работах, и ему следовало бы объяснить предпочтительность использования тонких проволочных зондов перед альтернативными вариантами. Правда, это увеличило бы объем диссертации, который и так довольно большой.

– Возможно, часть материала имело смысл перенести в приложения. Есть небольшое замечание по оформлению работы.


– Довольно часто автору приходится приводить конкретные данные с указанием размерности величин. При этом ему не каждый раз удается избежать ошибок при указании размерности удельного сопротивления и теплопроводности. Буквально на одной странице приведены величины с указанием в одном случае правильной размерности, в другом случае – неправильной. Например, размерность удельного сопротивления приводится в виде отношения ом, деленный метр, в то время как должно быть ом, умноженный на метр. В другом месте размерность той же величины указана правильно.

- В разделе 3.2, при формальной записи порядка следования дихотомических сечений в ячейке адиабатическими поверхностями и изотермическими плоскостями,

автор применяет неудобную линейную систему обозначений в виде последовательности букв "а", "и" соответственно. В ряде случаев по этим последовательностям невозможно восстановить используемые схемы сечений.

Сделанные замечания не снижают достоинств работы. Рассматривая работу в целом, следует сказать, что диссертация представляет законченное глубокое исследование, в котором содержится решение актуальной научной задачи, позволяющей сформулировать важные рекомендации по планированию и оптимальному выбору условий эксперимента, а также по прогнозированию теплофизических свойств твердых образцов, имеющих довольно обширный набор видов структурных неоднородностей. Автор владеет всеми необходимыми приемами математического анализа и численного математического моделирования. Содержание диссертации достаточно полно отражено в статьях, опубликованных в журналах, входящих в перечень ВАК. Автореферат также полно отражает содержание диссертационной работы. Выполненная работа соответствует требованиям п.9 Положения о присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Гарибян Б.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент
доцент кафедры молекулярных процессов и
экстремальных состояний вещества
Физического факультета ФГБОУ ВО
«Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова»,
кандидат физико-математических наук
(01.04.15 – молекулярная физика), доцент
119991 г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1,
стр. 2, физический факультет
Тел.: +7(495) 939-16-82
e-mail: blagonravovla@mail.ru


Л.А. Благодравов.
28.04.17

Декан Физического факультета
Московского государственного университета
им. М.В.Ломоносова, профессор


Н.Н. Святков
