

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- T, t — текущая температура по шкале Кельвина, К, и Цельсия, °С
 $T(0; \tau)$; $T_{\text{ц}}$ — температура в центре тела
 $T(R; \tau)$; $T_{\text{п}}$ — температура на поверхности тела
 T_0 — начальная температура тела
 T_c — температура окружающей среды
 $\vartheta = (T - T_0)$ — избыточная температура
 $\Theta = T/T_0$ — безразмерная относительная температура
 x, y, z — текущие координаты
 τ — время, с
 δ — толщина стены ограждения здания, м
 $2r$ — полная толщина тела, м
 q — плотность теплового потока, Вт/м²
 ρ — плотность материала, кг/м³
 c — массовая удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
 (cp) — объемная удельная теплоемкость, Дж/(м³·К)
 a — коэффициент температуропроводности, м²/с
 λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
 α — коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·К)
 B — коэффициент теплоусвоения, Вт/(м²·К)
 ν — коэффициент тепловой активности вещества, Дж/(с^{0.5}·м²·К)
 z — полный период колебаний, с
 $\lambda(cp)$ — тепловая инерция, Дж²/(с·м⁴·К²)
 R — термическое сопротивление ограждения, (м²·К)/Вт
 ω — частота колебаний, с⁻¹

ВВЕДЕНИЕ

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

В настоящее время одной из наиболее актуальных проблем является поиск и создание точных, надежных и простых в реализации методов теплового расчета стеклопакетов и потерь теплоты через них, а также оценки теплофизических свойств (ТФС) используемых и вновь разрабатываемых стеклопакетов. Теплофизические свойства стеклопакетов существенно влияют на тепловой и воздушный режим зданий различного назначения, а также на работу систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, потребляющих в настоящее время значительное количество тепловой энергии.

Проблемы энергосбережения и снижения потерь теплоты в окружающую среду существенно влияют на экологическую ситуацию, технико-экономические показатели и капитальные затраты на ограждения зданий. Для решения этих задач нужно знать теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость стеклопакетов.

Поэтому при возведении объектов различного назначения, в ходе строительства необходимо знание ТФС стеклопакетов. Информация о свойствах новых, разрабатываемых и используемых стеклопакетов позволяет корректно проводить тепловые расчеты систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, выбирать оптимальные варианты эксплуатации и контролировать энергосбережение в зданиях. Актуальной является и задача снижения уровня эксплуатационного энергопотребления при определении ТФС.

Методы предсказания теплофизических свойств пока еще должного развития не получили, и главным источником информации остается эксперимент. Важнейшим условием повышения эффективности эксперимента является высокая производительность всего цикла измерений. Это требует разработки и внедрения неразрушающих методов расчета, основанных на температурных и тепловых измерениях на поверхности, которые практически позволят оценить их влияние на энергосбережение здания.

На этой основе автором разработан метод определения ТФС (коэффициента теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости, термического сопротивления, теплоусвоения, тепловой активности и тепловой инерции) стеклопакетов, основанный на измерении температур и теплового потока на поверхностях ограждения без подвода тепловых или электрических источников теплоты.

ОБЗОР СТЕКЛОПАКЕТОВ

Стеклопакет — одна из важнейших составляющих окна. Он представляет собой два и более стекла, соединенных между собой с помощью специальной дистанционной рамки. Существует несколько видов стеклопакетов, отличающихся конструктивными особенностями (количеством камер и шириной) и типами стекла.

Количество камер. Камера — это пространство между двумя стеклами, заполненное инертным газом. Выбор стеклопакета с определенным количеством камер зависит, прежде всего, от климатических условий, места расположения здания и т. д. Количество камер в стеклопакете ограничивается максимально возможной толщиной стеклопакета, толщиной воздушной прослойки, а также толщиной самих стекол. Максимальное количество камер в стеклопакете — две. Для изготовления стеклопакета используют стекла различной толщины — стандартное стекло 4 мм, также есть стекла на 5–8 мм.

Однокамерный стеклопакет состоит из двух стекол, соединенных дистанционной алюминиевой или пластиковой рамкой. Чаще всего он используется для снижения нагрузки на окно (более легкая конструкция) в складских и производственных помещениях со сниженными требованиями к тепло- и шумоизоляции. Если стеклопакет имеет специальное энергосберегающее покрытие и внутри него закачан аргон, его можно использовать в жилых и офисных помещениях или в сложных витражных системах современных зданий. Формула однокамерного стеклопакета: 4–16–4 — стеклопакет с двумя стеклами толщиной 4 мм каждое, разнесенные дистанционной рамкой на 16 мм друг от друга. Суммарная толщина стеклопакета: 24 мм = 4 + 16 + 4 (при толщине стекла 5 мм: 5–14–5). При использовании триплекса толщина может достигать 32 мм (8–18–6).

Двухкамерный стеклопакет. Эти стеклопакеты отличаются от предыдущего варианта более высокими характеристиками основных показателей: они лучше сохраняют тепло и имеют более высокий уровень звукоизоляции. Такой стеклопакет состоит из трех стекол, соединенных двумя дистанционными рамками в единый «бутерброд». Формулы двухкамерных стеклопакетов могут быть разными. Самые стекла толщиной 4–6 мм, прослойки между ними — 6–16 мм. Для эффективного погашения шума в многокамерных стеклопакетах расстояния между стеклами делаются разными.

Ширина стеклопакета. Чем толще стеклопакет, тем лучше его тепло- и звукоизоляция. Толщина стеклопакета по установленному ГОСТ должна составлять 16–46 мм. Наиболее распространеными

являются 24 мм (4–16–4 или 4–6–4–6–4). Данная ширина используется в однокамерных стеклопакетах и двухкамерных стеклопакетах эконом-класса. 32 мм (4–10–4–10–4). Самая распространенная формула для двухкамерного пакета. Оптимальное соотношение «цена — качество», улучшенное теплосбережение и шумоизоляция. 40 мм (4–14–4–14–4). Такой стеклопакет обладает более высокими изоляционными свойствами и более высокой ценой.

ТИП ПРИМЕНЯЕМОГО СТЕКЛА

Энергосберегающий стеклопакет. В энергосберегающих стеклопакетах используются стекла со специальным покрытием (из оксидов металлов), которое пропускает коротковолновое солнечное излучение внутрь помещения, а длинноволновое тепловое излучение от нагревательных приборов отражает и оставляет в комнате. Таким образом, энергосберегающие стеклопакеты позволяют сохранять в помещении нужную температуру. Этот вид стекла становится все более востребованным, так как значительно повышает теплотехнические свойства окна. Особенно рекомендуется ставить стеклопакеты с энергосберегающим покрытием в частных домах, где отсутствует центральное отопление.

Шумозащитный стеклопакет. Высокие шумоизоляционные характеристики стеклопакета достигаются за счет использования утолщенных стекол, отличающихся по толщине не менее чем на 30% и разных по ширине воздушных камер между ними. Увеличение расстояния между стеклами повышает общий объем воздуха или другого газа в стеклопакете (увеличение расстояния между стеклами в два раза дает прибавку в звукоизоляции на 1–2 дБ). А увеличение толщины наружного стекла повышает общую массу стеклопакета, делая его более инертным, т. е. менее подверженным звуковым колебаниям. При замене стекла 4 мм на стекло 6 мм происходит увеличение звукоизоляции на 2–4 дБ. Использование триплекса, т. е. двух или более стекол, соединенных между собой слоем смолы или пленкой, также улучшает шумоизоляцию. Средний эластичный слой частично поглощает вибрацию стекла, вызванную звуковыми колебаниями. Например, при замене 6 мм стекла на триплекс 7,2 мм (два стекла М1 толщиной 3 мм) звукоизоляция увеличивается примерно на 2–3 дБ. Улучшение звукоизоляции достигается и путем заполнения камер газообразным продуктом с более низкой резонансной частотой. Заполняют камеры стеклопакета специальными газами: смесью аргона

(Ar ~ 78%) и гексафторидом серы (SF₆ ~ 13%). Тяжелые вязкие газы хорошо поглощают звуковые колебания.

Солнцезащитный стеклопакет. Солнцезащитные стеклопакеты значительно снижают уровень проникновения солнечной радиации. Конструкция солнцезащитного стеклопакета аналогична конструкции обычного стеклопакета. В солнцезащитном стеклопакете используется тонированное стекло в массе или тонированное пленкой. Данное стекло обладает обычными свойствами стекла за исключением светопроницаемости. Как правило, тонированные стеклопакеты используют в помещениях с солнечной стороны, там, где нет недостатка света, а также в декоративных целях.

Глава 1

МЕТОДЫ ТЕПЛООБМЕНА И РАСЧЕТА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

1.1. ОБЗОР МЕТОДОВ ТЕПЛООБМЕНА И ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ В СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

При нагреве или охлаждении ограждения здания (тела) наблюдается несколько характерных тепловых режимов, протекающих последовательно: начальный и упорядоченный — если граничные условия симметричные; начальный, упорядоченный и стационарный — если граничные условия несимметричные. Начальный тепловой период определяется исходным состоянием системы ограждения здания и описывается сложными математическими соотношениями.

Упорядоченный режим наступает по истечении некоторого отрезка времени от начала процесса, когда внешнее тепловое воздействие затронет в какой-то мере центральные участки объема ограждения. Обычно эта стадия, в отличие от начального теплового периода, описывается более простыми аналитическими выражениями. Упорядоченный тепловой режим асимптотически подходит к равновесному термодинамическому состоянию (при симметричном распространении теплоты) или вписывается в стационарную стадию (при несимметричных краевых условиях).

Существует множество способов и методов раздельного и комплексного определения теплофизических свойств материала ограждения здания, использующих весь диапазон нагрева — от начального до стационарного. Все эти тепловые режимы широко применяют в инженерной практике, научных исследованиях и определении ТФС различных материалов.

Условия однозначности включают в себя геометрические, физические, временные и граничные условия.

Геометрические условия характеризуют геометрические и линейные размеры системы, в которой протекает процесс. Физические условия характеризуют физические характеристики среды и тела. Временные или начальные условия характеризуют особенности протекания процесса во времени или распределение температуры внутри тела в начальный момент времени. Граничные условия характеризу-

ют процессы теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

Граничные условия задаются несколькими возможными случаями:

1-го рода — задано распределение температуры на поверхности тела;

2-го рода — задано распределение теплового потока на поверхности тела;

3-го рода — задана температура окружающей среды и закон теплообмена между средой и поверхностью тела;

4-го рода (условия сопряжения) — характеризуют процессы теплопроводности между соприкасающимися поверхностями различных тел, когда температура в точке сопряжения тел одинакова, но тепловые потоки разные.

Для экспериментального определения ТФС материалов (коэффициентов температуропроводности, теплопроводности, теплоемкости) применяют стационарные, нестационарные и комплексные методы.

Стационарные методы основаны на законе теплопроводности Фурье для стационарного теплового потока [42, 64, 80, 94, 95, 98, 126, 141...143, 144, 145, 157, 169].

При реализации стационарных методов исследуемому материалу — образцу — придается форма пластины, цилиндрической полой трубы, сферической оболочки, внутри которых создается соответствующее одномерное температурное поле. Экспериментальное определение ТФС материалов сопровождается рядом побочных явлений: утечки теплоты через торцы, конвекция, излучение, скачок температуры на границе твердого тела и газа (жидкости). Для устранения тепловых потерь применяются разнообразные охранные нагреватели, кольца, колпачки. При использовании стационарных методов исследования в процессе нагрева исследуемых влажных строительных и теплоизоляционных материалов происходит перераспределение влаги, что искажает опытные данные.

Нестационарные методы определения ТФС материалов [5, 11, 17, 21, 24, 28, 50, 68, 83, 94, 121, 151, 157, 172] основаны на теории теплопроводности при нестационарном тепловом потоке. В нестационарных методах различают методы начальной стадии (число Фурье $Fo \leq 0,55$) и методы регулярного режима ($Fo \geq 0,55$). Методы регулярного режима в соответствии с [73, 74, 172] могут быть подразделены на группы методов регулярного режима первого, второго и других видов.

Из нестационарных методов для исследования ТФС материалов при температурах, близких к комнатным, наибольшее применение находят методы регулярного режима первого рода, а при температурах от -50 до 80°C — методы монотонного режима.

Из теории теплофизических измерений известно, что нестационарные методы, с точки зрения оперативности, полноты получаемой информации об объектах исследования и простоты реализации экспериментальных установок, являются более перспективными. В нестационарных методах исследования теплофизических характеристик веществ, по сравнению со стационарными, снижены требования к тепловой защите, затрачивается меньше времени и тепловой энергии для проведения эксперимента. К недостаткам нестационарных методов следует отнести сложность расчетных уравнений и трудность оценки соответствия действительных граничных условий в эксперименте с условиями, принятыми в теории.

Для экспериментального определения ТФС материалов также используют комплексные методы, которые в большинстве случаев основываются на теории начальной и упорядоченной стадии нестационарной теплопроводности. Комплексные методы позволяют определять одновременно из одного эксперимента, на одной установке и на одном образце несколько теплофизических свойств в широком интервале температур. При сохранении времени на проведение эксперимента комплексные методы позволяют получить более полную информацию о ТФС веществ. Если изготовление строго одинаковых по структуре образцов затруднительно (например, структура гетерогенных, анизотропных веществ), то осуществление эксперимента на одном образце комплексным методом существенно повышает точность определения ТФС исследуемого материала.

Экспериментальные методы определения ТФС материалов могут быть абсолютными и относительными. В абсолютных методах определение параметров осуществляется непосредственным измерением. В относительных методах определяемые параметры зависят от постоянной прибора и определяются путем тарировки по эталонному веществу, материалу или образцу. Наиболее перспективными для определения ТФС материалов являются и должны быть абсолютные методы исследований.

Для экспериментального определения ТФС материалов также используют температурные волны, распространяемые в полуограниченном пространстве — массиве ограждения здания. Это связано с тем, что многие явления природы подчиняются закону простого гармонического колебания. Только периоды таких колебаний для разных

условий могут быть различными [12]. Так, период наиболее резких колебаний температуры земли равен одному году. А для ограждающих конструкций жилого помещения он составляет одни сутки. Существуют примеры, когда температурные колебания исчисляются периодом в долях секунды. Большинство из них происходят по закону косинуса, однако даже самые сложные колебания все равно могут быть описаны путем наложения косинусоид. Температурные колебания легко создаются в лабораторных условиях, что используется для определения ТФС материалов.

Среди перечисленных методов особое место в определении ТФС веществ занимают тепловые методы неразрушающего контроля и диагностики (ТМНК). Методы неразрушающего контроля позволяют определять качество исследуемых материалов и изделий, обладают высокой оперативностью и широкими функциональными возможностями [7, 8, 21, 29, 63, 110, 113, 151, 161, 166].

Все методы и реализующие их измерительные средства разделяются на две группы: контактные и бесконтактные. Использование контактных методов превалирует в способах исследования и определения ТФС веществ и материалов. Однако в последнее время отмечается рост бесконтактных методов и измерительных средств [4, 8, 21, 52, 68, 69, 113, 165].

Отличительной особенностью контактных методов является непосредственный контакт термоприемников с участком поверхности исследуемого объекта измерения для определения температурного поля в зоне теплового воздействия. Для этого используют погружаемые или непогружаемые термоприемники — термопреобразователи [10, 21, 29, 31, 34, 58, 63, 74, 80...82, 84, 87, 88, 91...93, 107, 108, 110, 128, 132, 150, 164].

Закономерности распространения теплоты в твердых телах всегда привлекали внимание многих исследователей. Большой вклад в разработку методов определения теплофизических свойств материалов внесли А. В. Лыков [106...108], В. Н. Богословский [14...16], Г. П. Бойков [18, 19], Ю. В. Видин [27, 28], В. В. Иванов [71...75], В. Н. Чернышов [196, 197], Г. Н. Дульнев [60...62], Г. М. Кондратьев [85], В. В. Курепин [94...97], Е. С. Платунов [142, 143], Л. П. Филиппов [181, 182], П. В. Черпаков [198], А. Г. Шашков [205], А. М. Шкловер [204], Н. А. Ярышев [216] и многие другие, в том числе зарубежные ученые Г. Карслоу, Д. Егер [79], О. Крейт, У. Блек [90], О. Кришер, Н. Эсдорн [232], Ли Тейлор [102], Э. М. Сперроу [155].

В монографии большое внимание уделено основам теории теплообмена в ограждении здания при циклическом подводе теплоты к его поверхности, исследованиям плотности теплового потока на поверхности ограждения, расчетам накопления и расхода тепловой энергии в ограждении здания. Закономерности распространения температурных волн в полуограниченном пространстве — массиве ограждения здания включают в свою структуру весь комплекс теплофизических свойств материалов, из которых выполнено ограждение здания. Закономерности распространения температурных волн в полуограниченном пространстве также позволяют и определять весь комплекс ТФС ограждения здания.

1.2. ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

1.2.1. МЕТОД РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

Теория регулярного режима была разработана Г. М. Кондратьевым [85] и в последующем углублена другими исследователями [11, 21, 31, 34, 42, 50, 64, 98, 157, 167]. Метод регулярного теплового режима получил весьма широкое распространение в теплотехнических лабораториях по определению ТФС строительных, теплоизоляционных, облицовочных твердых, сыпучих и порошковых материалов, для определения коэффициента температуропроводности a , коэффициента теплопроводности λ , а также теплоемкости c материалов [73, 74, 94].

Для регулярного режима первого рода, под которым принято понимать упорядоченную, свободную от начальных условий стадию охлаждения (нагрева) тела в среде с температурой $t_C = \text{const}$ и коэффициентом теплоотдачи $\alpha = \text{const}$, изменение температуры во времени для любой точки тела описывается показательной функцией

$$\vartheta = t - t_C = A \cdot U \cdot e^{-m\tau},$$

где ϑ — избыточная температура тела; t — температура в фиксированной точке тела; $t_C = \text{const}$ — температура окружающей среды; A — коэффициент, зависящий от формы тела и начального распределения температур; U — функция координат; m — темп охлаждения (нагрева), величина постоянная и не зависящая от координат и времени τ .

Исследование и определение ТФС материалов при невысоких температурах обычно проводят на образцах простой формы.

Смысл эксперимента состоит в следующем: образец в форме пластины, шара, параллелепипеда или короткого цилиндра с начальной температурой t_0 в начальный момент времени погружается в жидкость с температурой t_C , которая перемешивается с помощью мешалки и тем самым создается бесконечно большой коэффициент теплоотдачи α между жидкостью и телом. Коэффициент теплоотдачи, стремящийся к бесконечности, можно получить, если исследуемый образец поместить в кипящую воду.

Для определения темпа охлаждения по данным измерения температуры тела во времени строят график $\ln \vartheta = f(t)$, в котором m представляет собой угловой коэффициент линейного участка, характеризующего регулярный режим.

Понятие «регулярный тепловой режим» может быть сформулирован так: это такой период нагрева (или охлаждения), когда натуральный логарифм избыточной температуры начинает изменяться во времени по закону прямой линии. Регулярная стадия опыта в телях простой формы с равномерным начальным распределением температур обычно наступает при значениях числа $Fo > 0,5$.

Теория регулярного режима устанавливает зависимость темпа нагрева (охлаждения) тела от его физических характеристик, геометрической формы и размеров, а также условий теплообмена с окружающей средой. К наиболее распространенным методам, основанным на теории регулярного режима, относятся *a*-калориметра, λ -калориметра, калориметра двух и более точек, бикалориметра, микрокалориметра. В этих методах обработка опытных данных сводится к определению темпа нагрева или охлаждения m .

Установка *a*-калориметр представляет собой тонкостенный металлический стакан (сосуд), выполненный из металла (медь, латунь и т. п.) с высоким коэффициентом теплопроводности, наполненный исследуемым материалом и имеющим дифференциальную термопару. Предварительно нагрев *a*-калориметра осуществляется в сушильном шкафу с электрическим нагревателем. Затем нагретый *a*-акалориметр переносят в жидкостный термостат, где происходит его охлаждение в непрерывно перемешиваемой жидкой среде при $\alpha \rightarrow \infty$ и имеющей на протяжении всего опыта постоянное значение температуры $t_C = \text{const}$. Возможен также и нагрев *a*-акалориметра в среде кипящей воды при $t_C = \text{const} = 100^\circ\text{C}$. Строительные и теплоизоляционные материалы часто покрывают слоем эпоксидной смолы, что также позволяет избежать проникновения влаги внутрь исследуемого материала. Погрешность измерений составляет 4...7%.

Преимущества метода: 1) метод абсолютен, не требует эталонов с известными тепловыми характеристиками; 2) обеспечивает достаточно высокую точность эксперимента; 3) опыт идет непрерывное время, а формулы для обработки экспериментальных результатов имеют простой вид.

Недостатки метода: 1) для эксперимента необходима капельная среда (жидкость); 2) опыт соответствует теории только при условии, когда температура окружающей среды t_c на протяжении всего опыта остается постоянной; 3) во избежание смачивания образца и проникновения влаги внутрь исследуемого материала его помещают в герметично закрытый стакан или его поверхность покрывают эпоксидной смолой или лаком; 4) опыты с сыпучими материалами приходится производить в специальных условиях (герметично закрытым стакане); 5) обязательно обеспечивать большой коэффициент теплопередачи.

1.2.2. МЕТОД КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

Метод квазистационарного теплового режима устанавливается при нагреве тел постоянным во времени потоком теплоты (граничные условия 2-го рода). На закономерностях квазистационарного теплового режима основано большое число методов по изучению теплофизических свойств материалов [18, 23, 28, 42, 78, 109, 160, 193]. Методы базируются на решении линейного уравнения теплопроводности для пластины, цилиндра, шара в случае нагрева их постоянным тепловым потоком или в среде с постоянной скоростью изменения температуры.

Если на поверхности тела действует постоянный тепловой поток, то температурное поле по его сечению принимает вид [66, 94]

$$T = \kappa + b \cdot \tau + \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\mu_n^2 \cdot \text{Fo}}.$$

По истечении некоторого отрезка времени ($\tau > \tau^*$) бесконечный ряд становится очень малым в сравнении с двумя первыми членами, и им можно пренебречь. Тогда оставшийся температурный комплекс Φ имеет вид

$$\Phi = T = \kappa + b \cdot \tau,$$

где κ — начальная температура тела; b — скорость нагрева, К/с.

Для экспериментального исследования и определения теплофизических характеристик материалов удается создать квазистационарный нагрев с достаточно высокой точностью. Так, если неограниченную пластину толщиной $2r$ нагревать постоянным тепловым потоком,

то по истечении некоторого отрезка времени наступает так называемый квазистационарный тепловой режим. Температура на поверхности тела t_{Π} начинает изменяться во времени по закону прямой линии.

В процессе проведения опыта образец, выполненный в форме пластины, цилиндра или шара, нагревается с постоянной скоростью (постоянным тепловым потоком на поверхности) и замеряется температура тела вблизи поверхности и на оси. Можно замерять непосредственно и время запаздывания. На основании измерений строится график зависимости $t = f(\tau)$ для двух фиксированных точек, из которых определяются ТФС свойства.

На основе этого абсолютного метода разработан ряд сравнительных методов нагрева с постоянной скоростью [94].

Преимущества метода: 1) простота окончательного выражения для обработки экспериментальных данных; 2) быстрота проведения опыта.

Недостатки метода: 1) требуется качественная торцевая тепловая изоляция для того, чтобы образец соответствовал понятию «неграниченная пластина»; 2) необходимость проведения замеров температуры на поверхности нагревательного элемента, который обладает своей теплоемкостью и теплопроводностью, что вносит значительные погрешности в результаты опыта.

Методы, основанные на теории квазистационарного режима, позволяют определять теплофизические характеристики в широком интервале температур. Однако при исследовании ТФС материалов греющий поток на поверхности тела должен в течение длительного промежутка времени сохранять постоянное значение. Реализация таких режимов нагрева, очевидно, не может быть осуществлена без специальной регулирующей аппаратуры.

Кроме того, необходимо достичь таких условий опыта, когда вся теплота от основных электрических нагревателей полностью уходила бы внутрь образца. Эсдорн и Кришер предложили установку [193] в форме «многослойного пирога», где плоские образцы из одного и того же материала чередуются с плоскими тонкими электрическими нагревателями. Измерения температур производят в центральном образце и середине пакета. Чем больше слоев, тем продолжительнее квазистационарная часть процесса. Кроме того, в пакете необходимо учитывать теплоту, идущую на нагрев самого нагревателя. Таким образом, квазистационарные методы, несмотря на ряд их явных преимуществ перед другими, в общем случае использовать затруднительно, так как требуется громоздкая, дорогостоящая экспериментальная установка.

1.2.3. МЕТОД МОНОТОННОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

Методы монотонного теплового режима основываются на закономерностях приближенного анализа нелинейного уравнения теплопроводности [49, 120, 121, 163, 167]. Под монотонным тепловым режимом принято понимать плавный разогрев или охлаждение тел в широком диапазоне изменения температуры со слабопеременным полем скорости внутри образца.

Методы монотонного теплового режима позволяют из одного опыта получить температурную зависимость исследуемого параметра во всем интервале нагрева образца и носят иногда название динамических методов.

Из методов монотонного режима для определения коэффициента теплопроводности λ материалов используется метод тонкой пластины. Метод тонкой пластины основан на закономерностях монотонного разогрева исследуемого образца в режиме, когда его температурное поле остается близким к стационарному режиму и использует расчетные уравнения для коэффициента λ , приведенные в [121].

В качестве образцов используются диски диаметром 10...20 мм и толщиной 0,5...10 мм. Испытуемый образец помещается внутри металлического ядра λ -калориметра (ДК- λ -400), окруженного теплозащитной оболочкой, и монотонно разогревается вместе с ним. При реализации метода обычно используется вторая пластина (стержень) с известной теплоемкостью c_2 , выполненная из металла с высокой теплопроводностью и контактирующая с поверхностью исследуемой пластины, благодаря чему обеспечивается совместный их разогрев. Условия опыта создаются такими, при которых перепад температуры в стержне остается малым по сравнению с перепадом в образце, и скорость разогрева стержня практически совпадает со скоростью разогрева для контактирующей грани образца.

Для определения коэффициента температуропроводности материалов применяют метод непрерывного нагрева, аксиального или радиального разогрева. Метод непрерывного нагрева основан на закономерностях квазистационарного режима при монотонном изменении температуры образца, когда $b \neq \text{const}$ [78].

Схемы измерительных участков и порядок проведения опытов при исследовании коэффициента температуропроводности a материалов в воздушной, гелиевой среде и в условиях вакуума приводятся в [78].

Вышеприведенный метод получил дальнейшее развитие в варианте метода радиального и аксиального разогрева в монотонном ре-

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru