

В.М. ФОКИН, А.В. КОВЫЛИН, В.Н. ЧЕРНЫШОВ

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ СТРОИТЕЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**



Москва, 2011

УДК 621:006.354; 621.004:002:006.354
ББК 31.361
Ф75

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «ВолгГАСУ»
заслуженный деятель науки и техники РФ

Г.П. Бойков

Доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «ТГТУ»

А.А. Чуриков

Фокин В.М., Ковылин А.В., Чернышов В.Н.

Ф75 Энергоэффективные методы определения теплофизических свойств строительных материалов и изделий. – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 156 с. – 400 экз. – ISBN 978-5-904270-90-2.

Посвящена разработке методов и систем неразрушающего контроля и технической диагностики теплофизических свойств строительных материалов и изделий. Представлены физико-математические модели температурных полей в исследуемых объектах при контактном и бесконтактном тепловом воздействии от линейного, дискового или точечного источника тепла, адекватно описывающие тепловые процессы в контролируемых изделиях. Разработано математическое описание упорядоченного теплового режима на поверхности исследуемых образцов при их симметричном нагреве или охлаждении. Приведен анализ погрешностей результатов измерений разработанных методов и реализующих их измерительных систем.

Будет полезна при подготовке научных, инженерно-технических работников, преподавателей вузов, аспирантов, студентов.

УДК 621:006.354; 621.004:002:006.354
ББК 31.361

ISBN 978-5-904270-90-2

© Фокин В.М., Ковылин А.В.,
Чернышов В.Н., 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	6
ВВЕДЕНИЕ	7
1. ОБЗОР МЕТОДОВ ТЕПЛООБМЕНА И РАСЧЕТА ТЕПЛО- ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ	8
1.1. Обзор методов теплообмена и тепловых режимов в ограждениях зданий	8
1.2. Обзор методов расчета теплофизических свойств материалов	11
1.2.1. Метод регулярного теплового режима	11
1.2.2. Метод квазистационарного теплового режима	13
1.2.3. Метод монотонного теплового режима	15
1.2.4. Методы теплового импульса или мгновенного источника	17
1.2.5. Методы температурных волн	19
1.2.6. Комплексные методы	22
1.2.7. Анализ методов теплообмена и расчета ТФС материалов	24
1.3. Выводы	27
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА В ОГРАЖДЕНИЯХ ЗДАНИЙ ПО ТЕПЛОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ НА ПОВЕРХНОСТЯХ	29
2.1. Закономерности распространения теплоты в полуогра- ниченном пространстве	29
2.2. Температурные волны в ограждениях зданий	31
2.3. Плотность теплового потока на поверхности огражде- ния здания	34
2.4. Аккумуляция тепловой энергии в ограждении зданий ...	35
2.5. Тепловые потоки на наружных поверхностях огражде- ний зданий	36

2.6. Выводы	41
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ ПО ТЕПЛОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ НА ПОВЕРХНОСТЯХ	42
3.1. Теоретические основы экспериментального определения теплофизических свойств ограждений зданий и материалов	42
3.2. Методика экспериментального определения теплофизических свойств ограждений зданий	46
3.3. Экспериментальное определение теплофизических свойств ограждений зданий методом неразрушающего контроля	49
3.3.1. Определение теплофизических свойств ограждения панельного дома методом неразрушающего контроля ...	51
3.3.2. Определение теплофизических свойств ограждения здания из красного кирпича методом неразрушающего контроля	54
3.3.3. Определение теплофизических свойств ограждения здания из силикатного кирпича методом неразрушающего контроля	57
3.3.4. Определение теплофизических свойств одинарного оконного стекла ограждения здания методом неразрушающего контроля	60
3.3.5. Определение теплофизических свойств многослойного остекления ограждения здания методом неразрушающего контроля	63
3.4. Экспериментальное определение теплофизических свойств ограждения здания из силикатного кирпича в зимний, переходный и летний периоды	64
3.5. Выводы	73
4. МЕТОДЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	76
4.1. Метод неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик строительных твердых материалов и изделий	76

4.2. Метод неразрушающего контроля температуропроводности строительных твердых материалов при симметричном нагреве исследуемых образцов	94
4.3. СВЧ-метод и система оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов	99
4.4. Микроволновый метод и измерительная система неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов	107
5. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПО ТЕПЛОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ	114
5.1. Классификация погрешностей средств измерений	114
5.2. Метрологические характеристики экспериментального определения ТФС ограждений зданий	117
5.3. Погрешность и надежность измерений	124
5.4. Выводы	128
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	132
ПРИЛОЖЕНИЕ	149

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

T ; t – текущая температура по шкале Кельвина (К) и Цельсия ($^{\circ}\text{C}$)

$T(0; \tau)$; $T_{\text{ц}}$ – 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, $\text{Вт}/\text{м}^2$

ρ – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$

c – массовая удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$

(c_p) – объемная удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{м}^3\cdot\text{K})$

a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$

λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$

α – коэффициент конвективного теплообмена, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$

B – коэффициент теплоусвоения, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$

b – коэффициент тепловой активности вещества, $\text{Дж}/(\text{с}^{0.5}\cdot\text{м}^2\cdot\text{K})$

z – полный период колебаний, с

$\lambda(c_p)$ – тепловая инерция, $\text{Дж}^2/(\text{с}\cdot\text{м}^4\cdot\text{K}^2)$

R – термическое сопротивление ограждения, $(\text{м}^2\cdot\text{K})/\text{Вт}$

ω – частота колебаний, с^{-1}

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из наиболее актуальных проблем является поиск и создание точных, надежных и простых в реализации методов теплового расчета наружных ограждений и потерь теплоты через них, а также оценка теплофизических свойств (ТФС), используемых и вновь разрабатываемых строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов и изделий. Теплофизические свойства ограждений 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 ограждений зданий. На некоторые изделия и материалы ограждений зданий паспортные данные есть, на другие – нет. Кроме того, фактические свойства материалов ограждений зданий могут изменяться в процессе эксплуатации и не соответствовать их сертификату.

Поэтому при возведении объектов различного назначения в ходе строительства необходимо знание ТФС строительных, теплоизоляционных материалов и изделий, а в процессе эксплуатации здания необходимо проводить мониторинг ТФС ограждения. Информация о свойствах новых, разрабатываемых и используемых материалах 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 ограждений пока еще должного развития не получили, и главным источником информации остается эксперимент. Это требует разработки и внедрения неразрушающих методов расчета ограждений зданий и материалов, основанных на температурных и тепловых измерениях на поверхности, которые практически позволят оценить их влияние на энергосбережение здания.

На этой основе разработаны методы определения ТФС (коэффициента теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости, термического сопротивления, теплоусвоения, тепловой активности и тепловой инерции) ограждений зданий и материалов, основанные на измерении температур и теплового потока на поверхностях ограждения без подвода тепловых или электрических источников теплоты.

1. ОБЗОР МЕТОДОВ ТЕПЛООБМЕНА И РАСЧЕТА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

1.1. ОБЗОР МЕТОДОВ ТЕПЛООБМЕНА И ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ В ОГРАЖДЕНИЯХ ЗДАНИЙ

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 отдельного 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 характеризуют процессы теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

Граничные условия задаются несколькими возможными случаями:

- 1 рода – задано распределение температуры на поверхности тела;
- 2 рода – задано распределение теплового потока на поверхности тела;
- 3 рода – задана температура окружающей среды и закон теплообмена между средой и поверхностью тела;

4 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 [44, 65, 81, 95, 96, 99, 130, 146 – 148, 150, 151, 163, 176].

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, 12, 19, 23, 26, 30, 48, 67, 84, 93, 117, 145, 163, 179] 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 [74, 75, 179] 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 1 рода, а при температурах от минус 50 до плюс 80 °С – 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 [11]. 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, 9, 23, 31, 64, 111, 113, 157, 167, 173].

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, 9, 23, 54, 69, 70, 116, 172].

Отличительной особенностью контактных методов является непосредственный контакт термодатчиков с участком поверхности исследуемого объекта измерения для определения температурного поля в зоне теплового воздействия. Для этого используют погружаемые или непогружаемые термодатчики – термопреобразователи [10, 23, 31, 33, 36, 59, 64, 75, 81 – 83, 85, 88, 889, 92 – 95, 108, 111, 132, 136, 156, 171].

Закономерности распространения теплоты в твердых телах всегда привлекали внимание многих исследователей. Большой вклад в разработку методов определения теплофизических свойств материалов внесли: А.В. Лыков [107 – 109], В.Н. Богословский [16 – 19], Г.П. Бойков [20, 21], Ю.В. Видин [25, 30], В.В. Иванов [72 – 76], В.Н. Чернышов [203, 204], Г.Н. Дульнев [61 – 63], Г.М. Кондратьев [86], В.В. Курепин [95 – 98], Е.С. Платунов [147, 148], Л.П. Филиппов [188, 189], П.В. Черпаков [205], А.Г. Шашков [211, 212], А.М. Шкловер [211], Н.А. Ярышев [223] и многие другие, в том числе зарубежные ученые Г. Карслоу, Д. Егер [80], О. Крейт, У. Блек [91], О. Кришер, Н. Эсдорн [239], Ли Тейлор [103], Э.М. Сперроу [161].

В работе уделено внимание 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 ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА

Теория регулярного режима была разработана Г.М. Кондратьевым [73] и в последующем углублена другими исследователями [10, 23, 33, 36, 44, 52, 65, 99, 163, 174]. Метод регулярного теплового ре-

жима 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 [74, 75, 95].

Для регулярного режима 1 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:

$$\vartheta = t - t_c = AUe^{-m\tau},$$

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 $\ln \vartheta = f(\tau)$, в котором m представляет собой угловой коэффициент линейного участка, характеризующего регулярный режим.

Понятие «регулярный тепловой режим» может быть сформулировано так: это такой период нагрева (или охлаждения), когда натуральный логарифм избыточной температуры начинает изменяться во времени по закону прямой линии. Регулярная стадия опыта в телах простой формы с равномерным начальным распределением температур обычно наступает при значениях числа $Fo \geq 0,55$.

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 приборам, 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 -калориметр 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 $t_c = \text{const}$. Возможно также и нагрев a -калориметра в среде кипящей воды при $t_c = \text{const} = 100$ °С. 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 непродолжительное 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 закрытом стакане);
- 5) обязательно обеспечивать большой коэффициент теплоотдачи.

1.2.2. МЕТОД КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

Метод квазистационарного теплового режима устанавливается при нагреве тел постоянным во времени потоком теплоты (граничные условия 2 рода). На закономерностях квазистационарного теплового

режима основано большое число методов по изучению теплофизических свойств материалов [20, 25, 30, 44, 79, 110, 166, 200]. 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 [67, 95]

$$T = k + b\tau + \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\mu_n^2 F_0}.$$

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

$$\Phi = T = k + b\tau,$$

где k – 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.

На основе этого абсолютного метода разработан ряд сравнительных методов нагрева с постоянной скоростью [95].

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 «неограниченная 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 [200] 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 [51, 124, 125, 170, 174]. 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 [125].

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_3 , 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 $b \neq \text{const}$ [79].

Схемы измерительных участков и порядок проведения опытов при исследовании коэффициента температуропроводности a материалов в воздушной, гелиевой среде и в условиях вакуума приводятся в [79].

Вышеприведенный метод получил дальнейшее развитие в варианте метода радиального и аксиального разогрева в монотонном режиме для определения температуропроводности твердых теплоизоляторов и полупроводников. Исследования проводятся на установках, основной рабочей частью которых служат a -калориметры (ДК- ac -400; ДК- a -1000) соответствующих конструкций.

Метод c -калориметра (контактного тепломера) основан на закономерностях монотонного разогрева исследуемого образца, когда его температурное поле остается близким к стационарному (скорость разогрева составляет от 0,02 до 0,2 К/с). Метод может реализоваться в сравнительном и абсолютном вариантах и используется для исследования теплоемкости различных теплоизоляционных материалов (применим также к металлам, полупроводникам) до температур 400 °С [125].

Реальные условия выполнения экспериментов методом монотонного теплового режима не совпадают с теоретическими предпосылками, поэтому необходимо всегда вносить поправки $\sum \Delta\sigma$: на нелинейность, контактное сопротивление, боковой теплообмен. Исключение этих поправок конструктивным путем значительно усложняет схему приборов, включающую в себя узлы электропитания, водяного охлаждения, тепловых и температурных измерений, а в установках радиального разогрева – и форвакуумный насос для создания вакуума.

1.2.4. МЕТОДЫ ТЕПЛОВОГО ИМПУЛЬСА ИЛИ МГНОВЕННОГО ИСТОЧНИКА

Методы теплового импульса [24, 60, 86] позволяют определять теплофизические свойства в нестационарной области разогрева. В основе метода мгновенного источника лежит решение задачи охлаждения неограниченной пластины в неограниченной среде при наличии мгновенного источника, расположенного в середине пластины.

При использовании мгновенного источника теплоты, расположенного между пластинами с толщиной H , измеряют время, в течение которого достигается максимальная температура на противоположной поверхности образца.

Импульсный источник тепла мгновенно (\approx за 0,5...2,5 с) нагревается. При этом с помощью реле времени, соединенного с секундомером, удается установить точно время действия (0,5; 1; 1,5 или 2,5 с). После выключения мгновенного источника разность температур Δt начинает увеличиваться и в какой-то момент времени τ_{\max} достигает самого большого значения Δt_{\max} .

Преимущество метода состоит в его быстроте и значительной простоте установки. К недостаткам можно отнести наличие теплофизических характеристик эталона и большую мощность мгновенного источника. Нужны достаточно «широкие» размеры плоскостей нагревателя с целью исключения внешнего теплового эффекта.

Кратковременный тепловой импульс [97, 134, 162] между двух полуограниченных тел (параллелепипедов, стержней) позволяет также определять теплопроводность материалов по измерениям времени τ и максимальному значению температуры в точке, находящейся на расстоянии H от теплового источника A . Однако описанные способы являются не абсолютными, а относительными, так как определение ТФХ материалов производится с помощью эталонного образца.

Среди методов импульсного типа в последние годы получил широкое распространение метод нагрева лазерным импульсным излучением плоских образцов-дисков [54]. Информация о характерном времени изменения температуры стороны, противоположной нагреваемой, дает возможность определять теплопроводность образца. В целом это один из самых удобных и популярных методов исследования, но требуется дорогая и сложная аппаратура (импульсный оптический квантовый генератор, осциллограф, калориметр, газовый лазер и др.).

Другая группа методов импульсного нагрева имеет дело с плоскими или цилиндрическими нагревателями, внедряемыми в тело образца [137]. При хорошем тепловом контакте зонда с исследуемой средой этот способ позволяет достаточно точно определить количество

теплоты, вводимой в материал. Для нахождения числа Фурье необходимо использовать таблицы корней функций $\operatorname{erf}(x)$ и $\operatorname{ierfc}(x)$.

Метод двух временных интервалов получил достаточно широкое распространение как один из существующих скоростных методов для определения коэффициента теплопроводности веществ [27].

В начальный момент времени, принимаемый за начало отсчета, свободная поверхность образца мгновенно нагревается до температуры t_n , которая поддерживается постоянной на протяжении всего процесса. При этих условиях требуется найти зависимость температуры t от времени τ в точке 0 в предположении, что начальная температура (при $x = \infty$) поддерживается равной нулю. Далее решаются совместно дифференциальные уравнения теплопроводности для образца и теплоприемника с учетом контактных условий в месте соприкосновения плоскостей (при $x = R_1$).

Преимущества метода:

- 1) метод относится к скоростным методам;
- 2) окончательная формула для обработки результатов опыта имеет простой вид;
- 3) легко изготовить образец (теплоприемник), так как он имеет цилиндрическую форму;
- 4) в результате численных расчетов по теории построены удобные номограммы и таблицы.

Недостатки метода:

- 1) метод неабсолютный и требует предварительного определения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности материала теплоприемника;
- 2) необходимо поддерживать постоянную температуру на одной стороне образца;
- 3) для определения температуропроводности необходимо иметь боковую теплоизоляцию, характеристика и размеры которой позволяют рассматривать задачу о нагреве неограниченной пластины.

При определении температуропроводности всех импульсных методов основным источником погрешностей являются потери тепла из-за теплообмена между образцом и окружающей средой и влияние конечной длительности импульса. Теплообмен облученного образца с окружающей средой приводит к потерям теплоты за время распространения импульса в образце. Это влечет за собой уменьшение времени τ и, следовательно, завышение значения коэффициента температуропроводности.

Борьба с тепловыми потерями ведется самыми разнообразными способами. С одной стороны, выбираются образцы с малым отношением толщины к диаметру [4], с другой, для устранения потерь тепло-

ты конвекцией, радиацией и теплопроводностью образцы помещают в вакуум, экранируют и окружают тепловой изоляцией [58]. Однако такие меры не позволяют избавиться от тепловых потерь, да и для определения температуропроводности необходимо производить корректировку методом последовательных приближений.

Необходимо также учитывать поправки на эффект конечной длительности импульса, особенно если в эксперименте время импульса φ соизмеримо с характеристическим временем τ [27]. В этом случае подъем температуры на поверхности образца будет несколько замедлен, что приводит к заниженным значениям коэффициента температуропроводности.

Несмотря на глубокую аналитическую и практическую разработку импульсных методов, существуют некоторые неучтенные факторы, способные вызвать систематические погрешности при измерениях. Так, не учитывается влияние инерционных измерительных схем. При исследовании теплоизоляторов использование контактных поверхностных термопар неизбежно приводит к тепловым контактным сопротивлениям между образцом и температурным датчиком. В результате значение максимальной температуры образца будет заниженным, а инерционность термопары резко возрастет [112].

1.2.5. МЕТОДЫ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЛН

Особого внимания заслуживают методы измерений, основанные на использовании периодического нагрева температурными волнами. Изучение распространения плоских и квазиплоских (цилиндрических, сферических) температурных волн позволило использовать данное явление для определения теплофизических характеристик твердых материалов. Задачи такого типа решены А.В. Лыковым [95].

Метод режима температурных волн находит применение при определении коэффициента температуропроводности a теплоизоляционных материалов в варианте радиального нагрева цилиндрического образца [69]. Метод радиального нагревания основан на зависимости между значениями максимальных амплитуд гармонических колебаний температуры в двух фиксированных точках цилиндрического образца и коэффициентом температуропроводности исследуемого материала, выраженной отношением

$$a = (\omega r^2) / Pd,$$

где $\omega = 2\pi f$; f – частота колебаний температуры; r – радиальное расстояние; Pd – критерий, зависящая от отношения A_r/A_0 ; A_r – максимальная амплитуда температуры на расстоянии r от оси по радиусу образца; A_0 – максимальная амплитуда температуры на оси образца.

Образец цилиндрической формы с термопарами в его продольных отверстиях по оси и ближе к поверхности помещается в электрическую печь, нагреватель которой включается и выключается через равные промежутки времени (с помощью вариатора). После установления регулярного режима определяются амплитуды колебаний A_r и A_0 , по отношению которых с использованием заранее известной теоретической зависимости $A_r/A_0 = f(Pd)$ определяется значение числа Pd , а затем рассчитывается коэффициент a . В точных измерениях для определения амплитуд первой гармоники используется гармонический анализ [69].

Метод использовался для исследований фторопласта, эбонита и других материалов. Информация об изменении фазы и амплитуды температурных волн вдоль образца дает возможность получать сведения о температуропроводности материала [27], а погрешность измерений в зависимости от конструкции опытных образцов оценивается в 5%.

Известен метод комплексного определения тепловых свойств веществ [106]. Метод регулярного теплового режима 3 рода или температурных волн может быть комплексным и динамическим. Исследования в этом случае должны проводиться в процессе монотонного изменения средней температуры образца во времени.

Однако при экспериментальном осуществлении периодического закона наложение монотонно возрастающей составляющей температуры на синусоиду требует большого количества времени. Этого можно избежать, если использовать два одинаковых образца с плоскими нагревателями, которые помещаются в печь. Один образец с нагревателем является основным, второй – вспомогательным. В основном нагревателе ток изменяется по закону

$$I = I_{\max} [\sin(0,5\omega t)],$$

где I , I_{\max} – соответственно мгновенное и амплитудное значение тока.

Во вспомогательном (компенсационном) нагревателе мощность, выделяемая единицей поверхности, должна быть равна средней по времени мощности основного нагревателя, т.е.

$$W = 0,5 I_{\max}^2 R F^{-1}$$

В обоих образцах в точках внутри образцов, расположенных соответственно на одинаковых расстояниях от нагревателей, помещаются спаи дифференциальных термопар. Средняя монотонно изменяющаяся температура образца измеряется термопарой, холодный спай которой помещается в сосуд с тающим льдом. Запись термо-ЭДС термопар осуществляется электронным быстродействующим самопишущим

щим потенциометром. Коэффициент температуропроводности определяется по формуле

$$a = \frac{0,5\omega l}{\left(\ln \frac{t_{A \max}}{t_{B \max}} \right)},$$

где ω – циклическая частота колебаний; $t_{A \max}$, $t_{B \max}$ – соответственно амплитудные (максимальные) периодические составляющие температуры, регистрируемые термоприемниками; l – расстояние между приемниками.

Коэффициент теплопроводности определяется из выражения

$$\lambda = \frac{0,25}{F} \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \left[-\omega C + \sqrt{2W_{\max}^2 t_{n \max}^{-2} - (\omega C)^2} \right],$$

где F – односторонняя поверхность нагревателя; C – полная теплоемкость нагревателя; W_{\max} – амплитудное значение периодической составляющей мощности нагревателя; $t_{n \max}$ – амплитудное значение температуры нагревателя (вычисляется после подсчета коэффициента температуропроводности, если известны расстояния датчиков температуры от нагревателя).

Основным недостатком данного способа является малая точность измерения температуропроводности и теплопроводности, обусловленная динамическими погрешностями из-за влияния значения теплоемкости и периодической составляющей мощности нагревателя, амплитудных (максимальных) периодических составляющих температур, потерями теплоты за счет теплообмена с окружающей средой, контактным сопротивлением между образцами и нагревателем. Кроме того, требуется помещения дифференциальных термопар внутрь исследуемого образца, что нарушает его целостность.

В экспериментах с нагревом торцевой поверхности образца путем электронной бомбардировки коэффициент температуропроводности a определяется по сдвигу фаз между колебаниями анодного тока и колебаниями температуры на обратной поверхности тонкого образца [186]. Все испытания при температурных волнах проводятся на установке, в которую входит нагреватель, возбуждающий периодические тепловые воздействия на образец той или иной формы. Регулировка мощности осуществляется с помощью автоматических устройств. Нагреватели должны иметь малую инерционность и создавать достаточный тепловой поток. Существенным в проведении экспериментов является исключение лучистой составляющей или учет ее с помощью поправочных коэффициентов.

1.2.6. КОМПЛЕКСНЫЕ МЕТОДЫ

Комплексные методы позволяют определять одновременно из одного эксперимента на одной установке и на одном образце несколько теплофизических характеристик в широком интервале температур. Комплексные методы в большинстве случаев основываются на теории начальной и основной стадий процессов нестационарной теплопроводности. Принципы и реализация ряда применяемых комплексных методов рассматриваются в [25 – 27, 95, 105, 106, 177, 179].

Ряд нестационарных методов комплексного определения теплофизических характеристик основан на решении задач теплопроводности при действии источника (зонда) постоянной мощности (плоского, цилиндрического, сферического) в неограниченной среде [95, 106, 179].

Метод плоского источника постоянной мощности основан на закономерности развития одномерного температурного поля в полуограниченном теле при нагреве его постоянным тепловым потоком [95]. На основе метода плоского источника постоянной мощности разработан прибор для комплексных исследований ТФС сухих и влажных теплоизоляционных материалов с $\lambda = 0,03 \dots 4$ Вт/(м·К) в квазистационарном режиме.

Закономерности развития нестационарных температурных полей, создаваемых действием мгновенных точечных, линейных или плоских источников тепла в неограниченном теле [95], положены в основу создания ряда импульсных методов, комплексного определения теплофизических характеристик различных материалов [95, 106, 179].

Импульсный метод линейного источника теплоты основан на решении двухмерного уравнения теплопроводности для неограниченного тела при действии в нем в течение короткого времени τ_0 линейного источника тепла [179]. При реализации метода в исследуемом образце размещают линейный источник тепла (проволока диаметром 0,05...0,1 мм с малым температурным коэффициентом сопротивления), а на расстоянии r_0 от него – дифференциальную термопару. Начальная температура образца должна быть равна температуре окружающей среды t_0 . Электрическая схема прибора включает реле времени, с помощью которого обеспечивается заданная длительность импульса τ_0 , фотоэлектрический самопишущий прибор для регистрации зависимости $\Delta t_{\text{макс}} = f(\tau)$ и промежуточное пусковое реле, синхронизирующее работу реле времени с подачей мощности на источник тепла [87].

Комплексный импульсный метод плоского источника тепла рассматривается в [180], а комплексные методы мгновенного теплового импульса в [106].

Комплексные методы, основанные на автомоделных режимах, могут быть отнесены к зондовым методам. Теория зондовых методов

основана на анализе автомодельных задач теплопроводности. На решении этих задач базируются экспериментальные методы, позволяющие учесть влияние зависимости теплофизических характеристик от температуры [106].

Сравнительные методы с применением «неограниченного эталона» используются для комплексного определения теплофизических характеристик материалов в начальной стадии теплообмена. Эти методы основаны на уравнениях, описывающих температурные поля плотно соприкасающихся между собой двух сред: исследуемого материала и эталона с известными коэффициентами a_3 и λ_3 при наличии источника тепла [74, 95, 179].

Особое место в определении ТФХ веществ занимают *тепловые методы неразрушающего контроля* и диагностики (ТМНК), также основанные на мгновенном или импульсном тепловом воздействии на исследуемый образец. Методы неразрушающего контроля позволяют определять качество исследуемых материалов и изделий, обладают высокой оперативностью и широкими функциональными возможностями [7, 9, 19, 31, 64, 111, 116, 157, 166, 173].

В ТМНК [7, 172, 173] на поверхности исследуемого тела, теплоизолированного от окружающей среды, помещается линейный импульсный источник тепла, а на заданном определенном расстоянии от него – рабочие концы двух термопреобразователей (термопар). Затем от источника тепла подается тепловой импульс заданной мощности и фиксируется такой момент времени τ_1 , при котором соотношение между избыточными температурами достигнет определенного заранее заданного значения:

$$T(x_1, \tau_1) = nT(x_2, \tau_2),$$

где $T(x_1, \tau_1)$ и $T(x_2, \tau_1)$ – соответственно температура в двух равноотстоящих от линейного источника тепла точках поверхности исследуемого тела x_1 и x_2 в момент времени τ_1 ; n – постоянный коэффициент ($n > 1$).

При установлении такого соотношения фиксируется мощность источника тепла и измеряется температура $T(x_1, \tau_1)$ в точке x_1 . Определение времени τ_1 осуществляется путем непрерывного сравнения термо-ЭДС E_{T_1} термопары, расположенной в точке x_1 , и усиленной в n раз термо-ЭДС E_{T_2} от термопары в точке x_2 , а момент времени τ_1 наступает при достижении равенства $E_{T_1} = nE_{T_2}$ (нулевой метод). Предлагаемый метод позволяет определить комплекс ТФХ исследуемого тела в течение одного опыта без нарушения структуры материала.

Определение ТФС материалов производят и при бесконтактном тепловом воздействии от подвижного источника теплоты [7, 172, 173]. В основу теории большинства тепловых методов бесконтактного неразрушающего контроля ТФС твердых материалов положено явление собственного теплового излучения с поверхности исследуемых материалов и изделий, пропорционального четвертой степени их абсолютной температуры. Нагрев поверхности твердых материалов производится подвижным непрерывным точечным источником теплоты с регистрацией температуры нагреваемой поверхности одним или несколькими термоприемниками, движущимися вслед за источником теплоты с той же скоростью.

Однако при проведении теплофизического эксперимента в реальных условиях в процессе бесконтактного теплового воздействия на поверхность исследуемого объекта от подвижного источника теплоты из-за невозможности теплового изолирования поверхности с нее в окружающую среду происходят тепловые потери, оказывающие существенное влияние на температурное поле исследуемых объектов при указанном виде теплового воздействия. Эти тепловые потери вызваны конвективным и лучистым теплообменом поверхности исследуемого тела с окружающей средой. Кроме того, такие параметры как коэффициент излучения тела ϵ , коэффициенты конвективного α_k и лучистого α_l теплообмена зависят также и от температуры.

Тепловые потери обусловлены также вследствие неполного поглощения поверхностью исследуемого объекта тепловой энергии источника тепла. Кроме того, часть теплоты поглощается окружающей средой при прохождении через нее излучения от источника теплоты до объекта исследования в результате молекулярного поглощения и рассеяния на частицах пыли и воды, содержащихся в окружающей среде (атмосфере).

Комплексные методы также используются в методах регулярного режима, температурных волн [68], а также при сочетании квазистационарных и стационарных тепловых режимов [26].

1.2.7. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ТЕПЛООБМЕНА И РАСЧЕТА ТФС МАТЕРИАЛОВ

Анализ предшествующих исследований экспериментального определения коэффициентов температуропроводности, теплопроводности и теплоемкости веществ и материалов показывает, что в большинстве методов теплообмена, а также в проведении экспериментов требуется создание специальных условий: установка термопар внутри исследуемого материала или образца; поддержание постоянной темпе-

ратуры среды, теплового потока или определенных коэффициентов теплообмена; устройство торцевой изоляции; учет поправок на нелинейность, контактное сопротивление, боковой теплообмен; устройство охранных нагревателей.

Выпускаемые в настоящее время промышленностью приборы позволяют определять теплофизические характеристики на образцах малых размеров в виде дисков и пластинок, проволок и тонких трубок. Например, для прибора ИТ- λ -400 образец должен быть диаметром 15 мм и толщиной от 1 до 5 мм. Образцы для определения ТФХ, кроме строго заданных размеров, должны иметь специальные отверстия малого диаметра (1 мм) для размещения термопар.

Эти требования существенно ограничивают возможности использования серийных приборов для исследований строительных, теплоизоляционных и других материалов (минералов, горных пород), а также ограждений зданий и сооружений. Образцы гетерогенных, композиционных материалов не могут быть сколь угодно малы. Строительные и теплоизоляционные материалы, используемые для ограждения здания, имеют свои особенности как по структуре, так и по форме.

Преимущества и недостатки предшествующих исследований экспериментального определения коэффициентов температуропроводности, теплоемкости, теплопроводности материалов и изделий приведены в табл. 1.2.1.

1.2.1. Преимущества и недостатки методов экспериментального определения ТФС веществ и материалов

Метод исследования	Преимущества метода	Недостатки метода
1. Регулярный тепловой режим: <i>a</i> -калориметр; λ -калориметр; калориметр двух и более точек; бикалориметр; микрокалориметр; погрешность до 8%	Абсолютный; непродолжительное время опыта; формулы для обработки имеют простой вид	Необходима капельная среда; постоянная температура среды; большой коэффициент теплоотдачи
2. Квазистационарный тепловой режим; погрешность измерений 5...8%	Простые формулы; быстрота проведения опыта	Торцевая теплоизоляция; замер температуры на поверхности нагревателя

Метод исследования	Преимущества метода	Недостатки метода
3. Монотонный тепловой режим; погрешность измерений 5...8%	Широкий диапазон измерения температур	Поправки: нелинейность, контактное сопротивление, боковой теплообмен
4. Теплового импульса или мгновенного источника	Скоростной; легко изготовить образец (теплоприемник)	Относительный; постоянство T на образце; потери теплоты из-за теплообмена образца и среды; влияние конечной длительности импульса
5. Комплексные методы плоского и линейного источника, сочетание стационарных и нестационарных	Простые формулы и установки	Постоянный тепловой поток; импульс температур
6. Тепловые методы неразрушающего контроля	Неразрушающий контроль	Тепловые потери излучением и конвекцией
7. Метод температурных волн	Комплексный метод	Малая точность a и λ ; термодпары внутри тела
8. Предлагаемый метод определения ТФС материалов по температурным и тепловым измерениям на поверхности ограждения здания	Абсолютный комплексный метод; в структуру не входят α , ε и др.	Циклический естественный подвод теплоты к наружному ограждению здания в течение суток

Следовательно, оптимальным методом для экспериментального определения ТФС: коэффициентов температуропроводности, теплоемкости, теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов ограждений зданий – является метод, исключаяющий влияние внешних условий на процесс исследования и основанный на измерениях температур и тепловых потоков на поверхности.

1.3. ВЫВОДЫ

Результаты энергоаудита объектов ЖКХ показывают низкий уровень теплозащиты ограждений зданий различного назначения. Энергоэффективность зданий и сооружений требует создания и реализации точных, надежных и простых методов теплового расчета наружных ограждений и потерь теплоты через них, а также оценки теплофизических свойств (ТФС) используемых и вновь разрабатываемых строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов и изделий.

Теплофизические свойства ограждений 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. Поэтому актуальной является задача снижения уровня эксплуатационного энергопотребления.

В настоящее время для ограждений зданий предусматривается использование принципиально новых строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов. Соответственно возрастает потребность в информации о свойствах ограждений зданий и изделий и их влияние на работу систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Анализ состояния вопроса и предшествующие исследования по экспериментальному определению ТФС материалов позволяют сделать следующие выводы.

1. Для определения теплофизических свойств ограждений зданий и материалов применяют стационарные, нестационарные и комплексные методы, основанные на теории теплопроводности при стационарном или нестационарном тепловом режиме. Кроме того, эти методы могут быть абсолютными и относительными. Экспериментальное определение ТФС стационарными методами сопровождается рядом побочных явлений: утечкой теплоты через торцы, конвекцией, излучением, скачками температуры на границе ограждения и воздуха. В процессе нагрева исследуемых влажных материалов ограждений зданий происходит перераспределение влаги, что искажает опытные данные.

В нестационарных методах исследования теплофизических свойств затрачивается меньше времени и тепловой энергии для проведения эксперимента. Комплексные методы позволяют определять одновременно из одного эксперимента несколько теплофизических свойств. В абсолютных методах определение параметров осуществляется непосредственным измерением, а в относительных методах определяемые параметры зависят от постоянной прибора и определяются путем тарировки по эталонному веществу, материалу или образцу.

В большинстве методов определения ТФС ограждений зданий и материалов установка датчиков температур проводится внутри тела, что связано с рядом трудностей, так как расположение термопар в центральной части нарушает целостность ограждения. Если на границе ограждения действует сложный (лучистый или суммарный) теплообмен, то задачи такого рода значительно усложняются как теоретически, так и экспериментальные.

Для многих методов определения ТФС материалов требуется создание постоянного теплового потока, либо проведение эксперимента в обстановке жидкости (воды) при постоянной ее температуре или требование выдерживать малые геометрические размеры исследуемых образцов. Однако образцы гетерогенных, композиционных материалов, минералов, горных пород, используемых для ограждений зданий, не могут быть сколь угодно малыми.

Поэтому наиболее приемлемым способом определения ТФС ограждений зданий и материалов должен быть неразрушающий метод, основанный на измерениях температур и тепловых потоков на поверхности, без нарушения целостности ограждения или материала.

2. Исследованиями ИТМО, МЭИ, ТГТУ, ВолгГАСУ установлено, что перспективным направлением в развитии методов определения ТФС веществ, материалов, ограждений зданий является создание неразрушающих методов измерения и контроля. Наиболее приемлемым способом определения ТФС материалов является метод, исключаящий влияние внешних условий на процесс исследования и основанный на тепловых и температурных измерениях, без внедрения вглубь материала и нарушения целостности ограждения.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА В ОГРАЖДЕНИЯХ ЗДАНИЙ ПО ТЕПЛОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ НА ПОВЕРХНОСТЯХ

2.1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛОТЫ В ПОЛУОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Полуограниченным пространством называется тело бесконечной протяженности в сторону положительных (или отрицательных) значений температур. Плоская стена ограждения здания или сооружения также может считаться полупространством, пока тепловое возмущение в достаточной мере не проникнет сквозь всю ее толщину (массив бесконечной толщины).

Кроме того, учитывается, что полупространство однородно и изотропно, физические свойства его постоянны, деформации внутри объема массива (в связи с температурным напряжением) незначительны по сравнению с объемом и макрочастицы внутри массива неподвижны относительно друг друга.

Если массив (полупространство) с начальной температурой T_0 подвергается внезапно нагреву со стороны поверхности до температуры T_c и поддерживается неизменной на протяжении всего времени релаксации, то процесс переноса теплоты в массиве имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (2.1.1)$$

с условиями однозначности (начальные и граничные)

$$T_{\tau=0} = T_0; \quad T_{x=0} = T_c. \quad (2.1.2)$$

Для решения уравнения (2.1.1) воспользуемся избыточными температурами

$$\vartheta = (T_c - T) \quad \text{и} \quad \vartheta_0 = (T_c - T_0). \quad (2.1.3)$$

Тогда уравнение (2.1.1) будет иметь вид

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}. \quad (2.1.4)$$

В процессе распространения теплоты в полуограниченном пространстве тепловой поток в любом сечении определяется по закону Фурье

$$q = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x}.$$

Распространение температуры внутри массива можно записать в виде

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial x} = \frac{d\vartheta}{dZ} \frac{\partial Z}{\partial x}, \quad (2.1.5)$$

где $Z = \frac{x}{\sqrt{4a\tau}}$ – безразмерный комплекс; a – коэффициент температуропроводности массива, $\text{м}^2/\text{с}$; τ – время релаксации, с.

Тепловой поток на поверхности массива [21]

$$q_{\text{п}} = \frac{2\vartheta_0}{\sqrt{\pi}} \frac{\lambda}{\sqrt{4a\tau}} = \sqrt{\frac{\lambda c_p}{\pi\tau}} \vartheta_0 = B\vartheta_0, \quad (2.1.6)$$

где λ – коэффициент теплопроводности массива $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; a – коэффициент температуропроводности массива, $\text{м}^2/\text{с}$; (c_p) – объемная теплоемкость массива, $\text{кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$; τ – время релаксации, с; B – коэффициент теплоусвоения.

Коэффициент теплоусвоения B характеризует теплоаккумулирующую способность массива

$$B = \sqrt{\frac{\lambda c_p}{\pi\tau}} = \frac{b}{\sqrt{\pi\tau}}, \quad (2.1.7)$$

где $b = \sqrt{\lambda c_p}$ – коэффициент тепловой активности вещества массива.

При термической релаксации коэффициент теплоусвоения массива – это отношение теплового потока на поверхности в данный момент времени $q_{\text{п}}$ к постоянной максимальной разности температур в системе ϑ_0 :

$$B = q_{\text{п}}/\vartheta_0. \quad (2.1.8)$$

В процессе нагрева массива и его полной релаксации произойдет накопление или аккумуляция теплоты, которая определяется из уравнения:

$$Q = \int_0^{\tau} q_{\text{п}}(\tau) d\tau, \quad (2.1.9)$$

или с учетом выражения (2.1.6)

$$Q = \vartheta_0 \int_0^{\tau} B(\tau) d\tau. \quad (2.1.10)$$

2.2. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ВОЛНЫ В ОГРАЖДЕНИЯХ ЗДАНИЙ

Ограждения жилых и общественных зданий за одни сутки подчиняются закону простого гармонического колебания – внутренняя поверхность ограждения остается примерно постоянной, а наружная поверхность ограждения здания изменяется. В дневные часы температура ограждения здания на наружной поверхности выше, а в ночные часы – ниже. Плотность теплового потока q_n на поверхности ограждения здания изменяется в течение суток – в ночные часы q_n выше, а в дневные часы q_n – ниже.

Гармонические колебания температур в ограждении здания происходят по закону косинуса и могут быть рассмотрены путем наложения косинусоид. На рисунке 2.2.1 приведен график распределения температур и тепловых потоков в ограждении здания при циклическом (в течение суток) подводе теплоты к его наружной поверхности. В процессе изменения температуры на наружной поверхности ограждения здания ($x = 0$) в прямом и обратном направлениях внутри ограждения здания удастся получить температурные волны, которые угасая идут в глубину объема массива.

Если процесс теплового колебания на наружной поверхности ограждения здания продолжается достаточно часто, то начальные условия не будут сказываться на распределении температуры. То есть начальные условия в условиях однозначности можно не рассматривать.

Кроме того, учитывается, что ограждение здания однородно и изотропно, физические свойства его постоянны и не зависят от температуры и влажности, деформации внутри объема ограждения (в связи с температурными напряжениями) незначительны по сравнению с объемом и макрочастицы внутри ограждения здания неподвижны относительно друг друга.

Дифференциальное уравнение, описывающее явление распространения температурных волн, имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (2.2.1)$$

Для решения уравнения (2.2.1) воспользуемся избыточными температурами:

$\vartheta_{x, \tau} = (T_{x, \tau} - T_*)$ – избыточные температурные волны;

$\vartheta_n^{\max} = (T_n^{\max} - T_*) = 0,5(T_n^{\max} - T_n^{\min})$ – амплитуда колебаний на наружной поверхности ограждения здания;

$\vartheta_x^{\max} = (T_x^{\max} - T_*)$ – затухающие амплитуды колебаний по глубине (максимальное отклонение температуры по глубине ограждения здания).

Частота колебаний численно равна

$$\omega = 2\pi/z, \quad (2.2.3)$$

где z – полный период колебаний.

Решение системы уравнений 2.2.1 и 2.2.2 имеет вид

$$\vartheta_{(x,\tau)} = \vartheta_{\Pi}^{\max} \cos(\omega\tau - kx)e^{-kx}. \quad (2.2.4)$$

Коэффициент k численно равен

$$k = \sqrt{\omega/2a}, \quad (2.2.5)$$

где a – коэффициент теплопроводности.

Гармонические колебания температур считаются затухшими, если максимальная избыточная температура на внутренней поверхности ограждения здания (на глубине $x = \delta$) $\vartheta_{x=\delta}^{\max}$ составляет 0,5...1% от максимальной избыточной температуры на наружной поверхности ограждения здания. В этом случае соблюдаются два соотношения:

$$\frac{\vartheta_{x=L}^{\max}}{\vartheta_{\Pi}^{\max}} = 0,005...0,01;$$

$$\cos(\omega\tau - kx) = 1.$$

Уравнение (2.2.3) примет вид

$$\vartheta_x^{\max} = \vartheta_{\Pi}^{\max} e^{-kx}. \quad (2.2.6)$$

Согласно уравнению (2.2.6) экспонента

$$e^{kx} = 0,005...0,01.$$

Выделим два режима

$$e^{kx} = 0,005 \quad \text{и} \quad e^{kx} = 0,01.$$

Прологарифмировав последние выражения, получим

$$kx = 4,6 \quad \text{и} \quad kx = 5,3.$$

Среднее значение kx составит $kx = 4,95$.

Тогда глубина заметного проникновения температурных волн в ограждении зданий составляет

$$L = \frac{4,95}{R} = 4,95 \sqrt{\frac{2a}{\omega}}. \quad (2.2.7)$$

2.3. ПЛОТНОСТЬ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА НА ПОВЕРХНОСТИ ОГРАЖДЕНИЯ ЗДАНИЯ

Согласно закону Фурье плотность теплового потока на поверхности ограждения здания (рис. 2.2.1) определяется из соотношения

$$q_{пт} = -\lambda \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)_п. \quad (2.3.1)$$

Используя соотношение (2.2.3), избыточная температура на наружной поверхности (при $x = 0$) имеет вид

$$\vartheta_{пт} = \vartheta_{п}^{\max} \cos(\omega\tau). \quad (2.3.2)$$

Тогда выражение (2.3.1) примет вид

$$q_{пт} = \lambda k \sqrt{2} \vartheta_{п}^{\max} \cos\left(\omega\tau + \frac{\pi}{4}\right). \quad (2.3.3)$$

Согласно выражению (2.2.5) уравнение (2.3.3) примет вид

$$q_{пт} = \sqrt{\lambda(c_p)} \omega \vartheta_{п}^{\max} \cos\left(\omega\tau + \frac{\pi}{4}\right). \quad (2.3.4)$$

Окончательно плотность теплового потока на наружной поверхности ограждения здания имеет вид

$$q_{пт} = B \vartheta_{п}^{\max} \cos\left(\omega\tau + \frac{\pi}{4}\right). \quad (2.3.5)$$

Параметр B характеризует аккумулирующую способность ограждения здания и носит название – коэффициент теплоусвоения:

$$B = \sqrt{\lambda(c_p)} \omega. \quad (2.3.6)$$

Если за период колебаний температуры на наружной поверхности ограждения здания взять одни сутки, а глубину проникновения температурных волн согласно (2.2.7) более

$$L = 4,95 \sqrt{\frac{2a}{\omega}},$$

то косинусоида будет равна единице:

$$\cos\left(\omega\tau + \frac{\pi}{4}\right) = 1.$$

Максимальная плотность теплового потока на наружной поверхности ограждения здания в этом случае будет иметь вид

$$q_{\text{пт}}^{\text{max}} = B \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}}. \quad (2.3.7)$$

В процессе распространения температурных волн в ограждении здания коэффициент теплоусвоения остается постоянным и составляет

$$B = q_{\text{пт}}^{\text{max}} / \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}}. \quad (2.3.8)$$

В количественном смысле коэффициент теплоусвоения B ограждения здания при температурных колебаниях на поверхности – это отношение максимального теплового потока на поверхности к максимальному отклонению температуры на наружной поверхности.

Иногда в помещении здания наблюдается колебание мощности отопительных приборов, что приводит к накоплению или расходу тепловой энергии ограждениям.

С экологической точки зрения ограждения зданий с высокими значениями коэффициента теплоусвоения являются более удовлетворительными в виду того, что температура воздуха в помещении в этом случае будет более равномерной во времени за счет компенсации накопленной или расходуемой ограждением здания тепловой энергии.

2.4. АККУМУЛЯЦИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В ОГРАЖДЕНИИ ЗДАНИЙ

Параллельно температурным волнам в ограждении здания наблюдается проникающая теплопередача, сопровождающаяся накоплением или расходом тепловой энергии. В течение суток практически происходит повторение одного и того же теплового цикла и имеют место полупериодические процессы накопления и расхода тепловой энергии. По закону сохранения энергии в ограждении здания происходит накопление и расход тепловой энергии, численно равные между собой, но отличающиеся по знаку. Интегрированное количество удельной аккумулированной теплоты в тепловом процессе или расходуемой от ограждения определится из выражения

$$Q_{\text{уд}} = \pm \int_0^{0,5z} q_{\text{п}} d\tau = \pm \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} b \sqrt{2} \omega^{-1} = \pm \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} \sqrt{\frac{\lambda(c_p)}{\pi z}} = \pm \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} b (\pi z)^{-0,5}, \text{ Вт/м}^2, \quad (2.4.1)$$

где $q_{\text{п}}$ – удельный тепловой поток; z – полный период колебаний; b – коэффициент тепловой активности вещества (массива); ω – частота колебаний; λ – коэффициент теплопроводности; (c_p) – объемная теплоемкость массива.

Коэффициент тепловой активности вещества (массива) численно равен

$$b = \sqrt{\lambda c_p} . \quad (2.4.2)$$

Частота колебаний температурных волн:

$$\omega = 2\pi/z . \quad (2.4.3)$$

2.5. ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ НА НАРУЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ

Имеется однородная стенка – ограждение здания толщиной δ , с коэффициентом теплопроводности λ , коэффициентом температуропроводности a и объемной теплоемкостью (c_p).

При двухстороннем колебании температур на наружной и внутренней поверхности ограждения здания происходит наложение косинусоид, что математически представляет большую сложность и громоздкость. Практически все тепловые процессы в ограждении здания сводятся к ряду возможных вариантов эксплуатации.

Вариант 1. Распределение температуры и удельного теплового потока по толщине ограждения здания в стационарном режиме приведены на рис. 2.5.1.

Соблюдается стационарный тепловой режим, когда температура на улице и внутри помещения остаются постоянными. Соответственно температура на наружной T_{n1} и на внутренней T_{n2} поверхности ограждения здания остаются постоянными во времени. Причем возможны два случая, когда $T_{n1} > T_{n2}$ (летний режим) или $T_{n1} < T_{n2}$ (переходный и зимний режим). Вектор удельного теплового потока q_n в этих случаях направлен от поверхности ограждения с большей температурой к поверхности с меньшей температурой.

Если начало координат ограждения оставить в одном положении, как показано на рис. 2.5.1, a и b , то в случае летнего режима тепловая энергия идет от наружного ограждения здания, а проникающая теплопередача направлена внутрь помещения.

Распределение температуры внутри плоской стенки ограждения в случае a) (рис. 2.5.1) имеет линейный характер.

$$T_x = T_{n1} - \frac{T_{n1} - T_{n2}}{\delta} x . \quad (2.5.1)$$

Тепловой поток на внутренней и на наружной поверхности ограждения:

$$q_n = \frac{\lambda}{\delta} (T_{n1} - T_{n2}) . \quad (2.5.2)$$

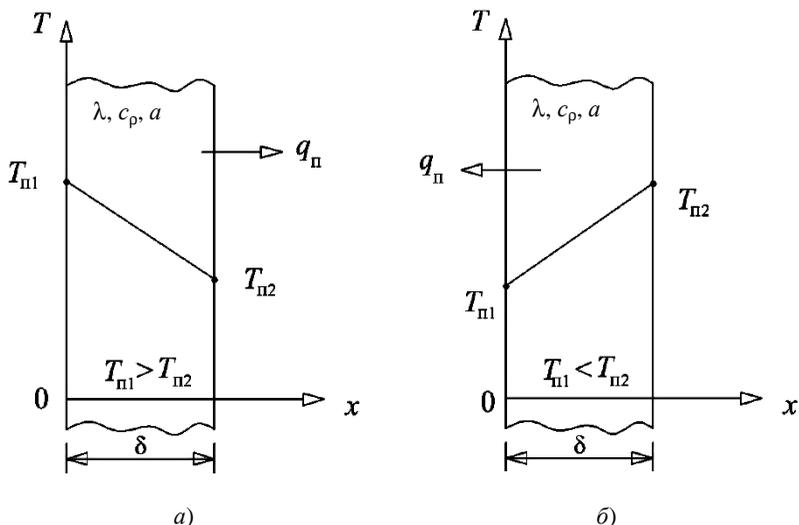


Рис. 2.5.1. Распределение температуры и удельного теплового потока по толщине ограждения здания в стационарном режиме:
а – летний режим; *б* – переходный и зимний режимы

В зимний и переходный периоды года тепловая энергия идет от внутреннего ограждения здания, а проникающая теплопередача направлена наружу ограждения здания. Распределение температуры внутри плоской стенки ограждения и удельный тепловой поток в случае *б* (рис. 2.5.1) имеет вид

$$T_x = T_{n2} - \frac{T_{n2} - T_{n1}}{\delta} (\delta - x); \quad (2.5.3)$$

$$q_n = \frac{\lambda}{\delta} (T_{n2} - T_{n1}). \quad (2.5.4)$$

Вариант 2. Температура на наружной поверхности T_{n1} остается постоянной, а температура на внутренней поверхности T_{n2} изменяется по гармоническому закону:

$$\vartheta_x = \vartheta_{n2}^{\max} e^{-kx}. \quad (2.5.5)$$

Такой случай возможен при циклическом включении и выключении системы кондиционирования воздуха внутри помещения здания.

Распределение температуры и удельного теплового потока по толщине ограждения при гармоническом изменении температуры внутри помещения приведены на рис. 2.5.2.

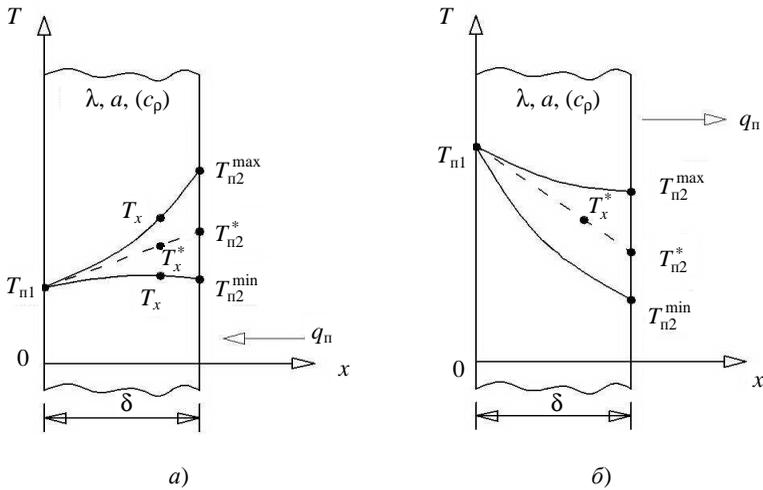


Рис. 2.5.2. Распределение температуры и удельного теплового потока по толщине ограждения здания при гармоническом изменении температуры внутри помещения:

$a - T_{n2}^* > T_{n1}$; $b - T_{n2}^* < T_{n1}$; T_{n1} – температура наружной поверхности, °С; T_{n2} – температура внутренней поверхности, °С; T_x^* – температура между максимальным и минимальным отклонением (средняя) по сечению ограждения, °С; q_n – удельный тепловой поток, Вт/м²; λ – коэффициент теплопроводности материала ограждения, Вт/(м·К); a – коэффициент температуропроводности материала ограждения, м²/с; c_p – объемная теплоемкость ограждения, кДж/(м³·К); δ – толщина стены ограждения здания, м

Избыточная температура на внутренней поверхности ограждения имеет вид

$$\vartheta_{n2}^{\max} = T_{n2}^{\max} - T_{n2}^* = T_{n2}^* - T_{n2}^{\min} = 0,5(T_{n2}^{\max} - T_{n2}^{\min}). \quad (2.5.6)$$

Причем возможны два случая, когда $T_{n2}^* > T_{n1}$ и $T_{n2}^* < T_{n1}$. Вектор удельного теплового потока q_n в этих случаях направлен от поверхности ограждения с большей температурой к поверхности ограждения с меньшей температурой.

Если начало координат ограждения здания оставить в положении на наружной поверхности стены, как показано на рис. 2.5.2, то в случае противоположного направления оси x и распределения температурной волны во всех выражениях необходимо вместо x подставить $(\delta - x)$.

Распределение амплитуды температурной волны по сечению ограждения имеет вид

$$\vartheta_x = \vartheta_{n2}^{\max} e^{-k(\delta-x)}. \quad (2.5.7)$$

Распределение колебаний температуры по сечению ограждения относительно средней T_x^* температуры определится из выражения

$$T_x = T_x^* \pm \vartheta_{n2}^{\max} e^{-k(\delta-x)}. \quad (2.5.8)$$

Коэффициент k в выражениях (2.5.7) и (2.5.8) численно равен

$$k = \sqrt{\frac{\pi}{az}}, \quad (2.5.9)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала ограждения, $\text{м}^2/\text{с}$; z – период колебания температурной волны на поверхности, с.

Удельный тепловой поток на внутренней поверхности ограждения здания в случае *a* рис. (2.5.2) определится из выражения

$$q_{n1} = -\lambda \left(\frac{dT_x}{dx} \right)_{x=\delta} = q_{n2}^* + \lambda \vartheta_{n2}^{\max} k, \quad (2.5.10)$$

где q_{n2}^* – среднее значение теплового потока на внутренней поверхности ограждения, $\text{Вт}/\text{м}^2$; λ – коэффициент теплопроводности материала ограждения, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; ϑ_{n2}^{\max} – избыточная температура на внутренней поверхности ограждения, $^{\circ}\text{C}$; k – коэффициент определяемый по формуле (2.5.9).

Удельный тепловой поток на внутренней поверхности ограждения здания в случае *б* (рис. 2.5.2) определится из выражения

$$q_{n1} = \lambda \vartheta_{n2}^{\max} k - q_{n2}^*. \quad (2.5.11)$$

Вариант 3. Температура в помещении и на внутренней поверхности ограждения здания T_{n2} остается постоянной, а температура на наружной поверхности (снаружи) ограждения здания изменяется по гармоническому закону (2.5.5).

Распределение температуры и удельного теплового потока по толщине ограждения при гармоническом изменении температуры снаружи приведены на рис. 2.5.3.

Избыточная температура на внешней поверхности ограждения здания (снаружи) имеет вид

$$\vartheta_{n1}^{\max} = T_{n1}^{\max} - T_{n1}^* = T_{n1}^* - T_{n1}^{\min} = 0,5(T_{n1}^{\max} - T_{n1}^{\min}). \quad (2.5.12)$$

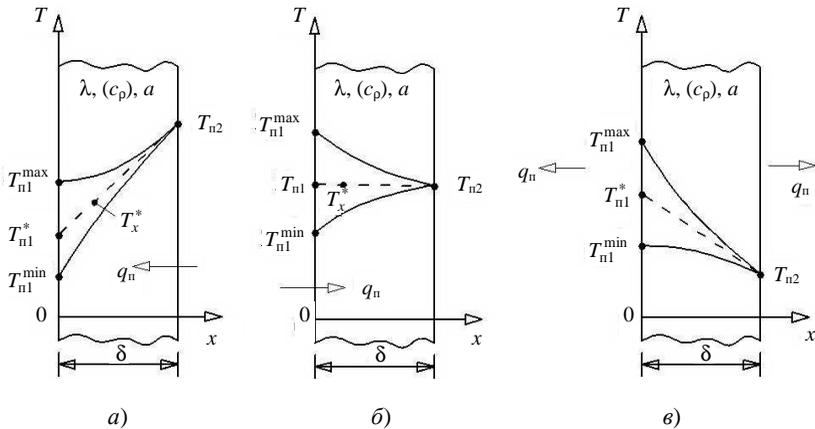


Рис. 2.5.3. Распределение температуры и удельного теплового потока по толщине ограждения здания при гармоническом изменении температуры снаружи:

a – зимний режим $T_{n1}^* < T_{n2}$; *б* – летний и переходный режимы $T_{n1}^* \approx T_{n2}$;

в – жаркий летний режим $T_{n1}^* > T_{n2}$; T_{n1} – температура наружной поверхности, °С; T_{n2} – температура внутренней поверхности, °С;

T_x^* – температура между максимальным и минимальным отклонением (средняя) по сечению ограждения, °С; q_n – удельный тепловой поток, Вт/м²;

λ – коэффициент теплопроводности материала ограждения, Вт/(м·К);

a – коэффициент температуропроводности материала ограждения, м²/с;

c_p – объемная теплоемкость ограждения, кДж/(м³·К);

δ – толщина стены ограждения здания, м.

Причем возможны три случая, когда $T_{n1}^* < T_{n2}$ (зимний режим), $T_{n1}^* \approx T_{n2}$ (летний и переходный режимы), $T_{n1}^* > T_{n2}$ (жаркий летний режим).

Распределение амплитуды температурной волны по сечению ограждения имеет вид

$$\vartheta_x = \vartheta_{n1}^{\max} e^{-kx}. \quad (2.5.13)$$

Распределение колебаний температуры по сечению ограждения, относительно средней T_x^* температуры определится из выражения

$$T_x = T_x^* \pm \vartheta_{n1}^{\max} e^{-kx}, \quad (2.5.14)$$

где k – коэффициент, определяемый по формуле (2.5.9).

Удельный тепловой поток на внешней поверхности ограждения здания (снаружи) в случае *a* (рис. 2.5.3), который чаще всего встречается в зимний период эксплуатации здания определится из выражения

$$q_{\text{п}} = -\lambda \left(\frac{dT_x}{dx} \right)_{x=0} = q_{\text{п1}}^* + \lambda \vartheta_{\text{п1}}^{\text{max}} k, \quad (2.5.15)$$

где $q_{\text{п1}}^*$ – среднее значение теплового потока на внешней поверхности ограждения, Вт/м².

Удельный тепловой поток на внешней поверхности ограждения (снаружи ограждения) в случае *б* (рис. 2.5.3), который встречается в переходный и летний периоды эксплуатации здания, определится из выражения

$$q_{\text{п}} = \lambda \vartheta_{\text{п1}}^{\text{max}} k - q_{\text{п1}}^*. \quad (2.5.16)$$

Удельный тепловой поток на внешней поверхности ограждения в случае *в* (рис. 2.5.3), который встречается в жаркий летний режим эксплуатации здания, определится из выражения

$$q_{\text{п}} = 0,5 \lambda \vartheta_{\text{п1}}^{\text{max}} k. \quad (2.5.17)$$

В жаркий период ограждение здания нагревается в «дневные» часы до температур выше, чем внутренняя температура ограждения (помещения), а в остальные «ночные» часы теплота от ограждения здания равномерно передается как наружу, так и внутрь помещения.

Вариант 4. Тепловое одновременное воздействие на ограждения здания всех трех предыдущих случаев формулируется так: тепловой поток на поверхности ограждений после всех температурных возмущений равен сумме первоначального теплового потока и всех потоков, вызванных на внешней и внутренней поверхности ограждения здания.

2.6. ВЫВОДЫ

1. Установлены закономерности распространения и аккумуляции теплоты в полуограниченном пространстве ограждения здания.

2. Получены закономерности распределения температур и тепловых потоков в ограждении зданий при подводе теплоты к его наружной поверхности по закону гармонического колебания.

3. Установлена глубина заметного проникновения температурных волн в ограждении зданий.

4. Установлена связь коэффициента теплоусвоения ограждения здания с изменением мощности отопительных приборов.

5. Рассмотрены различные варианты эксплуатации, распределения температур и удельных тепловых потоков при гармоническом подводе теплоты к поверхности ограждения здания.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ ПО ТЕПЛОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ НА ПОВЕРХНОСТЯХ

3.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ И МАТЕРИАЛОВ

В главе 2 было отмечено, что многие явления природы подчиняются закону простого гармонического колебания. Только периоды таких колебаний для разных условий могут быть различными. Так, период наиболее резких колебаний температуры Земли равен одному году, а для ограждающих конструкций зданий он составляет одни сутки. Температурные колебания распространяются по закону косинуса и легко создаются в лабораторных условиях, что позволяет определять коэффициент теплопроводности, температуропроводности, теплоусвоения, тепловой инерции, термического сопротивления и объемную теплоемкость материалов, изделий для ограждающих конструкций зданий и сооружений.

При распространении теплоты в полуограниченном пространстве коэффициент температуропроводности служит важнейшей теплофизической характеристикой, определяющей тепловую инерцию массива ограждающих конструкций зданий и сооружений. При увеличении значений объемной теплоемкости (c_p) коэффициент температуропроводности a уменьшается и это означает большое накопление теплоты в материале за период нагрева и неглубокое проникновение температурных волн, а при малых значениях (c_p) – наоборот. С экологической точки зрения ограждающих конструкций более благоприятными являются строительные и теплоизоляционные материалы, обладающие более высокими значениями коэффициента теплоусвоения.

При высоком значении коэффициента теплоусвоения колебание мощности нагревательных приборов системы отопления здания будут в какой-то степени компенсироваться накоплением и расходом тепловой энергии в ограждении здания, а температура окружающего воздуха внутри помещения будет более равномерной во времени.

Теоретические основы определения ТФС (теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности) материалов по тепловым измерениям на поверхности ограждения зданий методом неразрушающего контроля приведены в патенте на изобретение РФ G 01 N 25/18 «Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов» [84, 141, 184].

Если процесс теплового колебания изделия или конструкции продолжается достаточно долго, то начальные условия не будут сказываться на распространении температуры, а явление распространения температурных волн описывается двумя уравнениями:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}; \quad (3.1.1)$$

$$\vartheta_{0\tau} = \vartheta_{\Pi}^{\max} \cos(\omega\tau), \quad (3.1.2)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала, $\text{м}^2/\text{с}$; ϑ_{Π}^{\max} – амплитуда колебаний избыточной температуры на поверхности изделия ограждения или конструкции (максимальное отклонение температуры на поверхности изделия от средней температуры материала, массива), $^{\circ}\text{C}$; $\omega = 2\pi/z$ – частота температурных колебаний на поверхности материала, изделия, $1/\text{с}$; z – полный период колебаний, с .

Амплитуда колебаний избыточной температуры на поверхности ограждения, согласно рис. 2.2.1:

$$\vartheta_{\Pi}^{\max} = (T_{\Pi}^{\max} - T_*) = 0,5(T_{\Pi}^{\max} - T_{\Pi}^{\min}).$$

Решение системы уравнений (3.1.1) и (3.1.2) имеет вид

$$\vartheta_{x,\tau} = \vartheta_{\Pi}^{\max} \cos(\omega\tau - kx) e^{-kx}, \quad (3.1.3)$$

где $k = \sqrt{\omega/2a}$; a – коэффициент температуропроводности материала, $\text{м}^2/\text{с}$.

Из решения (3.1.3) вытекает ряд зависимостей, которые часто используются в технических расчетах. Так плотность теплового потока на поверхности ограждения здания может быть найдена с помощью выражения (3.1.3) по формуле

$$q_{\Pi\tau} = -\lambda \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right)_{\Pi} = \lambda k \sqrt{2} \vartheta_{\Pi}^{\max} \cos\left(\omega\tau + \frac{\pi}{4}\right).$$

Последнее выражение можно записать и в виде

$$q_{\Pi\tau} = B \vartheta_{\Pi}^{\max} \cos\left(\omega\tau + \frac{\pi}{4}\right),$$

где B – параметр, зависящий от теплофизических свойств материала.

Максимальная плотность теплового потока на поверхности равна

$$q_{\Pi}^{\max} = B \vartheta_{\Pi}^{\max}. \quad (3.1.4)$$

Параметр B характеризует аккумулирующую способность ограждения или массива и носит название коэффициента теплоусвоения, который в процессе распространения температурных волн остается постоянным. В количественном значении коэффициент теплоусвоения материала ограждения (массива) при тепловых колебаниях – это отношение максимального теплового потока на поверхности ограждения q_{Π}^{\max} к максимальному отклонению температуры на поверхности ограждения ϑ_{Π}^{\max} :

$$B = q_{\Pi}^{\max} / \vartheta_{\Pi}^{\max} . \quad (3.1.5)$$

Коэффициент теплоусвоения B численно определяется из соотношения

$$B = \sqrt{\lambda(c_p)\omega} , \quad (3.1.6)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); (c_p) – объемная теплоемкость материала, Дж/(м³·К); $\omega = 2\pi/z$ – частота температурных колебаний на поверхности материала, изделия, 1/с; z – полный период температурных колебаний на поверхности, с.

Из (3.1.4) и (3.1.6) видно, что максимальная плотность теплового потока на поверхности материала (массива) и его теплотехнические характеристики будут связаны следующей зависимостью

$$q_{\Pi}^{\max} = \vartheta_{\Pi}^{\max} \sqrt{\lambda(c_p)\omega} , \quad (3.1.7)$$

где ϑ_{Π}^{\max} – амплитуда колебаний избыточной температуры на поверхности (максимальное отклонение температуры на поверхности от средней температуры материала, массива), °С.

Известно, что $\lambda = a(c_p)$, тогда в соответствии с формулой (3.1.6) коэффициент теплоусвоения B будет равен

$$B = \sqrt{\lambda(c_p)\omega} = (c_p)\sqrt{a\omega} , \quad (3.1.8)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала, м²/с.

Согласно выражениям (3.1.7) и (3.1.8) максимальная плотность теплового потока на поверхности материала q_{Π}^{\max} и амплитуда колебаний избыточной температуры на поверхности изделия $\vartheta_{\Pi}(\tau)$ в любой момент времени нагрева или охлаждения могут быть записаны в виде соотношения

$$q_{\Pi}^{\max} = (c_p)\vartheta_{\Pi}(\tau)\sqrt{a\omega} . \quad (3.1.9)$$

Полученное соотношение (3.1.9) позволят определить объемную теплоемкость исследуемого материала (образца) по выражению

$$(c_p) = \frac{q_n^{\max}}{\vartheta_n(\tau)\sqrt{a\omega}}. \quad (3.1.10)$$

Очевидно, что время подъема температурной полуволны z_* (в процессе нагрева) и время спада температурной полуволны (в процессе охлаждения) будут показывать только половину от времени полного периода колебания температурной волны ($z = 2z_* = 2\tau$). Следовательно, максимальная плотность теплового потока q_n^{\max} на поверхности и амплитуда колебаний избыточной температуры на поверхности $\vartheta_n(\tau)$ в любой момент времени нагрева или охлаждения, согласно (3.1.9), могут быть записаны и в виде соотношения

$$q_n^{\max} = (c_p)\vartheta_n(\tau)\sqrt{a\frac{\pi}{\tau}}. \quad (3.1.11)$$

Если коэффициент теплопроводности определить по закону теплопроводности Фурье, максимальный тепловой поток на поверхности материала q_n^{\max} определить с помощью тепломера, графиков или формул, а амплитуду колебаний избыточной температуры на поверхности $\vartheta_n(\tau)$ в любой момент времени нагрева или охлаждения измерить термопарой, то объемную теплоемкость материала можно рассчитать по соотношению

$$(c_p) = \frac{q_n^{\max}}{\vartheta_n(\tau)\sqrt{a\frac{\pi}{\tau}}}. \quad (3.1.12)$$

Связь между ТФС ограждения здания имеет вид

$$a = \lambda/(c_p). \quad (3.1.13)$$

Тепловая инерция ограждения здания рассчитывается в соответствии с ГОСТ Р 51337–99 «Температуры касаемых поверхностей. Эргономические данные для установления предельных величин горячих поверхностей» [47]. Тепловая инерция b ограждения здания рассчитывается по формуле

$$b = \lambda(c_p)b, \text{ Дж}^2/(\text{с}\cdot\text{м}^4\cdot\text{К}^2). \quad (3.1.14)$$

3.2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ

Для определения теплофизических свойств ограждений зданий и сооружений выбирается ограждающая конструкция или стена здания или сооружения толщиной δ . Используя переносной тепломер, устанавливаются датчики температур и теплового потока, выполняются замеры плотности теплового потока на поверхности ограждения здания в течение суток, а также температуры на наружной и внутренней поверхности стены.

Для определения коэффициента теплопроводности λ , объемной удельной теплоемкости (c_p) и коэффициента температуропроводности a замеряется расстояние δ между датчиками температур на поверхностях ограждения здания. Датчиками температур замеряются температуры на наружной и внутренней поверхности ограждения здания в течение суток. Измерителем тепловых потоков ИТП-МГ4 «Поток» или ИТП «Теплограф» замеряется плотность теплового потока в течение суток. Выявляется максимальная плотность теплового потока q_n^{\max} на наружной поверхности ограждения здания и для этого периода времени определяется разность температур между внутренней T_{n1} и наружной T_{n2} поверхностью стены ограждения здания.

Схема установки датчиков температур и теплового потока на наружных поверхностях ограждения здания приведена на рис. 3.2.1.

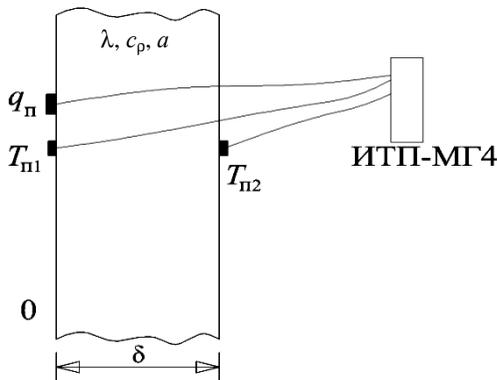


Рис. 3.2.1. Схема установки датчиков температур и теплового потока на наружных поверхностях ограждения здания:

- T_{n1} – температура на наружной поверхности ограждения здания;
- T_{n2} – температура на внутренней поверхности ограждения здания;
- q_n – удельный тепловой поток; δ – толщина стены ограждения здания;
- ИТП-МГ4 – измеритель тепловых потоков

Используя закон теплопроводности Фурье, определяется коэффициент теплопроводности ограждения по формуле

$$\lambda = (q_n^{\max} \delta) / (T_{n2} - T_{n1}), \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}). \quad (3.2.1)$$

Максимальная амплитуда колебаний температурной полуволны на наружной поверхности ограждения здания определяется по формуле

$$\vartheta_n^{\max} = 0,5(T_{n1}^{\max} - T_{n1}^{\min}), \quad (3.2.2)$$

где T_{n1}^{\max} , T_{n1}^{\min} – максимальная и минимальная температуры на наружной поверхности ограждения здания по амплитуде колебаний в течение суток.

Коэффициент теплоусвоения ограждения определяется по формуле

$$B = q_n^{\max} / \vartheta_n^{\max}, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}). \quad (3.2.3)$$

Ранее установлено (3.1.6), что коэффициент теплоусвоения

$$B = \sqrt{\lambda(c_p)\omega},$$

где (c_p) – объемная теплоемкость материала; $\omega = 2\pi/z$ – частота колебаний температуры; z – полный период колебаний температурной волны.

Полный период колебаний температуры на наружной поверхности ограждения z составляет 24 ч или 86 400 с. Тогда объемная теплоемкость (c_p) ограждающей конструкции здания определится из выражения

$$(c_p) = (B^2 z) / (\lambda 2\pi), \text{ Дж}/(\text{м}^3\cdot\text{К}). \quad (3.2.4)$$

Коэффициент температуропроводности a ограждения здания определится из соотношения

$$a = \lambda / (c_p), \text{ м}^2/\text{с}. \quad (3.2.5)$$

Термическое сопротивление теплопроводности ограждения здания определяется из выражения

$$R = \delta / \lambda, (\text{м}^2\cdot\text{К})/\text{Вт}. \quad (3.2.6)$$

Тепловая инерция ограждения здания рассчитывается в соответствии с ГОСТ Р 51337–99 [47] по формуле

$$b = \lambda(c_p), \text{ Дж}^2/(\text{с}\cdot\text{м}^4\cdot\text{К}^2). \quad (3.2.7)$$

Методика неразрушающего контроля, основанная на измерении температур на наружной и внутренней поверхности здания и измере-

нии плотности теплового потока на наружной поверхности здания, позволяет определять весь комплекс теплофизических свойств материала ограждения здания:

- коэффициент теплопроводности λ ;
- объемную теплоемкость (c_p);
- коэффициент температуропроводности a ;
- коэффициент теплоусвоения B ;
- тепловую инерцию b .

Все графические построения и математические расчеты не представляют сложности и легко выполняются в программе Excel или других аналогичных программах ЭВМ.

Методика комплексного определения коэффициентов теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости, термического сопротивления, теплоусвоения и тепловой инерции ограждений зданий, строительных и теплоизоляционных материалов по тепловым и температурным измерениям на поверхности ограждения здания в течение одного опыта методом неразрушающего контроля имеет значительное преимущество по сравнению с известными ранее методами и способами:

- нет необходимости создавать нагрев или охлаждение материала ограждения здания для проведения эксперимента;
- отсутствие необходимости измерения в процессе эксперимента таких физических параметров, как коэффициент теплообмена, степень черноты, мощность нагревателя;
- нет необходимости в создании чисто конвективной или чисто лучистой окружающей среды, что значительно упрощает экспериментальные установки;
- не требуется учета потерь теплоты за счет теплообмена с окружающей средой, а также контактным сопротивлением между образцом и нагревателем;
- измерения температур производятся на поверхности ограждения без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик материалов ограждений зданий.

Эти преимущества значительно упрощают условия проведения эксперимента (экспериментальную установку) и повышают метрологический уровень результатов измерения.

Кроме того, способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических свойств ограждений зданий позволяет легко автоматизировать теплофизический эксперимент, легко реализуется на базе микропроцессорной техники и поэтому является перспективным для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля ТФС материалов, в строительной теплотехнике и различных отраслях народного хозяйства.

3.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Экспериментальное подтверждение по определению ТФС ограждений зданий на основе полученных закономерностей (3.2.1)...(3.2.7) проводилось на опытном стенде, включающем установку (рис. 3.2.1), исследуемые ограждения зданий и контрольно-измерительное оборудование.

Для исследований были выбраны ограждения зданий: жилые здания из силикатного и красного кирпича, а также панельные ограждения.

Контрольно-измерительное оборудование включает в себя переносной измеритель тепловых потоков ИТП-МГ4 «Поток» или измеритель теплофизических параметров ИТП «Теплограф» с датчиками температур и теплового потока, которые выполняют замеры плотности теплового потока на поверхности ограждения здания в течение суток, а также температуры на наружной и внутренней поверхности стены. Основные характеристики ИТП-МГ4 «Поток» и измерителя теплофизических параметров ИТП «Теплограф» приведены в табл. 3.3.1.

Приборы ИТП-МГ4 и ИТП «Теплограф» предназначены для измерения плотности тепловых потоков, проходящих через однослойные и многослойные ограждающие конструкции зданий и сооружений по ГОСТ 25380, через облицовку и теплоизоляцию ограждений зданий, сооружений и энергообъектов при экспериментальном исследовании и в условиях эксплуатации.

**3.3.1. Основные характеристики ИТП-МГ4 «Поток»
и ИТП «Теплограф»**

Наименование характеристик	ИТП-МГ4 «Поток»	ИТП «Теплограф»
Диапазон измерения плотности тепловых потоков, Вт/м ²	10...500	10...1000
Диапазон измерения температуры, °С	(-30)...(+70)	(-55)...(+125)
Диапазон измерения сопротивления теплопередаче, (м ² ·К)/Вт	0,05...8	-
Относительная погрешность измерения плотности тепловых потоков, менее, %	± 6,0	± 6,0
Основная абсолютная погрешность измерения температуры, не более, °С	± 0,2	± 0,5

Приборы позволяют измерять температуру поверхности ограждения и воздуха внутри и снаружи ограждения помещения, а также определять термическое сопротивление ограждающих конструкций зданий сооружений и изделий по ГОСТ 26254 и ГОСТ 26602.1.

Приборы ИТП-МГ4 «Поток» и ИТП «Теплограф» обеспечивают выполнение измерений в оперативном режиме, а также в режиме наблюдения с автоматической регистрацией тепловых потоков и температуры через интервалы времени, установленные пользователем. Приборы оснащены функцией передачи данных на ЭВМ или ПК и часами реального времени. Получаемая в процессе измерений информация автоматически архивируется и маркируется датой и временем измерения.

Снижение погрешностей измерения температур достигалось следующими приемами: все датчики термопар размещались в изотермических плоскостях; датчики термопар теплоизолировались от окружающей среды защитным экраном (кожухом). Для измерения температур на поверхности ограждения здания использовали контактный метод неразрушающего контроля. Для снижения контактного сопротивления между материалом ограждения здания и датчиком прибора использовалась теплопроводная паста КПТ-8.

Метрологические характеристики экспериментального определения ТФС и погрешности средств измерения температур более подробно рассмотрены ниже (глава 5).

На рисунке 3.3.1 (фото) показан общий вид экспериментального стенда для определения ТФС ограждения здания.

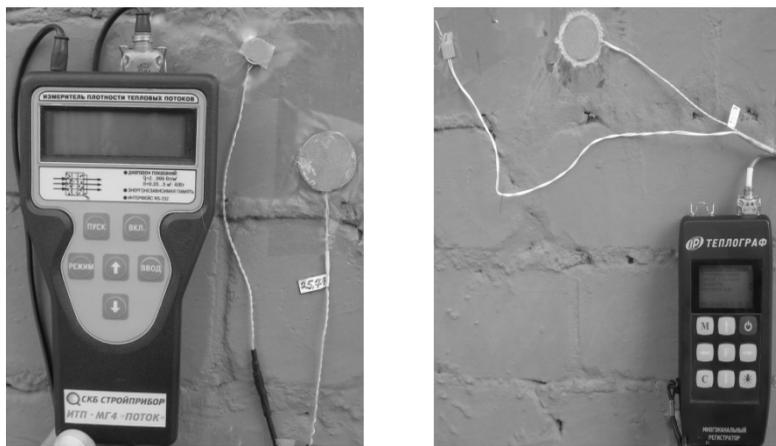


Рис. 3.3.1. Общий вид экспериментального стенда для определения ТФС ограждения здания

3.3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОГРАЖДЕНИЯ ПАНЕЛЬНОГО ДОМА МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Толщина однородной стены ограждения здания панельного дома составляет $\delta = 0,4$ м.

Максимальная плотность теплового потока наблюдалась в ночные часы и составила $q_{\text{п}}^{\text{max}} = 13,5$ Вт/м². Минимальная плотность теплового потока наблюдалась в дневные часы и составила $q_{\text{п}}^{\text{min}} = 2,7$ Вт/м².

При максимальной плотности теплового потока $q_{\text{п}}^{\text{max}} = 13,5$ Вт/м² температура наружной поверхности ограждения здания составляла $t_{\text{нар}} = 15,6$ °С, температура внутренней поверхности ограждения здания $t_{\text{вн}} = 21,7$ °С. Разность температур наружной и внутренней поверхности ограждения здания $\Delta t = 21,7 - 15,6 = 6,1$ °С.

Согласно методике, приведенной в разделе 3.2, для определения коэффициента теплопроводности используется температура внутренней $t_{\text{вн}}$ и наружной $t_{\text{нар}}$ поверхности ограждения здания при максимальном тепловом потоке на наружной поверхности ограждения здания $q_{\text{нар}}$.

На рисунке 3.3.2 приведены экспериментальные распределения по часам в течение суток с интервалом в один час: температур внутренней $t_{\text{вн}}$ и наружной $t_{\text{нар}}$ поверхности ограждения здания, теплового потока на наружной поверхности стены ограждения здания $q_{\text{нар}}$.

Коэффициент теплопроводности λ определяется по формуле

$$\lambda = (q_{\text{п}}^{\text{max}} \delta) / (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) = \\ = (13,5 \cdot 0,4) / (21,7 - 15,6) = 0,88 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Максимальная амплитуда колебаний температурной волны $\vartheta_{\text{п}}^{\text{max}}$ на наружной поверхности ограждения здания между 18 ч 2 мая и 18 ч 3 мая в течение суток составила

$$\vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} = 0,5(T_{\text{п1}}^{\text{max}} - T_{\text{п1}}^{\text{min}}) = 0,5(18,1 - 15,4) = 1,35 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

где $T_{\text{п1}}^{\text{max}} = 18,1$ °С – максимальная температура на наружной поверхности ограждения здания в 14 ч; $T_{\text{п1}}^{\text{min}} = 15,4$ °С – минимальная температура на наружной поверхности ограждения здания в 2 ч.

Коэффициент теплоусвоения ограждения определяется по формуле

$$B = q_{\text{п}}^{\text{max}} / \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} = 13,5 / 1,35 = 10 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

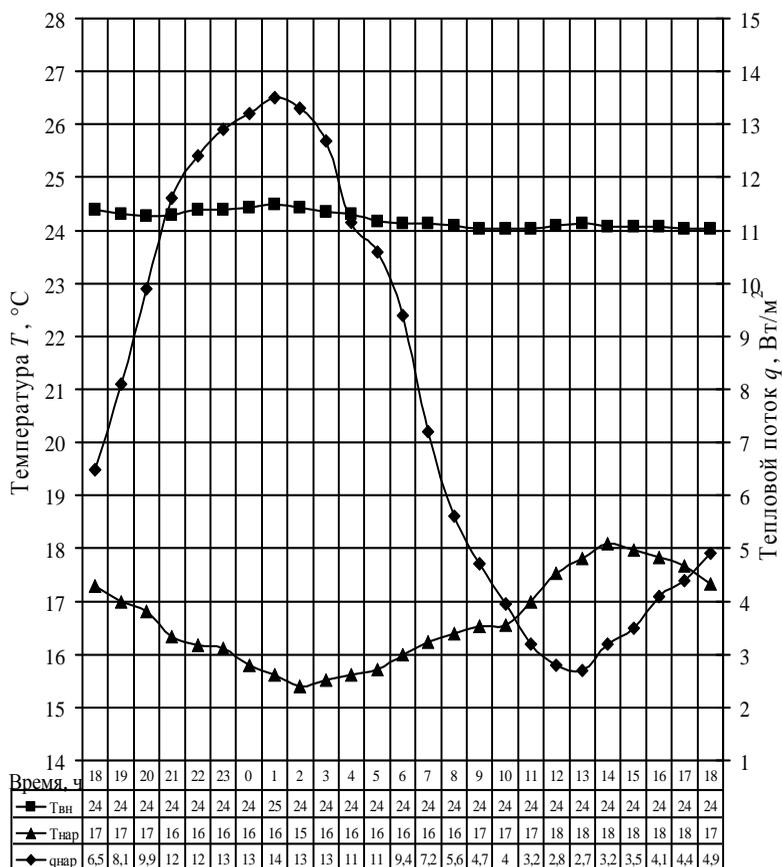


Рис. 3.3.2. Экспериментальные распределения температур и теплового потока ограждения здания панельного дома (2–3 мая 2009 г.):

- – температура поверхности внутренней стены ограждения здания, °С;
- ▲ – температура поверхности наружной стены ограждения здания, °С;
- ◆ – плотность теплового потока на поверхности наружного ограждения здания, Вт/м²

Объемная теплоемкость ограждения определяется по формуле

$$(c_p) = (B^2 z) / (\lambda 2\pi) = (100 \cdot 86\,400) / (0,88 \cdot 2 \cdot 3,14) = 1560 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}),$$

где $z = 86\,400$ – полный период колебаний температуры на наружной поверхности ограждения здания, с.

Коэффициент температуропроводности ограждения здания составляет

$$a = \lambda / (c_p) = 0,88 / 1\,560\,000 = 0,56 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Термическое сопротивление теплопроводности ограждения здания определяется из выражения

$$R = \delta/\lambda = 0,4/0,88 = 0,455 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт.}$$

Тепловая инерция ограждения здания рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} b &= \lambda(c_p) = 0,88 \cdot 1\,560\,000 = 1,38 \cdot 10^6, \text{ Дж}^2/(\text{с}\cdot\text{м}^4\cdot\text{К}^2) = \\ &= 1,38 \cdot 10^3, \text{ кДж}^2/(\text{с}\cdot\text{м}^4\cdot\text{К}^2). \end{aligned}$$

Рассчитанные значения ТФС ограждения здания панельного дома: λ , a , (c_p) , B , b приведены в табл. 3.3.2.

Справочные значения теплофизических свойств выбраны из таблиц литературы [47, 108, 116, 171 – 174, 191, 192, 209, 213], а также приведены в табл. 3.3.2.

Полученные значения ТФС ограждения здания панельного дома с использованием электронного измерителя плотности тепловых потоков ИТП-МГ4 «Поток» и ИТП «Теплограф» согласуются со справочными (литературными) значениями этих коэффициентов. Расхождение рассчитанных значений ТФС со справочными не превышают 10%.

Вывод. Предлагаемая методика определения ТФС ограждающих конструкций зданий с помощью электронного измерителя плотности тепловых потоков ИТП-МГ4 «Поток» позволяет достаточно точно определить ТФС ограждения здания панельного дома: коэффициент теплопроводности λ , температуропроводности a , объемную теплоемкость (c_p) , коэффициент теплоусвоения B , термическое сопротивление R , тепловую инерцию b методом неразрушающего контроля по тепловым измерениям на поверхности ограждения здания.

3.3.2. ТФС ограждения здания панельного дома

ТФС ограждения здания	ИТП-МГ4 «Поток»	Справочные значения
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	0,88	0,81...1,0
Коэффициент температуропроводности a , м ² /с	$0,56 \cdot 10^{-6}$	$0,45 \dots 0,61 \cdot 10^{-6}$
Объемная теплоемкость (c_p) , кДж/(м ³ ·К)	1560	1650...1800
Коэффициент теплоусвоения B , Вт/(м ² ·К)	10	–
Термическое сопротивление R , (м ² ·К)/Вт	0,455	–
Тепловая инерция b , кДж ² /(с·м ⁴ ·К ²)	$1,38 \cdot 10^3$	–

3.3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОГРАЖДЕНИЯ ЗДАНИЯ ИЗ КРАСНОГО КИРПИЧА МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

На рисунке 3.3.3 приведены экспериментальные распределения по часам в течение суток с интервалом в один час: температур поверхности внутренней $T_{\text{вн}}$ и наружной $T_{\text{нар}}$ поверхности стенки, теплового потока на наружной поверхности стенки $q_{\text{нар}}$.

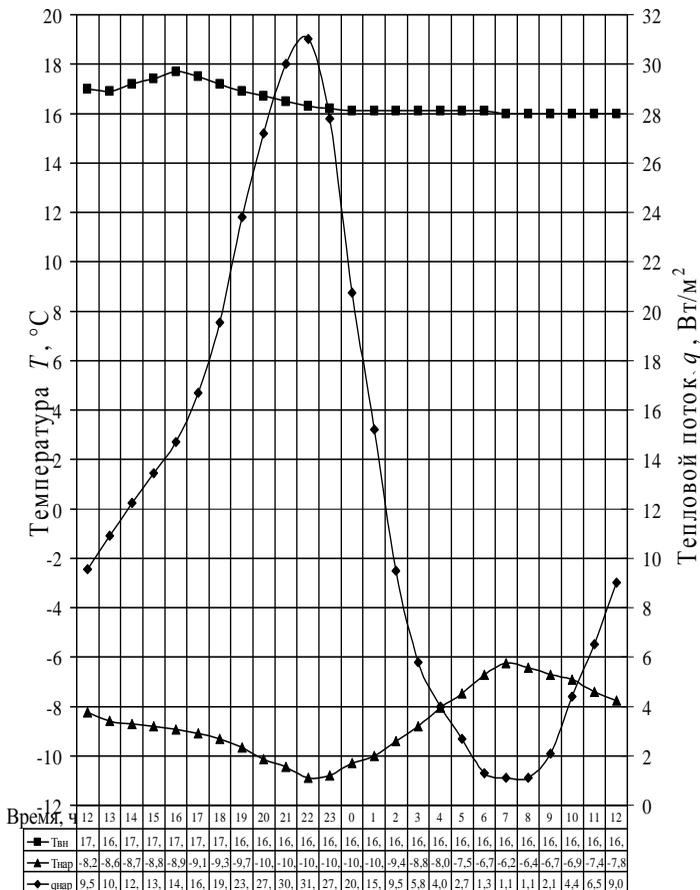


Рис. 3.3.3. Экспериментальные распределения температур и теплового потока ограждения здания из красного кирпича (22–23 декабря 2009 г.):

- – температура поверхности внутренней стены ограждения здания, °C;
- ▲ – температура поверхности наружной стены ограждения здания, °C;
- ◆ – плотность теплового потока на поверхности наружного ограждения здания, Вт/м²

Толщина однородной стены ограждения здания из красного кирпича составляет $\delta = 0,6$ м.

Максимальная плотность теплового потока наблюдалась в ночные часы и составила $q_{\text{п}}^{\text{max}} = 26$ Вт/м². Минимальная плотность теплового потока наблюдалась в дневные часы и составила $q_{\text{п}}^{\text{min}} = 1,1$ Вт/м².

При максимальной плотности теплового потока $q_{\text{п}}^{\text{max}} = 26$ Вт/м² температура наружной поверхности стены составляла $t_{\text{нар}} = -13,1$ °С, температура внутренней поверхности стены $t_{\text{вн}} = +16,3$ °С. Разность температур наружной и внутренней поверхностей стенки составила $\Delta t = 16,3 - (-13,1) = 29,4$ °С.

Согласно методике, приведенной в разделе 3.2, для определения коэффициента теплопроводности используется температура внутренней $T_{\text{вн}}$ и наружной $T_{\text{нар}}$ поверхности ограждения здания при максимальном тепловом потоке на наружной поверхности ограждения здания $q_{\text{нар}}$.

Коэффициент теплопроводности λ определяется по формуле

$$\lambda = (q_{\text{п}}^{\text{max}} \delta) / (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) = (26 \cdot 0,6) / 29,4 = 0,53 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

Максимальная амплитуда колебаний температурной волны $\vartheta_{\text{п}}^{\text{max}}$ на наружной поверхности ограждения здания между 12 ч 22 декабря и 12 ч 23 декабря в течение суток составила

$$\vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} = 0,5(T_{\text{п1}}^{\text{max}} - T_{\text{п1}}^{\text{min}}) = 0,5(-6,3 - (-13,1)) = 3,4 \text{ °С},$$

где $T_{\text{п1}}^{\text{max}} = -6,3$ °С – максимальная температура на наружной поверхности ограждения здания в 22 ч; $T_{\text{п1}}^{\text{min}} = -13,1$ °С – минимальная температура на наружной поверхности ограждения здания в 7 ч.

Коэффициент теплоусвоения ограждения определяется по формуле

$$B = q_{\text{п}}^{\text{max}} / \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} = 26 / 3,4 = 7,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Объемная теплоемкость ограждения определяется по формуле

$$(c_p) = (B^2 z) / (\lambda 2\pi) = (57,8 \cdot 86\,400) / (0,53 \cdot 2 \cdot 3,14) = 1500 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}),$$

где $z = 86\,400$ – полный период колебаний температуры на наружной поверхности ограждения здания, с.

Коэффициент температуропроводности ограждения здания составляет

$$a = \lambda / (c_p) = 0,53 / 1\,500\,000 = 0,35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Термическое сопротивление теплопроводности ограждения здания определяется из выражения

$$R = \delta / \lambda = 0,6 / 0,53 = 1,132 \text{ (м}^2\text{·К)/Вт}.$$

Тепловая инерция ограждения здания рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} b &= \lambda (c_p) = 0,53 \cdot 1\,500\,000 = 0,795 \cdot 10^6, \text{ Дж}^2 / (\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2) = \\ &= 0,795 \cdot 10^3, \text{ кДж}^2 / (\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2). \end{aligned}$$

Рассчитанные значения ТФС ограждения здания из красного кирпича: коэффициент теплопроводности λ , температуропроводности a , объемная теплоемкость (c_p), коэффициент теплоусвоения B , термическое сопротивление R , тепловая инерция b методом неразрушающего контроля по тепловым измерениям на поверхности из красного кирпича приведены в табл. 3.3.3.

Справочные значения теплофизических свойств выбраны из таблиц литературы [47, 108, 116, 171 – 174, 191, 192, 209, 213], а также приведены в табл. 3.3.3.

Полученные значения ТФС ограждения здания из красного кирпича с использованием измерителя плотности тепловых потоков ИТП-МГ4 «Поток» согласуются со справочными (литературными) значениями этих коэффициентов. Расхождение рассчитанных значений ТФС со справочными не превышает 10%.

3.3.3. ТФС ограждения здания из красного кирпича

ТФС ограждения здания	ИТП-МГ4 «Поток»	Справочные значения
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	0,53	0,6...0,8
Коэффициент температуропроводности a , м ² /с	$0,35 \cdot 10^{-6}$	$0,39 \dots 0,45 \cdot 10^{-6}$
Объемная теплоемкость (c_p), кДж/(м ³ ·К)	1500	1400...1700
Коэффициент теплоусвоения B , Вт/(м ² ·К)	7,6	–
Термическое сопротивление R , (м ² ·К)/Вт	1,132	–
Тепловая инерция b , кДж ² /(с·м ⁴ ·К ²)	$0,795 \cdot 10^3$	0,89

Вывод. Предлагаемая методика определения ТФС ограждающих конструкций зданий с помощью электронного измерителя плотности тепловых потоков ИТП-МГ4 «Поток» и ИТП «Теплограф» позволяет достаточно точно определить ТФС ограждения здания из красного кирпича: λ , a , (c_p) , B , R , b методом неразрушающего контроля по тепловым измерениям на поверхности.

3.3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОГРАЖДЕНИЯ ЗДАНИЯ ИЗ СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

На рисунке 3.3.4 приведены экспериментальные распределения по часам в течение суток с интервалом в один час: температур внутренней $T_{\text{вн}}$ и наружной $T_{\text{нар}}$ поверхности ограждения здания, температуры внутреннего $T_{\text{вн.в}}$ и наружного воздуха $T_{\text{нар.в}}$, теплового потока на наружной поверхности стены ограждения здания $q_{\text{нар}}$.

При максимальной плотности теплового потока на наружной поверхности ограждения здания в ночное время $q_{\text{п}}^{\text{max}} = 32,7 \text{ Вт/м}^2$ температура наружной поверхности ограждения здания составляла: $t_{\text{нар}} = -4,4 \text{ }^\circ\text{C}$, температура внутренней поверхности ограждения здания $t_{\text{вн}} = 18,3 \text{ }^\circ\text{C}$, разность температур наружной и внутренней поверхностей ограждения здания $\Delta t = 18,3 + 4,4 = 22,7 \text{ }^\circ\text{C}$.

Толщина однородной стены здания из силикатного кирпича $\delta = 0,6 \text{ м}$. Минимальная плотность теплового потока наблюдалась в дневные часы и составила $q_{\text{п}}^{\text{min}} = 5 \text{ Вт/м}^2$.

Согласно методике, приведенной в разделе 3.2, для определения коэффициента теплопроводности используется температура внутренней $T_{\text{вн}}$ и наружной $T_{\text{нар}}$ поверхности ограждения здания при максимальном тепловом потоке на наружной поверхности ограждения здания $q_{\text{нар}}$.

Коэффициент теплопроводности λ определяется по формуле

$$\lambda = (q_{\text{п}}^{\text{max}} \delta) / (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) = (32,7 \cdot 0,6) / 22,7 = 0,86 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Максимальная амплитуда колебаний температурной волны $\vartheta_{\text{п}}^{\text{max}}$ на наружной поверхности ограждения здания между 3 ч 10 февраля и 14 ч 11 февраля в течение суток составила

$$\vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} = 0,5(T_{\text{п1}}^{\text{max}} - T_{\text{п1}}^{\text{min}}) = 0,5(2,2 - (-4,8)) = 3,5 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

где $T_{\text{п1}}^{\text{max}} = 2,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – максимальная температура на наружной поверхности ограждения здания в 14 ч; $T_{\text{п1}}^{\text{min}} = -4,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – минимальная температура на наружной поверхности ограждения здания в 3 ч.

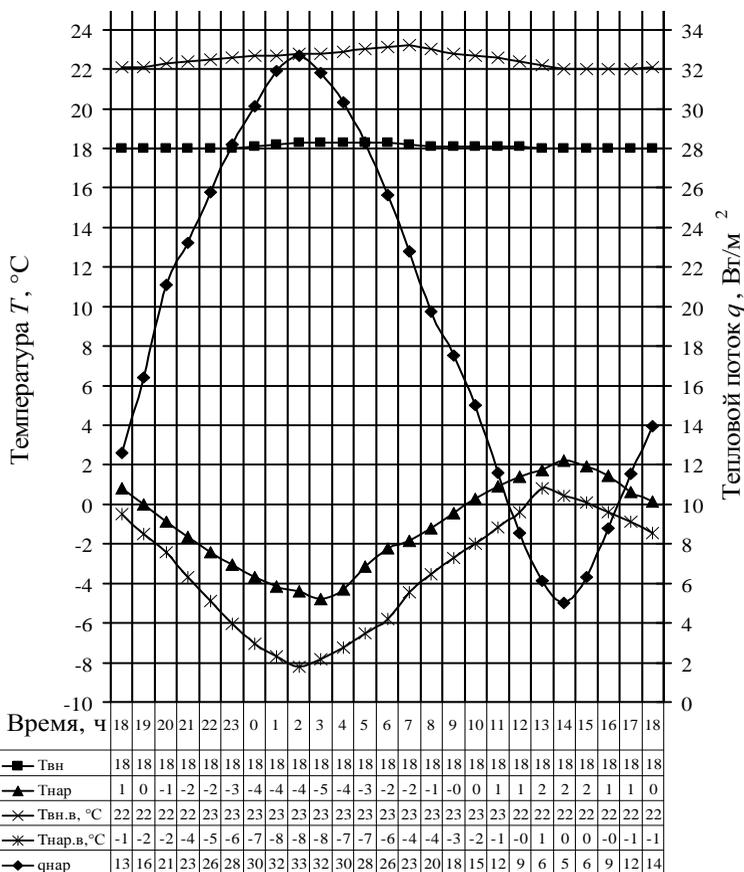


Рис. 3.3.4. Экспериментальные распределения температур и теплового потока ограждения здания из силикатного кирпича (10–11 февраля 2009 г.):

- – температура поверхности внутренней стены ограждения здания, °C;
- ▲ – температура поверхности наружной стены ограждения здания, °C;
- × – температура внутреннего воздуха помещения здания, °C;
- * – температура наружного воздуха, °C; ◆ – плотность теплового потока на поверхности наружного ограждения здания, Вт/м²

Коэффициент теплоусвоения ограждения определяется по формуле

$$B = q_{\text{п}}^{\text{max}} / \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} = 34,5/3,5 = 9,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Объемная теплоемкость ограждения определяется по формуле

$$(c_p) = (B^2 z) / (\lambda 2\pi) = (98 \cdot 86 400) / (0,86 \cdot 2 \cdot 3,14) = 1568 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}),$$

где $z = 86 400$ – полный период колебаний температуры на наружной поверхности ограждения, с.

Коэффициент температуропроводности ограждения здания составляет

$$a = \lambda / (c_p) = 0,86 / 1 568 000 = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Термическое сопротивление теплопроводности ограждения здания определяется из выражения

$$R = \delta / \lambda = 0,6 / 0,86 = 0,698 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}.$$

Тепловая инерция ограждения здания рассчитывается по формуле

$$b = \lambda (c_p) = 0,86 \cdot 1 568 000 = 1,348 \cdot 10^6, \text{ Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2) = \\ = 1,348 \cdot 10^3, \text{ кДж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2).$$

Рассчитанные значения ТФС ограждения здания из силикатного кирпича: λ , a , (c_p) , B , R , b приведены в табл. 3.3.4. Справочные значения теплофизических свойств выбраны из таблиц литературы [47, 108, 116, 171 – 174, 191, 192, 209, 213], а также приведены в табл. 3.3.4.

3.3.4. ТФС ограждения здания из силикатного кирпича

ТФС ограждения здания	ИТП «Теплограф»	Справочные значения
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	0,86	0,81...1,0
Коэффициент температуропроводности a , м ² /с	$0,55 \cdot 10^{-6}$	$0,45 \dots 0,61 \cdot 10^{-6}$
Объемная теплоемкость (c_p) , кДж/(м ³ ·К)	1568	1650...1800
Коэффициент теплоусвоения B , Вт/(м ² ·К)	9,9	–
Термическое сопротивление R , (м ² ·К)/Вт	0,698	–
Тепловая инерция b , кДж ² /(с·м ⁴ ·К ²)	$1,348 \cdot 10^3$	–

Полученные значения ТФС ограждения здания из силикатного кирпича с использованием измерителя теплофизических параметров ИТП «Теплограф» и ИТП «Поток» согласуются со справочными (литературными) значениями этих коэффициентов. Расхождение рассчитанных значений со справочными не превышает 10%.

Вывод. Предлагаемая методика определения ТФС ограждающих конструкций зданий с помощью измерителя теплофизических параметров ИТП «Теплограф» позволяет достаточно точно определить ТФС ограждения здания из силикатного кирпича методом неразрушающего контроля по тепловым измерениям на поверхности.

3.3.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОДИНАРНОГО ОКОННОГО СТЕКЛА ОГРАЖДЕНИЯ ЗДАНИЯ МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

На рисунке 3.3.5 приведены экспериментальные распределения одинарного оконного стекла ограждения здания толщиной $\delta = 0,012$ м по часам в течение суток с интервалом в один час.

На рисунке 3.3.5 приведены: температуры внутренней $T_{\text{вн}}$ и наружной $T_{\text{нар}}$ поверхности одинарного стекла для ограждения здания, а также теплового потока на наружной поверхности оконного стекла $q_{\text{нар}}$.

Максимальная плотность теплового потока на наружной поверхности оконного стекла наблюдалась в ночные часы и составила $q_{\text{п}}^{\text{max}} = 27 \text{ Вт/м}^2$.

При максимальной плотности теплового потока $q_{\text{п}}^{\text{max}} = 27 \text{ Вт/м}^2$ температура наружной поверхности оконного стекла составляла $t_{\text{нар}} = 10,8 \text{ }^\circ\text{C}$, температура внутренней поверхности $t_{\text{вн}} = 11,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Разность температур наружной и внутренней поверхностей одинарного оконного стекла составила $\Delta t = 11,5 - 10,8 = 0,7 \text{ }^\circ\text{C}$.

Согласно методике, приведенной в разделе 3.2, для определения коэффициента теплопроводности используется температура внутренней $T_{\text{вн}}$ и наружной $T_{\text{нар}}$ поверхности оконного стекла для ограждения здания при максимальном тепловом потоке на наружной поверхности стекла $q_{\text{нар}}$.

Коэффициент теплопроводности λ определяется по формуле

$$\lambda = (q_{\text{п}}^{\text{max}} \delta) / (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) = (27 \cdot 0,012) / (11,5 - 10,8) = 0,463 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

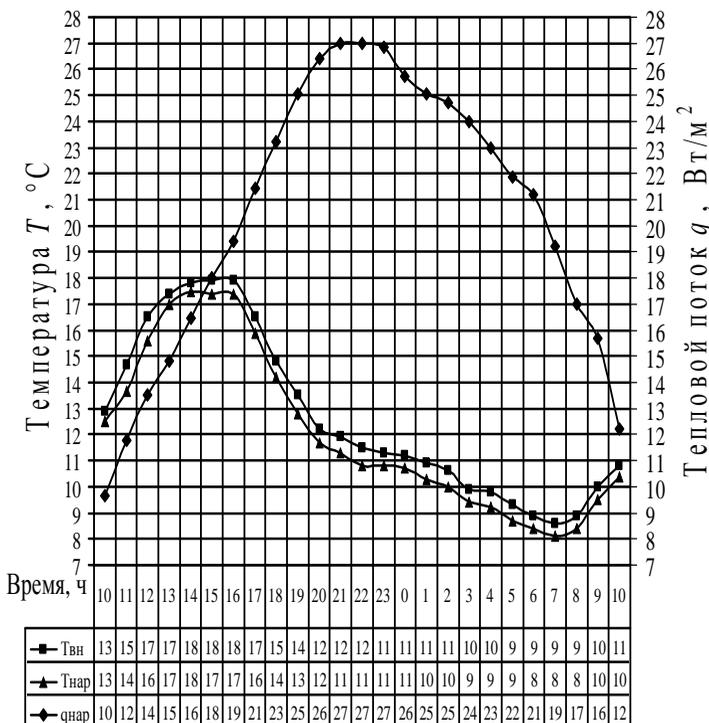


Рис. 3.3.5. Экспериментальные распределения температур и теплового потока оконного стекла для ограждения здания (декабрь 2010 г.):

- – температура поверхности внутренней стены ограждения здания, °С;
- ▲ – температура поверхности наружной стены ограждения здания, °С;
- ◆ – плотность теплового потока на поверхности наружного ограждения здания, Вт/м²

Максимальная амплитуда колебаний температурной волны на наружной поверхности оконного стекла равна

$$\vartheta_{\pi}^{\max} = 0,5(T_{\pi 1}^{\max} - T_{\pi 1}^{\min}) = 0,5 \cdot (17,5 - 10,4) = 3,55 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

где $T_{\pi 1}^{\max} = 17,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – максимальная температура наружной поверхности стекла; $T_{\pi 1}^{\min} = 10,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – минимальная температура наружной поверхности стекла.

Согласно методике, приведенной в разделе 3.2, для определения коэффициента теплопроводности используется температура внутренней $T_{\text{вн}}$ и наружной $T_{\text{нар}}$ поверхности оконного стекла при максимальном тепловом потоке на наружной поверхности оконного стекла $q_{\text{нар}}$.

Коэффициент теплоусвоения стекла определяется по формуле

$$B = q_{\text{п}}^{\text{max}} / \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} = 27/3,55 = 7,61 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Объемная теплоемкость стекла определяется из соотношения:

$$(c_p) = (B^2 z) / (\lambda 2\pi) = (7,61^2 \cdot 86\,400) / (0,463 \cdot 2 \cdot 3,14) = 1720 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}),$$

где $z = 86\,400$ – полный период колебаний температуры на наружной поверхности оконного стекла для ограждения здания, с.

Коэффициент температуропроводности стекла составляет

$$a = \lambda / (c_p) = 0,463 / 1\,720\,000 = 0,269 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Термическое сопротивление теплопроводности стекла определяется из выражения

$$R = \delta / \lambda = 0,4 / 0,88 = 0,0259 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}.$$

Тепловая инерция стекла рассчитывается по формуле

$$b = \lambda (c_p) = 0,463 \cdot 1\,720\,000 = 0,796 \cdot 10^6, \text{ Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2) = 0,796 \cdot 10^3, \text{ кДж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2).$$

Рассчитанные значения ТФС одинарного оконного стекла для ограждения здания: коэффициент теплопроводности λ , температуропроводности a , объемная теплоемкость (c_p), коэффициент теплоусвоения B , термическое сопротивление R , тепловая инерция b , приведены в табл. 3.3.5.

Предлагаемая методика определения ТФС свойств стекла с помощью электронного измерителя плотности тепловых потоков ИТП «Теплограф» позволяет достаточно точно определить ТФС оконного стекла для ограждения здания методом неразрушающего контроля по тепловым измерениям на поверхности.

3.3.5. ТФС одинарного оконного стекла для ограждения здания

ТФС одинарного оконного стекла	ИТП «Теплограф»
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	0,463
Коэффициент температуропроводности a , м ² /с	$0,269 \cdot 10^{-6}$
Объемная теплоемкость (c_p), кДж/(м ³ ·К)	1720
Коэффициент теплоусвоения B , Вт/(м ² ·К)	7,61
Термическое сопротивление R , (м ² ·К)/Вт	0,0259
Тепловая инерция b , кДж ² /(с·м ⁴ ·К ²)	$0,796 \cdot 10^3$

3.3.5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНОГО ОСТЕКЛЕНИЯ ОГРАЖДЕНИЯ ЗДАНИЯ МЕТОДОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

На рисунке 3.3.6 приведены экспериментальные распределения при четырех- (А), трех- (Б) и двухслойном (В) остеклении в течение часа с интервалом в десять минут, а также приведены температуры внутренней $T_{вн}$ и наружной $T_{нар}$ поверхности оконного стекла и плотность теплового потока на наружной поверхности оконного стекла $q_{нар}$.

Стекла установлены на расстоянии 15 мм. При 4-слойном остеклении тепловой поток $q_{нар}$ изменялся от 22,1 до 23 Вт/м², при 3-слойном остеклении тепловой поток $q_{нар}$ изменялся от 23,8 до 25,3 Вт/м², при 2-слойном остеклении тепловой поток $q_{нар}$ изменялся от 27,2 до 30 Вт/м².

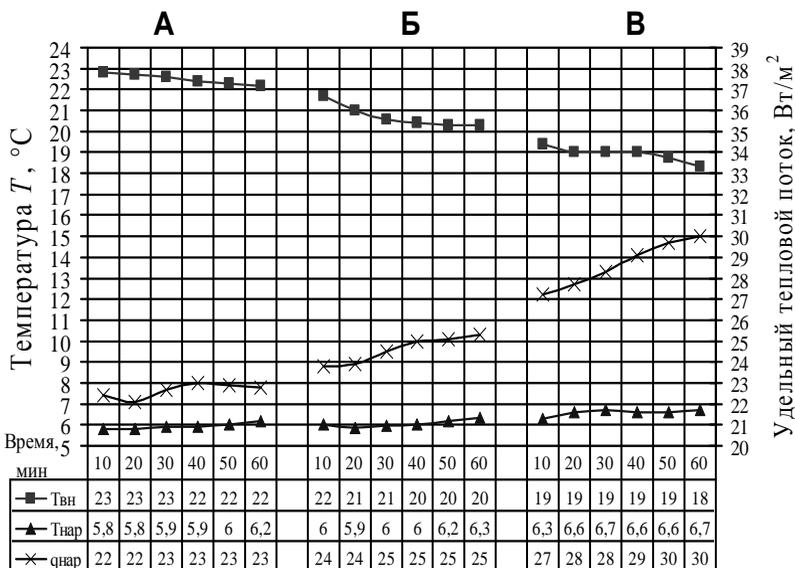


Рис. 3.3.6. Экспериментальные распределения температур и плотности теплового потока при 2-, 3-, 4-слойном остеклении ограждения здания:

А – 4 стекла, Б – 3 стекла, В – 2 стекла;

■ – температура поверхности внутреннего стекла, °С;

▲ – температура поверхности наружного стекла, °С;

× – плотность теплового потока на наружной поверхности оконного стекла, Вт/м²

3.3.6. ТФС многослойного остекления

Параметры	2 стекла	3 стекла	4 стекла
λ , Вт/(м·К)	0,035	0,026	0,021
q , Вт/м ²	30,0...27,2	25,3...23,8	23,0...22,1
R , (м ² ·К)/Вт	0,429	0,577	0,714

Исследования ТФС оконного стекла для ограждения зданий проводились методом неразрушающего контроля с использованием электронного измерителя плотности тепловых потоков ИТП-МГ4 «Поток».

Полученный тепловой поток, а также рассчитанные значения коэффициента теплопроводности λ , коэффициента термического сопротивления многослойного остекления приведены в табл. 3.3.6.

Вывод. Предлагаемая методика определения ТФС стекла позволяет достаточно точно определить коэффициент теплопроводности λ , объемную теплоемкость (c_p), коэффициент температуропроводности a методом неразрушающего контроля. Остекление в ограждении зданий имеет значительные потери тепловой энергии. При наличии 3-слойного остекления удельный тепловой поток относительно 2-слойного снижается на 25%, а при наличии 4-слойного остекления на 50%. При наличии 3-слойного остекления эффективный коэффициент теплопроводности относительно 2-слойного снижается на 35%, а при наличии 4-слойного остекления на 67%. При наличии 3-слойного остекления коэффициент термического сопротивления относительно 2-слойного увеличивается на 35%, а при наличии 4-слойного остекления на 66%.

3.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОГРАЖДЕНИЯ ЗДАНИЯ ИЗ СИЛИКАТНОГО КИРПИЧА В ЗИМНИЙ, ПЕРЕХОДНЫЙ И ЛЕТНИЙ ПЕРИОДЫ

Для подтверждения предлагаемого способа и методики определения комплекса ТФС твердого строительного материала ограждения было выбрано здание из силикатного кирпича. Толщина однородной стены здания составила $\delta = 0,6$ м. Эксперименты проводились в зимнем, переходном и летнем режимах эксплуатации здания.

На рисунке 3.4.1 приведены экспериментальные распределения в зимнем режиме эксплуатации здания толщиной $\delta = 0,6$ м по часам в течение суток с интервалом в один час.

При максимальной плотности теплового потока, наблюдавшейся в ночные часы, $q_{\Pi}^{\max} = 28,5$ Вт/м² температура наружной поверхности

ограждения здания составляла $t_{\text{нар}} = -1$ °С, температура внутренней стены $t_{\text{вн}} = 17,2$ °С, разность температур наружной и внутренней стенки $\Delta t = 17,2 - (-1) = 18,2$ °С, толщина однородной стены здания составила $\delta = 0,6$ м.

Согласно методике, приведенной в разделе 3.2, для определения λ использовались температуры внутренней $T_{\text{вн}}$ и наружной $T_{\text{нар}}$ поверхности ограждения здания при максимальном тепловом потоке на наружной поверхности ограждения здания $q_{\text{нар}}$.

На рисунке 3.4.1 приведены экспериментальные распределения по часам в течение суток с интервалом в один час в зимнем режиме эксплуатации здания: температуры внутренней $T_{\text{вн}}$ и наружной $T_{\text{нар}}$ поверхности ограждения здания теплового потока на наружной поверхности стены ограждения здания $q_{\text{нар}}$.

Коэффициент теплопроводности λ определяется по формуле

$$\lambda = (q_{\text{п}}^{\text{max}} \delta) / (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) = (28,5 \cdot 0,6) / 18,2 = 0,94 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Максимальная амплитуда колебаний температурной волны $\vartheta_{\text{п}}^{\text{max}}$ на наружной поверхности ограждения здания между 18 ч 10 декабря и 18 ч 11 декабря в течение суток составила

$$\vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} = 0,5(T_{\text{п1}}^{\text{max}} - T_{\text{п1}}^{\text{min}}) = 0,5 \cdot (4,4 + 1,0) = 2,7 \text{ }^{\circ}\text{С},$$

Коэффициент теплоусвоения ограждения определяется по формуле

$$B = q_{\text{п}}^{\text{max}} / \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} = 28,5 / 2,7 = 10,6 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Объемная теплоемкость ограждения определяется по формуле

$$(c_p) = (B^2 z) / (\lambda 2\pi) = (112,4 \cdot 86\,400) / (0,94 \cdot 2 \cdot 3,14) = 1798 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)},$$

где $z = 86\,400$ – полный период колебаний температуры на наружной поверхности ограждения здания, с.

Коэффициент температуропроводности ограждения здания составляет

$$a = \lambda / (c_p) = 0,94 / 1\,798\,000 = 0,52 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Термическое сопротивление теплопроводности ограждения здания определяется из выражения

$$R = \delta / \lambda = 0,6 / 0,94 = 0,638 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}.$$

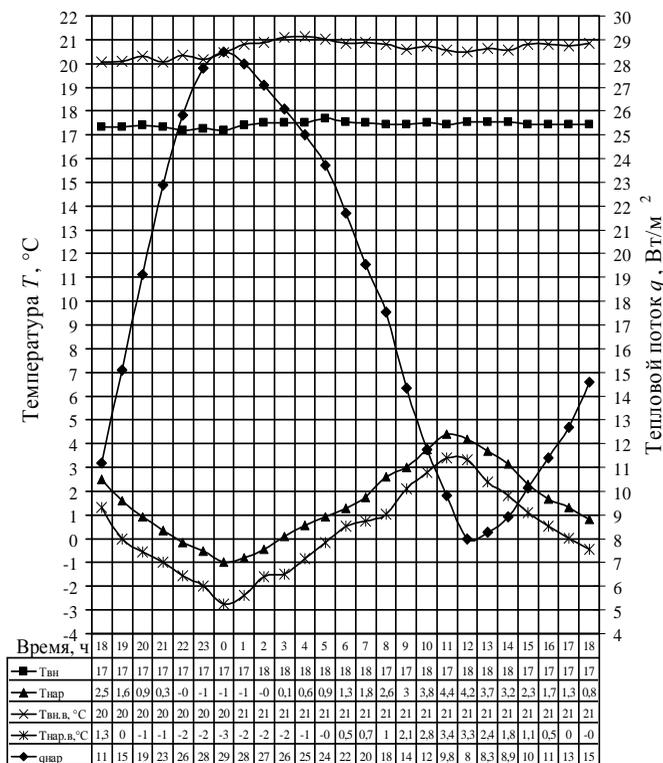


Рис. 3.4.1. Экспериментальные распределения температур и теплового потока ограждения здания из силикатного кирпича в зимний период эксплуатации (10–11 декабря 2009 г.):

- – температура поверхности внутренней стены ограждения здания, °С;
- ▲ – температура поверхности наружной стены ограждения здания, °С;
- × – температура внутреннего воздуха помещения здания, °С;
- * – температура наружного воздуха, °С;
- ◆ – плотность теплового потока на поверхности наружного ограждения здания, Вт/м²

Тепловая инерция ограждения здания рассчитывается по формуле

$$b = \lambda(c_p) = 0,94 \cdot 1\,798\,000 = 1,690 \cdot 10^6, \text{ Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2) = 1,690 \cdot 10^3, \text{ кДж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2).$$

На рисунке 3.4.2 приведены экспериментальные распределения по часам в течение суток с интервалом в один час в переходном режиме эксплуатации здания: температур внутренней $T_{вн}$ и наружной $T_{нар}$ поверхности ограждения здания, теплового потока на наружной поверхности стены ограждения здания $q_{нар}$.

Согласно методике, приведенной в разделе 3.2, для определения λ использовались температуры внутренней $T_{\text{вн}}$ и наружной $T_{\text{нар}}$ поверхности ограждения здания при максимальном тепловом потоке на наружной поверхности ограждения здания $q_{\text{нар}}$.

Коэффициент теплопроводности λ определяется по формуле

$$\lambda = (q_{\text{п}}^{\text{max}} \delta) / (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) = (15,4 \cdot 0,6) / 12,7 = 0,73 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Максимальная амплитуда колебаний температурной волны $\vartheta_{\text{п}}^{\text{max}}$ на наружной поверхности ограждения здания между 18 ч 8 марта и 18 ч 9 марта в течение суток составила

$$\vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} = 0,5(T_{\text{п1}}^{\text{max}} - T_{\text{п1}}^{\text{min}}) = 0,5 \cdot (5,2 - 1,9) = 1,65 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

где $T_{\text{п1}}^{\text{max}} = 5,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – максимальная температура на наружной поверхности ограждения здания в 13 ч; $T_{\text{п1}}^{\text{min}} = 1,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – минимальная температура на наружной поверхности ограждения здания в 0 ч.

Коэффициент теплоусвоения ограждения определяется по формуле

$$B = q_{\text{п}}^{\text{max}} / \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} = 15,4 / 1,65 = 9,3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Объемная теплоемкость ограждения определяется по формуле

$$(c_p) = (B^2 z) / (\lambda 2\pi) = (100 \cdot 86 \cdot 400) / (0,73 \cdot 2 \cdot 3,14) = 1642 \text{ кДж/(м}^3\cdot\text{К)},$$

где $z = 86 \cdot 400$ – полный период колебаний температуры на наружной поверхности ограждения здания, с.

Коэффициент температуропроводности ограждения здания составляет

$$a = \lambda / (c_p) = 0,73 / 1 \, 642 \, 000 = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Термическое сопротивление теплопроводности ограждения здания определяется из выражения

$$R = \delta / \lambda = 0,6 / 0,73 = 0,822 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}.$$

Тепловая инерция ограждения здания рассчитывается по формуле

$$b = \lambda (c_p) = 0,73 \cdot 1 \, 642 \, 000 = 1,199 \cdot 10^6, \text{ Дж}^2/(\text{с}\cdot\text{м}^4\cdot\text{К}^2) = \\ = 1,199 \cdot 10^3, \text{ кДж}^2/(\text{с}\cdot\text{м}^4\cdot\text{К}^2).$$

На рисунке 3.4.3 приведены экспериментальные распределения по часам в течение суток с интервалом в один час в летнем режиме эксплуатации здания: температур внутренней $T_{\text{вн}}$ и наружной $T_{\text{нар}}$

поверхности ограждения здания, теплового потока на наружной поверхности стены ограждения здания $q_{нар}$.

При максимальной плотности теплового потока, наблюдавшейся в ночные часы, $q_{п}^{max} = 13,2 \text{ Вт/м}^2$ температура наружной поверхности ограждения здания составляла $t_{нар} = 15,6 \text{ }^\circ\text{C}$, температура внутренней стены $t_{вн} = 24,5 \text{ }^\circ\text{C}$, разность температур наружной и внутренней стенки $\Delta t = 24,5 - 15,6 = 8,9 \text{ }^\circ\text{C}$, толщина однородной стены здания составила $\delta = 0,6 \text{ м}$.

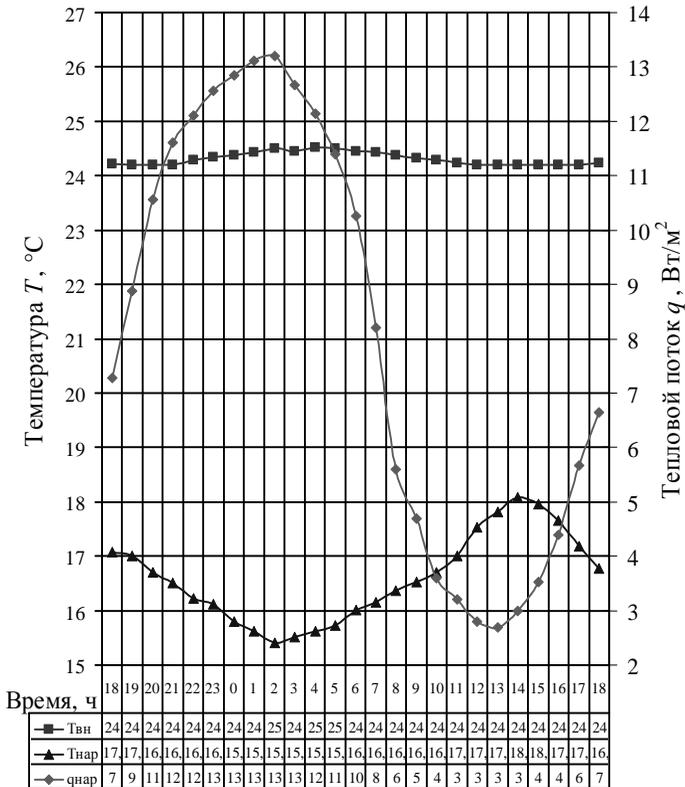


Рис. 3.4.3. Экспериментальные распределения температур и теплового потока ограждения здания из силикатного кирпича в летний период эксплуатации (7–8 июня 2009 г.):

- – температура поверхности внутренней стены ограждения здания, $^\circ\text{C}$;
- ▲ – температура поверхности наружной стены ограждения здания, $^\circ\text{C}$;
- ◆ – плотность теплового потока на поверхности наружного ограждения здания, Вт/м^2

Согласно методике, приведенной в разделе 3.2, для определения λ использовались температуры внутренней $T_{\text{вн}}$ и наружной $T_{\text{нар}}$ поверхности ограждения здания при максимальном тепловом потоке на наружной поверхности ограждения здания $q_{\text{нар}}$.

Коэффициент теплопроводности λ определяется по формуле

$$\lambda = (q_{\text{п}}^{\text{max}} \delta) / (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) = (13,2 \cdot 0,6) / 8,9 = 0,89 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

Максимальная амплитуда колебаний температурной волны $\vartheta_{\text{п}}^{\text{max}}$ на наружной поверхности ограждения здания между 18 ч 7 июня и 18 ч 8 июня в течение суток составила

$$\vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} = 0,5 (T_{\text{п1}}^{\text{max}} - T_{\text{п1}}^{\text{min}}) = 0,5(18,1 - 15,4) = 1,35 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

где $T_{\text{п1}}^{\text{max}} = 18,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – максимальная температура на наружной поверхности ограждения здания в 14 ч; $T_{\text{п1}}^{\text{min}} = 15,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – минимальная температура на наружной поверхности ограждения здания в 2 ч.

Коэффициент теплоусвоения ограждения определяется по формуле

$$B = q_{\text{п}}^{\text{max}} / \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} = 13,5 / 1,35 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Объемная теплоемкость ограждения определяется по формуле

$$(c_p) = (B^2 z) / (\lambda 2\pi) = (100 \cdot 86 \cdot 400) / (0,89 \cdot 2 \cdot 3,14) = 1545 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}),$$

где $z = 86 \cdot 400$ – полный период колебаний температуры на наружной поверхности ограждения здания, с.

Коэффициент температуропроводности ограждения здания составляет

$$a = \lambda / (c_p) = 0,89 / 1 \, 545 \, 000 = 0,57 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Термическое сопротивление теплопроводности ограждения здания определяется из выражения

$$R = \delta / \lambda = 0,6 / 0,89 = 0,674 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}.$$

Тепловая инерция ограждения здания рассчитывается по формуле

$$b = \lambda (c_p) = 0,89 \cdot 1 \, 545 \, 000 = 1,375 \cdot 10^6, \text{ Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2) = 1,375 \cdot 10^3, \text{ кДж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2).$$

На рисунке 3.4.4 приведены экспериментальные распределения в летнем – жарком режиме эксплуатации здания толщиной $\delta = 0,6$ м по часам в течение суток с интервалом в один час: температур внутренней $T_{\text{вн}}$ и наружной $T_{\text{нар}}$ поверхности ограждения здания, температуры внутреннего $T_{\text{вн.в}}$ и наружного $T_{\text{нар.в}}$ воздуха, теплового потока на наружной поверхности стены ограждения здания $q_{\text{нар}}$.

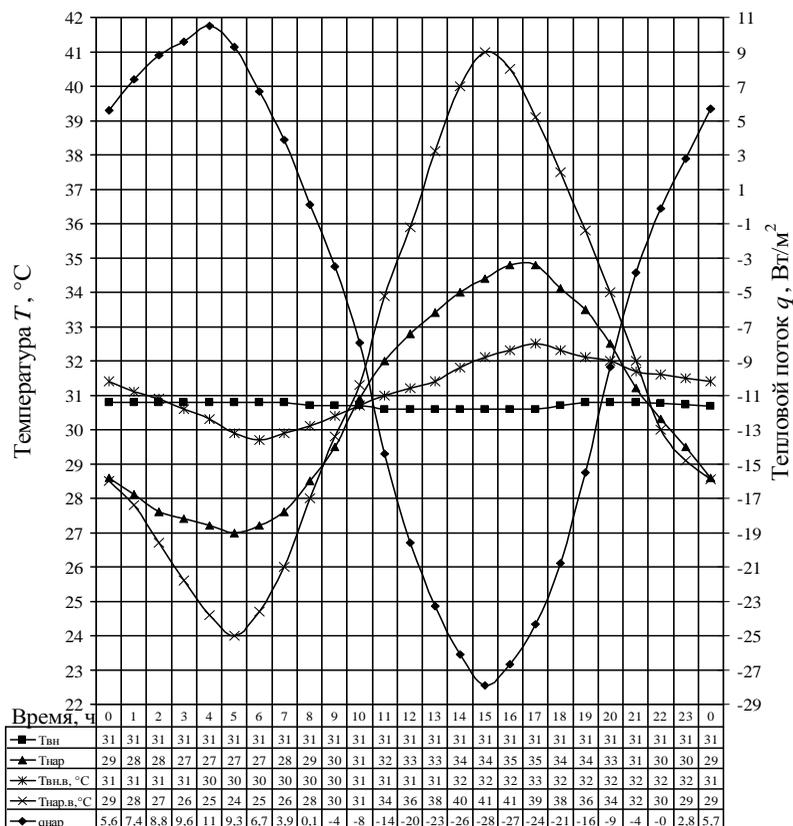


Рис. 3.4.4. Экспериментальные распределения температур и теплового потока ограждения здания из силикатного кирпича в летнем – жарком периоде эксплуатации (19–20 июля 2009 г.):

- – температура поверхности внутренней стены ограждения здания, °С;
- ▲ – температура поверхности наружной стены ограждения здания, °С;
- ✱ – температура внутреннего воздуха помещения здания, °С;
- ✕ – температура наружного воздуха, °С; ◆ – плотность теплового потока на наружной поверхности ограждения здания, Вт/м²

Максимальная плотность теплового потока, наблюдавшаяся в ночные часы, составила $q_{\text{пл}}^{\text{max}} = 10,5 \text{ Вт/м}^2$. Тепловой поток направлен от стенки к воздуху. В дневное время максимальная плотность теплового потока составила $q_{\text{пл}}^{\text{max}} = -28,2 \text{ Вт/м}^2$.

При максимальной плотности теплового потока, наблюдавшейся в ночное время, $q_{\text{пл}}^{\text{max}} = 10,5 \text{ Вт/м}^2$ температура наружной стены составляла

$t_{\text{нар}} = 27,2 \text{ }^\circ\text{C}$, температура внутренней стены $t_{\text{вн}} = 30,8 \text{ }^\circ\text{C}$, разность температур между внутренней и наружной стенками $\Delta t = 30,8 - 27,2 = 3,6 \text{ }^\circ\text{C}$, толщина однородной стены здания $\delta = 0,6 \text{ м}$.

Согласно методике, приведенной в разделе 3.2, для определения коэффициента теплопроводности λ используется температура внутренней $T_{\text{вн}}$ и наружной $T_{\text{нар}}$ поверхности ограждения здания при максимальном тепловом потоке на наружной поверхности ограждения здания $q_{\text{нар}}$.

Коэффициент теплопроводности λ определяется по формуле

$$\lambda = 0,5(q_{\text{п}}^{\text{max}}\delta)/(t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) = (0,5 \cdot 10,5 \cdot 0,6) / (30,8 - 27,2) = 0,88 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Максимальная амплитуда колебаний температурной волны $\vartheta_{\text{п}}^{\text{max}}$ на наружной поверхности ограждения здания между 5 и 17 ч 19 июля, в течение суток составила

$$\vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} = 0,5(T_{\text{п1}}^{\text{max}} - T_{\text{п1}}^{\text{min}}) = 0,5 \cdot (34,8 - 27) = 3,9 \text{ }^\circ\text{C},$$

где $T_{\text{п1}}^{\text{max}} = 34,8 \text{ }^\circ\text{C}$ – максимальная температура на наружной поверхности ограждения здания в 17 ч; $T_{\text{п1}}^{\text{min}} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ – минимальная температура на наружной поверхности ограждения здания в 5 ч.

Коэффициент теплоусвоения ограждения определяется по формуле

$$B = q_{\text{п}}^{\text{max}} / \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} = (10,5 + 28,2) / 3,9 = 9,9 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Объемная теплоемкость ограждения определяется по формуле

$$(c_p) = (B^2 z) / (\lambda 2\pi) = (98 \cdot 86 \cdot 400) / (0,88 \cdot 2 \cdot 3,14) = 1530 \text{ кДж/(м}^3\cdot\text{К)},$$

где $z = 86 \cdot 400$ – полный период колебаний температуры на наружной поверхности ограждения здания, с.

Коэффициент температуропроводности ограждения здания составляет

$$a = \lambda / (c_p) = 0,88 / 1 \, 530 \, 000 = 0,58 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Термическое сопротивление теплопроводности ограждения здания определяется из выражения

$$R = \delta / \lambda = 0,6 / 0,88 = 0,682 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}.$$

Тепловая инерция ограждения здания рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} b = \lambda (c_p) &= 0,88 \cdot 1 \, 530 \, 000 = 1,35 \cdot 10^6, \text{ Дж}^2/(\text{с}\cdot\text{м}^4\cdot\text{К}^2) = \\ &= 1,35 \cdot 10^3, \text{ кДж}^2/(\text{с}\cdot\text{м}^4\cdot\text{К}^2). \end{aligned}$$

3.4.1. ТФС ограждения здания из силикатного кирпича в зимнем, переходном и летнем режимах эксплуатации здания

ТФС ограждения здания	Зимний режим	Переходный режим	Летний режим	Жаркий режим	Справочные значения
λ , Вт/(м·К)	0,94	0,73	0,89	0,88	0,81...1,0
a , м ² /с	$0,52 \cdot 10^{-6}$	$0,44 \cdot 10^{-6}$	$0,57 \cdot 10^{-6}$	$0,58 \cdot 10^{-6}$	$0,5...0,6 \cdot 10^{-6}$
(c_p) , кДж/(м ³ ·К)	1798	1642	1545	1530	1650...1800
B , Вт/(м ² ·К)	10,6	9,3	10	9,9	–
R , (м ² ·К)/Вт	0,638	0,822	0,674	0,682	–
b , кДж ² /(с·м ⁴ ·К ²)	$1,690 \cdot 10^3$	$1,199 \cdot 10^3$	$1,375 \cdot 10^3$	$1,35 \cdot 10^3$	$1,2...1,6 \cdot 10^3$

Рассчитанные значения ТФС ограждения здания из силикатного кирпича в зимнем, переходном, летнем и летнем – жарком периодах эксплуатации: λ , a , (c_p) , B , b приведены в табл. 3.4.1.

Справочные значения теплофизических свойств выбраны из таблиц литературы [47, 108, 116, 171 – 174, 191, 192, 209, 213], а также приведены в табл. 3.4.1.

Полученные значения ТФС ограждения здания из силикатного кирпича с использованием электронного измерителя плотности тепловых потоков ИТП-МГ4 «Поток» согласуются со справочными (литературными) значениями этих коэффициентов. Расхождения рассчитанных значений ТФС силикатного кирпича с табличными составляют: коэффициент теплопроводности λ – 5%, коэффициент температуропроводности a – 4,3%, объемная теплоемкость (c_p) – 5,9%, тепловая инерция b – 4,7%.

Вывод. Предлагаемая методика определения коэффициентов теплопроводности λ , температуропроводности a , теплоусвоения B , объемной теплоемкости (c_p) , термического сопротивления R и тепловой инерции b ограждающих конструкций зданий с помощью электронного измерителя тепловых потоков ИТП-МГ4 «Поток» и ИТП «Теплограф» позволяет достаточно точно определить ТФС ограждения здания методом неразрушающего контроля по тепловым измерениям на поверхности ограждения в зимнем, переходном и летнем режимах эксплуатации здания.

Расхождение рассчитанных значений ТФС с табличными значениями не превышает 10%.

В приложении даны экспериментальные распределения температур и теплового потока ограждений зданий.

3.5. ВЫВОДЫ

1. Приведен энергоэффективный метод расчета теплофизических свойств ограждений зданий, методика и экспериментальная установка для определения теплофизических свойств ограждений зданий.

2. Энергоэффективный метод расчета теплообмена в ограждениях зданий основан на естественном перепаде температуры и теплового потока на поверхности ограждения здания без нарушения целостности ограждения здания и без использования тепловых или электрических источников теплоты.

3. Разработанный метод определения теплофизических свойств ограждений зданий по измерениям теплового потока и естественного колебания температуры на поверхности ограждения здания в течение суток методом неразрушающего контроля позволяет определять весь комплекс теплофизических свойств материала ограждения здания:

- коэффициент теплопроводности λ ;
- объемную теплоемкость (c_p);
- коэффициент температуропроводности a ;
- коэффициент теплоусвоения B ;
- тепловую инерцию b .

4. Методика комплексного определения коэффициентов теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости, термического сопротивления, теплоусвоения и тепловой инерции ограждений зданий, строительных и теплоизоляционных материалов по тепловым и температурным измерениям на поверхности ограждения здания в течение одного опыта методом неразрушающего контроля имеет значительное преимущество по сравнению с известными ранее методами и способами:

- отсутствие необходимости измерения в процессе эксперимента таких физических параметров, как коэффициент теплообмена, степень черноты, мощности нагревателя;
- нет необходимости создавать нагрев или охлаждение материала ограждения здания для проведения эксперимента;
- нет необходимости в создании чисто конвективной или чисто лучистой окружающей среды, что значительно упрощает экспериментальные установки;
- не требуется учета потерь теплоты за счет теплообмена с окружающей средой, а также контактным сопротивлением между образцом и нагревателем;
- измерения температур производятся на поверхности ограждения без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик материалов ограждений зданий.

Все графические построения и математические расчеты не представляют сложности и легко выполняются в программе Excel или других аналогичных программах ЭВМ.

Эти преимущества значительно упрощают условия проведения эксперимента (экспериментальную установку) и повышают метрологический уровень результатов измерения.

Кроме того, способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических свойств ограждений зданий позволяет легко автоматизировать теплофизический эксперимент, легко реализуется на базе микропроцессорной техники и поэтому является перспективным для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля ТФС материалов, в строительной теплотехнике и различных отраслях народного хозяйства.

5. Проведенные эксперименты методом неразрушающего теплового контроля подтверждают достаточную точность полученных ТФС различных материалов. Экспериментальными исследованиями определены ТФС ограждений зданий для панельного домостроения из силикатного и красного кирпича, а также для оконного стекла.

Полученные значения ТФС ограждений зданий с использованием электронного измерителя плотности тепловых потоков ИТП-МГ4 «Поток» и ИТП «Теплограф» согласуются с опубликованными в справочной и технической литературе значениями этих коэффициентов, что подтверждает точность метода неразрушающего контроля. Расхождение рассчитанных значений ТФС со справочными не превышает 10%.

6. Предлагаемый способ позволяет достаточно точно определить ТФС ограждения здания методом неразрушающего контроля по тепловым измерениям на поверхности ограждения в зимнем, переходном и летнем режимах эксплуатации здания. Расхождение рассчитанных значений ТФС с табличными составляют: коэффициента теплопроводности λ – 5%, коэффициента температуропроводности a – 4,3%, объемной теплоемкости (c_p) – 5,9%.

7. Предлагаемая методика позволяет достаточно точно определить ТФС оконного стекла методом неразрушающего контроля. Остекление в ограждении зданий имеет значительные потери тепловой энергии. При наличии 3-слойного остекления удельный тепловой поток относительно 2-слойного снижается на 25%, а при наличии 4-слойного остекления на 50%. При наличии 3-слойного остекления эффективный коэффициент теплопроводности относительно 2-слойного снижается на 35%, а при наличии 4-слойного остекления на 67%. При наличии 3-слойного остекления коэффициент термического сопротивления относительно 2-слойного увеличивается на 35%, а при наличии 4-слойного остекления на 66%.

8. Предлагаемая методика выгодно отличается от известных методов: энергоэффективностью, быстродействием, небольшой погрешностью, обладает новизной и оригинальностью. Кроме того, методика позволяет легко автоматизировать теплофизический эксперимент, упрощается реализация на базе микропроцессорной техники, и поэтому является перспективной для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля ТФС материалов и технической теплофизики.

4. МЕТОДЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

4.1. МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КОМПЛЕКСА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Разработан метод неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых материалов, сущность которого заключается в следующем [139].

Исследуемый образец в форме призмы квадратного сечения, длина которой во много раз (в 6 и более) превышает ширину грани, что обеспечивает условие бесконечной длины, помещают в испытательную цилиндрическую камеру установки, схема которой приведена на рис. 4.1.1.

Конструкция экспериментальной установки состоит из двух расположенных друг в друге полых цилиндров 1, служащих изотермическими поверхностями и выполненных из листового материала. В зазоре между экранами установлены коаксиальные нагреватели 2, питающиеся через стабилизатор от сети переменного тока и обеспечивающие

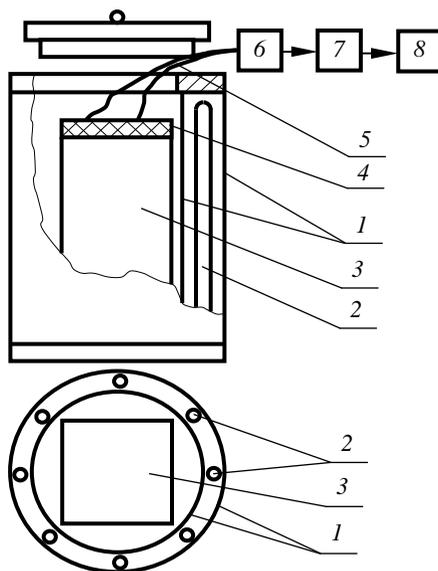


Рис. 4.1.1. Схема установки неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов

практически симметричный нагрев исследуемого образца в виде призмы квадратного сечения 3. Нагреватель представляет собой равномерно уложенную нихромовую проволоку, помещенную в коаксиально расположенных керамических трубках, выполняющих роль электрического изолятора. Снизу камера закрыта, а сверху имеется отверстие с крышкой 4, через которое образец помещают в установку. Измерение температур на ребре и в середине грани исследуемой призмы осуществляют термодатчиками 5, которые подключены к коммутатору 6 и далее через усилитель 7 и порт ввода-вывода к ЭВМ 8.

После помещения исследуемого образца в камеру установки, включают нагреватели и контролируют изменение температуры на ребре и в середине грани призмы. Расчетное соотношение для определения искомого коэффициента температуропроводности получено на основании следующих рассуждений.

При любых граничных условиях процесс симметричного нагревания призмы прямоугольного сечения (рис. 4.1.2), помещенной в цилиндрическую полость установки, может быть описан дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} \right] \quad (4.1.1)$$

с условиями однозначности (симметрии, граничными и начальными)

$$\frac{\partial T(x, 0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial T(x, 0, \tau)}{\partial y} = 0; \quad (4.1.2)$$

$$T(R, y, \tau) = T_n(y, \tau); \quad T(x, R, \tau) = T_n(x, \tau); \quad (4.1.3)$$

$$T(x, y, 0) = T_0. \quad (4.1.4)$$

Выражение (4.1.1) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} \left[1 + \frac{\frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2}}{\frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2}} \right] = \\ &= a \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} \left(1 + \frac{\text{grad } g_y}{\text{grad } g_x} \right) = a \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} (1 + \beta_y), \end{aligned} \quad (4.1.5)$$

где β_y – отношение составляющей градиента теплового потока в направлении y к составляющей градиента теплового потока в направлении x .

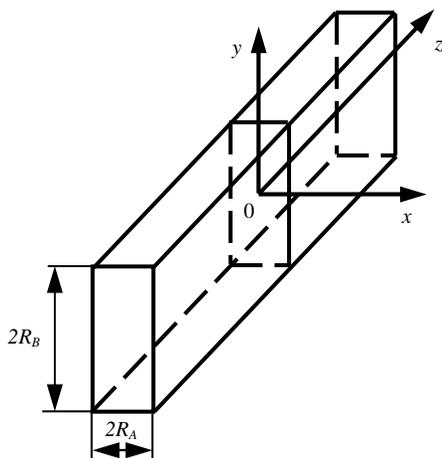


Рис. 4.1.2. Исследуемый образец из строительного материала

Если призму нагревать симметрично конвективным потоком тепла, то температурное поле по ее сечению можно определить по принципу перемножения температурных критериев [21]:

$$T(x, y, \tau) = T_C - (T_C - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} D_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{R_A}\right) \times e^{-\mu_n^2 \frac{a\tau}{R_A^2}} \sum_{m=1}^{\infty} D_m \cos\left(\mu_m \frac{y}{R_B}\right) e^{-\mu_m^2 \frac{a\tau}{R_B^2}}. \quad (4.1.6)$$

Составляющие градиента теплового потока в направлении x и y соответственно будут равны:

$$\frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2} = (T_C - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} D_n \frac{\mu_n^2}{R_A^2} \cos\left(\mu_n \frac{x}{R_A}\right) \times e^{-\mu_n^2 \frac{a\tau}{R_A^2}} \sum_{m=1}^{\infty} D_m \cos\left(\mu_m \frac{y}{R_B}\right) e^{-\mu_m^2 \frac{a\tau}{R_B^2}}; \quad (4.1.7)$$

$$\frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial y^2} = (T_C - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} D_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{R_A}\right) \times e^{-\mu_n^2 \frac{a\tau}{R_A^2}} \sum_{m=1}^{\infty} D_m \frac{\mu_m^2}{R_B^2} \cos\left(\mu_m \frac{y}{R_B}\right) e^{-\mu_m^2 \frac{a\tau}{R_B^2}}. \quad (4.1.8)$$

$$\beta_y(\text{Bi}_A; \text{Bi}_B) = \frac{\mu_{1B}^2 R_A^2}{\mu_{1A}^2 R_B^2}, \quad (4.1.9)$$

где μ_{1A} и μ_{1B} – первые характеристические числа, зависящие от чисел Био, определяемые по выражениям:

$$\text{Bi}_A = \frac{\alpha R_A}{\lambda_C}; \quad \text{Bi}_B = \frac{\alpha R_B}{\lambda_C}. \quad (4.1.10)$$

Таким образом, в регулярной стадии β_y не зависит от критерия Фурье, а является функцией Bi_A и Bi_B и отношениями между измерениями сторон призмы R_A и R_B во второй степени. При R_B , стремящаяся к R_A , призма принимает форму квадратного сечения, а значение β_y начинает стремиться к своему предельному значению, равному единице. Отношение составляющих градиента теплового потока β_y (когда $R_A = R_B$) при лучистом нагреве призмы квадратного сечения также равно единице в области упорядоченного теплового периода. Этот же результат получается при симметричном нагреве призмы квадратного сечения и суммарным потоком тепла (одновременно конвекцией и радиацией).

Следовательно, для области упорядоченного теплового периода в призме квадратного сечения бесконечной длины условия нагревания могут быть описаны следующими зависимостями:

$$\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = 2a \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2}; \quad (4.1.11)$$

$$\frac{\partial T(0, x, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (4.1.12)$$

$$T(R, y, \tau) = T_n(y, \tau); \quad (4.1.13)$$

$$T(x, y, \tau_*) = T^*(x, y), \quad (4.1.14)$$

где $\tau > \tau^*$.

В процессах распространения тепла, описываемых системой уравнений (4.1.11) – (4.1.14), искомое температурное поле является функцией многих физических параметров. Поскольку любое явление природы не зависит от выбранной системы единиц и величин измерения, то наиболее целесообразно описывать его совокупностью уравнений в безразмерном виде (4.1.15) – (4.1.18). Безразмерная форма имеет ряд преимуществ и замечательна тем, что охватывает множество явлений, подобных друг другу и, кроме того, позволяет оперировать значительно меньшим числом аргументов.

$$\frac{\partial \theta}{\partial F_0} = 2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2}; \quad (4.1.15)$$

$$\frac{\partial \theta(0; F_0)}{\partial X} = 0; \quad (4.1.16)$$

$$\theta(1; F_0) = \theta_n(F_0); \quad (4.1.17)$$

$$\theta(x, y, 0) = \theta_0. \quad (4.1.18)$$

где $\theta_n(F_0)$ – уже заданное изменение температуры поверхности тела.

Система (4.1.15) – (4.1.18) дает возможность получить решение в неявной форме [27]:

$$\theta(X; F_0) = \theta_n - \sum_{n=1}^{\infty} P(X) e^{-2\mu_n^2 F_0} \int_0^{F_0} e^{2\mu_n^2 F_0} \frac{d\theta_n}{dF_0} dF_0,$$

которое для упорядоченной части процесса ограничивается только первым членом ряда и имеет вид

$$\theta = \theta_n - P_1(X) e^{-2\mu_1^2 F_0} \int_0^{F_0} e^{2\mu_1^2 F_0} \frac{d\theta_n}{dF_0} dF_0. \quad (4.1.19)$$

Поскольку граничные условия (4.1.17) предусматривают различные способы нагревания (или охлаждения), то решение (4.1.19) следует рассматривать как универсальное в этом отношении. Кроме того, функция $P(X)$ для неограниченной пластины выражается через тригонометрическую функцию. Для призмы квадратного сечения бесконечной длины, получаемой пересечением двух неограниченных пластин, выражение (4.1.19) записывается так:

$$\theta = \theta_n - \frac{2}{\mu} \sin[\mu_1(1-X)] e^{-2\mu_1^2 F_0} \int_{F_0^*}^{F_0} e^{2\mu_1^2 F_0} \frac{d\theta_n}{dF_0} dF_0, \quad (4.1.20)$$

где F_0^* соответствует началу упорядоченного теплового режима.

Вычислив значения относительных температур соответственно для поверхности ($X = 1$) и центра бруса ($X = 0$), определим их разность $\Delta\theta$

$$\Delta\theta = \theta_n - \theta_{ц} = \pm \frac{2}{\mu_1} e^{-2\mu_1^2 F_0} \int_{F_0^*}^{F_0} e^{2\mu_1^2 F_0} \frac{d\theta_n}{dF_0} dF_0,$$

или

$$\Delta\theta e^{-2\mu_1^2 F_0} = \pm \frac{2}{\mu_1} \int_{F_0^*}^{F_0} e^{2\mu_1^2 F_0} \frac{d\theta_{\Pi}}{dF_0} dF_0.$$

Преобразуем это выражение к виду

$$\frac{d(\Delta\theta e^{2\mu_1^2 F_0})}{dF_0} = \frac{d\left(\frac{2}{\mu_1} \int_{F_0^*}^{F_0} e^{2\mu_1^2 F_0} \frac{d\theta_{\Pi}}{dF_0} dF_0\right)}{dF_0}.$$

После дифференцирования получаем

$$\frac{d\Delta\theta}{dF_0} + \Delta\theta 2\mu_1^2 = \pm \frac{2}{\mu_1} \frac{d\theta_{\Pi}}{dF_0}.$$

С учетом сокращения и разделения переменных

$$\frac{d\Delta\theta}{d\theta} \pm \frac{2}{\mu_1} \frac{d\theta_{\Pi}}{d\theta_0} = -2\mu_1^2 dF_0.$$

Интегрируя последнее выражение и обозначив тождество символом Φ , получим

$$\Phi = \ln \Delta\theta \pm \frac{2}{\mu_1} \int \frac{d\theta_{\Pi}}{d\theta} = -2\mu_1^2 F_0 + \text{const}, \quad (4.1.21)$$

или в размерной форме

$$\Phi = \ln \Delta T \pm \frac{2}{\mu_1} \int \frac{dT_R}{\Delta T} = -2\mu_1^2 \frac{a}{R^2} \tau + \text{const}, \quad (4.1.22)$$

где ΔT – положительная разность температур между поверхностью и центром тела. Знак минус перед интегралом означает процесс нагревания, а знак плюс – охлаждения; R – половина ширины грани призмы;

$\mu_1 = \frac{\pi}{2}$; $\frac{2}{\mu_1}$ – постоянное число, теоретически равное 1,27, что соот-

ветствует измерению температуры строго в центральной точке призмы квадратного сечения. При некотором смещении точки эта постоянная величина несколько уменьшается. С учетом объемности термопары можно рекомендовать $2/\mu_1 = 1,23$.

Следовательно, математические условия (4.1.15) – (4.1.18) позволяют получить решение в неявной форме с точностью до неизвестной постоянной величины (константы):

$$\Phi = \ln[T(R, y, \tau) - T(0, y, \tau)] - 1,23 \int \frac{dT(R, y, \tau)}{T(R, y, \tau) - T(0, y, \tau)} = \quad (4.1.23)$$

$$= -4,94 \frac{a}{R^2} \tau + \text{const.}$$

Если температуру измерять в конкретных парах точек I–II, III–IV, V–VI сечения призмы (рис. 4.1.4), то выражение упорядоченного теплового режима для каждой пары запишется следующим образом:

$$\Phi_{i-(i+1)} = \ln(T_{i+1} - T_i) - 1,23 \int \frac{dT_{i+1}}{T_{i+1} - T_i} = -4,94 \frac{a}{R^2} \tau + \text{const.}, \quad (4.1.24)$$

где $i = 1 \dots 5$.

Наибольший интерес представляют точки V – середина грани призмы квадратного сечения и VI – ребра призмы, так как в этом случае все измерения температур производятся на поверхности исследуемого образца и отпадает необходимость проникать с термопарой внутрь тела образца, разрушать его, что в итоге позволяет осуществить метод неразрушающего контроля, т.е. определить искомый коэффициент температуропроводности без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик исследуемых объектов.

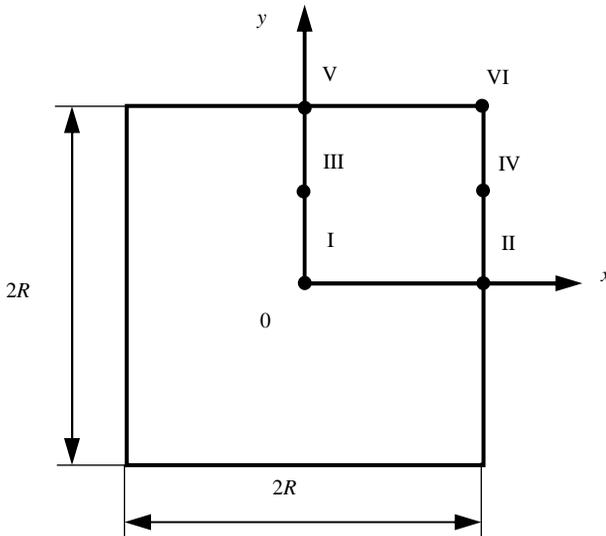


Рис. 4.1.4. Схема измерения температуры в различных точках сечения призмы

Таким образом, момент наступления упорядоченного теплового режима при симметричном нагревании призмы квадратного сечения определяют, когда изменение значения температурного комплекса

$$\Phi = \ln(T_p - T_{гр}) - 1,23 \int \frac{dT_p}{T_p - T_{гр}}$$

во времени достигнет постоянного неизменного значения, т.е. когда скорость изменения температурного комплекса $\Delta\Phi/\Delta\tau$ становится постоянной, а искомый коэффициент температуропроводности исследуемого материала определяют по формуле

$$a = \frac{\Delta\Phi R_*^2}{\Delta\tau \cdot 4,94}, \quad (4.1.25)$$

где R_* – расстояние между термопарами, измеряющими температуры ребра и середины грани призмы; $\Delta\Phi = \Phi(\tau_2) - \Phi(\tau_1)$ – изменение температурного комплекса Φ за любой интервал времени $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ после наступления упорядоченного теплового режима.

Максимальная плотность теплового потока $q_{п}^{\max}$ на поверхности призмы квадратного сечения при ее симметричном нагревании зависит от начальной температуры внутренней поверхности экспериментальной установки и нагретого в ней воздуха $T_{нагр}$, и начальной температуры середины грани $T_{гр}$ поверхности призмы.

Удельный тепловой поток q от нагретой внутренней цилиндрической поверхности экспериментальной установки и воздуха (рис. 4.1.1) к поверхности призмы квадратного сечения может быть определен графически с использованием рис. 4.1.5 или может быть рассчитан с использованием трехчлена вида:

$$q = 4,6\Delta T + 0,035\Delta T^2 + \Delta T^{1,333}, \text{ Вт/м}^2, \quad (4.1.26)$$

где $\Delta T = T_{нагр} - T_{гр}$; $T_{нагр}$ – начальная температура нагретой цилиндрической поверхности экспериментальной установки и воздуха внутри установки, может изменяться до + 100 °С; $T_{гр}$ – начальная температура середины грани на поверхности призмы квадратного сечения, может изменяться от 10 до + 30 °С.

Удельную теплоемкость исследуемого образца далее определяют на основании следующих рассуждений.

На рисунке 4.1.6. показано изменение температуры (одна температурная полуволна при нагревании и одна температурная полуволна при охлаждении) при воздействии теплового потока на поверхности призмы квадратного сечения.

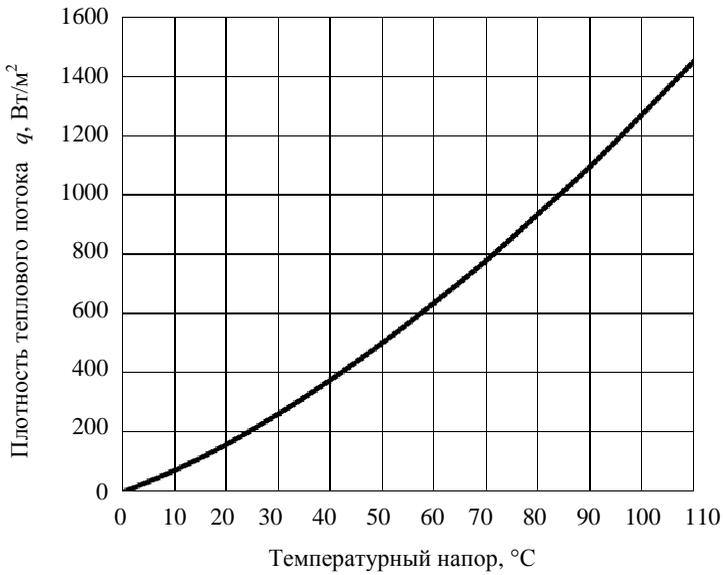


Рис. 4.1.5. Зависимость плотности теплового потока от температурного напора при нагреве исследуемого образца

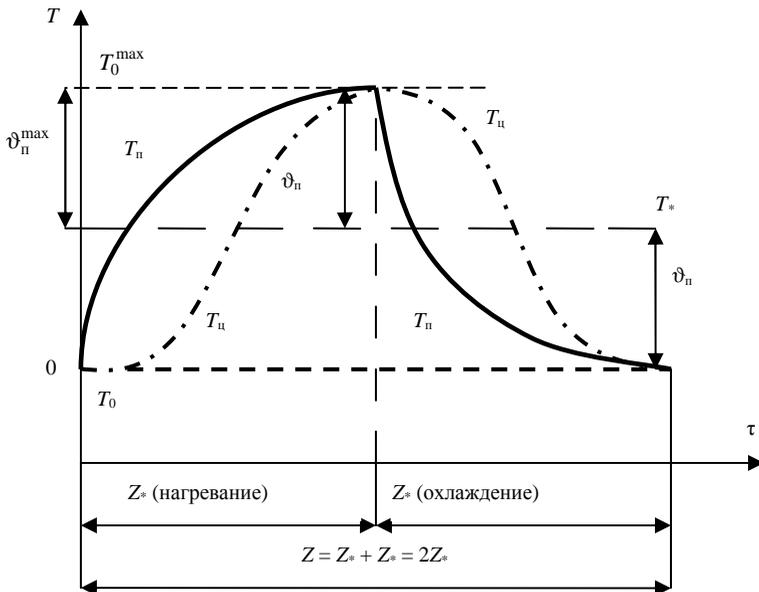


Рис. 4.1.6. Изменение температуры исследуемого образца при нагреве и последующем охлаждении

На представленном чертеже введены следующие обозначения: $T_{\text{п}}$ – температура в середине грани поверхности призмы; $T_{\text{ц}}$ – температура центра; T_0 – начальная температура призмы; T_0^{max} – максимальная температура призмы, полученная при ее нагревании до термодинамического равновесия; Z_{*} – полуволна при нагревании и охлаждении призмы; Z – полный период температурной волны на поверхности призмы; $\vartheta_{\text{п}}^{\text{max}}$ – амплитуда колебаний на поверхности или максимальное отклонение температуры на поверхности; $\vartheta_{\text{п}}$ – избыточная температура на поверхности призмы.

Согласно прототипа [21], распределение температуры в полуограниченном теле при циклическом подводе теплоты к его поверхности, максимальная плотность теплового потока на поверхности материала (массива) и его теплотехнические характеристики связаны следующей зависимостью:

$$q_{\text{п}}^{\text{max}} = \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} \sqrt{\lambda(c_p)} \omega, \quad (4.1.27)$$

где $\vartheta_{\text{п}}^{\text{max}}$ – амплитуда колебаний на поверхности (максимальное отклонение температуры на поверхности); λ – коэффициент теплопроводности материала; (c_p) – объемная теплоемкость материала; $\omega = \frac{2\pi}{Z}$ – частота колебаний; Z – полный период колебаний.

Известно [107], что $\lambda = a(c_p)$, тогда в соответствии с формулой (4.1.27) максимальная плотность теплового потока на поверхности материала в любой момент времени нагрева или охлаждения может быть записана и в виде соотношения

$$q_{\text{п}}^{\text{max}} = (c_p) \vartheta_{\text{п}}(\tau) \sqrt{a \frac{\pi}{\tau}}. \quad (4.1.28)$$

Поскольку в соответствии с рис. 4.1.6 амплитуда колебаний температурной полуволны на поверхности призмы квадратного сечения при ее нагревании и воздействии теплового потока для каждого периода времени численно равна

$$\vartheta_{\text{п}} = 0,5(T_{\text{гр}} - T_0),$$

где $T_{\text{гр}}$ – температура середины грани на поверхности призмы квадратного сечения; T_0 – начальная температура призмы квадратного сечения, °С.

Тогда объемную теплоемкость из формулы (4.1.28) можно рассчитать по соотношению

$$c_p = \frac{q_{\Pi}^{\max}}{\vartheta_{\Pi} \sqrt{\frac{a\pi}{\tau_{\text{зад1}}}}}, \quad (4.1.29)$$

где $\vartheta_{\Pi} = 0,5 [T_{\text{гр}}(\tau_{\text{зад1}}) - T_0]$ – амплитуда колебаний температурной полуволны на поверхности призмы квадратного сечения при ее нагреве; $T_{\text{гр}}(\tau_{\text{зад1}})$ – температура середины грани исследуемой призмы в заданный момент времени $\tau_{\text{зад1}}$ при наступлении упорядоченного теплового режима; T_0 – начальная температура призмы.

Определив коэффициент температуропроводности по формуле (4.1.25) и объемной теплоемкости исследуемого образца по формуле (4.1.29), коэффициент теплопроводности рассчитывают по соотношению

$$\lambda = a(c_p). \quad (4.1.30)$$

После нагрева исследуемого образца до установившегося термодинамического равновесия, снятия информации о температурно-временных изменениях в точках контроля и расчета комплекса теплофизических характеристик исследуемого материала по соотношениям (4.1.25), (4.1.29) и (4.1.30), выключают нагреватели, вынимают образец из цилиндрической камеры и охлаждают на воздухе при комнатной температуре и естественной конвекции.

Измеряют при этом также температуру на поверхности призмы в двух точках – на ребре T_p и середине грани $T_{\text{гр}}$, определяют момент наступления упорядоченного теплового режима в исследуемом образце, когда скорость изменения температурного комплекса

$$\Phi = \ln(T_{\text{гр}} - T_p) - 1,23 \int \frac{dT_p}{T_{\text{гр}} - T_p}$$

во времени достигнет постоянного неиз-

менного значения ($\Delta\Phi/\Delta\tau = \text{const}$), рассчитывают коэффициент температуропроводности, используя соотношение (4.1.25).

Максимальная плотность теплового потока q_{Π}^{\max} на поверхности призмы квадратного сечения при ее симметричном охлаждении на воздухе зависит от начальной температуры нагретой поверхности образца $T_{\text{гр}}$ и температуры воздуха $T_{\text{возд}}$.

Удельный тепловой поток q от нагретой поверхности образца (призмы квадратного сечения) к воздуху может быть определен графически с использованием рис. 4.1.7 или может быть рассчитан с использованием трехчлена вида:

$$q = 4,6\Delta T + 0,035\Delta T^2 + 1,5\Delta T^{1,333}, \text{ Вт/м}^2, \quad (4.1.31)$$

где $\Delta T = T_{гр} - T_{возд}$, $T_{гр}$ – начальная температура нагретой поверхности середины грани призмы, может изменяться до $+100\text{ }^\circ\text{C}$; $T_{возд}$ – температура воздуха, может изменяться от -10 до $+30\text{ }^\circ\text{C}$.

Поскольку в соответствии с рис. 4.1.6 амплитуда колебаний температурной полуволны на поверхности призмы квадратного сечения при ее охлаждении для каждого периода времени численно равна

$$\vartheta_n = 0,5(T_0^{\max} - T_{гр}),$$

где T_0^{\max} – максимальная начальная температура призмы квадратного сечения; $T_{гр}$ – температура середины грани на поверхности призмы квадратного сечения; то объемную теплоемкость исследуемого образца из формулы (4.1.28) можно рассчитать по соотношению

$$c_p = \frac{q_n^{\max}}{\vartheta_n \sqrt{\frac{a\pi}{\tau_{зад2}}}}, \quad (4.1.32)$$

где $\vartheta_n = 0,5[T_0^{\max} - T_{гр}(\tau_{зад2})]$ – амплитуда колебаний температурной полуволны на поверхности призмы квадратного сечения при ее охлаждении;

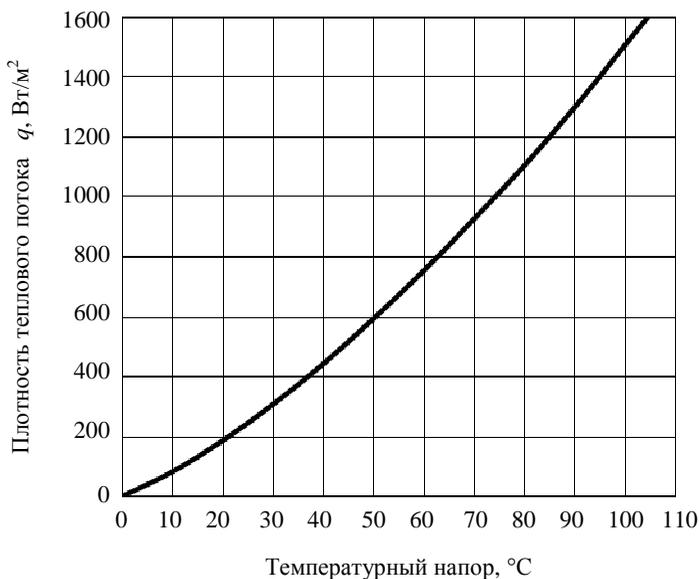


Рис. 4.1.7. Зависимость плотности теплового потока от температурного напора при охлаждении исследуемого образца

T_0^{\max} – максимальная температура призмы, полученная при ее нагревании до термодинамического равновесия; $T_{гр}(\tau_{зад2})$ – температура середины грани призмы в заданный момент времени $\tau_{зад2}$ при наступлении упорядоченного теплового режима в призме, далее, используя полученную информацию о температуропроводности и объемной теплоемкости, определяют теплопроводность исследуемого материала по соотношению (4.1.30): $\lambda = a(c_p)$.

За окончательные искомые теплофизические характеристики принимают средние значения, полученные на стадии нагрева и охлаждения исследуемого образца.

Для проверки работоспособности предлагаемого способа были проведены эксперименты с использованием установки, схема которой показана на рис. 4.1.1. Для исследования была изготовлена призма из бетона на портландцементе длиной 350 мм и шириной грани $2R = 50$ мм, с шамотным заполнителем (цемент – 400 кг/м³; тонкомолотая шамотная добавка – 80 кг/м³; шамотный песок – 740 кг/м³; шамотный щебень – 400 кг/м³; В/Ц = 0,6).

Для измерения температуры ребра и середины грани методом неразрушающего контроля на призме квадратного сечения закреплялись термопары с использованием контактного устройства. Расстояние между термопарами составило $R = 0,024$ м.

Для комплексного определения теплофизических свойств бетона установку (цилиндрическую печь) вначале прогревали до того момента, пока температура среды внутри печи $T_{ср}$ установится постоянной. Ввиду того, что боковые экраны выполнены из листового алюминия, установка выходит в рабочий режим в течение короткого времени, не более 20...30 мин, а температура среды внутри печи $T_{ср}$ составила 97 °С.

Подготовленную к опыту призму из бетона с установленными на ней двумя термопарами помещали в испытательную цилиндрическую камеру и симметрично нагревали от начальной комнатной температуры $T_0 = 23$ °С.

В таблице 4.1.1 представлены результаты экспериментальных измерений температур ребра призмы квадратного сечения T_p и середины ее грани $T_{гр}$, а также расчеты температурного комплекса Φ для каждого значения времени τ . Выполнены и расчеты коэффициента температуропроводности a бетона для каждого промежутка времени $\Delta\tau$ в течение 12 мин.

Из эксперимента и вычислений видно, что коэффициент температуропроводности бетона с шамотным заполнителем, начиная со времени $\tau = 360$ с становится равным $a = 0,494 \cdot 10^{-6}$ м²/с и повторяет свои истинные значения для каждого последующего промежутка времени $\Delta\tau$. Анализ вычислений также указывает, что до времени $\tau = 360$ с

длится начальная стадия нагрева, а затем начинается упорядоченный тепловой режим.

Полученное из опыта значение коэффициента температуропроводности $a = 0,495 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ используется в дальнейшем для расчета значений объемной теплоемкости (c_p) и теплопроводности λ бетона.

Плотность теплового потока $q_{\text{п}}^{\text{max}}$ на поверхности призмы квадратного сечения из бетона в начальном периоде нагревания возможно определить графически по рис. 4.1.5 или по формуле (4.1.26) при максимальном температурном напоре на поверхности образца, когда призму помещали в прогретую установку $\Delta T = T_{\text{ср}} - T_0 = 97 - 23 = 74 \text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты расчета объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности по температурному полю на поверхности при нагревании бетона при $T_0 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{ср}} = 97 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T = 74 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{\text{п}}^{\text{max}} = 840 \text{ Вт/м}^2$, при коэффициенте температуропроводности $a = 0,495 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, сведены в табл. 4.1.2.

Для повышения точности результатов измерения за счет уменьшения доли случайной составляющей в общей погрешности измерений был также проведен эксперимент с охлаждением бетона. Для этого призму квадратного сечения из бетона, нагретую в печи до термодинамического температурного равновесия $T_0^{\text{max}} = 94 \text{ }^\circ\text{C}$, охлаждали на воздухе при температуре $T_{\text{возд}} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ и естественной конвекции.

В таблице 4.1.3 представлены результаты экспериментального измерения температур ребра призмы $T_{\text{р}}$ и середины ее грани $T_{\text{гр}}$, а также расчеты температурного комплекса Φ для каждого значения времени τ и расчеты коэффициента температуропроводности при охлаждении бетона для каждого промежутка времени Δt в течение 20 мин. Полученное из опыта значение коэффициента температуропроводности $a = 0,465 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ использовалось для расчета значений объемной теплоемкости (c_p) и теплопроводности λ бетона.

Плотность теплового потока $q_{\text{п}}^{\text{max}}$ на поверхности призмы квадратного сечения из бетона в начальном периоде охлаждения определялась по формуле (4.1.31) при максимальном температурном напоре на поверхности, когда прогретая призма вынимается из нагретой установки для последующего охлаждения на воздухе при естественной конвекции, при этом $\Delta T = T_0^{\text{max}} - T_{\text{возд}} = 94 - 27 = 67 \text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты расчета объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности по температурному полю на поверхности призмы при охлаждении бетона для $T_0^{\text{max}} = 94 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{ж}} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T = 67 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{\text{п}}^{\text{max}} = 870 \text{ Вт/м}^2$, при коэффициенте температуропроводности $a = 0,465 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, сведены в табл. 4.1.4.

4.1.1. Расчет коэффициента температуропроводности при нагревании бетона ($R_* = 0,024$ м)

Время τ , с	T_p , °C	T_{fp} , °C	$\Delta T = T_p - T_{fp}$	$\ln \Delta T_i$	$\frac{T_i}{\Delta T} - 1$	$H_{fp} = 0,5 \left[(\Delta T_i)^{-1} + \frac{1}{\Delta T_i} \right]$	$\Delta(T_p) = (T_p)_{i+1} - (T_p)_i$	$f_i = H_{fp} \Delta(T_p)$	$F_i = F_{i-1} + f_i$	$1,23 F_i$	$\Phi = \ln \Delta T_i - 1,23 F_i$	$a \cdot 10^6 = \frac{\Delta \Phi R_*^2}{\Delta \tau} \cdot \text{м}^2/\text{с} = \frac{1}{\Delta \tau \cdot 4,94}$
90	33,5	29,5	4,0	1,386	0,250	0,209	6,5	1,359	1,359	1,672		
180	40,0	34,0	6,0	1,792	0,167	0,155	3,5	0,543	1,902	2,340	+0,120	0,720
270	43,5	36,5	7,0	1,946	0,143	0,143	2,5	0,358	2,260	2,780	-0,390	0,620
360	46,0	39,0	7,0	1,946	0,143	0,143	2,0	0,286	2,546	3,130	-0,834	0,495
450	48,0	41,0	7,0	1,946	0,143	0,150	1,4	0,210	2,756	3,390	-1,186	0,494
540	49,4	43,0	6,4	1,856	0,156	0,164	1,2	0,197	2,953	3,652	-1,534	0,491
630	50,6	44,8	5,8	1,750	0,172	0,177	1,1	0,200	3,153	3,878	-1,882	0,490
720	51,5	46,1	5,4	1,690	0,182						-2,188	

Таблица 4.1.2

Время $\tau_{\text{нал}}$, с	T_{fp} , °C	$\Phi_n = 0,5 [T_{fp}(\tau_{\text{нал}}) - T_0]$	$c_p = \frac{q_{\text{н}}^{\text{max}}}{\Phi_n \sqrt{\frac{\Delta T}{\tau_{\text{нал}}}}} \cdot \text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$	$\lambda = a(c_p) \cdot \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
180	34,0	5,5	1630	0,81
270	36,5	6,75	1627	0,81
360	39,0	8,0	1612	0,81
450	41,0	9,0	1581	0,80
540	43,0	10,0	1555	0,78

4.1.3. Расчет коэффициента температуропроводности при охлаждении бетона ($R_* = 0,024 \text{ м}$)

Время t , с	$T_{\text{гп}}$, °С	$T_{\text{п}}$, °С	$\Delta T_i = T_{\text{гп}} - T_{\text{п}}$	$\ln \Delta T_i$	$\frac{1}{\Delta T_i}$	$H_{\text{гп}} = 0,5 [(\Delta T_i)^{-1} + (\Delta T_i)^{-1}]$	$\Delta(T_{\text{п}}) = (T_{\text{п}})^{i+1} - (T_{\text{п}})^i$	$f = H_{\text{гп}}(\Delta T_{\text{п}})$	$F_i = F_{i-1} + f_i$	$1,23 F_i$	$\Phi = \ln \Delta T_i - 1,23 F_i$	$a \cdot 10^6 = \frac{\Delta \Phi R_*^2}{\Delta t \cdot 4,94}, \text{ м}^2/\text{с}$
150	83,0	76,5	5,5	1,705	0,182	0,168	3,5	0,588	0,588	1,672		
300	79,5	73,0	6,5	1,872	0,154	0,154	3,0	0,462	1,050	2,340	+1,149	0,479
450	76,5	70,0	6,5	1,872	0,154	0,154	3,0	0,462	1,512	2,780	+0,581	0,480
600	73,5	67,0	6,5	1,872	0,154	0,154	2,5	0,385	1,897	3,130	+0,012	0,4
750	71,0	64,5	6,5	1,872	0,154	0,168	2,0	0,336	2,233	3,390	-0,461	0,490
900	68,0	62,5	5,5	1,705	0,182	0,191	2,0	0,382	2,615	3,632	-1,042	0,477
1050	65,5	60,5	5,0	1,609	0,200	0,225	1,5	0,333	2,948	3,878	-1,608	0,530
1200	63,0	59,0	4,0	1,386	0,250						-2,240	

Таблица 4.1.4

Время $\tau_{\text{зап}}$, с	$T_{\text{гп}}$, °С	$\Phi_{\text{п}} = 0,5 [T_0^{\text{max}} - T_{\text{гп}}(\tau_{\text{зап}})]$	$c_{\text{п}} = \frac{q_{\text{п}}^{\text{max}}}{\Phi_{\text{п}} \sqrt{\tau_{\text{зап}}}}, \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$	$\lambda = c(c_{\text{п}}), \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
150	83,0	5,50	1617	0,75
300	79,5	7,25	1726	0,80
450	76,5	8,75	1752	0,81
600	73,5	10,25	1727	0,80
750	71,0	11,5	1723	0,80

Из полученных экспериментальных данных следует, что относительная погрешность измерения коэффициента температуропроводности, объемной теплоемкости и теплопроводности разработанного способа неразрушающего контроля, использующая упорядоченный тепловой режим в призме квадратного сечения, составляет не более 5%, тогда как в аналогах и способе-прототипе относительная погрешность составляет не менее 8...10%.

Большим преимуществом разработанного способа неразрушающего контроля для комплексного определения коэффициентов температуропроводности, теплопроводности и объемной теплоемкости материалов по температурным измерениям на поверхности призмы квадратного сечения, по сравнению с известными являются:

- отсутствие необходимости в измерении в процессе эксперимента таких физических величин, как коэффициент теплообмена, степень черноты мощности нагревателя;
- возможность проведения теплофизического эксперимента без создания чисто конвективного или лучистого теплообмена с окружающей средой, что значительно упрощает экспериментальные установки;
- проведение эксперимента и расчет искомых ТФХ без учета потерь тепла за счет теплообмена с окружающей средой, а также контактным сопротивлением между образцом и нагревателем;
- возможность определения искомых ТФХ образцов без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик исследуемых образцов, т.е. неразрушающий контроль.

Эти преимущества заявленного технического решения значительно упрощают условия проведения эксперимента (экспериментальную установку) и повышают метрологический уровень результатов измерения.

Кроме того, предлагаемый способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых материалов позволяет легко автоматизировать теплофизический эксперимент, легко реализуется на базе микропроцессорной техники и поэтому является перспективным для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля ТФХ материалов.

Таким образом, разработанный способ неразрушающего контроля для комплексного определения коэффициентов температуропроводности, теплопроводности и объемной теплоемкости материалов по температурным измерениям на поверхности призмы квадратного сечения имеет ряд существенных преимуществ перед известными способами указанного назначения, что несомненно позволит использовать его в практике теплофизических измерений, в строительной теплотехнике и различных отраслях народного хозяйства.

4.2. МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СИММЕТРИЧНОМ НАГРЕВЕ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

Разработан способ неразрушающего контроля температуропроводности строительных материалов при симметричном нагреве исследуемых образцов, сущность которого заключается в следующем [140].

Исследуемый образец в форме призмы квадратного сечения, длина которой в 6 и более раз превышает ширину грани, что обеспечивает условие бесконечной длины, помещают в испытательную цилиндрическую камеру установки, схема которой приведена на рис. 4.1.1.

После помещения исследуемого образца в камеру установки, включают нагреватели и контролируют изменение температуры на ребре и в середине грани призмы. Расчетное соотношение для определения искомого коэффициента температуропроводности получено на основании следующих рассуждений.

В разделе 4.1 было получено решение краевой задачи при симметричном нагреве исследуемого образца в виде призмы в неявной форме с точностью до неизвестной постоянной величины в следующем виде:

$$\begin{aligned}\Phi &= \ln[T(R, y, \tau) - T(0, y, \tau)] - 1,23 \int \frac{dT(R, y, \tau)}{T(R, y, \tau) - T(0, y, \tau)} = \\ &= -4,94 \frac{a}{R^2} \tau + \text{const.}\end{aligned}\quad (4.2.1)$$

Если температуру измерять в конкретных парах точек I–II, III–IV, V–VI сечения призмы (рис. 4.1.4), то выражение упорядоченного теплового режима для каждой пары запишется следующим образом:

$$\Phi_{i-(i+1)} = \ln(T_{i+1} - T_i) - 1,23 \int \frac{dT_{i+1}}{T_{i+1} - T_i} = -4,94 \frac{a}{R^2} \tau + \text{const}, \quad (4.2.2)$$

где $i = 1 \dots 5$.

Наибольший интерес представляют точки V – середина грани призмы квадратного сечения и VI – ребра призмы, так как в этом случае все измерения температур производятся на поверхности исследуемого образца и отпадает необходимость проникать с термопарой внутрь тела образца, разрушать его, что в итоге позволяет осуществить метод неразрушающего контроля, т.е. определить искомый коэффициент температуропроводности без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик исследуемых объектов.

Таким образом, измерив температуры в два заранее заданных момента времени τ_1 и τ_2 , после наступления упорядоченного теплового режима из соотношения (4.2.2) получается формула для определения коэффициента температуропроводности в следующем виде:

$$a = \frac{R^2}{4,94} \frac{\Phi(\tau_2) - \Phi(\tau_1)}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (4.2.3)$$

где

$$\Phi(\tau_i) = \ln[T(R, \tau_i) - T(0, \tau_i)] - 1,23 \int \frac{dT(R, \tau_i)}{T(R, \tau_i) - T(0, \tau_i)}, \quad i = 1, 2,$$

$T(0, \tau_i)$ и $T(R, \tau_i)$ – температуры соответственно на ребре и в середине грани исследуемой призмы в заданные моменты времени τ_1 и τ_2 .

Для определения начала регулярной части теплового режима используют отношение

$$\psi = \frac{T_{\text{гр}} - T_0}{T_{\text{реб}} - T_0}, \quad (4.2.4)$$

где $T_{\text{гр}}$ – температура грани призмы; $T_{\text{реб}}$ – температура ребра призмы; T_0 – начальная температура исследуемого образца.

Данный динамический критерий был получен из закономерности изменения ψ в зависимости от критерия теплообмена Bi для тел различной формы. Графики функций $\psi = f(Bi)$ для неограниченной пластины, бесконечного цилиндра, призмы квадратного сечения и шара показаны на рис. 4.2.1.

Из графика функции $\psi = f(Bi)$ на рис. 4.2.1 видно, что для призмы квадратного сечения наступление упорядоченного теплового режима гарантировано с погрешностью порядка 1% при $\psi = 0,78$.

Полученная закономерность является универсальной, т.е. может быть использована при различных граничных условиях и позволяет установить наступление упорядоченного теплового режима при симметричном нагревании призмы квадратного сечения по температурам ребра, центра грани и начальной температуре без определения величины критерия Фурье.

После нагрева исследуемого образца до установившегося термодинамического равновесия, снятия информации о температурно-временных изменениях в точках контроля и расчета искомой температуропроводности материала по соотношению (4.2.3) выключают нагреватели, вынимают образец из цилиндрической камеры и охлаждают

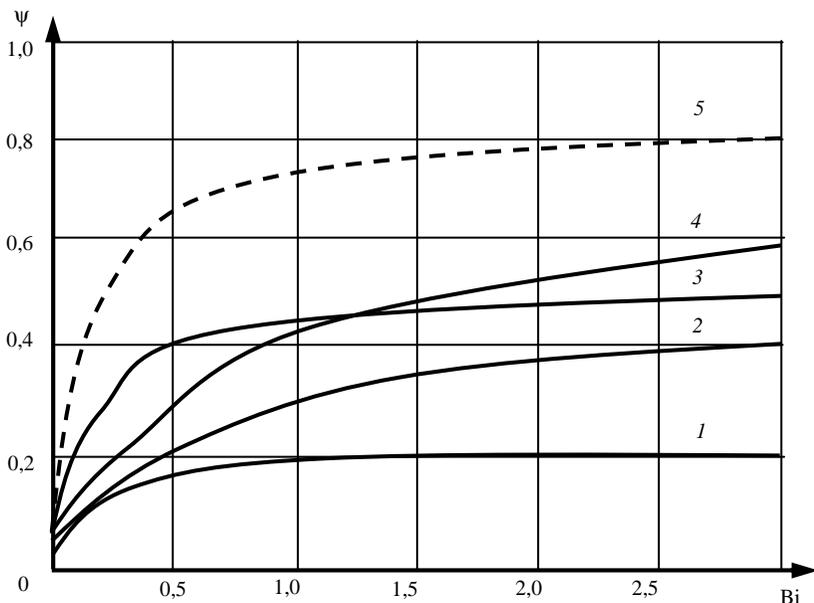


Рис. 4.2.1. График зависимости отношения ψ от критерия теплообмена Bi для тел различной формы:

1 – неограниченная пластина; 2 – бесконечный цилиндр;
3 – призма квадратного сечения; 4 – шар; 5 – призма квадратного сечения

на воздухе при комнатной температуре и естественной конвекции. Из экспериментальных данных и вычислений видно (рис. 4.2.2), что при охлаждении призмы квадратного сечения с определенного момента времени τ^* динамический критерий, определяемый по соотношению

$$\psi = \frac{T_0^{\max} - T_{гр}}{T_0^{\max} - T_{реб}},$$

где T_0^{\max} – максимальная температура призмы, полученная при ее нагревании до термодинамического равновесия, т.е. температура, с которой начинают охлаждение исследуемого образца, становится постоянным и равным для призмы $\psi = 0,78$, после чего начинается упорядоченный тепловой режим и температурный комплекс

$$\Phi(\tau_i) = \ln[T(0, \tau_i) - T(R, \tau_i)] - 1,23 \int \frac{dT(R, \tau_i)}{T(0, \tau_i) - T(R, \tau_i)}, \quad i = 1, 2$$

выходит на прямую линию, а угловой коэффициент $\Delta\Phi/\Delta\tau$ построенной прямой линии становится постоянным. Таким образом, определив

изменение температурного комплекса $\Delta\Phi$ за заданный интервал времени $\Delta\tau$ после наступления упорядоченного теплового режима, по формуле (4.2.3) рассчитывают коэффициент теплопроводности исследуемого образца при его охлаждении. За окончательное значение коэффициента теплопроводности принимают среднearифметическое результатов измерения на стадии нагрева и охлаждения, что существенно повышает достоверность результатов и снижает случайную составляющую общей погрешности измерения искомой теплопроводности.

В таблице 4.2.1 представлено экспериментальное распределение температур при нагревании призмы из оргстекла и контроле температур на ребре и середине грани призмы (сечение V–VI), а также результаты расчетов температурных комплексов Φ_{V-VI} и теплопроводности.

В таблице 4.2.2 представлены экспериментальные данные распределения температуры при охлаждении призмы из оргстекла и контроле температур также в сечении V–VI, а также результаты температурных комплексов Φ_{V-VI} и теплопроводности.

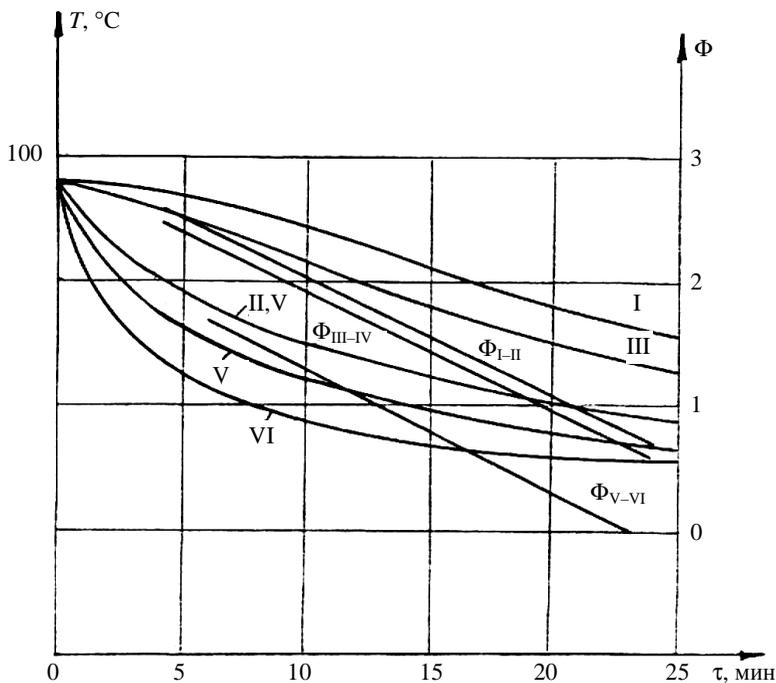


Рис. 4.2.2. График определения упорядоченного теплового режима

Таблица 4.2.1

Время τ, мин	T_{Vi} , °C	T_{Vj} , °C	$\Delta T_i =$ $T_{Vi} -$ T_{Vj}	$\ln \Delta T_i$	$(\Delta T_i)^{-1}$	$H_{sp} =$ $0,5 [(\Delta T_i)^{-1} +$ $+(\Delta T_{i+1})^{-1}]$	$\frac{\Delta(T_p)}{(T_p)_{i+1} -$ $(T_p)_i}$	$f_i =$ $H_{sp} \times$ $\times \Delta(T_p)$	$F_i =$ $F_{i-1} +$ $+ f_i$	$1,23 F_i$	$\Phi = \ln \Delta T_i -$ $- 1,23 F_i$	$a \cdot 10^6,$ m^2/c	Относительная погрешность a , %
20	61,5	47,0	14,5	2,674	0,069	0,067	8,5	0,568					
40	70,0	54,5	15,5	2,741	0,064	0,067	5,0	0,334	0,568	0,699	2,042	0,120	4,3
60	75,0	60,5	14,5	2,674	0,069	0,070	5,0	0,351	0,902	1,110	1,565	0,116	0,8
80	80,0	66,0	14,0	2,639	0,071	0,074	4,0	0,297	1,253	1,541	1,098	0,119	3,4
100	84,0	71,0	13,0	2,565	0,077	0,080	3,5	0,280	1,550	1,907	0,659	0,117	1,7
120	87,5	75,0	12,5	2,526	0,089	0,083	3,5	0,291	1,830	2,251	0,275	0,118	2,6
140	91,0	79,0	12,0	2,484	0,083	0,087	3,0	0,261	2,121	2,609	-0,124	0,119	3,4
160	94,0	83,0	11,0	2,398	0,091				2,382	2,930	-0,532		

Таблица 4.2.2

Время τ, мин	T_{Vi} , °C	T_{Vj} , °C	$\Delta T_i =$ $T_{Vi} -$ T_{Vj}	$\ln \Delta T_i$	$\frac{1}{\Delta T_i}$	$H_{sp} =$ $0,5 [(\Delta T_i)^{-1} +$ $+(\Delta T_{i+1})^{-1}]$	$\frac{\Delta(T_p)}{(T_p)_{i+1} -$ $(T_p)_i}$	$f_i =$ $H_{sp} \times$ $\times \Delta(T_p)$	$F_i =$ $F_{i-1} +$ $+ f_i$	$1,23 F_i$	$\Phi = \ln \Delta T_i -$ $- 1,23 F_i$	$a \cdot 10^6 =$ $\frac{\Delta \Phi R_{*}^2}{\Delta t \cdot 4,94}, m^2/c$	Относительная погрешность a , %
3	82,0	71,0	11,0	2,398	0,091	0,084	8	0,672					
6	76,0	63,0	13,0	2,565	0,077	0,080	3	0,240	0,672	0,827	1,738	0,117	1,7
9	72,0	60,0	12,0	2,485	0,083	0,087	2,5	0,218	0,912	1,220	1,363	0,118	2,6
12	68,5	57,5	11,0	2,398	0,091	0,091	2,5	0,228	1,130	1,390	1,008	0,116	0,8
15	65,0	55,0	10,0	2,303	0,100	0,105	2	0,210	1,358	1,670	0,633	0,119	3,4
18	62,0	53,0	9,0	2,197	0,111	0,111	2	0,222	1,568	1,930	0,268	0,120	4,3
21	60,0	51,0	9,0	2,197	0,111	0,111	2	0,222	1,790	2,200	0,005	0,119	3,4
24	58,0	49,0	9,0	2,197	0,111				2,012	2,475	-0,278		

Из полученных экспериментальных данных следует, что относительная погрешность измерения коэффициента температуропроводности разработанным способом неразрушающего контроля, использующим упорядоченный тепловой режим в призме квадратного сечения, составляет не более 5%, тогда как в аналогах и способе-прототипе относительная погрешность определения искомой температуропроводности составляет не менее 8...10%.

Большим преимуществом разработанного способа по сравнению с известными является отсутствие необходимости в измерении в процессе эксперимента таких физических величин, как коэффициент теплообмена, температура окружающей среды, степень черноты и т.д. Кроме того, разработанный способ позволяет проводить измерения без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик исследуемых образцов.

В разработанном методе отпадает необходимость в создании чисто конвективного или чисто лучистого теплообмена, что значительно упрощает условия проведения эксперимента (экспериментальную установку) и повышает метрологический уровень результатов измерения.

Таким образом, разработанный метод неразрушающего контроля температуропроводности твердых материалов имеет ряд существенных преимуществ перед известными способами указанного назначения, что, несомненно, позволит использовать его в практике теплофизических измерений и различных отраслях народного хозяйства.

4.3. СВЧ-МЕТОД И СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В целях экономии топливно-энергетических ресурсов при резко возросшей стоимости энергоносителей в настоящее время в строительстве в соответствии с новыми нормативами предъявляются более высокие требования к теплозащитным характеристикам ограждающих конструкций зданий и сооружений. Так, для средней полосы России значение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий и сооружений должно быть увеличено не менее чем в два раза по сравнению со значением по старым нормативным требованиям (Постановление Министерства строительства Российской Федерации № 18-81 от 11.08.95 о принятии изменения № 3 СНиП II-3-78 «Строительная теплотехника»). Для обеспечения этих условий энергосбережения в строительстве возникла необходимость в создании и применении новых строительных материалов, обладающих более высокими значениями сопротивления теплопередаче, т.е. более низкими коэффициентами теплопроводности и теплоотдачи.

При синтезе таких строительных материалов необходимо иметь информацию об их теплофизических характеристиках (ТФХ), так как ТФХ в этом случае являются параметрами, определяющими теплозащитные свойства и качество строительных конструкций и изделий [169]. Для получения информации о ТФХ требуется разработка новых методов и измерительных средств, позволяющих с необходимой для строительной теплотехники точностью контролировать искомые свойства. Как показал информационный поиск и анализ, в настоящее время в отечественной и зарубежной строительной отрасли таких средств измерения и контроля крайне мало, поэтому разработка новых методов и реализующих их систем оперативного контроля ТФХ строительных материалов является актуальной задачей строительной теплотехники, решение которой позволит осуществить экономию топливно-энергетических ресурсов.

Разработан новый метод оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов, сущность которого состоит в следующем [138].

Исследуемый образец 1 (рис. 4.3.1) выполняют в виде призмы квадратного сечения (параллелепипеда) с теплоизолированными боковыми гранями (теплоизолятор 2) и открытыми торцевыми гранями, через которые осуществляют симметричный нагрев образца воздействием СВЧ электромагнитного поля от излучающих антенн 3 и 4 (переменно-фазовых многощелевых излучателей).

При этом контролируют изменение температуры на поверхностях открытых противоположных граней призмы с помощью термодпар Тп1 и Тп2, контролируют температуру также в середине призмы термодпарой Тп3, а контроль температуры окружающей среды осуществляют термодпарой Тп4. Термодпары Тп1 – Тп3 через коммутатор 6, нормирующий прецизионный усилитель 7 и АЦП 8 подключают к микропроцессору 9.

Увеличивая мощность СВЧ-генератора, осуществляют контроль изменения температур на торцевых гранях и в середине исследуемого образца и определяют момент, при котором контролируемая в указанных точках образца температура достигнет неизменного установившегося значения $T_{уст1}$, $T_{уст2}$, $T_{уст3}$ (рис. 4.3.2). В этом случае наступает тепловой баланс между количеством тепла, выделяемом в исследуемом образце при воздействии СВЧ-излучения, и количеством тепла, отводимым в окружающую среду через свободные (неизолированные) торцевые грани призмы. При этом прекращается разогрев образца, т.е. в образце устанавливается стационарный одномерный тепловой поток. Для установившихся значений температур в контролируемых точках в i -й и j -й моменты времени выполняются условия:

$$\begin{cases} \Delta T_i = T(\tau_{i+1}) - T(\tau_i) \leq \varepsilon & \text{для } T_{уст1}(T_{уст2}); \\ \Delta T_j = T(\tau_{j+1}) - T(\tau_j) \leq \varepsilon, \text{ где } \varepsilon = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C} & \text{для } T_{уст3}. \end{cases} \quad (4.3.1)$$

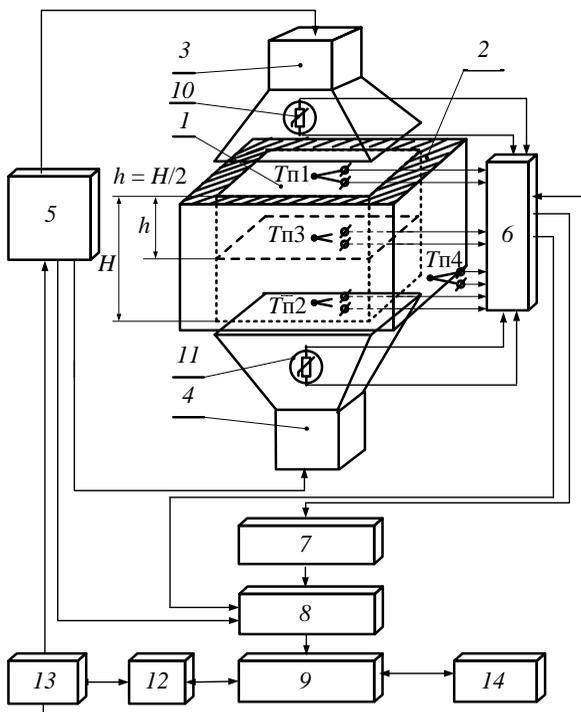


Рис. 4.3.1. Структурная схема системы, реализующей СВЧ-метод контроля теплофизических характеристик материалов

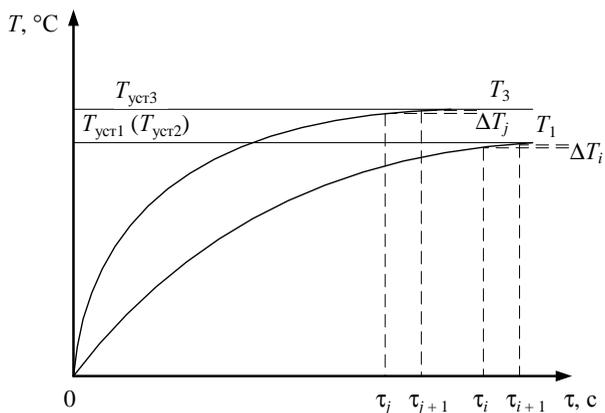


Рис. 4.3.2. Определение момента наступления стационарного теплового режима при симметричном СВЧ-нагреве исследуемых образцов

Измеренные термопарами Тп1 – Тп3 значения установившейся температуры заносят в микропроцессор. Измеряют с помощью термопары Тп4 температуру окружающей среды, определяют также мощность СВЧ-генератора, при которой в исследуемом образце установился стационарный тепловой поток, и полученную информацию фиксируют в оперативной памяти микропроцессора 9.

Поскольку при нагреве образца часть энергии СВЧ-излучения отражается от поверхностей торцевых граней призмы, то с помощью СВЧ-ваттметров 10 и 11, помещенных в антеннах 3 и 4, измеряют мощность энергии отраженного излучения и полученную информацию через коммутатор 6 и аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) 8 заносят также в микропроцессор 9. Микропроцессор соединен с СВЧ-генератором 5 через цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) 12 и порт ввода-вывода 13. Данные эксперимента выводятся на индикатор 14. В микропроцессоре с использованием полученной в ходе теплофизического эксперимента измерительной информации определяют искомые теплофизические характеристики исследуемого материала по математическим соотношениям, полученным на основании следующих теоретических рассуждений.

Строительные материалы представляют собой сложные диэлектрические гетерогенные среды с капиллярно-пористой структурой. В сухом состоянии они неоднородные диэлектрики, а во влажном – полупроводящие среды. В реальных природных условиях эти среды постоянно контактируют с меняющимся температурным полем и водой в различных ее агрегатных состояниях. Вода при этом является переменным компонентом и определяет диэлектрические свойства таких сред.

В общем случае, при воздействии СВЧ-излучения строительные материалы нагреваются неравномерно по всему объему образца, быстрее повышается температура областей с более высоким содержанием воды.

Для упрощения нахождения искомых зависимостей сделаем некоторые допущения. Будем считать, что в эффективной площади раскрытого рупорный излучатель генерирует плоскую электромагнитную волну. Нагреваемый образец состоит из однородного материала с равномерным распределением влаги по объему.

В этом случае, без учета влияния сушки, уравнение для распределения температуры в однородном материале, облучаемом плоской электромагнитной (ЭМ) волной при ее нормальном падении на полупространство, имеет вид [113]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\rho(x)}{c_p}, \quad (4.3.2)$$

где T – локальная температура образца от поверхности в глубь материала; x – координата; a_T – коэффициент температуропроводности ма-

териала образца; c_p – теплоемкость материала образца; ρ – плотность материала образца; τ – время облучения образца.

Краевые условия для данного уравнения имеют вид:

$$T = T_0 \quad \text{при } \tau = 0; \quad (4.3.3)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha(T|_{x=0} - T_4), \quad (4.3.4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала образца; α – коэффициент теплоотдачи; T_4 – температура окружающей среды.

В результате одностороннего теплового воздействия электромагнитной (ЭМ) волны на образец удельная мощность выделяемой в нем энергии в соответствии с [113] будет определяться соотношением:

$$p_1(x) = 2\beta p_x(1 - \gamma) \exp(-2\beta x), \quad (4.3.5)$$

где x – координата в глубину образца; β – коэффициент затухания ЭМ-волны; γ – коэффициент отражения ЭМ-волны; p_x – плотность потока падающей на образец СВЧ-энергии, при которой наступает тепловой баланс.

Интенсивность процессов затухания и отражения ЭМ-волны зависит от влагосодержания материала образца, что обусловлено связью этих процессов от диэлектрических свойств материала. Эта связь из [9] определяется следующими соотношениями:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_\Gamma} \sqrt{\frac{\epsilon'_{\text{см}} \mu}{2} \left(\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta} - 1 \right)}, \quad (4.3.6)$$

$$\gamma = \frac{\left(1 - \sqrt{\epsilon' - j\epsilon''} \right)^2}{\left(1 - \sqrt{\epsilon' + j\epsilon''} \right)^2}, \quad (4.3.7)$$

где ϵ' и ϵ'' – соответственно действительная и комплексная составляющие диэлектрической проницаемости; $\text{tg} \delta = \epsilon''/\epsilon'$ – тангенс угла диэлектрических потерь; μ – магнитная проницаемость; λ_Γ – длина ЭМ-волны.

Для всех материалов диэлектрическая проницаемость является функцией влажности, температуры, химического состава, структурной особенности и других факторов.

Зависимость диэлектрических свойств материала от влажности объясняется одним из уникальных свойств воды – аномально высокой диэлектрической проницаемостью, вызванной тем, что оси O – H в молекуле воды имеют угол, близкий к 105°. Эта особенность, обусловленная законами квантовой механики, приводит к тому, что даже в от-

сутствие внешнего электрического поля молекула воды обладает собственным дипольным моментом.

В процессе воздействия электромагнитного поля на воду происходит ориентация полярных молекул. При дипольной поляризации молекула поворачивается как единое целое, поэтому на процесс поляризации влияют энергия связи воды со скелетом и температура. Вращение молекулы отстает от вращающего момента, вызванного переменным электромагнитным полем, за счет сил трения, уменьшающих также и амплитуду результирующей поляризации. Данное уменьшение характеризуется временем релаксации.

При симметричном нагреве двух противоположных граней призмы толщиной H , суммарная удельная мощность выделяемой в образце энергии в соответствии с [113] и формулой (4.3.5) будет равна

$$p_2(x) = 2\beta p_x(1 - \gamma) \exp(-2\beta x) + 2\beta p_x(1 - \gamma) \exp(2\beta(H - x)). \quad (4.3.8)$$

Количество тепла, поглощаемое образцом в единицу времени, определяется соотношением

$$Q_x = \int_0^H p_2(x) dx. \quad (4.3.9)$$

Поглощаемое тепло приводит к нагреву образца и частично рассеивается в окружающую среду в процессе теплоотдачи через свободные от изоляции грани, в результате чего создается от середины призмы к граням в направлении нормали к этим граням одномерный тепловой поток плотностью $q = Q_x/S_2$, где $S_2 = 2S_1$ – суммарная площадь свободных граней, S_1 – площадь одной грани.

Варьируя мощностью электромагнитного СВЧ-излучения, определяют такой тепловой (энергетический) режим, при котором выделяемое в образце тепло полностью расходуется в теплообмене с окружающей средой и не приводит к дальнейшему разогреву образца, т.е. в исследуемом образце устанавливается стационарный тепловой поток.

В режиме стационарного теплового потока коэффициент теплоотдачи исследуемого материала в соответствии с [116] определяется выражением

$$\alpha = \frac{Q_x}{S_2 \Delta T_1} = \frac{Q_x}{S_2 (T_{\text{ср}} - T_4)}, \quad (4.3.10)$$

где Q_x – количество тепла, прошедшее через поверхность площадью S_2 ; ΔT_1 – разность между температурой окружающей среды T_4 и средней температурой поверхностей торцевых граней $T_{\text{ср}}$, определяемой как $T_{\text{ср}} = (T_1 + T_2)/2$.

Поскольку часть СВЧ-излучения отражается от поверхности грани при нагреве образца и эти потери $Q_{\text{пот}}$ фиксируются СВЧ-ваттметрами, то для получения более точного результата измерения коэффициента теплоотдачи исследуемого образца целесообразно использовать следующую формулу:

$$\alpha = \frac{Q_x - Q_{\text{пот}}}{S_2 \Delta T_1}, \quad (4.3.11)$$

где $Q_{\text{пот}}$ – суммарная энергия СВЧ-излучения, отраженного от поверхностей торцевых граней призмы, определяемая как $Q_{\text{пот}} = Q_{\text{пот}}^1 + Q_{\text{пот}}^2$, $Q_{\text{пот}}^1$ – потери с первой неизолированной грани, $Q_{\text{пот}}^2$ – потери со второй неизолированной грани.

Усреднение значения температуры в формуле (4.3.10) позволяет уменьшить долю случайной составляющей общей погрешности определения искомых теплофизических характеристик.

Искомый коэффициент теплопроводности исследуемого материала при таком тепловом режиме и условиях проведения эксперимента в соответствии с [116] определяется из уравнения

$$\lambda = -\frac{q}{\text{grad } T}, \quad (4.3.12)$$

где $\text{grad } T$ – градиент температуры в исследуемом образце, т.е. изменение температуры на единицу длины в направлении теплового потока в образце.

В данном случае $\text{grad } T = \Delta T_2 / h$, где $\Delta T_2 = T_3 - T_{\text{ср}}$ – разность между температурой в среднем сечении образца (где начинается тепловой поток) и усредненной температурой поверхностей торцевых граней, через которые происходит теплоотдача; h – расстояние между свободной поверхностью грани призмы и ее средним сечением (серединой).

Для проверки работоспособности предложенного метода и реализующей его микропроцессорной системы оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов были проведены эксперименты на образцах в виде куба толщиной $H = 10$ см, изготовленных из керамзитного бетона, силикатного и красного кирпича. Симметричный нагрев образца осуществлялся при температуре окружающей среды 20 °С.

В таблицах 4.3.1, 4.3.2 и 4.3.3 приведены данные экспериментов соответственно для керамзитного бетона, силикатного и красного кирпича.

Таблица 4.3.1

$T_{\text{пр}}, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_1, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_2, ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{с}}, \text{Вт}$	$Q_{\text{х}} - Q_{\text{лог}}, \text{Вт}$	$\alpha_{\text{маж}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$\lambda_{\text{маж}}, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$\alpha_{\text{справ}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$\lambda_{\text{справ}}, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$ \delta \alpha , \%$	$ \delta \lambda , \%$
27,4	33,5	7,4	6,1	1,34	0,91	6,15	0,373	6,50	0,356	5,41	4,76
27,4	33,6	7,4	6,2	1,36	0,93	6,28	0,375	6,50	0,356	3,33	5,34
27,6	33,9	7,6	6,3	1,38	0,93	6,12	0,369	6,50	0,356	5,87	3,67
27,5	33,7	7,5	6,2	1,37	0,93	6,20	0,375	6,50	0,356	4,62	5,34
27,5	33,8	7,5	6,3	1,36	0,94	6,26	0,373	6,50	0,356	3,59	4,78

Таблица 4.3.2

$T_{\text{пр}}, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_1, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_2, ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{с}}, \text{Вт}$	$Q_{\text{х}} - Q_{\text{лог}}, \text{Вт}$	$\alpha_{\text{маж}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$\lambda_{\text{маж}}, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$\alpha_{\text{справ}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$\lambda_{\text{справ}}, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$ \delta \alpha , \%$	$ \delta \lambda , \%$
29,7	36,3	9,7	6,6	2,28	1,78	9,18	0,674	9,60	0,715	4,42	5,70
29,9	36,4	9,9	6,5	2,29	1,80	9,14	0,687	9,60	0,715	4,82	3,91
29,6	36,1	9,6	6,5	2,27	1,76	9,12	0,682	9,60	0,715	5,01	4,59
29,7	36,2	9,7	6,5	2,26	1,78	9,22	0,679	9,60	0,715	3,93	4,98
29,5	36,0	9,5	6,5	2,23	1,76	9,26	0,677	9,60	0,715	3,51	5,33

Таблица 4.3.3

$T_{\text{пр}}, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_1, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_2, ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{с}}, \text{Вт}$	$Q_{\text{х}} - Q_{\text{лог}}, \text{Вт}$	$\alpha_{\text{маж}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$\lambda_{\text{маж}}, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$\alpha_{\text{справ}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$\lambda_{\text{справ}}, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$ \delta \alpha , \%$	$ \delta \lambda , \%$
29,2	35,6	9,2	6,4	2,05	1,63	8,86	0,637	8,4	0,670	5,46	4,97
29,3	35,6	9,3	6,3	2,04	1,61	8,65	0,639	8,4	0,670	3,05	4,64
29,4	35,7	9,4	6,3	2,08	1,62	8,66	0,638	8,4	0,670	3,13	4,81
29,2	35,5	9,2	6,3	2,07	1,60	8,74	0,630	8,4	0,670	4,09	5,98
29,6	35,6	9,6	6,0	2,15	1,68	8,75	0,700	8,4	0,670	4,17	4,48

В разработанном методе и реализующей его системе использование для нагрева образца энергии СВЧ-излучения позволяет на порядок уменьшить время эксперимента по сравнению с известными методами и средствами данного назначения. Кроме того, разработанный метод позволяет повысить точность результатов измерений за счет устранения влияния состояния поверхности исследуемых образцов (шероховатость, степень черноты) и тепловых потерь с поверхности исследуемого образца, а также усреднения значений измеренных температур.

Кроме того, метод, основанный на симметричном нагреве образца, дает меньшее значение относительной погрешности измерений, что связано с большей равномерностью прогрева при использовании двух излучателей.

Экспериментальная проверка показала, что относительная погрешность предложенного метода не превышает 6%.

Таким образом, разработанный метод контроля теплофизических характеристик строительных материалов по температурным измерениям на поверхностях и в центре призмы с использованием для нагрева СВЧ-излучения имеет ряд существенных преимуществ (оперативность и точность) по сравнению с известными методами данного назначения, что, несомненно, позволит использовать его в практике теплофизических измерений, в строительной теплотехнике и других отраслях промышленности.

4.4. МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для обеспечения условий энергосбережения в строительстве в настоящее время возникла необходимость в создании и применении новых строительных материалов, обладающих более высокими значениями сопротивления теплопередаче, т.е. более низкими коэффициентами тепло- и температуропроводности. При синтезе таких строительных материалов необходимо иметь информацию об их теплофизических характеристиках (ТФХ), так как ТФХ в этом случае являются параметрами, определяющими теплозащитные свойства и качество строительных конструкций и изделий [169]. Для получения информации о ТФХ требуется разработка новых методов и измерительных средств, позволяющих с необходимой для строительной теплотехники точностью контролировать искомые свойства. Как показал информационный поиск и анализ, в настоящее время в отечественной и зарубежной строительной отрасли таких средств измерения и контроля крайне мало, поэтому разработка новых методов и реализующих их систем оперативного контроля ТФХ строительных материалов является акту-

альной задачей строительной теплотехники, решение которой позволит осуществить экономию топливно-энергетических ресурсов.

Разработан новый метод и реализующая его микропроцессорная система неразрушающего оперативного контроля теплофизических характеристик (ТФХ) твердых строительных материалов и готовых изделий [115]. Сущность этого метода заключается в следующем.

Поверхность исследуемого объекта подвергают импульсному воздействию высокочастотного электромагнитного поля (СВЧ-излучения) по линии, осуществляя нагрев исследуемого полуограниченного в тепловом отношении тела по плоскости, перпендикулярной внешней поверхности тела и уходящей внутрь этого тела. Для организации такого воздействия электромагнитное излучение рупорной антенны СВЧ-генератора фокусируют в линию линзой из диэлектрического материала. Длина линии воздействия берется не менее 8...10 см, а ширина около 0,2 см. Величина длины линии микроволнового воздействия задается на порядок больше, чем расстояния от этой линии до точек контроля температур, чтобы концевые эффекты, обусловленные ограниченностью длины линии теплового воздействия, не влияли на контролируемое температурное поле, а величина ширины линии определяется минимально возможной разрешающей способностью фокусировки СВЧ-излучения в линию, которая зависит от длины волны излучения, расстояния от линзы до поверхности исследуемого изделия и ряда других параметров.

Измерительная система, реализующая предлагаемый метод, представлена на рис. 4.4.1.

Расстояние от рупорной антенны 1 СВЧ-генератора 2 и параметры диэлектрической линзы 3 подобраны таким образом, чтобы обеспечить минимум рассеивания электромагнитных волн в окружающую среду и собрать фокусируемое излучение в линию 4 минимально возможной ширины на поверхности исследуемого объекта. Учитывая данные конструктивные особенности метода и проникающую способность СВЧ-излучения, обеспечивается нагрев исследуемого тела по плоскости, перпендикулярной плоскости внешней поверхности исследуемого изделия и уходящее внутрь его. Для организации такого микроволнового воздействия электромагнитные излучения рупорной антенны СВЧ-генератора 1 фокусируют в линию заданной длины линзой 3 из радиопрозрачного диэлектрического материала, например фторопласта.

Нагрев исследуемого объекта 5 осуществляется импульсным воздействием высокочастотного электромагнитного поля (СВЧ-излучением) длительностью 10...15 с от излучающей антенны 1 (переменно-фазовый многощелевой излучатель), соединенной волноводом с СВЧ-генератором 2. Диэлектрическая линза 3 осуществляет фокусировку излучения в линию 4 на поверхности исследуемого тела.

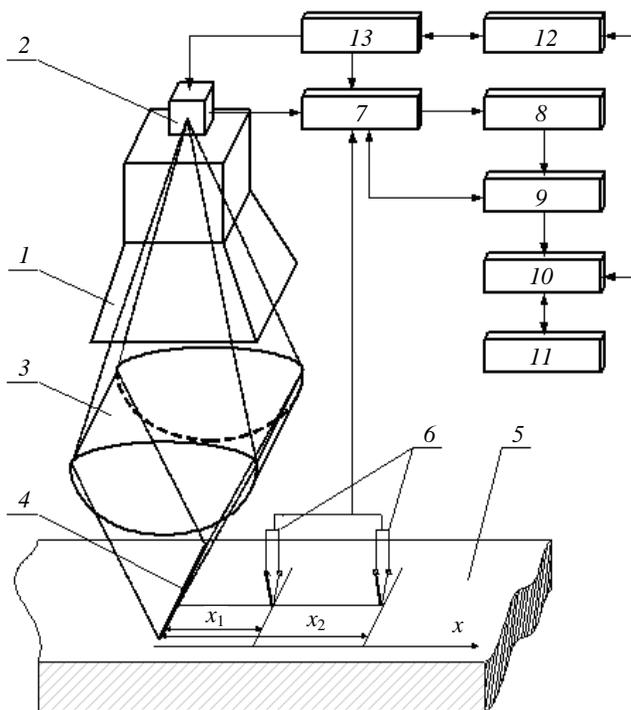


Рис. 4.4.1. Система микроволнового метода неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов

После СВЧ-воздействия осуществляют контроль избыточных температур на теплоизолированной от окружающей среды поверхности исследуемого объекта в двух точках, находящихся соответственно на расстояниях x_1 и x_2 от линии электромагнитного воздействия, термомпарами 6, которые через коммутатор 7, нормирующий прецизионный усилитель 8 и АЦП 9 подключают к микропроцессору 10. В эксперименте расстояния x_1 и x_2 берутся обычно равными 2 и 3 мм соответственно.

Микропроцессор 10 соединен с СВЧ-генератором через цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) 12 и порт ввода-вывода 13. Данные эксперимента выводятся на индикатор 11. Используя полученную в ходе теплофизического эксперимента измерительную информацию, в микропроцессоре 10 определяют искомые теплофизические характеристики по алгоритмам, построенным на основании аналитических соотношений, описывающих тепловые процессы в исследуемом полуограниченном в тепловом отношении объекте.

Имея информацию о мощности теплового нагрева исследуемого тела по внутренней плоскости и о значениях избыточных температур в контролируемых точках плоскости изделия, теплоизолированной от окружающей среды, искомые ТФХ находят по соотношениям, полученным на основании следующих рассуждений.

Температурное поле в исследуемом полуограниченном в тепловом отношении теле при импульсном тепловом воздействии по плоскости определяются уравнением [106]:

$$T(x, \tau) = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right), \quad (4.4.1)$$

где x – координата; τ – время; a – температуропроводность; $b = Q/c_j$ – тепловая активность исследуемого тела; Q – удельная мощность, выделяемая на единицу площади плоскости; c_j – теплоемкость исследуемого тела.

Температурное поле в контролируемых точках x_1 и x_2 в заданный момент времени τ^* после теплового воздействия описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} T(x_1, \tau^*) = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau^*}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau^*}\right); \\ T(x_2, \tau^*) = \frac{b}{2\sqrt{\pi a \tau^*}} \exp\left(-\frac{x_2^2}{4a\tau^*}\right). \end{cases} \quad (4.4.2)$$

$$(4.4.3)$$

Поделив (4.4.2) на (4.4.3) и выполнив ряд несложных математических преобразований, получим формулу для определения коэффициента температуропроводности в виде

$$a = \frac{x_2^2 - x_1^2}{4\tau^* \ln\left(\frac{T(x_1, \tau^*)}{T(x_2, \tau^*)}\right)}. \quad (4.4.4)$$

Используя известное соотношение $\lambda = ac_j$ и уравнение (4.4.1), получим формулу для определения коэффициента теплопроводности:

$$\lambda = \frac{Q}{2T(x_1, \tau^*)} \sqrt{\frac{a}{\pi \tau^*}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau^*}\right). \quad (4.4.5)$$

Поскольку электромагнитная волна, попадающая в диэлектрик с потерями, коими являются традиционные строительные материалы

(кирпич, бетон и т.д.), ослабляется в направлении распространения, то для определения мощности теплового воздействия, участвующего в формировании контролируемого температурного поля, рассчитаем глубину проникновения поля плоской волны в материал с потерями, используя выражение для удельной мощности рассеивания в диэлектрике, приведенной в работе [149]:

$$P_{\text{потерь}} = 0,556 \cdot 10^{-12} \epsilon_{\text{см}} E^2 f, \quad (4.4.6)$$

где E – напряженность переменного электрического поля; f – частота излучения; ϵ – диэлектрическая проницаемость исследуемого материала.

Используя зависимость (4.4.6), данные о параметрах СВЧ-излучения и исследуемого материала, определяют глубину проникновения поля в исследуемый материал и рассеиваемую по глубине мощность теплового воздействия. Так, например, на рис. 4.4.2 приведен график, построенный для красного кирпича с влажностью 30%, позволяющий определить количество энергии, участвующей в формировании температурного поля в точках контроля x_1 и x_2 следующим образом.

На формирование температуры в контролируемых точках поверхности изделия x_1 и x_2 , находящихся на расстоянии не более 2...3 мм от плоскости теплового воздействия, оказывает влияние только часть энергии СВЧ-генератора, выделяемая в плоскости на глубине z

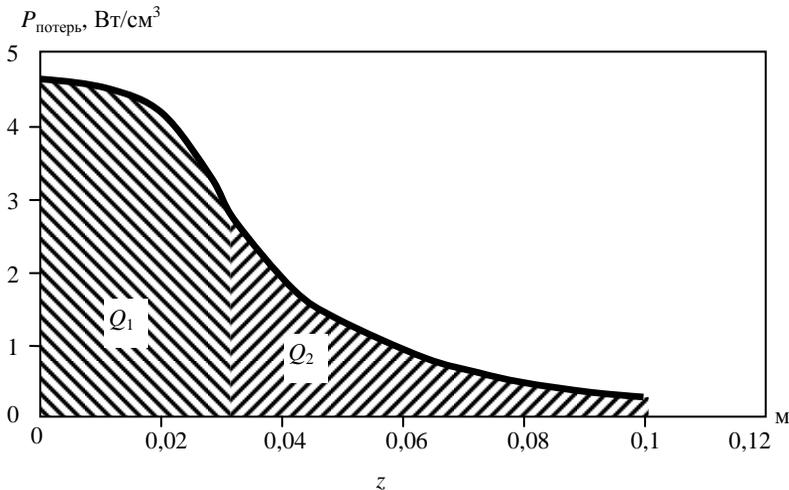


Рис. 4.4.2. Изменение удельной мощности рассеивания по глубине исследуемого изделия

не более 30 мм, т.е. на порядок больше расстояния x_1 и x_2 . На рисунке 4.4.2 эта часть энергии обозначена Q_1 , а величина ее рассчитывается по соотношению (4.4.6). Остальная часть энергии $Q_2 = Q - Q_1$ не участвует в формировании контролируемых на поверхности изделия избыточных температур $T(x_1, \tau^*)$ и $T(x_2, \tau^*)$. Поэтому для повышения точности определения коэффициента теплопроводности исследуемых изделий вводится поправочный коэффициент k , определяемый по соотношению

$$k = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2}. \text{ Тогда для уточненного расчета искомого коэффициента}$$

теплопроводности используют соотношение в следующем виде:

$$\lambda = \frac{kQ}{2T(x_1, \tau^*)} \sqrt{\frac{a}{\pi\tau^*}} \exp\left(-\frac{x_1^2}{4a\tau^*}\right). \quad (4.4.7)$$

Таким образом, измерив в заданный момент τ^* после импульсного теплового воздействия на исследуемый объект по плоскости от СВЧ-источника в двух точках x_1 и x_2 избыточную температуру поверхности этого объекта и осуществив коррекцию мощности воздействия, по соотношениям (4.4.4) и (4.4.7) можно определить весь комплекс ТФХ исследуемых строительных изделий.

Для проверки работоспособности предложенного метода были проведены эксперименты на строительных материалах и из керамзитного бетона, силикатного и красного кирпича. Нагрев образцов осуществлялся при температуре окружающей среды 20 °С в течение 10 с. Контроль температур производился на расстояниях $x_1 = 2$ мм, $x_2 = 3$ мм.

В таблицах 4.4.1 – 4.4.3 приведены данные экспериментов соответственно для кермзитного бетона, силикатного и красного кирпича.

К основным преимуществам метода можно отнести:

- повышение оперативности получения результатов исследования по сравнению с методами, использующими линейный кондуктивный поверхностный нагрев;
- повышение точности результатов контроля, обусловленное прогревом большого объема исследуемого материала и получением усредненных по объему данных, что очень важно для строительных материалов, которые, как правило, неоднородны, дисперсны и т.д.;
- относительная простота практической реализации метода.

Поэтому предложенный метод и реализующая его микропроцессорная система найдут широкое применение при контроле теплозащитных свойств зданий и сооружений.

Таблица 4.4.1

№ эксперимента	$T_1(x_1, \tau^*), K$	$T_2(x_2, \tau^*), K$	$a \cdot 10^{-6}, M^2/c$	$\lambda, Вт/(M \cdot K)$	$\alpha_{справ} \cdot 10^{-6}, M^2/c$	$\lambda_{справ}, Вт/(M \cdot K)$	$\delta \alpha, \%$	$\delta \lambda, \%$
1	19,1	18,7	0,268	0,527	0,283	0,562	5,300	6,227
2	19,2	18,8	0,267	0,529	0,283	0,562	5,654	5,871
3	19,3	18,9	0,267	0,532	0,283	0,562	5,654	5,338
4	19,1	18,7	0,268	0,527	0,283	0,562	5,300	6,227
5	19,2	18,8	0,267	0,529	0,283	0,562	5,654	5,871

Таблица 4.4.2

№ эксперимента	$T_1(x_1, \tau^*), K$	$T_2(x_2, \tau^*), K$	$a \cdot 10^{-6}, M^2/c$	$\lambda, Вт/(M \cdot K)$	$\alpha_{справ} \cdot 10^{-6}, M^2/c$	$\lambda_{справ}, Вт/(M \cdot K)$	$\delta \alpha, \%$	$\delta \lambda, \%$
1	7,3	6,1	0,586	0,764	0,558	0,721	5,018	5,963
2	7,4	6,2	0,594	0,759	0,558	0,721	6,452	5,271
3	7,3	6,1	0,586	0,764	0,558	0,721	5,018	5,963
4	7,4	6,2	0,594	0,759	0,558	0,721	6,452	5,271
5	7,3	6,1	0,586	0,764	0,558	0,721	5,018	5,963

Таблица 4.4.3

№ эксперимента	$T_1(x_1, \tau^*), K$	$T_2(x_2, \tau^*), K$	$a \cdot 10^{-6}, M^2/c$	$\lambda, Вт/(M \cdot K)$	$\alpha_{справ} \cdot 10^{-6}, M^2/c$	$\lambda_{справ}, Вт/(M \cdot K)$	$\delta \alpha, \%$	$\delta \lambda, \%$
1	7,1	6,4	0,377	0,630	0,362	0,657	4,144	4,109
2	7,2	6,3	0,382	0,625	0,362	0,657	5,525	4,871
3	7,3	6,3	0,389	0,636	0,362	0,657	5,458	3,301
4	7,4	6,3	0,393	0,617	0,362	0,657	8,564	6,088
5	7,2	6,4	0,382	0,625	0,362	0,657	5,525	4,871

5. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПО ТЕПЛОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

5.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерений температуры среды, веществ и определения ТФС материалов ограждений зданий необходимо иметь измерительный комплекс, функциональная схема которого включает следующие элементы.

1. Датчики, находящиеся в контакте с исследуемой средой (телом) и являющиеся своего рода «преобразователями» температуры в иной физический параметр, подлежащий измерению. Для измерения температур используют термомпары (типа ТХК) или термопреобразователи сопротивления (типа ТСП, ТСМ). Термомпары с термочувствительным элементом (определенной градуировки), термоэлектрические преобразователи или термоприемники (ТП) подключают к входам прибора – блоку обработки данных.

2. Блок обработки данных может включать в себя регистрирующие или показывающие приборы, цифровые фильтры, вычислители или логические устройства, аналого-цифровые преобразователи, аналоговые модули входа, адаптеры интерфейса, а также ЭВМ.

3. Термоэлектродные или компенсационные провода, которые передают сигналы от термомпар к прибору и изготовлены из тех же материалов (либо с аналогичными термоэлектрическими характеристиками), что и термомпара.

При определении и исследовании ТФС материалов и изделий основными параметрами измерений являются: температура, текущее время, геометрические размеры образца и расстояние между фиксированными точками тела, где установлены датчики температур.

Любые измерительные системы не могут обеспечить определение действительного значения температуры элементарного объема исследуемого объекта, поскольку физические принципы и исходные условия проведения измерений в той или иной степени оказываются нарушенными [6, 23, 36, 37, 44, 64, 77, 82, 94, 98, 104, 130, 133, 156, 167, 183, 190]. Результат экспериментального измерения температуры T_3 будет отличаться от ее действительного значения T_d на величину, называемую абсолютной погрешностью измерения температуры $\Delta T = T_3 - T_d$.

Абсолютную погрешность измерения температуры ΔT можно разделить на три составляющие: методическую ΔT_m , инструменталь-

ную $\Delta T_{\text{и}}$ и погрешность наблюдения $\Delta T_{\text{н}}$: $\Delta T = \Delta T_{\text{м}} + \Delta T_{\text{и}} + \Delta T_{\text{н}}$. Любая погрешность измерения может выражаться в долях действительного значения измеряемой величины и называется относительной погрешностью измерения.

Методическая погрешность измерения температуры $\Delta T_{\text{м}}$ возникает из-за неточности выполнения методики измерений, недостаточной изученности явлений теплообмена между исследуемым объектом и термодатчиком. Методические погрешности при исследовании ТФС материалов, связанные с неточностью реализации теоретических предпосылок, могут быть вызваны следующими условиями: временем наступления теплового режима, неоднородностью температурного поля, изменением ТФС веществ от температуры и др.

Инструментальная (приборная) погрешность измерения температуры $\Delta T_{\text{и}}$ возникает из-за несовершенства средств измерения температуры и использования этих средств в условиях, отличающихся от нормальных. Приборную погрешность снижают путем применения современных контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации, а также ЭВМ.

Погрешность регистрации наблюдения $\Delta T_{\text{н}}$ определяется квалификацией и особенностями наблюдателя и возникает в результате неправильного отсчета и снятия показаний, расшифровки записей и результатов регистрации. Как правило, эта составляющая погрешности при исключении ошибок экспериментатора незначительна по сравнению с $\Delta T_{\text{м}}$ и $\Delta T_{\text{и}}$.

Кроме того, погрешность ΔT разделяют на систематическую $\Delta T_{\text{сист}}$ и случайную $\Delta T_{\text{сл}}$: $\Delta T = \Delta T_{\text{сист}} + \Delta T_{\text{сл}}$.

Систематической погрешностью измерения температуры $\Delta T_{\text{сист}}$ называют составляющую погрешности измерения, которая остается постоянной или закономерно изменяется в процессе измерений (либо при их повторении). Систематическую погрешность оценивают расчетным путем или экспериментально, а затем вводят соответствующую поправку в результат измерения температуры либо самого метода.

Случайная погрешность измерения температуры $\Delta T_{\text{сл}}$ заранее не предсказуема и изменяется случайным образом при повторных измерениях температуры теми же средствами измерения. Закономерности проявления случайной погрешности и ее оценка могут быть выявлены при многократных наблюдениях температуры с последующей статистической обработкой результатов измерений. В полученное значение случайной погрешности $\Delta T_{\text{сл}}$ войдет и та часть систематической погрешности, которая из-за сложности и приближенности оценки $\Delta T_{\text{сист}}$ не могла быть ранее учтена.

Измеряемая температура среды, веществ, материалов и изделий может быть стационарной (постоянной) или нестационарной (изменяться во времени). В зависимости от этого погрешность измерения температуры подразделяют на статическую $\Delta T_{\text{ст}}$ и динамическую $\Delta T_{\text{дин}}$. Погрешность измерения нестационарной температуры включает в себя статическую $\Delta T_{\text{ст}}$ и динамическую составляющую $\Delta T_{\text{дин}}$: $\Delta T = \Delta T_{\text{ст}} + \Delta T_{\text{дин}}$. Погрешность измерения стационарной температуры включает в себя только статическую $\Delta T_{\text{ст}}$, а динамическая составляющая $\Delta T_{\text{дин}} = 0$.

Статическая составляющая погрешности $\Delta T_{\text{ст}}$ зависит от многих факторов: измерения температуры твердых тел, жидкостей, газов, движущихся сред или высокоскоростных потоков, монтажа ТП на поверхности или внутри тела (материала, изделия, массива), с высокой или низкой теплопроводностью, при установке ТП в пазу, цилиндрическом канале или с использованием защитных экранов, применения непогружаемых ТП контактным или бесконтактным способом. Существенно влияют на статическую составляющую погрешности $\Delta T_{\text{ст}}$ направление теплового воздействия на исследуемый объект (нагрев или охлаждение), теплообмен между отдельными элементами ТП, теплоотдача излучением ТП и его окружением в газообразных, частично прозрачных и других объектах, влияние внутренних источников теплоты, характер изменения температуры внутри ТП и в зоне его расположения.

Для непогружаемых контактных термодатчиков статическая составляющая погрешности $\Delta T_{\text{ст}}$ зависит от процесса переноса теплоты через зону механического контакта двух твердых тел или деталей [37, 63, 82, 94, 156, 183, 190]. На эффективность передачи теплоты в зоне контакта оказывают влияние такие факторы, как физические свойства материалов, из которых выполнены термодатчик и исследуемый материал, свойства среды, заполняющей пространство между соприкасающимися поверхностями, чистота обработки и характер микрорельефа указанных поверхностей, сила сжатия и температура в зоне контакта. Так, термическое сопротивление контакта понижается с увеличением нагрузки на соприкасающиеся поверхности, увеличением частоты обработки контактных поверхностей, повышением температуры в зоне раздела. Для непогружаемых контактных термодатчиков статическая составляющая погрешности $\Delta T_{\text{ст}}$ учитывается независимо от характера теплового режима (стационарный или нестационарный).

Динамическая составляющая погрешности $\Delta T_{\text{дин}}$ вызвана скоростью изменения исследуемой величины (температуры) T_d от времени τ , и невозможностью из-за инерционных свойств ТП регистрации мгновенных значений нестационарной температуры средствами измерения.

Каждый из применяемых приборов функциональной схемы комплекса вносит в результат измерения дополнительную инструментальную погрешность, зависящую от особенностей конструкции и принципа действия. Результирующая погрешность всего измерительного комплекса определяется суммой погрешностей каждого элемента, который может иметь свои погрешности. Суммирование всех составляющих погрешностей определяет методическую погрешность ΔT_m измерительного комплекса. Количественный анализ методических погрешностей в конечном итоге заключается в обосновании и выборе математической модели, определяющей процесс теплового взаимодействия объекта исследования с ТП.

Принимая меры защиты (хороший тепловой контакт термопар с телом, установка ТП в изотермической поверхности, увеличение числа измерений, применение совершенных контрольно-измерительных приборов), можно уменьшить инструментальную, случайную и статическую погрешности до необходимого минимального значения. Если это удастся сделать, то единственным фактором оказывается тепловое воздействие исследуемого объекта. Если тепловое воздействие объекта изменяется во времени (нестационарные процессы), то остается лишь одна составляющая методической погрешности, обусловленная тепловой инерционностью или динамической погрешностью ТП.

Однако внести дополнительную динамическую составляющую погрешности может и любой из перечисленных выше источников измерительного комплекса, если интенсивность его воздействия с течением времени достаточно велика. Анализ источников погрешностей [37, 64, 82, 98, 104, 133, 156, 167, 186, 190] показывает, что основные погрешности измерений ТФС материалов имеют тепловую природу, так как быстроедействие современных регистрирующих приборов (особенно электронных) исчисляется долями секунд, а процесс теплообмена между ТП и средой может занимать значительно большее время.

5.2. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТФС ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ

При исследовании ТФС материалов, измерении тепловых потоков и нестационарных температур на поверхности объекта (тела) требуется тщательное планирование эксперимента, от которого зависит погрешность и надежность эксперимента или его метрологические характеристики.

Термодатчики или термопары (ТП) чаще всего располагают в прямоугольном канале (паз) с геометрическими размерами – глубиной h и шириной паза b . На рисунке 5.2.1 показана схема расположения ТП цилиндрической формы на поверхности исследуемого материала.

При реализации такого способа измерений желательно, чтобы глубина и ширина паза не превышали $0,2 \dots 0,8$ мм. Замазка выбирается с относительно высокой теплопроводностью. Чувствительный элемент по возможности чеканится к исследуемой поверхности. Паз с термопарой заполняется клеем, пастой, цементом или другим веществом с коэффициентом теплопроводности меньшим или близким к исследуемому материалу. Снижение погрешностей измерения температур таких материалов, как оргстекло, фторопласт, бетон, красный и силикатный кирпич, достигалось следующими приемами:

- 1) термочувствительный элемент ТП должен находиться в хорошем тепловом контакте с телом, для чего крепление термопар к образцам из оргстекла проводилось опилками оргстекла, смешанными с дихлорэтаном; из фторопласта – опилками фторопласта смешанными с универсальным клеем (ГУ 6-15-1268–80); из бетона, красного и силикатного кирпича – цементом, смешанным с силикатным клеем;
- 2) спай термопары должен размещаться в изотермических плоскостях;
- 3) все провода термопар, должны быть изолированы защитным фторопластовым кожухом (кембриком), во избежание теплоотдачи оголенного провода с окружающей средой.

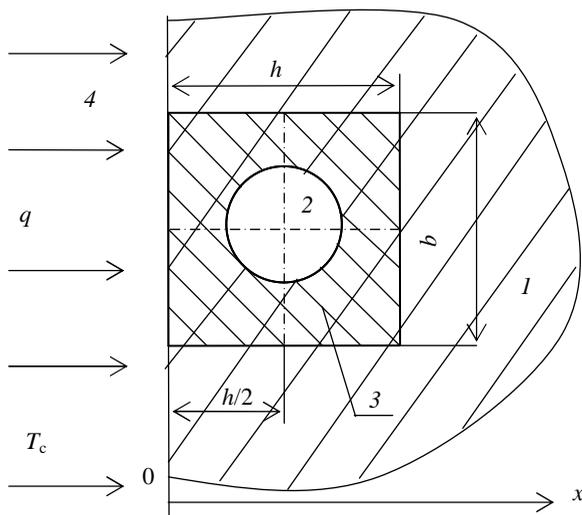


Рис. 5.2.1. Схема расположения термопары на поверхности материала:

1 – материал; *2* – термопара (ТП); *3* – замазка; *4* – окружающая среда;

q – удельный тепловой поток; *b*, *h* – геометрические размеры паза;

T_c – температура окружающей среды

В результате такой «защиты» термопар коэффициент теплопроводности исследуемого материала λ_1 незначительно превышает теплопроводность замазки λ_3 . Методическая погрешность измерения температуры поверхности объекта (образца) возникает ввиду разности значений теплопроводности λ_1 и λ_3 и перераспределения тепловых потоков в области паза, а также смещения термопары на величину $h/2$ от поверхности исследуемого объекта [190].

При измерении *стационарной* температуры поверхности тела и условии, что коэффициент теплоотдачи с поверхности тела в окружающую среду равен α_0 , распределение температуры по сечению ТП равномерное, а термопара занимает центральное положение внутри паза (рис. 5.2.1), погрешность ΔT_3 определяется по выражению [183]

$$\Delta T_3 = T_3 - T_d = \Delta(T_c - T_d) = \Delta(T_3 - T_c)/(\Delta - 1), \quad (5.2.1)$$

где T_3 и T_d – измеренная (экспериментальная) и действительная температура поверхности тела; T_c – температура окружающей среды.

Показатель погрешности измерения температуры поверхности Δ определяется из выражения [190]

$$\Delta \approx [1 - \varphi \xi_0 (1 + \eta)] / [1 + \mu (1 + \eta)]. \quad (5.2.2)$$

Так, при исследовании бетонного ограждения здания погрешность измерения температуры поверхности бетона

$$\Delta T_3 = \Delta(T_3 - T_c)/(\Delta - 1) = -0,12 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Действительная температура поверхности бетона

$$T_d = T_3 - \Delta T_3 = 20,12 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Относительная погрешность измерения

$$\Delta T = \Delta T_3 / T_d = 0,006 = 0,6\%.$$

При измерении *нестационарной* температуры поверхности тела, когда распределение температуры по сечению ТП равномерное, а термопара занимает центральное положение внутри паза (рис. 5.2.1), погрешность измерения включает в себя только динамическую составляющую $\Delta T_{\text{дин}}$, которая приближенно оценивается по формуле [190]

$$\Delta T_{\text{дин}} = T_3(\tau) - T_d(\tau) = (\epsilon_0 - \epsilon_3)b, \quad (5.2.3)$$

где $T_3(\tau)$ и $T_d(\tau)$ – измеренная (экспериментальная) и действительная температура поверхности тела; ϵ_0 , ϵ_3 – инерционная составляющая исследуемого тела и замазки, с; b – темп нагрева тела, $^\circ\text{C}/\text{с}$.

Коэффициент или показатель тепловой инерции материала (тела) определяется из выражения [190]

$$\epsilon_m = (h + b)^2 / 8\pi^2 a_m, \quad (5.2.4)$$

где a_m – коэффициент температуропроводности материала, $\text{м}^2/\text{с}$.

Рассмотрим конкретные примеры нагрева в экспериментальной установке образцов из оргстекла и бетона, выполненных в виде пластины 250×250 мм, со скоростью изменения температуры на поверхности исследуемого материала $b \approx 0,024$ К/с. Термопара градуировки ХК диаметром $d = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м расположена в прямоугольном пазу $h = b = 0,8 \cdot 10^{-3}$ м. Коэффициент температуропроводности для оргстекла и бетона соответственно равны: $a_{\text{орг}} = 0,12 \cdot 10^{-6}$ и $a_{\text{бет}} = 0,5 \cdot 10^{-6}$, $\text{м}^2/\text{с}$.

Коэффициент теплопроводности цементной замазки (для бетона) и опилок оргстекла, смешанных с дихлорэтаном (для оргстекла), соответственно равны: $\lambda_{\text{ц.з}} = 0,5$ Вт/(м·К), $\lambda_{\text{о.з}} = 0,2$ Вт/(м·К). Объемная теплоемкость, Дж/($\text{м}^3 \cdot \text{К}$), для цементной замазки, опилок оргстекла и термопары ХК соответственно равны: $(c_p)_{\text{ц.з}} = 1,12 \cdot 10^6$, $(c_p)_{\text{о.з}} = 1,6 \cdot 10^6$, $(c_p)_T = 4,35 \cdot 10^6$.

Предварительно определяется коэффициент или показатель тепловой инерции материала из выражения (5.2.4):

- оргстекла $\epsilon_{\text{орг}} = (h + b)^2 / 8\pi^2 a_{\text{орг}} = 0,27$ с;
- бетона $\epsilon_{\text{бет}} = (h + b)^2 / 8\pi^2 a_{\text{бет}} = 0,065$ с

и показатель тепловой инерции замазки:

- оргстекла $\epsilon_{\text{о.з}} = 0,71$ с;
- бетона $\epsilon_{\text{ц.з}} = 0,23$ с.

Динамическая составляющая $\Delta T_{\text{дин}}$ приближенно оценивается по формуле (5.2.3) и соответственно равна:

- для оргстекла $\Delta T_{\text{дин}} = (\epsilon_{\text{орг}} - \epsilon_{\text{о.з}})b = -0,011$ К;
- для бетона $\Delta T_{\text{дин}} = (\epsilon_{\text{бет}} - \epsilon_{\text{ц.з}})b = -0,0042$ К.

При нестационарном нагреве образцов в диапазоне температур ΔT от 5 до 35 °С относительная погрешность соответственно составит:

- для оргстекла $\Delta \zeta = \Delta T_{\text{дин}} / \Delta T = 0,00036 = 0,036\%$;
- для бетона $\Delta \zeta = \Delta T_{\text{дин}} / \Delta T = 0,00013 = 0,014\%$.

При определении ТФС ограждений зданий измерение температур в стационарных и нестационарных процессах нагрева или охлаждения объектов производится *контактными термопарами*. Для проведения опытов методом неразрушающего контроля и для измерения температуры поверхности ограждения здания использовались непогружаемые контактные датчики-термопары.

Отличительной особенностью контактных методов неразрушающего контроля ТФС материалов и изделий ограждений зданий является непосредственный контакт термоприемников с участком поверхно-

сти исследуемого объекта. Проблемы, связанные с особенностями контактных методов измерения температур на поверхности тел, достаточно глубоко и детально проработаны и представлены в работах многих авторов [23, 37, 64, 77, 94, 156, 183].

Процесс переноса теплоты через зону механического контакта двух твердых тел или деталей отличается исключительной сложностью. Эффективность переноса теплоты зависит от следующих факторов: физических свойств материалов, из которых выполнены термомпара и исследуемый образец; среды, заполняющей пространство между соприкасающимися поверхностями; чистоты обработки и характера микрорельефа указанных поверхностей; силы сжатия и температуры в зоне контакта. Термическое сопротивление контакта понижается с увеличением нагрузки на соприкасающиеся поверхности, увеличением частоты обработки контактных поверхностей, повышением температуры в зоне раздела. Методические погрешности свойственны в той или иной степени всем контактным методам измерений независимо от принципа действия выбранных приборов. Суммарное воздействие различных источников и ошибок приводит к тому, что измерительный комплекс регистрирует не температуру материала T_d , а некоторую отличную от нее температуру T_s . Одна из основных задач при контактном измерении температуры заключается в определении действительной температуры T_d по измеренной температуре T_s , т.е. состоит в оценке суммарной погрешности измерения.

Для расчета метрологических характеристик контактной термомпары, статической и динамической погрешности ТП необходимо иметь относительно простые явные зависимости – симплексы [156].

Симплексы представлены системой:

$$\begin{aligned} K_\alpha &= \alpha_k / \alpha_b; K_\lambda = \lambda_2 / \lambda_1; K_\lambda = 100K_\lambda; K_C = (c_p)_2 / (c_p)_1; \\ K_{\Delta r} &= \Delta r / L_1; K_\Delta = \Delta / L_1; \end{aligned} \quad (5.2.5)$$

где α_k , α_b – коэффициенты теплообмена зоны контакта и поверхности термомприемника с внешней средой (воздухом); λ_2 , λ_1 – коэффициенты теплопроводности теплоизолятора и термомприемника; $(c_p)_2$, $(c_p)_1$ – объемная теплоемкость теплоизолятора и термомприемника, кДж/(м³·К).

Теплофизические свойства для термомпреобразователя градуировки ХК и исследуемых строительных материалов (бетон, красный и силикатный кирпич) приняты следующие:

- хромель-копель:

$$\lambda_1 = 23 \text{ Вт/(м·К)}; \quad (c_p)_1 = 4350 \text{ кДж/(м}^3\text{·К)};$$

- кирпич, бетон:

$$\lambda_3 = 0,5 \dots 1,2 \text{ Вт/(м·К)}; \quad (c_p)_3 = 1600 \dots 1900 \text{ кДж/(м}^3\text{·К)}.$$

Одной из основных особенностей контактной термопары является теплоотдача, обусловленная тем, что в процессе эксплуатации большая часть поверхности участвует в теплообмене не с материалом, а с внешней средой. Даже в стационарном режиме через ТП проходит тепловой поток, величина и направление которого влияет в конечном счете на погрешность контактной термопары. Коэффициент теплообмена поверхности контактной термопары (теплоизолятора) с внешней средой (воздухом) при естественной конвекции принимается равным $\alpha_{\text{в}} \approx 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Статическая погрешность измерения температуры $\Delta T_{\text{ст}}$, вызванная теплообменом ТП с внешней средой, в радиальном и осевом направлении можно рассчитать по формуле [156]

- в радиальном направлении

$$\Delta T_{\text{ст}} (0,046 + 3,74 K_{\alpha}^{-0,77}) [(1,38 - K_{\lambda}^{-0,38}) K_{\Delta r}^{\text{м}} - 0,011 K_{\lambda}] ; \quad (5.2.6)$$

Для исследованных материалов (например, красного кирпича) и принятых условий эксплуатации статическая погрешность измерения температуры $\Delta T_{\text{ст}}$ составляет

- в радиальном направлении

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{ст}} &= (0,046 + 3,74/25,5) \cdot [(1,38 - 1)/4,5 - 0,011] = \\ &= (0,046 + 0,147) \cdot [(0,38)/4,5 - 0,011] = \\ &= (0,193) \cdot [0,073] = 0,014 = 1,4\%. \end{aligned}$$

Динамическая погрешность измерения температур контактной термопарой, когда тепловое воздействие на исследуемый материал изменяется во времени, обусловлена тепловой инерционностью. Для оценки влияния инерционности ТП при измерении нестационарной температуры воспользуемся соотношением [190]

$$\Delta T_{\text{дин}} = \varepsilon_1 b, \quad (5.2.7)$$

где ε_1 – коэффициент или показатель тепловой инерции термоприемника, с; b – скорость изменения температуры исследуемого образца (массива), К/с.

Для исследуемых материалов (оргстекло, фторопласт, бетон, кирпич) скорость изменения температуры в области упорядоченного теплового режима, где определяется коэффициент температуропроводности материала, составляет $b \approx 0,025 \text{ К/с}$.

Показатель тепловой инерции контактной термопары ε_1 определяется из соотношения [156]

$$\varepsilon_1 = \tau_1 (L_1)^2 / a_1, \quad (5.2.8)$$

где τ_1 – безразмерный аналог термической инерции; a_1 – коэффициент температуропроводности термоприемника (термопары ХК), $\text{м}^2/\text{с}$.

Коэффициент температуропроводности термоприемника (термопары градуировки ХК) равен

$$a_1 = \lambda_1 / (c_p)_1 = 5,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Учитывая, что погрешность измерительного комплекта с контактными термопарами обычно относят к диапазону контролируемых температур $\Delta T_{\text{к}} = T_{\text{к max}} - T_{\text{к min}} = 30 - (-10) = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, очевидно, что относительная максимальная погрешность динамической составляющей $\Delta T_{\text{дин}}^*$ определится из соотношения

$$\Delta T_{\text{дин}}^* = \Delta T_{\text{дин max}} / \Delta T_{\text{к}} = 1/40 = 0,025 = 2,5\% .$$

Предельная погрешность измерения температуры всего измерительного комплекта определяется из соотношения

$$\Delta T_{\text{к}} = \left[(\Delta T_{\text{дин}}^*)^2 + (\Delta T_{\text{пр}})^2 \pm (\Delta T_{\text{ст}})^2 \right]^{0,5}, \quad (5.2.9)$$

где $\Delta T_{\text{пр}}$ – погрешность вторичного прибора, зависящая от класса точности вторичного прибора $K_{\text{пр}}$.

$$\Delta T_{\text{пр}} = 0,01 K_{\text{пр}} = 0,01 \cdot 0,5 = 0,005.$$

В выражении (5.2.9) $\Delta T_{\text{ст}}$ берется со знаком «+» при нагреве образца и со знаком «-» при его охлаждении.

Предельная погрешность измерения температуры всего измерительного комплекта с контактными термопарами при максимальных статических и динамических погрешностях определяется из соотношения (5.2.9):

- при нагреве

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{к}} &= \left[(\Delta T_{\text{дин}}^*)^2 + (\Delta T_{\text{пр}})^2 + (\Delta T_{\text{ст}})^2 \right]^{0,5} = \\ &= \left[(0,025)^2 + (0,005)^2 + (0,014)^2 \right]^{0,5} = \\ &= \left[(0,000625) + (0,000025) + (0,000196) \right]^{0,5} = \\ &= \left[0,000846 \right]^{0,5} = 0,029 = 2,9\% ; \end{aligned}$$

- при охлаждении

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{к}} &= \left[(\Delta T_{\text{дин}}^*)^2 + (\Delta T_{\text{пр}})^2 - (\Delta T_{\text{ст}})^2 \right]^{0,5} = \\ &= \left[(0,025)^2 + (0,005)^2 - (0,014)^2 \right]^{0,5} = \\ &= \left[(0,000625) + (0,000025) - (0,000196) \right]^{0,5} = \\ &= \left[0,000454 \right]^{0,5} = 0,021 = 2,1\% . \end{aligned}$$

Для того чтобы свести к минимуму влияние погрешности вторичного прибора на результат измерения, достаточно выбрать автоматический прибор определенной градуировки, удовлетворяющий условию $\Delta T_{\text{пр}} \leq 0,2 \Delta T_{\text{к.доп}}$.

5.3. ПОГРЕШНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

Основные погрешности, возникающие при экспериментальном определении коэффициентов теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости материалов, рассмотрены выше.

Оценка погрешности, надежности, степени точности проводилась для полученных теоретических закономерностей и формул, а также результатов экспериментального определения коэффициента теплопроводности, температуропроводности и объемной теплоемкости материалов.

Суммарная погрешность определения теплофизических свойств, основанная на измерении температур на поверхности ограждения здания, складывается из:

- 1) погрешности измерения величин, входящих в расчетные формулы;
- 2) погрешности, связанной с неточностью реализации теоретических предпосылок;
- 3) случайных погрешностей, влияние которых можно в некоторой степени устранять путем увеличения числа измерений.

Погрешности измерения физических параметров, входящих в расчетные формулы, могут быть уменьшены за счет применения совершенных измерительных приборов.

Наиболее вероятное значение коэффициента теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости и интервал, в котором с разумной вероятностью он может находиться, определяется из выражения [141]

$$a = a^* \left(1 + \sum_i \varphi_i \right) \pm \xi_a, \quad (5.3.1)$$

где a^* – теплофизический параметр, определяемый для ограждения здания; φ_i – поправка отражающая влияние i -го фактора, не учитываемого теорией; ξ_a – относительная погрешность измерений температур.

Погрешности, связанные с неточностью реализации теоретических предпосылок, вызваны условиями, которые рассмотрим ниже.

1. *Неоднородностью температурного поля по сечению датчика измерения температуры и теплового потока.*

Уменьшение ошибки, связанной с неоднородностью симметричного теплового потока, при определении теплофизических свойств достигалось выбором соответствующих размеров датчиков.

Условие одномерности в области установки датчика диаметром 25 мм выполняется с высокой степенью точности во всем диапазоне измеряемых нестационарных температур. Расхождение при этом не превышало 0,5 градуса, что соответствует погрешности прибора (измерителя температур ИТП-МГ4 и теплографа). Следовательно, поправка, связанная с неоднородностью температурного поля, $\varphi_1 = 0,005$.

2. *Неточностью измерения температуры термодатчиками.*

Заделка термодатчиков термопар производится таким образом, чтобы обеспечить надежный тепловой контакт. Для уменьшения ошибки, связанной с отводом теплоты по термоэлектродам, термопары изготавливались из проволоки диаметром 0,2 мм, теплоизолировались и располагались в изотермической поверхности на длину не менее 50 их радиусов [167]. Однако полностью избежать ошибки, вносимой при измерении термопарой или датчиком температуры, невозможно. Поэтому погрешность, связанная с неточностью измерения температур контактным способом, датчиком прибора ИТП-МГ4 или теплографа составляет 2,1...2,9%, а при установке термопары в пазу 1%.

Следовательно, поправка $\varphi_2 = 0,01$ при установке термопары в пазу и $\varphi_3 = 0,03$ при использовании контактных термопар или датчиков.

3. *Изменением расстояния между термодатчиками.*

Как правило, при нагреве материала ввиду линейного расширения происходит смещение термопары или термодатчика. Поправка определится из выражения [141]: $\varphi_4 = 2\delta_l T$, где δ_l – коэффициент линейного расширения материала; T – температура образца. При нагреве образца из силикатного кирпича или бетона до температуры $T \approx 30$ °C: $\delta_l = 8,1 \cdot 10^{-6}$, K⁻¹.

Следовательно, поправка, связанная с изменением расстояния между термодатчиками, при измерении температуры материала $\varphi_3 = 0,0008$.

4. *Изменением теплофизических свойств веществ от температуры.*

Опыт показывает, что зависимости $\lambda(t)$, $c(t)$, $a(t)$ у всех материалов на значительных участках температурной шкалы имеют монотонный вид. Исключение составляют лишь зоны фазовых и структурных превращений.

Следовательно, в пределах малого перепада температур на наружной поверхности ограждения здания: $\vartheta = T_{\Pi}^{\max} - T_{\Pi}^{\min}$ теплофизи-

ческие коэффициенты образцов всегда могут быть представлены с любой заданной точностью соотношениями вида

$$a = a_0 (1 + k_a \vartheta + n_a \vartheta^2 + \dots) . \quad (5.3.2)$$

Слагаемые выражения (5.3.2) представляют собой разложения ряда Тейлора функций $a(T)$ на участках изменения перепада температур ϑ в окрестности базовой температуры $T_0(\tau)$.

Относительные температурные коэффициенты k_a и n_a в выражении (5.3.2) зависят от температуры $T_0(\tau)$, остаются постоянными в пределах перепада ϑ и могут определяться в точке $T_0(\tau)$ по значению, соответствующему производной для функции $a(T)$:

$$k_a = \frac{1}{a} \frac{da_0}{dt} ; \quad n_a = \frac{1}{2a_0} \frac{d^2 a_0}{dt^2} . \quad (5.3.3)$$

Степенные ряды в разложениях (5.3.3) по физическому смыслу являются абсолютно сходящимися. Быстрота сходимости их непосредственно связана с величиной перепада ϑ в образце и может выбираться по желанию экспериментатора.

В промежуточных между фазами переходах обычно

$$|k_a| \leq 3 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1} \text{ и } |n_a| \leq 3 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-2} ,$$

поэтому условия оптимальной сходимости разложений (5.3.3)

$$|k_a \vartheta| \leq 0,1 \text{ и } |n_a \vartheta| \leq 0,01$$

и при теплофизических измерениях реализуются весьма просто.

При нагреве ограждения здания, по мере увеличения температуры на поверхности, величина температурного коэффициента теплопроводности ограждения равна

$$k_a = \frac{1}{0,5 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{0,5 \cdot 10^{-6}}{60} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1} .$$

Перепад температуры в образце $T_{\Pi}^{\max} - T_{\Pi}^{\min} \vartheta = 10$ град, а погрешность измерения коэффициента теплопроводности составит

$$\varphi_4 = k_a \vartheta = 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = 1,6 \cdot 10^{-2} .$$

Следовательно, поправка, связанная с изменением теплофизических свойств веществ, от температуры при измерении температуры ограждения здания составляет 1,6%, а $\varphi_4 = 0,016$.

Таким образом, суммарная поправка, отражающая влияние каждого фактора, связанного с неточностью реализации теоретических предпосылок в уравнении (5.3.1), будет равна:

- при использовании контактных датчиков температур

$$\begin{aligned}\Sigma\varphi &= \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 = 0,005 + 0,03 + 0,0008 + 0,016 = \\ &= 0,0518 \text{ (5,18\%);}\end{aligned}$$

- при установке термопары в пазу

$$\begin{aligned}\Sigma\varphi &= \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 = 0,005 + 0,01 + 0,0008 + 0,016 = \\ &= 0,0318 \text{ (3,18\%).}\end{aligned}$$

При использовании контактных датчиков в диапазоне температур наружного ограждения здания ΔT от (-10) °С до $(+30)$ °С *предельная относительная погрешность* измерения всего измерительного комплекта при максимальных статических и динамических погрешностях составит:

- при нагреве ограждения

$$\Delta T_k = \Delta \zeta + \Sigma\varphi = 2,9 + 5,18 = 8,08\%;$$

- при охлаждении здания

$$\Delta T_k = \Delta \zeta + \Sigma\varphi = 2,1 + 3,18 = 5,28\%.$$

При стационарном режиме нагрева или охлаждения ограждений зданий *предельная относительная погрешность* измерения составит меньше, чем при нестационарном режиме:

- при нагреве ограждения

$$\Delta T_k = \Delta \zeta + \Sigma\varphi = 0,6 + 5,18 = 5,78\%;$$

- при охлаждении здания

$$\Delta T_k = \Delta \zeta + \Sigma\varphi = 0,6 + 3,18 = 3,78\%.$$

Вероятность, с которой теплофизические свойства находятся в заданном интервале погрешностей, или надежность результата, может быть подсчитана следующим образом [66].

1. Вычисляется среднее значение теплофизического коэффициента

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i . \quad (5.3.4)$$

Например, для четырех измерений коэффициента температуропроводности фторопласта

$$\bar{a} = \frac{(11,4 + 12,2 + 11,8 + 11,4) \cdot 10^{-8}}{4} = 11,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}.$$

2. Находятся погрешности отдельных измерений $\Delta a_i = \bar{a} - a_i$, и определяется средняя квадратичная погрешность результата серии измерений

$$\begin{aligned} \Delta S_{\bar{a}} &= \sqrt{\frac{\sum (\Delta a_i)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{[0,3^2 + (-0,5)^2 + (-0,01)^2 + 0,3^2] \cdot (10^{-8})^2}{4 \cdot (4-1)}} = \\ &= \sqrt{\frac{0,44 \cdot (10^{-8})^2}{12}} = 0,191 \cdot 10^{-8}. \end{aligned}$$

3. Задаваясь границами доверительного интервала (погрешности результата измерений) $\Delta a = \pm 0,6 \cdot 10^{-8}$, определяется коэффициент Стьюдента из выражения

$$t_a = \frac{\Delta a}{\Delta S_{\bar{a}}}; \quad t_a = \frac{0,06 \cdot 10^{-8}}{0,191 \cdot 10^{-8}} = 3,14.$$

4. Пользуясь таблицами коэффициентов Стьюдента [66], находится значение надежности $k_n = 0,95$. При уменьшении числа опытов до трех, при определении ТФС материалов значение надежности снизится до $k_n = 0,92$.

5.4. ВЫВОДЫ

Дана оценка погрешности, надежности и степени точности при экспериментальном определении теплофизических свойств материалов ограждений зданий. Оценка погрешности, надежности, степени точности проводилась для полученных теоретических закономерностей и формул, а также результатов экспериментального определения коэффициентов температуропроводности, теплопроводности и объемной теплоемкости.

Суммарная и предельная относительная погрешность измерения всего измерительного комплекта при максимальных статических и динамических погрешностях составили:

- при нагреве ограждения здания $\Delta T_k = 8,08\%$;
- при охлаждении ограждения здания $\Delta T_k = 5,28\%$.

Надежность метода неразрушающего контроля составляет 0,92...0,95.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены следующие результаты, определяющие научную новизну и практическую значимость.

1. На основании выполненного обзора методов теплообмена, тепловых режимов и анализа экспериментальных методов определения теплофизических свойств веществ определены приоритетные направления и разработаны научно-технические основы экспериментального определения теплофизических свойств ограждений зданий и строительных материалов, существенно влияющих на работу систем отопления, охлаждения и вентиляции.

2. Разработаны теоретические основы метода расчета теплообмена в ограждении здания при циклическом подводе теплоты к его поверхности, основанные на естественном перепаде температуры и теплового потока на поверхности ограждения здания, без нарушения целостности ограждения здания и без подвода и использования внешних или внутренних тепловых и электрических источников теплоты.

3. Разработаны научно-технические основы надежного метода определения ТФС ограждений зданий, влияющих на работу систем отопления, охлаждения и вентиляции.

4. Разработан способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов (патент на изобретение РФ № 2421711 «Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов»).

5. Разработана методика экспериментального определения комплекса теплофизических свойств ограждений зданий, основанная на измерениях температуры и теплового потока на поверхности ограждения здания при естественном циклическом подводе теплоты к его поверхности в течение суток методом неразрушающего контроля, без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик исследуемых объектов.

6. Разработанный способ и методики позволяют в течение одного опыта по тепловым и температурным измерениям на поверхности методом неразрушающего контроля определять весь комплекс ТФС: коэффициент теплопроводности, температуропроводности, теплоусвоения, тепловой активности, объемную теплоемкость, тепловую инерцию и термическое сопротивление ограждений зданий и твердых строительных материалов.

7. Разработанный метод основан на измерении естественного перепада температуры и теплового потока на поверхности ограждения здания, а постановка измерений не требует знания или определения таких физических параметров, как коэффициент теплообмена, степень черноты.

Нет необходимости в создании чисто конвективной или чисто лучистой окружающей среды, что значительно упрощает экспериментальные установки для исследования и определения ТФС ограждений зданий. Не требуется учет потерь теплоты за счет теплообмена с окружающей средой. Эти преимущества значительно повышают надежность методики и упрощают условия проведения эксперимента (экспериментальную установку).

8. Приведены метрологические характеристики и погрешности при экспериментальном определении ТФС материалов ограждений зданий. Суммарная и предельная относительная погрешности измерения всего измерительного комплекта при максимальных статических и динамических погрешностях составят: при нагреве ограждения здания – 8,08%; при охлаждении ограждения здания – 5,28%. Надежность метода неразрушающего контроля составляет 0,92...0,95.

ТФС ограждения зданий

ТФС ограждения здания	Силикатный кирпич	Красный кирпич	Панельное домостроение
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	0,86	0,53	0,88
Коэффициент температуропроводности a , м ² /с	$0,55 \cdot 10^{-6}$	$0,35 \cdot 10^{-6}$	$0,56 \cdot 10^{-6}$
Объемная теплоемкость (c_p), кДж/(м ³ ·К)	1568	1500	1560
Коэффициент теплоусвоения B , Вт/(м ² ·К)	9,9	7,6	10
Термическое сопротивление R , (м ² ·К)/Вт	0,698	1,132	0,455
Тепловая инерция b , кДж ² /(с·м ⁴ ·К ²)	$1,348 \cdot 10^3$	$0,795 \cdot 10^3$	$1,38 \cdot 10^3$

9. Изложены рекомендации, методики и порядок проведения экспериментов и обработки опытных данных. Экспериментальное и производственное подтверждения полученных на опытных установках, стендах в лабораторных и промышленных условиях ТФС ограждений зданий различного назначения, строительных материалов согласуются с результатами исследований других авторов, опубликованных в справочной и технической литературе.

10. Разработанные методы отличаются от известных быстродействием, небольшой погрешностью, обладают новизной и оригинальностью, позволяют координировать влияние технологических факторов на свойства готовых изделий и экономичность работы систем отопления, охлаждения и вентиляции. Методики позволяют легко автоматизировать теплофизический эксперимент, упрощается реализация на базе микропроцессорной техники, и поэтому являются перспективными в практике теплофизических измерений и строительной теплотехнике, а также для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля ТФС, в различных отраслях ЖКХ и АПК.

Значения ТФС ограждений зданий и отдельных строительных материалов приведены в таблице.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азизов А.М., Гордов А.Н. Точность измерительных преобразователей. – Л.: Энергия, 1975. – 256 с.
2. Азимов Р.К. Измерительные преобразователи с тепловыми распределенными параметрами. – М.: Энергия, 1977. – 80 с.
3. Александровский С.В. Прикладные методы теории теплопроводности и влагопроводности бетона. – М.: Компания спутник, 2001. – 186 с.
4. Алиев М.И., Гусейнов Р.Э., Араслян Д.Г. Прибор для измерения температуропроводности твердых тел методом светового импульса // Изв. АН Аз. ССР. Серия физико-технических и математических наук. – 1979. – № 3. – С. 77.
5. Аметистов Е.В. Основы теории теплообмена. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 242 с.
6. Андреев А.А. Автоматические показывающие, самопишущие и регулирующие приборы. – Л.: Машиностроение, 1973. – 286 с.
7. А. с. 1377695 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Т.И. Чернышева, В.Н. Чернышов, В.А. Попов. № 4055693/31-25; Заявл. 14.04.86; Оpubл. 29.02.88. Бюл. № 8. – 6 с.
8. А. с. 293209 СССР. Способ определения теплофизических характеристик материалов / Н.Д. Данилов; Оpubл. 16.07.69.
9. Баранов В.М., Кудрявцев Е.М., Самохвалов А.И. Ультразвуковой метод определения температуропроводности материалов // ИФЖ. – 1976. – Т. 30, № 6. – С. 965.
10. Баталов В.С. Одновременное определение теплофизических параметров твердофазовых веществ // ИФЖ. – 1982. – Т. 42, № 6. – С. 1026–1027.
11. Белов Е.А., Соколов Г.Я., Платунов Е.С. Цифровой экспресс-измеритель теплоотражающих конструкций с прямым отсчетом // Промышленная теплотехника. – 1986. – № 4. – С. 756 – 760.
12. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности. Ч. 1 и 2. – М.: Высшая школа, 1982. – 671 с.
13. Береговой В.А. Теплофизические свойства композиционных материалов для защиты от радиации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пенза, 1997. – 18 с.
14. Берд Р., Стюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса; пер. с англ. – М.: Химия, 1974. – 688 с.

15. Берлинер М.А. Измерения влажности. – 2-е изд, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.
16. Богословский В.Н. Тепловой режим здания. – М.: Стройиздат, 1979.
17. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. – М.: Стройиздат, 1982.
18. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.
19. Борискина И.В., Плотников А.А., Захаров А.В. Проектирование современных оконных систем гражданских зданий. – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 320 с.
20. Бойков Г.П., Видин Ю.В., Фокин В.М. Определение теплофизических свойств строительных материалов. – Красноярск: Изд-во Красноярского университета, 1992. – 172 с.
21. Бойков, Г.П., Видин Ю.В., Журавлев В.Н. Основы тепломасообмена. – Красноярск, 2000. – 272 с.
22. Бровкин В.Л. Частное решение уравнения теплопроводности для определения теплофизических коэффициентов // Изв. вузов. Энергетика. – 1980. – № 11. – С. 120.
23. Буравой С.Е., Платунов Е.С. Установка для измерения истинной теплоемкости жаростойких материалов в режиме охлаждения // Теплофизика высоких температур. – 1966. – Т. 4, № 3. – С. 459 – 462.
24. Бутковский А.Г. Характеристики систем с распределенными параметрами: Справочное пособие. – М.: Наука, 1979. – 224 с.
25. Вавилов В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник. – М.: Машиностроение, 1991. – 240 с.
26. Варганов И.С., Геращенко О.А. Тепловой метод неразрушающего контроля с помощью датчика теплового потока // Промышленная теплотехника. – 1987. – № 4. – С. 77 – 80.
27. Васильев Л.Л., Фрайман Ю.Е. Теплофизические свойства плохих проводников тепла. – Минск: Наука и техника, 1967. – 172 с.
28. Волькенштейн В.С. Скоростной метод определения теплофизических характеристик материалов. – Л.: Энергия, 1971. – 145 с.
29. Видин Ю.В. Инженерные методы расчетов процессов теплопереноса. – Красноярск, 1974. – 144 с.
30. Видин Ю.В., Иванов В.В. Расчет температурных полей в твердых телах, нагреваемых конвекцией и радиацией одновременно. – Красноярск, 1965. – 95 с.

31. Вик Эзикши. Квазистационарное распределение температуры в периодически контактирующих стержнях конечной длины // Теплопередача. Труды американского общества инженеров-механиков. – 1981. – № 1. – С. 149.

32. Власов В.В. Автоматические устройства для определения теплофизических характеристик твердых материалов. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 168.

33. Гаврилов Р.Н., Никифоров Н.Д. Метод определения теплофизических свойств горного массива без нарушения естественной структуры // ИФЖ. – 1983. – № 6. – С. 1023–1024.

34. Гагарин В.Г. Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий: Дис. ... д-ра техн. наук / НИИСФ. – М., 2000.

35. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Цыкановский Е.Ю. Теплозащита фасадов с вентилируемым воздушным зазором // АВОК. – 2004. – № 2. – С. 20 – 26; 2004. – № 3. – С. 20 – 26.

36. Герашенко О.А. Современное состояние теплотрии в СССР // ИФЖ. – 1990. – Т. 59, № 3. – С. 516 – 522.

37. Герашенко О.А., Гордов А.Н., Лах В.И. Температурные измерения: Справочник. – Киев: Наукова думка, 1984. – 496 с.

38. Герашенко О.А., Гриценко Т.Г. Теплотрический метод определения комплекса теплофизических свойств вещества при гармоническом теплоточном воздействии // Теплофизика и теплотехника. – Киев: Наукова думка, 1979. – Вып. 36. – С. 19 – 22.

39. Гордов А.Н., Малков Я.В., Эргардт Н.Н. Точность контактных методов измерения температуры. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 232 с.

40. Использование обогрева межстекольного пространства для повышения теплотехнических характеристик окон с тройным остеклением / А.И. Гныря, Е.В. Петров, М.И. Низовцев, В.И. Терехов // Строительные материалы. – 2000. – № 11.

41. Влияние обогрева межстекольного пространства на сопротивление теплопередаче при тройном остеклении / А.И. Гныря, Е.В. Петров, М.И. Низовцев, В.И. Терехов // Известия вузов. Строительство. – 1999. – № 11.

42. ГОСТ 24700–99. Блоки оконные деревянные со стеклопакетами. Технические условия. – М., 2002. – 33 с.

43. ГОСТ 26602.1–99. Блоки оконные и дверные. Методы определения сопротивления теплопередаче. – М., 2000. – 16 с.

44. ГОСТ 8.009–72. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.

45. ГОСТ 8.157–75. Государственная система обеспечения единства измерений. Шкалы температурные практические.

46. ГОСТ 11.004–74. Прикладная статистика. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров нормального распределения.

47. ГОСТ 51337–99. Температуры касаемых поверхностей. Эргономические данные для установления предельных величин горячих поверхностей. – М., 2000. – 16 с.

48. Граник Ю.Г., Магай А.А., Беляев В.С. Конструкции наружных ограждений и инженерные системы в новых типах энергоэффективных жилых зданиях // Энергосбережение. – 2003. – № 5.

49. Граник Ю.Г. Применение фасадных систем в жилищно-гражданском строительстве // Энергосбережение. – 2005. – № 4.

50. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 287 с.

51. Математическое моделирование теплообмена в межстекольном промежутке окна / В.В. Грищенко, М.И. Низовцев, В.В. Терехов, В.И. Терехов // Известия вузов. Строительство. – 2002. – № 7.

52. Гусева Л.И. Комплексные исследования теплофизических характеристик теплоизоляционно-теплозащитных материалов длительного и многоразового применения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1981. – 20 с.

53. Гурьев М.Е. Тепловые измерения в строительной теплофизике. – Киев, 1976. – С. 93 – 105.

54. Дао Тхай Зиеу, Ковальчук Н.Г., Пытель И.Д. Минимизация погрешности измерения стационарных температур динамическим методом // Известия вузов. Приборостроение. – 1985. – Т. 28, № 7. – С. 92 – 95.

55. Данилов Н.Д., Шадрин Ю.В., Павлов Н.Н. Анализ влияния теплопроводных включений на температурный режим ограждающих конструкций // Жилищное строительство. – 2009. – № 6. – С. 32–33.

56. А. с. 1267176 СССР. БИ. Датчик теплового потока / М.Е. Гуревич, Л.В. Гурьянов, Ю.П. Золотаренко, Ю.Н. Коваль. – 1986. – № 40.

57. Диомидов М.В., Низовцев М.И., Терехов В.И. Тепловые характеристики окна с тройным остеклением при естественной вентиляции внутренней межстекольной прослойки // Известия вузов. Строительство. – 2001. – № 7. – С. 70 – 73.

58. Динамика теплообмена комбинированного тепломера / Н.А. Ярышев, Т.В. Смирнова, Н.Н. Заровская, Г.А. Васильев // Измерительная техника. 1990. – № 2. – С. 15–16.

59. Дмитриевич А.Д. Определение теплофизических свойств строительных материалов. – М.–Л.: Госстройиздат, 1963, 204 с.

60. Дроздов В.А., Савин В.К., Александров Ю.П. Теплообмен в светопрозрачных ограждающих конструкциях. – М.: Стройиздат, 1979. – 506 с.

61. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.

62. Дульнев Г.Н., Сигалов А.В. Температуропроводность неоднородных систем // ИФЖ. – 1980. – Т. 39, № 5. – С. 859.

63. Дульнев Г.Н. Комплекс методик, программ и аппаратуры для автоматизации теплофизических исследований // ИФЖ. – 1981. – Т. 40, № 4. – С. 717.

64. Загребин Л.Д. Импульсный метод измерения теплофизических свойств металлов с использованием лазерного нагрева: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Свердловск, 1982. – 23 с.

65. Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин. – Л.: Наука, 1974. – 108 с.

66. Заровная Н.Н., Ярышев Н.А. Анализ локальных тепловых возмущений в полупрозрачных объектах // Теплообмен. – Минск: Наука и техника, 1984. – С. 58 – 62.

67. Зарубин В.С. Инженерные методы решения задач теплопроводности. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 328 с.

68. Золотухин А.В., Клименко В.С., Синицкий Н.Е. Комплексная автоматическая калориметрическая установка для измерения тепловых свойств твердых веществ // Промышленная теплотехника. – 1983. – Т. 5, № 2. – С. 91 – 96.

69. Егоров Б.Н., Килессо В.С. Комплексное определение теплофизических свойств твердых материалов импульсно-адиабатическим методом // Теплофизические свойства твердых тел. – Киев: Наукова думка, 1971. – С. 65 – 71.

70. Елисеев, В.Н. Оценка погрешности измерения поверхностной температуры полупрозрачного материала контактным датчиком / В.Н. Елисеев, В.И. Воротников, В.А. Товстоног // Известия вузов. Машиностроение. – 1981. – С. 77 – 81.

71. Елисеев В.Н., Соловов В.А. Теоретическое и экспериментальное исследование погрешности измерения температур термомпарами в теплоизоляционных материалах // Инженерно-физический журнал. – 1983. – Т. 45, № 5. – С. 737 – 742.

72. Иванов В.В., Бойков А.Г., Кудрявцев Л.В. Определение тепловых свойств материалов используемых в системах теплоснабжения и строительства. – Волгоград: ВолгГАСА, 1998. – 98 с.

73. Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – С. 140.

74. Иванов В.В., Карасева Л.В., Тихомиров С.А. Нестационарный теплоперенос в многослойных строительных конструкциях // Известия вузов. Строительство. – 2001. – № 9, 10. – С. 7 – 10.

75. Иванов В.В., Карасева Л.В., Сохно И.И. Исследование процессов радиационно-конвективного прогрева ограждающих конструкций // Известия вузов Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2003. – № 3.

76. Иванов В.В., Карасева Л.В., Сохно И.И. Температурные режимы ограждающих конструкций // Жилищное строительство. – 2003. – № 5. – С. 17–18.

77. Исаченко В.П., Осипова В.П., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.

78. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 1985. – 480 с.

79. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. – М.: Наука, 1970. – 109 с.

80. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 487 с.

81. Кельтнер Бек Дж. Погрешности измерения температур поверхностей // Теплопередача. – 1983. – Т. 105, № 2. – С. 98 – 106.

82. Кириченко Ю.А. Измерение температуропроводности методом радиальных температурных волн в цилиндре // Измерительная техника, 1960. – № 5. – С. 29 – 32.

83. Клименко М.М., Кржижановский Р.Б., Шерман В.Е. Анализ методических погрешностей измерения температуропроводности импульсным методом с применением лазера // Измерительная техника. – 1980. – № 6.

84. Ковылин А.В., Фокин В.М. Методика определения коэффициентов теплопроводности, теплоусвоения, тепловой инерции, температуропроводности и объемной теплоемкости строительных и теплоизоляционных материалов методом неразрушающего контроля // Вестник ВолгГАСУ. Сер. Строительство и архитектура. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2010. – Вып. 19(38). – С. 112 – 117.

85. Козлов В.П., Липовцев В.Н., Писарик Г.П. Аналитические основы неразрушающих способов комплексного определения тепло-

физических характеристик материалов // Промышленная теплотехника. – 1987. – № 2. – С. 96 – 102.

86. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. – М.: Гостехиздат, 1954. – 408 с.

87. Контрольно-измерительные приборы и средства автоматизации: Каталог продукции компании ОВЕН. – 2003. – 152 с.

88. Корепанов Е.В. Свободная конвекция в окнах с двойным остеклением // Известия вузов. Строительство. – 2005. – № 2.

89. Коротков П.А., Лондон Г.Е. Динамические контактные измерения тепловых величин. – Л.: Машиностроение, 1974. – 224 с.

90. Краев О.А. Простой метод измерения температуропроводности теплоизоляторов // Теплоэнергетика. – 1958. – № 4. – С. 81–82.

91. Крейт О., Блек У. Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983. – 256 с.

92. Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам. – М.: Энергия, 1978. – 215 с.

93. Куинн Т. Температура / Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 448 с.

94. Кулаков М.В., Макаров Б.И. Измерение температуры поверхности твердых тел. – М.: Энергия, 1979. – 96 с.

95. Курепин В.В., Козин В.М., Левочкин Ю.В. Приборы для теплофизических измерений с прямым отсчетом // Промышленная теплотехника. – 1982. – Т. 4, № 3. – С. 91.

96. Курепин В.В., Дикалов А.И. Определение теплофизических характеристик методом мгновенного теплового импульса при учете влияния контактных термических сопротивлений // ИФЖ. – 1981. – Т. 40, № 6. – С. 1046.

97. Курепин В.В., Калинин В.А. Скоростной метод определения коэффициента теплопроводности и температуропроводности твердых тел // Изв. Северо-Кавказского научного центра высшей школы. Естественные науки. – 1979. – № 2. – С. 24.

98. Курепин В.В., Платунов Е.С., Белов Е.А. Энтальпийный термомонитор для неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов // Промышленная теплотехника. – 1982. – № 4. – С. 78.

99. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – Новосибирск: Наука, 1970. – 659 с.

100. Куталадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.

101. Лабейш В.Г., Пименов А.Г., Чуудинов С.Н. Определение инерционности датчиков поверхности температуры по методике

периодического нагрева // Известия вузов. Приборостроение. – 1983. – Т. 26, № 11. – С. 88 – 90.

102. Линеверг Ф. Измерение температур в технике: Справочник / Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1980. – 544 с.

103. Тейлор Ли. Температуропроводность материала с диспергированными включениями // Теплопередача. Труды американского общества инженеров-механиков. – 1978. – № 4. – С. 177 – 182.

104. Литовский Е.Я., Пучкелевич Н.А. Теплофизические свойства огнеупоров: Справочник. – М.: Металлургия, 1982. – 152 с.

105. Луцаев Г.А., Борц Г.Н., Фандеев Е.И. Исследование погрешностей датчиков температуры непогружного типа, содержащих тепловые экраны // Изв. вузов. Приборостроение. – 1973. – № 4. – С. 124.

106. Луцаев Г.А., Фандеев Е.И. Проектирование контактных непогружных термоприемников с заданными метрологическими характеристиками // Изв. вузов. Электромеханика. – 1974. – № 10. – С. 1142 – 1148.

107. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

108. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

109. Лыков А.В. Теоретические основы строительной теплофизики. – Минск: Наука и техника, 1961. – 519 с.

110. Мак Адамс В.Х. Теплопередача. – М.: Металлургия, 1961. – 686 с.

111. Малявина Е.Г., Бибик М.В. Инженерная методика определения приведенных сопротивлений теплопередачи наружных стен со стержневыми связями // АВОК. – 2007. – № 3.

112. Марич М. Совместное определение теплофизических характеристик материалов // ИФЖ. – 1973. – Т.25, № 5. – С. 851.

113. Марков А.В., Юленец Ю.П. Метод контроля влагосодержания при непосредственном сверхвысокочастотном нагреве // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31, № 7. – С. 79 – 85.

114. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / Под ред. А.В. Лыкова. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.

115. Микроволновый метод и система неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов / Д.О. Голиков, В.Н. Чернышов, А.В. Чернышов, В.И. Полухин // Вести высших учебных заведений Черноземья, 2011. – С. 56 – 64.

116. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 319 с.

117. Михеев М.А. Краткий курс теплопередачи. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 208 с.

118. Мецик М.С. Методы обработки экспериментальных данных и планирование эксперимента по физике. – Иркутск: Иркутский государственный университет, 1981. – 111 с.

119. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – 2-е изд, стер. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

120. Мухин А.И. Энергосберегающий подход при выборе светопрозрачных ограждающих конструкции // Известия вузов. Строительство. – 2001. – № 2, 3. – С. 90 – 94.

121. Ненароков Н.Ю. Математическое моделирование процессов теплопереноса при исследовании теплофизических характеристик веществ и материалов в стадии иррегулярного режима: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2000.

122. Низовцев М.И. Влияние толщины межстекольной прослойки на теплоизолирующие свойства // Светопрозрачные конструкции. – 2001. – № 4.

123. Экспериментальное исследование влияния тепловыделения в межстекольном пространстве на тепловые характеристики окна / М.И. Низовцев, В.И. Терехов, А.И. Гныря, Е.В. Петров // Труды ММФ. – 2000. – Т. 1.

124. Низовцев М.И., Терехов В.И., Хайритдинов И.К. Межрамные экраны и жалюзи с теплоотражающими покрытиями // Светопрозрачные конструкции. – 2005. – № 2.

125. Никитенко Н.И. Теория тепло- и массопереноса. – Киев: Наукова думка, 1983. – 349 с.

126. Новицкий Л.А., Кожевников И.Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. – М.: Машиностроение, 1975. – 216 с.

127. Новицкий П.В. Динамика погрешностей средств измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.

128. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 301 с.

129. Новиченок Л.Н., Шульман З.П. Теплофизические свойства полимеров. – Минск: Наука и техника, 1971. – 117 с.

130. Ньюэл М., Шмидт Ф. Теплопередача при ламинарной естественной конвекции в прямоугольной замкнутой полости // Теплопередача. Труды американского общества инженеров-механиков. Серия С, 1970. – № 1.

131. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. – М.: Энергия, 1979. – 319 с.
132. Ойков Г., Буриев В. Исследование влияния ультразвука на теплофизические коэффициенты // Теплофизика и теплотехника. – Киев: Наукова думка, 1970. – № 16. – С. 25–26.
133. Падерин Л.Я. Расчетное исследование погрешностей контактного метода измерения температур поверхностей неметаллических материалов в условиях лучистого теплообмена // Теплофизика высоких температур. – 1981. – Т. 19, № 6. – С. 1277 – 1284.
134. Пак В., Калинин А.И. Метод точного измерения стационарной температуры поверхности твердого тела контактными термоприемниками // Заводская лаборатория. – 1976. – Т. 42, № 11. – С. 1371–1372.
135. Пак М.И., Осипова В.А. Квазистационарный метод комплексного определения теплофизических свойств твердых тел в широком температурном интервале // Теплоэнергетика. – 1967. – № 6. – С. 73 – 76.
136. Паперный Е.А., Эйдельштейн И.Л. Погрешности контактных методов измерения температур. – М.–Л.: Энергия, 1966.
137. Парцхаладзе К.Г. Импульсный метод измерения температуропроводности // Труды метрологических институтов СССР. – 1971. – Вып. 129. – С. 86.
138. Пат. 2399911. Способ определения теплофизических характеристик строительных материалов (варианты) / В.Н. Чернышов, А.В. Чернышов, Д.О. Голиков; Заявл. 20.11.2009; Оpubл. 20.09.2010.
139. Пат. РФ № 2263901. Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов / В.М. Фокин, В.Н. Чернышов; Заявл. 25.05.2004; Оpubл. 10.11.2005.
140. Патю. РФ № 2250454. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик твердых материалов / В.М. Фокин, В.Н. Чернышов, Г.П. Бойков; Заявл. 12.04.2004; Оpubл. 20.04.2005.
141. Пат. РФ РФ № 2421711. Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов / В.М. Фокин, А.В. Ковылин; Заявл. 29.07.2009; Оpubл. 20.06.2011.
142. Перехоженцев А.Г. Потенциал переноса влаговлажных капиллярнопористых материалов: Дис. ... д-ра техн. наук. – М.: НИИСФ, 1998.
143. Петров В.Г., Денисов В.Г., Масленников Л.А. Процессы тепло- и влагообмена в промышленной изоляции. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 192 с.

144. Петров Е.В., Терехов В.И., Низовцев М.И. Исследование обогрева межстекольного пространства при тройном остеклении // Вестник ТГАСУ. – Томск, 2000.

145. Петрунин Г.И., Юрчак Р.П. Установка для измерения теплопроводности материалов методом плоских температурных волн // Техника высоких температур. – 1971. – Т. 9, № 3. – С. 622 – 626.

146. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. – Л.: Энергия, 1976. – 352 с.

147. Платунов Е.С., Козин В.М., Левочкин Ю.В. Цифровой экспресс-измеритель теплофизических свойств вещества // Промышленная теплотехника. – 1982. – Т. 4, № 1. – С. 51 – 65.

148. Платунов Е.С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. – Л. : Энергия, 1973. – 143 с.

149. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот. – М.: Энергия, 1968. – 312 с.

150. Сопrotивление теплопередаче стен с навесными теплоизоляционными фасадами / И.А. Подласова, В.Ю. Чернета, Н.О. Копаница, Е.В. Солодникова // АВОК. – 2005. – № 3.

151. Попов В.Н. Об искажении температурного поля в области заделки термопары // Теплофизика высоких температур. – 1966. – Т. 4, № 2. – С. 112 – 115.

152. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.

153. Приборы для измерения температуры контактным способом / Под ред. Р.В. Бычковского. – Львов: Вища школа, 1978. – 208 с.

154. Приборы для измерения температуры контактным способом: Справочник / Под ред. Р.В. Бычковского. – Львов: Вища школа, 1979. – 208 с.

155. Рабинович С.Г. Погрешности измерений. – Л.: Энергия, 1978. – 262 с.

156. Рудзит Я.А., Путалов В.Н. Основы точности и надежность в приборостроении. – М.: Машиностроение, 1991. – 302 с.

157. Савватимский А.И. Экспериментальное определение физических свойств веществ при микросекундном нагреве импульсом электрического тока: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1999.

158. Саченко А.А., Твердый Е.Я. Совершенствование методов измерения температуры. – Киев: Техника, 1983. – 104 с.

159. Сергеев О.А. Метрологические основы теплофизических измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 170 с.

160. Серых Г.М., Колесников Б.П., Сысоев В.Г. Прибор для комплексного определения теплофизических характеристик материалов // Промышленная теплотехника. – 1981. – Т. 3, № 1. – С. 85 – 91.
161. Сперроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением. – Л.: Энергия, 1971. – 294 с.
162. СНиП П-3-9*. Строительная теплофизика. – М.: Стройиздат, 1996.
163. СНиП 23-02–2003. Тепловая защита зданий. – М.: ФГУП ЦПП, 2004.
164. СП 23-101–2004. Проектирование тепловой защиты зданий. – М.: ФГУП ЦПП, 2004.
165. Табунщиков Ю.А., Хромец Д.Ю. Тепловая защита ограждающих конструкций зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1986.
166. Табунщиков Ю.А. Энергоэффективный жилой дом в Москве // АВОК. – 1999. – № 4. – С. 4 – 10.
167. Теоретические основы хладотехники. Теплообмен / Под ред. проф. Э.И. Гуйго. – М.: Агропромиздат, 1986. – 320 с.
168. Теория теплообмена / Под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Высшая школа, 1979. – 567 с.
169. Тепловые методы технической диагностики строительных материалов и изделий: Монография / В.Н. Чернышов, В.Г. Однолько, А.В. Чернышов, В.М.Фокин. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 208 с.
170. Теплотехника / Под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высшая школа, 2002.
171. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.
172. Теплотехнический справочник. Т. 2. / Под общ. ред. В.И. Юренева, П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1975. – 896 с.
173. Теплофизические свойства веществ / Под ред. Н.Б. Варгафтика. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 367 с.
174. Теплопроводность твердых тел: Справочник / А.С. Охотин, Р.П. Боровикова Т.В. Нечаева и др.; Под ред. А.С. Охотина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.
175. Теплофизические измерения и приборы / Е.С. Платунов, С.Е. Буравой, В.В. Курепин и др.; Под ред. Е.С. Платунова. – Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
176. Налетов В.Л., Дивин Н.П., Зайцев А.С. Термоэлектрический измеритель теплового потока // Приборы и техн. эксперим. – 1990. – № 5. – С. 248.

177. Тихомиров С.А. Исследование динамики процессов теплопереноса через ограждающие конструкции: Автореф. дис. ... канд. наук. – Ростов н/Д., 2004.
178. Томилина Е.А., Ахметьев М.А., Коллычев А.Д. Теплоотражающие пленки в светопропускающих покрытия // Известия вузов. Строительство. – 2004. – № 2. – С. 119 – 123.
179. Умякова Н.П. Как сделать дом теплым: Справочное пособие. – М.: Стройиздат, 1996. – 368 с.
180. Факторович Л.М. Тепловая изоляция: Справочное руководство. – Л.: Недра, 1966. – 456 с.
181. Фандеев Е.И., Ушаков В.Г., Луцаев Г.А. Непогружаемые термоприемники. – М.: Энергия, 1979. – 64 с.
182. Фокин В.М. Научно-методологические основы определения теплофизических свойств материалов методом неразрушающего контроля: Монография. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 140 с.
183. Фокин В.М., Бойков Г.П., Видин Ю.В. Основы технической теплофизики: Монография. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 172 с.
184. Фокин В.М., Ковылин А.В. Теоретические основы определения теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности материалов по тепловым измерениям на поверхности методом неразрушающего контроля // Вестник ВолгГАСУ. Сер. Строительство и архитектура. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2009. – Вып. 14(33). – С. 123–127.
185. Фокин В.М., Чернышов В.Н. Неразрушающий контроль теплофизических характеристик строительных материалов: Монография. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 212 с.
186. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. – М.: Стройиздат, 1973.
187. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.
188. Филиппов Л.П. Измерения теплофизических свойств веществ методом периодического нагрева. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
189. Филиппов Л.П. Направления развития методов измерений теплофизических свойств веществ и материалов // Энергетика, 1980. – № 3. – С. 125.
190. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 232 с.
191. Франчук А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. – М.: Госстрой СССР, НИИ Стройфизики, 1969. – 128 с.

192. Фукс Л.Г., Шмандина В.Н. Метод комплексного определения теплофизических свойств // Изв. ВУЗов. Энергетика, 1970. – № 2. – С 124 – 126.

193. Харламов А.Г. Измерение теплопроводности твердых тел. – М.: Атомиздат, 1973. – 151 с.

194. Хуторной А.Н., Колесникова А.В. Теплозащитные свойства неоднородных керамзитобетонных наружных стен зданий // Известия вузов. Строительство. – 2004. – № 7.

195. Хуторной А.Н., Цветкова Н.А., Кузин А.Я. Теплозащитные свойства неоднородных наружных стен зданий: Монография. – Томск: Изд-во Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2006. – 287 с.

196. Теплоперенос в керамзитной наружной стене с вертикальными теплоизоляционными вставками / А.Н. Хуторной, А.В. Колесникова, А.Я. Кузин, Н.А. Цветкова // Теоретические основы Теплогазоснабжения и вентиляции: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. МГСУ. – 2005. – С. 76 – 81.

197. Теплоперенос в неоднородных керамзитобетонной и брусчатой наружных стенах зданий / А.Н. Хуторной, С.В. Хон, А.В. Колесникова и др. // Известия вузов. Строительство. – 2006. – № 2.

198. Цветков Э.И. Методические погрешности статистических измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 144 с.

199. Цветков Э.И. Алгоритмические основы измерений. – Энергоатомиздат, 1992. – 254 с.

200. А. с. СССР 539264. Способ определения коэффициента температуропроводности / Н.М. Цирельман.

201. Цой П.В. Методы расчета задач теплопереноса. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 415 с.

202. Черкасова К.Г. Измерение температуры поверхности // Труды метрологических институтов СССР. ВНИИМ. – 1977. – № 207. – С. 64 – 68.

203. Чернышов В.Н. Разработка теоретических основ и алгоритмического обеспечения неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов с метрологическим анализом полученных результатов: Дис. ... д-ра техн. наук. – Л., 1997. – 496 с.

204. Чернышова Т.И., Чернышов В.Н. Методы и средства контроля теплофизических свойств материалов. – М.: Машиностроение. – 2001. – 240 с.

205. Черпаков П.В. Теория регулярного теплообмена. – М.: Энергия, 1975. – 225 с.

206. Чиркин В.С. Теплопроводность промышленных материалов. – М.: Машгиз, 1962. – 247 с.
207. Чеховский В.Я., Беляев Ю.В., Вавилов Р.А. Установка для измерения тепло- и температуропроводности твердых материалов // ИФЖ. – 1972. – Т. 22, № 6. – С. 1049.
208. Чистяков С.Ф., Радун Д.Б. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Высшая школа, 1972. – 392 с.
209. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. – М.: Физматгиз, 1962. – 456 с.
210. Чуриков А.А. Разработка и исследование методов и устройств для автоматического неразрушающего контроля температурозависимых теплофизических свойств твердых теплозащитных материалов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1980. – 16 с.
211. Шкловер А.М., Васильев Б.Ф., Ушков Ф.В. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий. – М.: Госиздат литературы по строительству и архитектуре, 1956. – 350 с.
212. Шашков А.Г. Системно-структурный анализ процесса теплообмена и его применение. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 280 с.
213. Шевельков В.А. Теплофизические характеристики изоляционных материалов. – М., 1958. – 96 с.
214. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. – М.: Мир, 1972. – 381 с.
215. Шейнери М. Температуропроводность высоконаполненного каучука // Теплопередача. Труды американского общества инженеров-механиков. – 1974. – № 2. – С. 129–130.
216. Шерешевский И.А. Конструирование гражданских зданий. – М.: Архитектура, 2005. – 176 с.
217. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А. Контактный теплообмен. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963.
218. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. – М.: Энергия, 1977. – 328 с.
219. Шорин С.Н. Теплопередача. – М.: Высшая школа, 1964. – 490 с.
220. Эталонные и образцовые измерительные приборы и установки: Справочник / Интерэталонприбор. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 135 с.
221. Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. Теория тепло- и массообмена. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 680 с.

222. Юрчак Р.П., Ткач Г.Ф., Петрунин Г.И. Исследование теплофизических свойств диэлектриков при высоких температурах // Теплофизические свойства твердых веществ. – Киев: Наукова думка, 1973. – С. 83 – 87.
223. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. – 2-е изд., перераб. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
224. Яскин А.С. Комплексный метод определения теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности керамических материалов при температурах до 2000 °С: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1989. – 18 с.
225. Champoussin I.C. Sur la pertinence des modeles thermocinetiques et leestimation de levrs caracteristiques // Heat and Mass Trasfer. – 1983. – № 8. – P. 1229.
226. Chohan R.K. Effects of manufacturing tolerance on the thermal response of industrial thermometersy Proc. Inst., Mech. Eng. – 1986. – Vol. 2000. – N 4. – P. 285 – 289.
227. Davis L.I.E. Determination of Physical properties of heat transfer sensors from vacuum soat loss observation // Trans of the Heat Transfer. – 1982. – № 1. – P. 219 – 221.
228. Dantzig J.A. Improved transient response of thermocouple sensor // Rev. Sei. Instrum. – 1985. – Vol. 56. – N 5. – Pt. 1. – P. 723 – 725.
229. Lanivik M. Thermometry by surface probes // High Temp. High Pressures. – 1983. – Vol. 15. – N 2. – P. 199 – 204.
230. Mikroprozessoren bieten überlegen Vorteile: Nene Wege beider Wözmemeßung / Stobbe Matthias // JKZ – Haustechn. – 1991. – № 2. – С. 39 – 41.
231. Neuez Heizkosten – verteiler // Sanit. Heizungstechn. – 1990. – 55, № 11. – P. 680.
232. Peek, M.K., Salt H. Measurement of transient temperatures at the centre of a sphere // J. Phys. E: Sci. Instrum. – 1987. – Vol. 20. – N 4. – P. 395 – 398.
233. Robertson D., Sterbutzel G.A. An accurate surface temperature measuring system // IEEE Transactions. Industria. General Applications. – 1970. – Vol. 6. – N 1. – P. 43 – 47.
234. Satyamurty, P., Dixit N.S., Prasad M.P. Dynamic thermocouple technique to measure high gastream temperatur // Res, and Ind. – 1985. – Vol. 30, N 4. – P. 494 – 500.

235. Tarzia D.A. Simultaneous determination of two unknown thermal coefficients through of inverse one-phase Lamé-Clapeyron (Stefan) problem with an overspecified condition of the fixed face // Heat and mass transfer. – 1983. – № 8. – P. 1151 – 1157.

236. Taylor H., Navarro H. Method to determine and reduce the response time of resistance thermometers under practical conditions // J. Phys. E: Sci. Instrum. – 1983. – Vol. 16, N 9. – P. 916 – 918.

237. Thin film temperature heat fluxmeters / J.C. Godefroy, M. Clery, C. Gageant, D. Francois, Y. Servouze // Thin Solid Films. – 1990. – 193–194. – № 1–2. – C. 924 – 934.

238. Viskanta R., Gross R. Heat transfer by simultaneous conduction and radiation in an absorbing medium // Heat Transfer. – 1962. – Vol. 84. – P. 73 – 76.

239. Krischer, O., Esdorn H. Einfachen Kurzzeitverfahren zur gleichzeitigen Bestimmung der Wärmeleitzahe, der Warmekapazität und Wärmeindringzahe fester Stoffe. VDI, Forschungsheft. 450/1955.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР И ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ

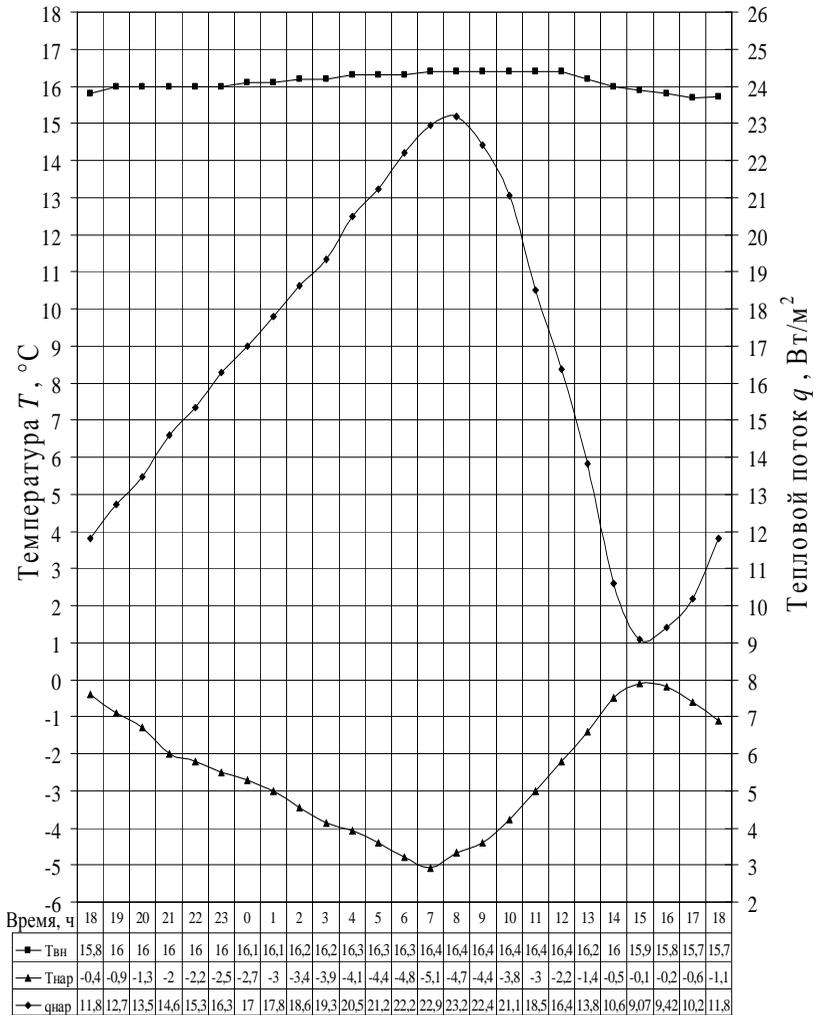


Рис. П1. Экспериментальные распределения температур и теплового потока ограждения здания из силикатного кирпича (26–27.01.2009 г.)

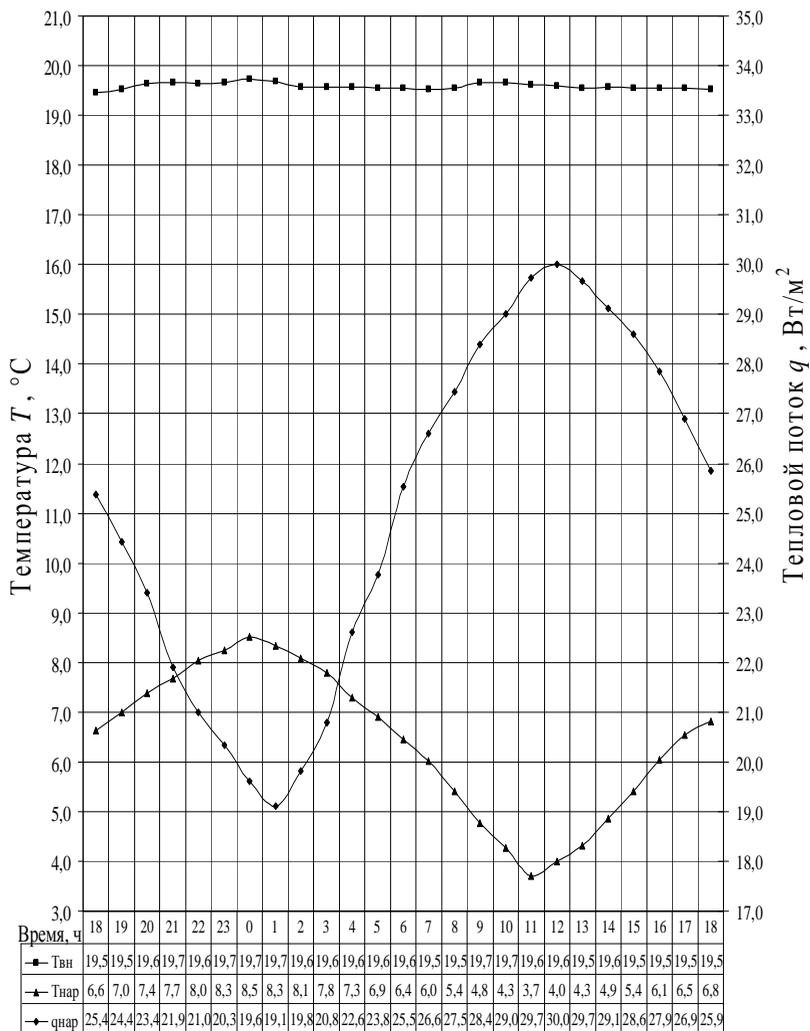


Рис. П2. Экспериментальные распределения температур и теплового потока ограждения здания из силикатного кирпича (15–16.02.2009 г.)

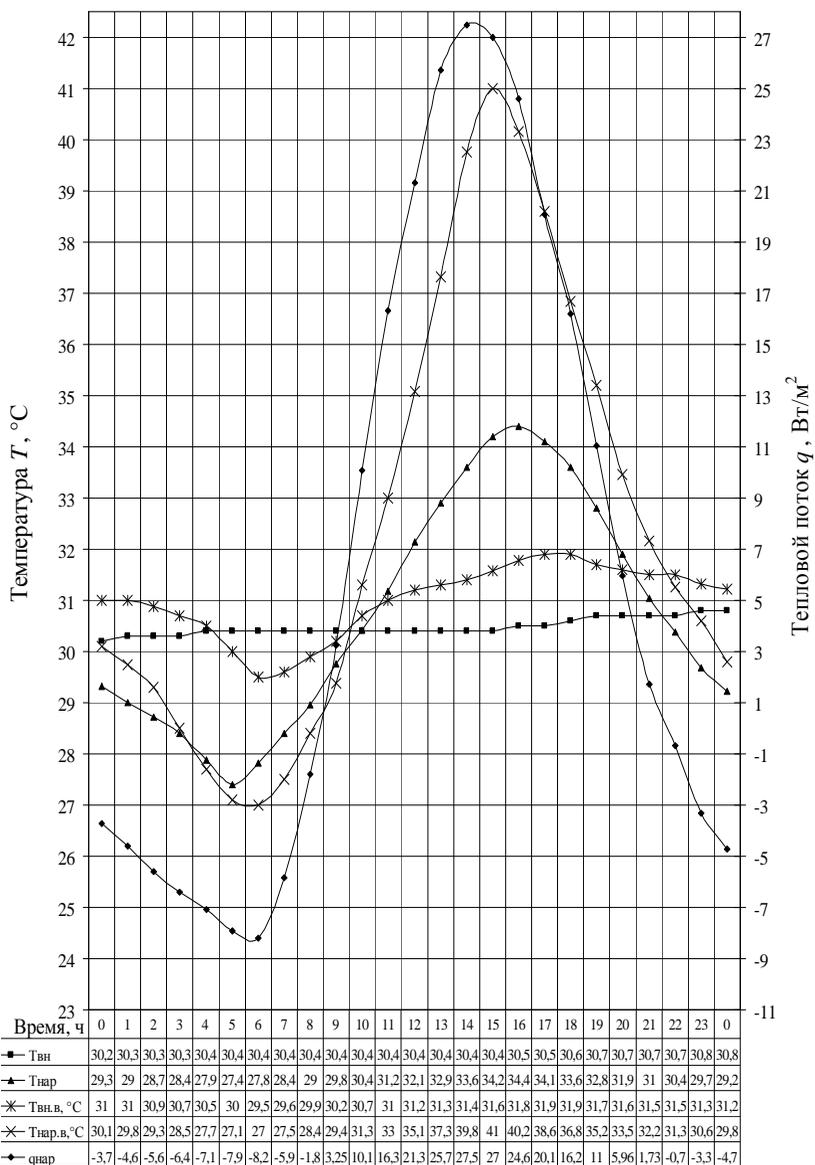


Рис. ПЗ. Экспериментальные распределения температур и теплового потока ограждения здания из силикатного кирпича (17–18.07.2009 г.)

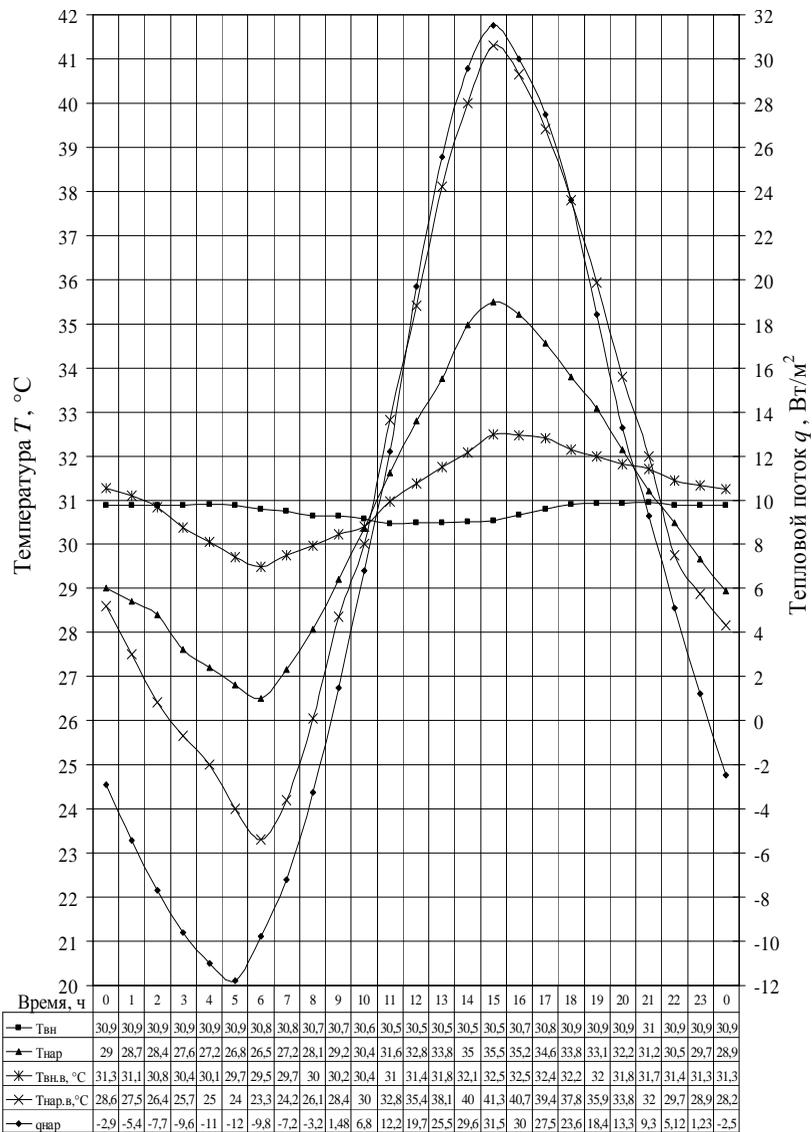


Рис. П4. Экспериментальные распределения температур и теплового потока ограждения здания из силикатного кирпича (29–30.07.2009 г.)

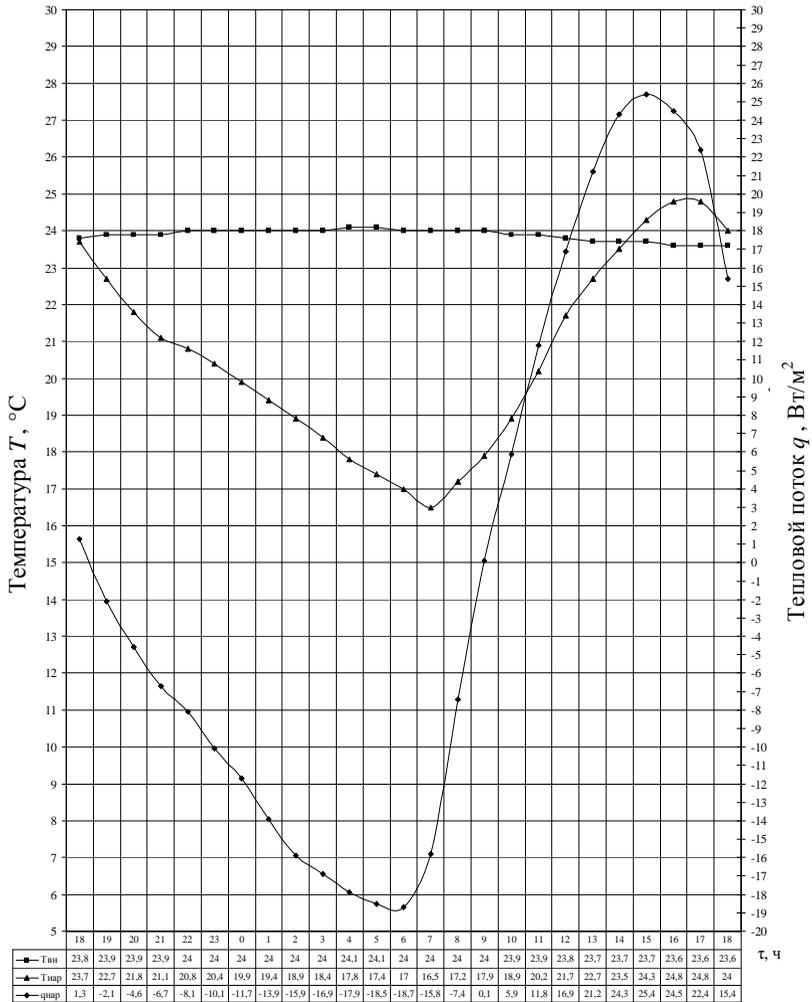


Рис. П5. Экспериментальные распределения температур и теплового потока ограждения здания из силикатного кирпича (01–02.09.2009 г.)

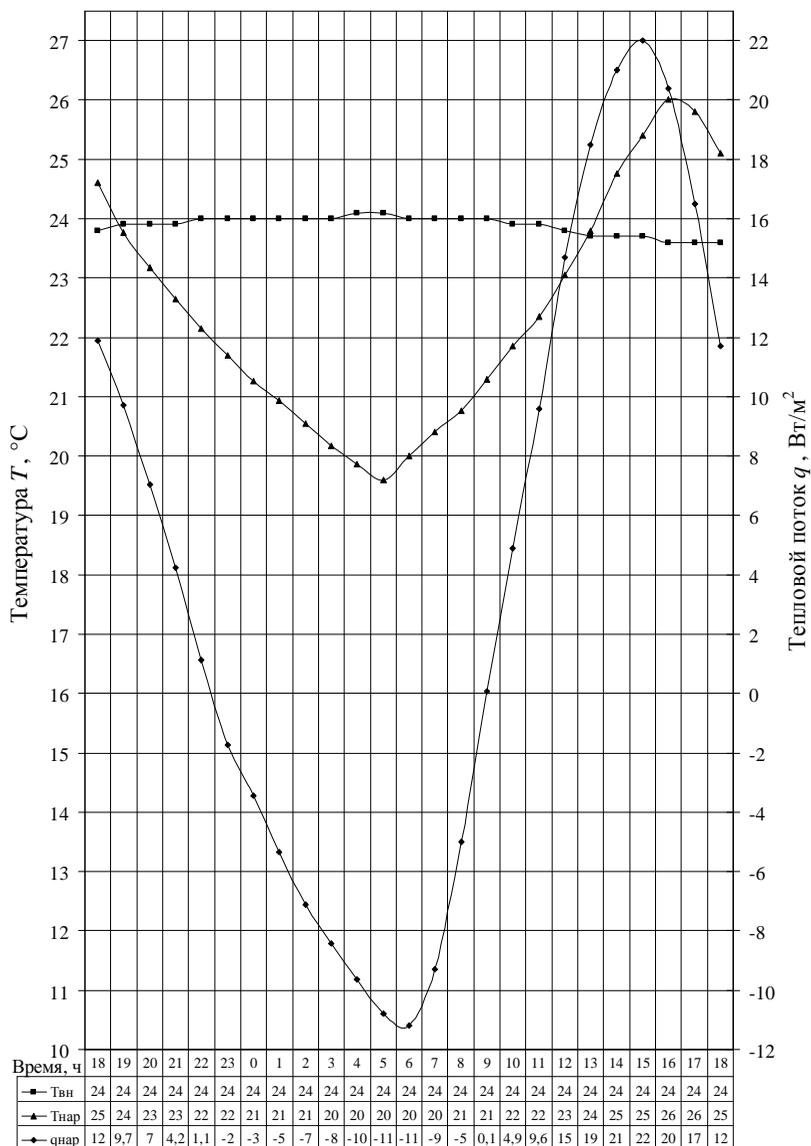


Рис. Пб. Экспериментальные распределения температур и теплового потока ограждения здания из силикатного кирпича (04–05.09.2009 г.)

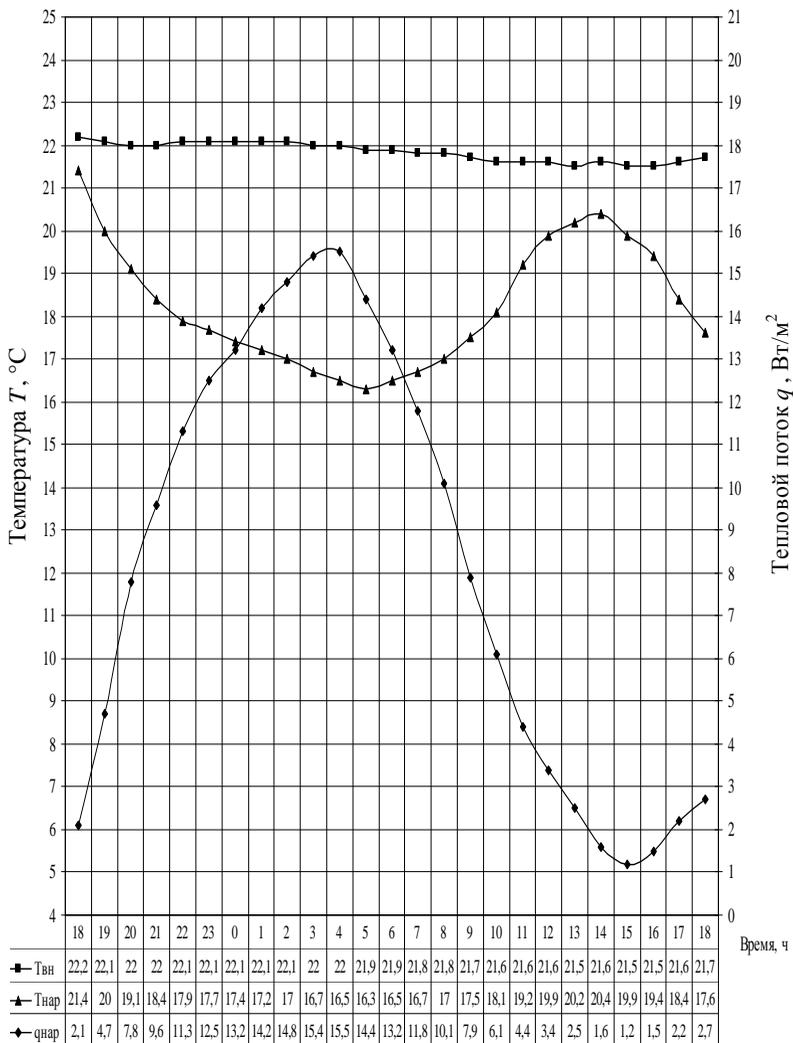


Рис. П7. Экспериментальные распределения температур и теплового потока ограждения здания из силикатного кирпича (25–26.05.2009 г.)

Научное издание

ФОКИН Владимир Михайлович,
КОВЫЛИН Андрей Васильевич,
ЧЕРНЫШОВ Владимир Николаевич

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Редактор Л.В. Комбарова
Инженер по компьютерному макетированию Т.Ю. Зотова

Сдано в набор 22.11.2011 г. Подписано в печать 22.11.2011 г.
Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman
Усл. печ. л. 9,07. Уч.-изд. л. 9,75
Тираж 400 экз. Заказ № 517

ООО «Издательский дом «Спектр», 119048, Москва, ул. Усачева, д. 35, стр. 1
[Http://www.idspektr.ru](http://www.idspektr.ru). E-mail: idspektr@rambler.ru

Подготовлено к печати и отпечатано в Издательско-полиграфическом центре
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14

По вопросам приобретения книги обращаться по телефону 8(4752)638108
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru