

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ**

**ТЕПЛОМЕТРИЯ:  
теория, метрология, практика  
(монография в трех книгах)**

*Под редакцией д.т.н. Т.Г. Грищенко*

**КНИГА 3  
Теплометрическая аппаратура  
для решения прикладных задач  
Том 1**

**Киев 2018**

УДК 53.08:536.2:536.6:536.629.7

ББК 31.3

T343

Авторы: Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша, Л.И. Воробьев,  
З.А. Бурова, С.И. Ковтун, О.Л. Декуша

Рецензенты: Б.И. Стаднык, д-р техн. наук, проф.,  
Национальный университет «Львовская политехника»;  
Л.А. Назаренко, д-р техн. наук, проф.,  
Харьковский национальный университет  
городского хозяйства им. А.Н. Бекетова

*Рекомендовано к печати ученым советом  
Института технической теплофизики НАН Украины*

T343 Теплометрия: теория, метрология, практика. Монография в трех книгах. / Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша, Л.И. Воробьев (и др.); под ред. д-ра техн. наук. Т.Г. Грищенко.

ISBN 978-966-02-8199-8 (общий)

Кн. 3: Теплометрическая аппаратура для решения прикладных задач : в 2 томах. Том 1. – К.: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2018.– 433с.

ISBN 978-966-02-8638-2 (общий)

ISBN 978-966-02-8639-9 (Т.1)

В книге 3 монографии изложены теплометрические методы и описана реализующая их соответствующая аппаратура, предназначенная для применения в научных исследованиях и при технических измерениях теплового потока и температуры, тепловых потерь (или притоков) через ограждающие конструкции зданий, сооружений и теплотехнического оборудования, теплофизических и терморadiационных характеристик материалов и покрытий, теплопоглощения или тепловыделения в различных тепловых процессах, а также методики измерений.

Для научных сотрудников, инженеров, преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений, а также специалистов, занимающихся теплофизическими измерениями и теплоэнергетическим аудитом.

ISBN 978-966-02-8199-8

ISBN 978-966-02-8638-2

ISBN 978-966-02-8639-9

© Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша, Л.И. Воробьев,  
З.А. Бурова, С.И. Ковтун, О.Л. Декуша, 2018

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Благодаря достижениям теплометрии [1\*, 2\*], электроники и метрологии теплоточных измерений [книга 2] на базе первичных преобразователей теплового потока и температуры разработана большая номенклатура современных теплометрических устройств, приборов, установок и компьютеризированных измерительных комплексов. Согласно назначению и сфере применения созданные теплометрические средства измерительной техники (далее – СИТ) являются исследовательскими, то есть предназначенными для работы в лабораторных условиях, и эксплуатационными – для получения информации при проведении тепловых испытаний различных объектов на стройплощадках, заводских стендах, в других натуральных условиях. Хотя область распространения каждого типа СИТ ограничена, общий диапазон их применения достаточно широк.

Книга 3 содержит описание наиболее востребованных теплометрических СИТ (см. рисунок 1\*), разработанных в Институте технической теплофизики НАН Украины (далее – ИТТФ) [3\*–5\*], и состоит из двух томов по 5 глав в каждом.

**В главе 1** представлена группа малогабаритных переносных аналоговых и цифровых приборов типа ИТП для измерения в натуральных условиях плотности локального теплового потока и температуры (1.1) и соответствующая методика определения их истинного значения по результатам измерения приборами ИТП (1.2).

**В главе 2** – группа приборов для измерения плотности потока теплового излучения (радиометры) (2.1), измерители интенсивности солнечного излучения (пиранометры) (2.2), а также средства измерения параметров пламени (теплового потока и температуры) при огневых испытаниях материалов и изделий в самолетостроении и специальный калориметр для проведения метрологической аттестации (2.3).

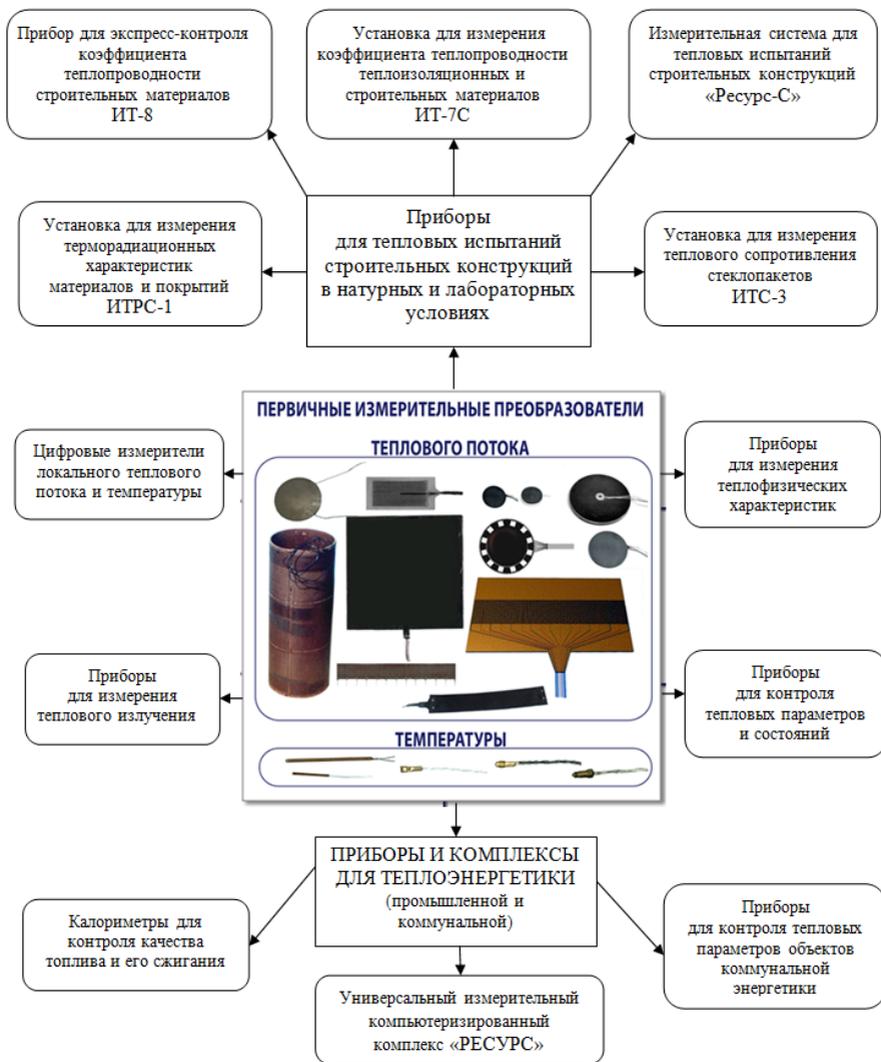


Рис. 1\*. Теплометрическая аппаратура, разработанная в ИТТФ для решения прикладных задач в различных сферах научной и производственной деятельности

**В главе 3** рассмотрено состояние контроля теплоэффективности различных объектов (3.1) и разработанные средства контроля эффективности при производстве теплоты на теплогенерирующих предприятиях (3.2), ее транспортировании по теплосетям, как магистральным так и отдельным теплопроводам (3.3), а также при потреблении теплоты на различных объектах жилищно-коммунального и строительного секторов (3.4).

**В главе 4** описаны особенности, теоретические основы и обоснование корректности измерений теплофизических характеристик (далее – ТФХ) различных неметаллических материалов, а также сформулированы требования к конструктивным и технологическим параметрам приборов на базе преобразователей теплового потока (далее – ПТП), реализующих теплотемпературные методы измерений.

**В главе 5** дано описание гаммы разработанных в ИТТФ теплотемпературных приборов и установок, предназначенных для измерения ТФХ различных неметаллических материалов при значениях комнатной, низкой и криогенной температуры. Приведены схемы конструкций, основные технические и метрологические характеристики описанных СИТ, оригинальные методики измерения, а также результаты экспериментального определения фактических значений ТФХ и их температурные зависимости.

В конце каждой главы дан перечень ссылок на библиографические источники.

Выражаем глубокую благодарность уважаемым рецензентам, профессорам Б.И. Стадныку и Л.А. Назаренко за конструктивную критику и ценные советы при обсуждении и редактировании книги, признательность и благодарность всем сотрудникам отдела, принимавшим в разные годы активное участие в исследованиях и разработках, описанных в книге, а также оказавшим большую помощь при оформлении и подготовке рукописи.

*От авторов*

**Литература к предисловию**

- 1\* *Геращенко О. А.* Основы теплотметрии / Олег Аркадьевич Геращенко. – К. : Наукова думка, 1971. – 192 с.
- 2\* Теплотметрия: теория, метрология, практика : монография в трех книгах. Книга 1. Методы и средства измерения теплового потока / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев [и др.] ; под ред. д-ра техн. наук Т. Г. Грищенко. – К. : Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2017. – 438 с.
- 3\* Приборы для теплофизических измерений : каталог / Институт технической теплофизики АН УССР. – К. : Реклама, 1986. – 73 с.
- 4\* Приборы для теплофизических измерений : каталог / К.: Час, 1991. – 56 с.
- 5\* Приборы для теплофизических измерений [Электронный ресурс] : каталог – К.: ИТТФ НАН Украины. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Название с этикетки диска.

	стр.
Условные обозначения и размерность физических величин, индексы и основные сокращения .....	11
<b>ГЛАВА 1 ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ПЕРЕНОСНЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕПЛООБМЕНА НА ОБЪЕКТАХ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ .....</b>	<b>14</b>
1.1 Малогабаритные приборы для измерения плотности локального теплового потока и температуры.....	15
1.2 Методика определения действительных значений теплового потока по результатам измерений ПТП и приборами типа ИТП.....	28
Литература к главе 1 .....	41
<b>ГЛАВА 2 ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....</b>	<b>43</b>
2.1 Приемники потока теплового излучения (радиометры).....	43
2.1.1 Основы измерения потока теплового излучения термоэлектрическим ПТП вида вспомогательной стенки .....	44
2.1.2 Методы измерения и принципиальные схемы радиометров .....	49
2.1.3 Элементная база приемников теплового излучения.....	55
2.1.4 Теплометрические приемники теплового излучения .....	60
2.2 Приборы для измерения интенсивности солнечного излучения (пиранометры) .....	81
2.3 Теплометрическая аппаратура для исследования параметров пламени при огневых испытаниях .....	94
Литература к главе 2 .....	106

ГЛАВА 3 ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА, ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ И ПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕПЛОТЫ.....	114
3.1 Состояние контроля теплоэффективности различных объектов.....	114
3.2 Приборы для контроля эффективности производства теплоты.....	117
3.3 Приборы для контроля эффективности транспортирования теплоты по тепловым сетям.....	134
3.4 Информационно-измерительные комплексы и приборы для контроля эффективности теплопотребле- ния на жилищно-коммунальных и строительных объектах .....	151
3.4.1 Информационно-измерительные комплексы «Ресурс-С» и «Ресурс-РК» для теплотехнического обследования зданий (сооружений) .....	152
3.4.2 Методика теплотехнического обследования зданий и сооружений комбинированным тепловизионно-теплометрическим методом .....	165
Литература к главе 3 .....	175
 ГЛАВА 4 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ .....	179
4.1 Стационарный теплометрический метод пластины .....	180
4.1.1 Особенности стационарного метода пластины и принципиальные схемы измерительных ячеек .....	180
4.1.2 Особенности теплометрического метода пластины.....	186
4.1.3 Динамические характеристики тепло-метрических приборов.....	190

4.1.4	Искажения теплового и температурного полей в теплотрических приборах плоского типа .....	198
4.1.5	Требования к конструктивным и технологическим параметрам прибора и применяемых преобразователей теплового потока.....	221
4.2	Теплотрический зондовый метод локального теплового воздействия на образец.....	238
4.2.1	Суть метода и его теоретическое обоснование ..	239
4.2.2	Способы уменьшения влияния факторов, искажающих результаты измерения .....	254
4.3	Теплотрический дифференциально-мостовой метод определения комплекса ТФХ.....	262
	Литература к главе 4 .....	274

## ГЛАВА 5 ТЕПЛОТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК .....

280

5.1	Теплотрические приборы в асимметричном исполнении .....	280
5.1.1	Приборы серии ИТ для массовых технических экспресс-измерений коэффициента теплопроводности неметаллических материалов (твердых, жидких, сыпучих) .....	281
5.1.2	Прибор для исследования теплопроводности образцов химикатов-добавок к полимерным материалам .....	289
5.1.3	Прибор для исследования теплопроводности талых и мерзлых грунтов.....	293
5.1.4	Теплотрические приборы для измерения теплопроводности и других геотермических параметров горных пород в лабораторных и натуральных условиях .....	294
5.2	Теплотрические приборы в симметричном исполнении.....	306

5.2.1 Вакуумно-криогенная установка для исследования теплопроводности и теплового сопротивления .....	306
5.2.2 Установка ИТ-7С для измерения коэффициента теплопроводности и теплового сопротивления теплоизоляционных строительных материалов .....	311
5.2.3 Универсальный прибор ИТ-7СУ для исследования теплофизических характеристик и тепловых эффектов .....	333
5.2.4 Прибор ИТ-7-60 для исследования теплопроводности на малогабаритных образцах .....	338
5.3 Теплометрическая установка ВКУ-2 для определения комплекса теплофизических характеристик .....	339
5.4 Зондовые теплометрические приборы для экспресс-измерений коэффициента теплопроводности (модели ИТ-8, ИТ-8М).....	345
5.5 Экспериментальная установка ИТС-3 для измерения теплового сопротивления теплопередаче стеклопакетов .....	357
Литература к главе 5.....	372
ПРИЛОЖЕНИЕ А Переносные приборы для измерения плотности теплового потока и температуры .....	380
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Теплопроводность контактных смазок .....	400
ПРИЛОЖЕНИЕ В Алгоритм определения критерия $K^q$ ...	403
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Теплофизические характеристики материалов.....	410

## Условные обозначения и размерность физических величин, индексы и основные сокращения

### Условные обозначения:

<i>a</i>	– поглотательная способность; – коэффициент температуропроводности ( $\text{м}^2/\text{с}$ )
<i>A</i>	– площадь ( $\text{м}^2$ )
<i>C</i>	– теплоемкость (Дж/К)
<i>c, c<sub>p</sub></i>	– удельная теплоемкость (Дж/(К·кг) при постоянном объеме и Дж/(К·м <sup>3</sup> ) – постоянном давлении)
<i>d, D</i>	– диаметр (м; мм)
<i>E</i>	– сигнал электрический (мВ; мкВ)
<i>f</i>	– площадь сечения ( $\text{м}^2$ )
<i>h</i>	– высота, толщина (м)
<i>K</i>	– коэффициент преобразования, градуировочный коэффициент (Вт/мВ; Вт/(м <sup>2</sup> ·мВ))
<i>K<sup>*</sup></i>	– безразмерный критерий степени искажения температуры и теплового потока (* – верхний индекс «Т» или «q»)
<i>k</i>	– геометрический параметр ПТП
<i>l, L</i>	– длина (м)
<i>m</i>	– масса (кг)
<i>q</i>	– поверхностная плотность теплового потока (Вт/м <sup>2</sup> )
<i>Q</i>	– количество теплоты (Дж)
<i>R</i>	– сопротивление тепловое (м <sup>2</sup> ·К/Вт)
<i>r</i>	– радиус (м); удельная теплота плавления (Дж/кг)
<i>r, z</i>	– цилиндрические координаты (м)
<i>S<sup>*</sup></i>	– чувствительность ПТП (* – верхний индекс «Ф» или «q»)
<i>T</i>	– температура (К или °С)
<i>V</i>	– скорость (м/с; м/час)
<i>W</i>	– количество энергии (Дж)
<i>x, y, z</i>	– декартовы координаты (м)
<i>α</i>	– коэффициент теплообмена (Вт/(м <sup>2</sup> ·К)); – термоэлектрический коэффициент Зеебека (мВ/К)
<i>Δ</i>	– разность (приращение); погрешность абсолютная

$\delta$	– погрешность относительная
$\varepsilon$	– степень черноты (коэффициент эмиссии)
$\rho, \zeta$	– безразмерные радиальная и продольная координаты
$\vartheta$	– текущая температура в безразмерной форме
$\chi$	– коэффициент теплопроводности, Вт/(К·м)
$\sigma$	– постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )
$\tau$	– время (с; мин; час)
$\Phi$	– тепловой поток (Вт; Дж/с)
$\psi$	– угол (в градусах); угловой коэффициент

### Индексы нижние:

<i>БОК</i>	– боковой	<i>РАД</i>	– радиометр; радиальный
<i>ВОЗ</i>	– воздух	<i>РАСС</i>	– рассеянный
<i>ГС</i>	– газовая среда	<i>РЕЗ</i>	– результирующий
<i>ДОП</i>	– дополнительный	<i>СОБ</i>	– собственный
<i>ИЗМ</i>	– измеренный	<i>СР</i>	– среднеинтегральный, средний
<i>К</i>	– контактный	<i>ТБ</i>	– термобатарея
<i>ЛОК</i>	– локальный	<i>УСТ</i>	– установившийся
<i>0</i>	– начальный, действительный	<i>ЧЭ</i>	– чувствительный элемент
<i>ОБР</i>	– образец	<i>Э</i>	– эталонный
<i>ОК</i>	– объект контроля; ограждающая конструкция	<i>ЭФ</i>	– эффективный
<i>ОС</i>	– окружающая среда	$\alpha$	– конвективный
<i>ПАД</i>	– падающий	$\varepsilon$	– радиационный
<i>ПОВ</i>	– поверхность	$\Sigma$	– суммарный
<i>ПОГЛ</i>	– поглощенный	<i>t</i>	– интегральный
<i>ПР</i>	– приведенный	<i>h</i>	– полусферический
<i>ППП</i>	– преобразователь теплового потока	$\chi$	– кондуктивный

### Индексы верхние:

<i>И</i>	– изотермический	<i>q</i>	– плотность теплового потока
<i>T</i>	– температура	$\Phi$	– тепловой поток

**Сокращения:**

АЧТ	–	абсолютно черное тело
АЧХ	–	амплитудно-частотная характеристика
АЦП	–	аналого-цифровой преобразователь
ИК	–	инфракрасный
ИТИ	–	источник теплового излучения
ИТТФ	–	Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины
ОК	–	объект контроля; ограждающая конструкция
ОС	–	окружающая среда
ПК	–	персональный компьютер
ПО	–	программное обеспечение
ПТ	–	преобразователь температуры
ПТИ	–	приемник теплового излучения
ПТП	–	преобразователь теплового потока
СИТ	–	средство измерительной техники
ТРХ	–	терморadiационная характеристика
ТС	–	термометр сопротивления
ТФХ	–	теплофизическая характеристика
ТЭДС	–	термоэлектродвижущая сила
ЧЭ	–	чувствительный элемент

Математические операции и специальные функции обозначены общепринятыми символами. Индексы и величины, встречающиеся не более 3 раз, оговорены в тексте. Размерность всех физических величин приведена в единицах Международной системы (СИ).

## **ГЛАВА 1 ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ПЕРЕНОСНЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕПЛООБМЕНА НА ОБЪЕКТАХ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Совокупность фундаментальных разработок средств непосредственного измерения теплового потока, выполненных в ИТТФ и описанных в первой книге монографии [2\*], позволила решить множество научных и прикладных задач теплотметрии в интересах различных отраслей – строительной, энергетической, химической, медико-биологической, сельскохозяйственной, пищевой, текстильной, пожарной безопасности, аэрокосмической и др. К ним относятся проблемы определения потерь теплоты от теплотрасс, зданий и сооружений, технологических устройств и аппаратов; исследование теплозащитных свойств материалов, одежды и конструкций; измерение тепловыделения от технических и биологических объектов, а также многие другие вопросы, имеющие непосредственное отношение к мероприятиям по ресурсо- и энергосбережению.

Для удовлетворения запросов многочисленных организаций и предприятий силами научного коллектива ИТТФ создана и постоянно совершенствуется техническая база, необходимая для изготовления ПТП, преобразователей температуры (далее – ПТ) и теплотметрических приборов на их основе. Разработки отдела постоянно пополняются новыми средствами теплотпоточных измерений, успешно внедряемыми на практике.

В условиях дефицита и постоянного роста цен на энергоресурсы и коммерциализации отношений между их поставщиками и потребителями тенденция развития СИТ существенно изменилась. В связи с появлением новых проблем, связанных с внедрением технологий и мероприятий, направленных на энерго- и ресурсосбережение, существенно востребованными стали приборы, позволяющие проводить

оперативный контроль с целью минимизации тепловых потерь (или притоков), а также оптимизации и регулирования процессов теплообмена в различном технологическом оборудовании.

### **1.1 Малогабаритные приборы для измерения плотности локального теплового потока и температуры**

После освоения технологии серийного производства термоэлектрических многоэлементных гальванических ПТП их применение по прямому назначению в комплекте со стандартным вольтметром (в 60-е годы 20 ст. значительных весогабаритных размеров) привело к необходимости создания переносных приборов серии ИТП – измерителей плотности локального теплового потока [ $1^* - 4^*$ ; 1.1 – 1.3] с автономным малогабаритным измерительно-показывающим устройством аналогового типа.

Основное назначение приборов ИТП – оперативное измерение теплотерь, контроль и учет которых актуальны при эксплуатации объектов, потребляющих большое количество энергии для своего функционирования. В силу специфики рабочих условий эксплуатации приборов этого назначения они выполнены переносными, малогабаритными, удобными и неприхотливыми в работе и сравнительно недорогими, не боятся сырости, загрязнений, перегревов и переохлаждений.

Прибор ИТП состоит из одного или нескольких первичных преобразователей: ПТП [1.4], ПТ [1.5, 1.6] и разности температуры, а также показывающего измерительного устройства с соответствующим автономным электропитанием и кабеля, соединяющего первичные преобразователи с измерительным устройством.

Первые модели приборов серии ИТП (ИТП-3, ИТП-4, ИТП-4А), разработанные и выпускавшиеся в ИТТФ в 60-е – 80-е годы прошлого века, были выполнены на базе слоистых батарейных ПТП и оснащены малогабаритными стандартны-

ми аналоговыми стрелочными электрическими приборами с подвеской подвижной системы на кернах. Эти приборы были сравнительно грубыми. Недостаточность их чувствительности компенсировали встроенным в корпус измерительного устройства транзисторным усилителем, собранным по двухкаскадной дифференциальной схеме. Для питания усилителя использовали стандартную батарею (КБСЛ-05) или аккумуляторную батарею, при этом зарядные устройства также были вмонтированы в корпус, а аккумуляторную батарею заряжали от осветительной сети.

Приборы были предназначены для измерения только плотности теплового потока. Малые размеры ПТП (не более  $\text{Ø}27 \times 2$  мм) позволяли регистрировать локальные значения теплового потока и определять при необходимости их распределение по поверхности контролируемого объекта. Приборы эксплуатировали при температуре окружающего воздуха от минус 30 до 50 °С и поверхности изделия не более 80 °С. С их помощью был охвачен диапазон измерения плотности теплового потока от 10 до  $2 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>. Внешний вид и основные технические характеристики моделей аналоговых приборов типа ИТП приведены в Приложении А (таблица А.1).

В дальнейшем эти приборы были неоднократно модифицированы. Так приборы модели ИТП-5 были оснащены более чувствительными ПТП и показывающим прибором, что позволило отказаться от усилителя и соответствующей системы питания. Кроме того, в ИТП-5 была применена система аттенюации для изменения диапазона измеряемой плотности теплового потока, что открыло путь к разработке двух- и трехдиапазонных моделей: ИТП-5 и ИТП-6 с пределами измерения плотности теплового потока 1000, 2000 и 5000 Вт/м<sup>2</sup>; ИТП-7 с пределами 50 и 250 Вт/м<sup>2</sup>; ИТП-9 – 300 и 1000 Вт/м<sup>2</sup>; ИТП-11 – 50 и 250 Вт/м<sup>2</sup>; ИТП-13 – 5 и 15 кВт/м<sup>2</sup>.

Таким образом, с помощью последовательно модернизированных приборов ИТП-5, ИТП-6 и ИТП-9 были охвачены оперативным теплотехническим контролем теплоизоляцион-

ные покрытия и конструкции таких объектов, как различные энергетические установки, технологические устройства и аппараты, наземные и производственные трубопроводы. Кроме того, в приборе ИТП-9 было предусмотрено автоматическое подавление флуктуаций сигнала ПТП, обусловленных наличием конвективного теплообмена при натурных измерениях.

Модель ИТП-7, а позже ИТП-11, оснащенные более чувствительными ПТП, позволили контролировать тепловые потери холодильных установок, для которых характерными являются малые значения теплового потока через их теплоизоляцию, а также измерять тепловой поток в условиях существенного неоднородного температурного поля объекта.

Приборы ИТП-13, оснащенные термостойкими ПТП, допускали проведение измерений теплотерь через ограждающие конструкции (далее – ОК) с температурой поверхности до 300 °С, а путем определения распределения теплового потока по поверхности ОК, например, обмуровки плавильных печей, стало возможным заранее обнаруживать скрытые дефекты обмуровки (например, прогары) и предотвращать аварийные ситуации. Однако, приборы ИТП этого поколения обладали таким недостатком, как ограниченность измерений только одним параметром – плотностью теплового потока.

Для более полного удовлетворения поставленным задачам приборы ИТП стали оснащать не только преобразователями ПТП, но и ПТ (измерителями температуры поверхности и воздуха, а также, при необходимости, и разности температуры). Аналоговые стрелочные показывающие приборы были заменены цифровыми электронными устройствами. С появлением портативных персональных компьютеров (далее – ПК) – ноутбуков, приборы выполняли с возможностью подключения к ним [5\*; 1.7].

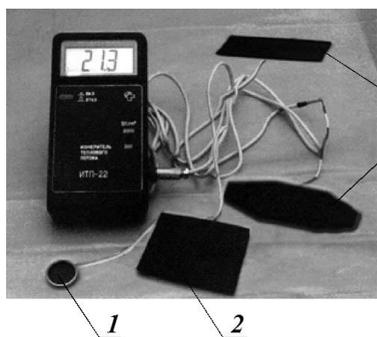
Цифровые модели прибора ИТП, разработанные за последние 10 – 15 лет (см. Приложение А, табл. А.2), предназначены для проведения оперативного обследования энерге-

тического и технологического оборудования, а также для теплотехнических испытаний различных объектов строительной отрасли.

Среди цифровых приборов модели ИТП-12, ИТП-20М, ИТП-22 и ИТП-22К выполнены однопараметрическими и предназначены для измерения только плотности теплового потока:

- в одном диапазоне: прибор ИТП-12 – до  $999 \text{ Вт/м}^2$ ;
- в двух диапазонах:
- прибор ИТП-20М – от  $10,0$  до  $199,9$  и от  $200$  до  $1999 \text{ Вт/м}^2$ ;
- прибор ИТП-22К – от  $50,0$  до  $399,9$  и от  $400$  до  $1999 \text{ Вт/м}^2$ ;
- в трех диапазонах: прибор ИТП-22 – от  $2,0$  до  $19,99$ ; от  $20,0$  до  $199,9$  и от  $200$  до  $1999 \text{ Вт/м}^2$ ;

Для реализации таких возможностей ИТП укомплектованы ПТП различных типоразмеров в количестве от одного до нескольких штук. Например, как показано на рисунке 1.1, модель ИТП-20М, снабженная двумя ПТП в жестком исполнении 1 и 2 и двумя гибкими ПТП 3 и 4, позволяет проводить исследования на объектах с плоскими и криволинейными поверхностями.



1, 2 – ПТП в жестком исполнении;  
3, 4 – ПТП в гибком исполнении

Рис. 1.1. Цифровой однопараметрический трехдиапазонный прибор ИТП-22

Если прибор предназначен для обследования трубопроводов, его комплектуют двумя ПТП, в гибком и жестком исполнении, как показано на рисунке 1.2.



1 – ПТП в гибком исполнении в «лучковом» держателе;  
 2 – ПТП в жестком исполнении;  
 3 – держатель ПТП для установки под слой теплоизоляции

Рис. 1.2. Цифровой прибор ИТП-20М для обследований трубных конструкций

При этом гибкий ПТП 1 закрепляют в специальном держателе пружинного типа на телескопическом жезле, обеспечивающем плотное прижатие к поверхности теплоизоляционного покрытия трубопровода. Жесткий ПТП 2 выполняют в виде пластинки удлинненной прямоугольной формы, позволяющей устанавливать ПТП на цилиндрической поверхности трубы вдоль ее образующей, иногда под слой теплоизоляции, закрепляя его специальным держателем 3, в щель которого заводят кромку слоя теплоизоляции.

Модели ИТП-20 и ИТП-23, представленные на рисунке 1.3, являются двухпараметрическими, предназначенными для измерения плотности теплового потока и температуры.

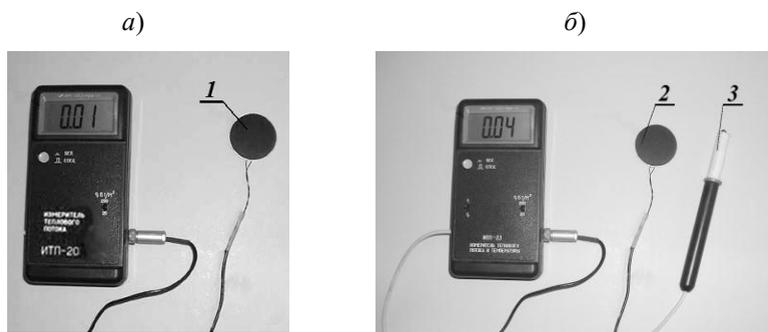
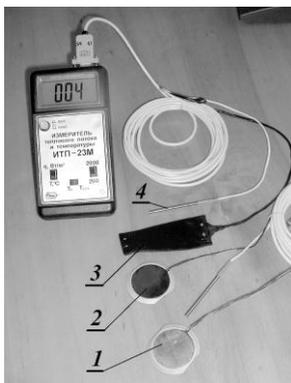


Рис. 1.3. Цифровые двухпараметрические приборы ИТП-20 (а) и ИТП-23 (б): 1 – ПТП со встроенной термопарой, 2 – ПТП (без ПТ); 3 – ПТ

Они оснащены ПТП и ПТ (см. рис. 1.3а), при этом прибор ИТП-20 – ПТП со встроенным спаем термопары, а ИТП-23 – конструктивно не связанными ПТП и ПТ, что проиллюстрировано на рис. 1.3б. Оба прибора имеют предел измерения плотности теплового потока  $2000 \text{ Вт/м}^2$  и применимы в диапазоне значений температуры от минус 50 до  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Пользуются этими приборами для обследования ОК зданий (сооружений) для определения теплотерь через ОК с одновременным контролем температуры ее поверхности и (или) прилегающего воздуха.

Особый интерес для решения значительной части задач энергосбережения представляют приборы моделей ИТП-23М и ИТП-24, в составе которых имеются три ПТП – две модели в жестком и одна в гибком исполнении, а также ПТ, что представлено на рисунке 1.4.



- 1 и 2 – ПТП в жестком исполнении с контрастной степенью черноты их рабочих поверхностей;
- 3 – ПТП в гибком исполнении;
- 4 – ПТ

Рис. 1.4. Цифровой прибор ИТП-23М

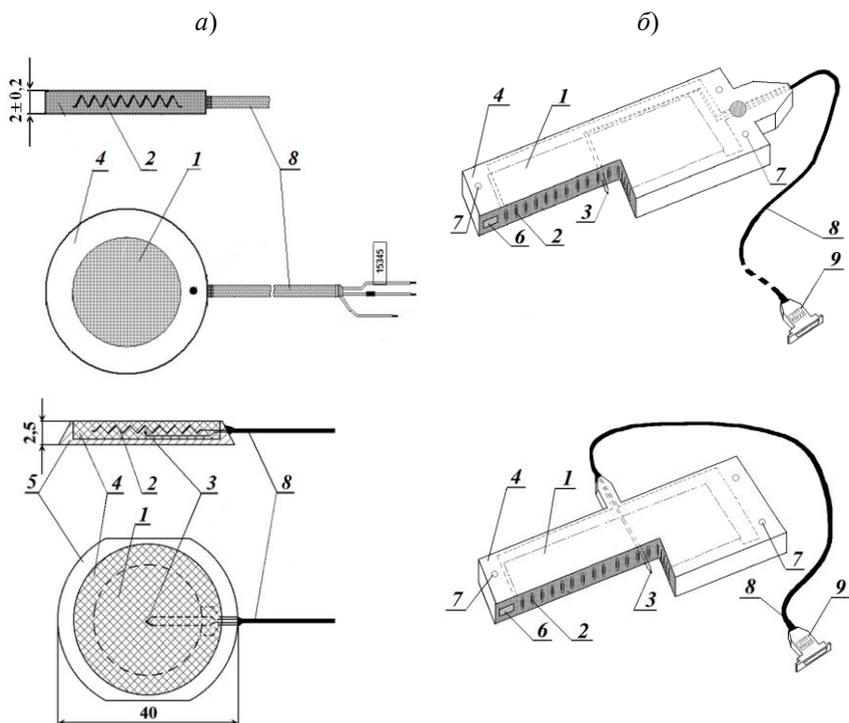
Два идентичных по конструктивному исполнению жестких ПТП имеют различные степени черноты приемных поверхностей. Например, при обследовании объектов, обшитых снаружи металлом (алюминием, нержавеющей сталью и т.п.), применяется ПТП, покрытие тепловоспринимающей поверхности которого имеет степень черноты  $0,20 \pm 0,02$ . В других случаях в измерениях используют ПТП со степенью черноты  $0,92 \pm 0,02$ .

Если степень черноты исследуемой поверхности теплообмена отличается от степени черноты ПТП более, чем на  $\pm 0,05$ , достоверность выполняемых измерений обеспечивают путем наклеивания на приемную поверхность ПТП тонкой пленки с соответствующим значением степени черноты. При отсутствии такого выравнивания истинное значение плотности теплового потока определяют расчетным путем по методике, учитывающей измеренные значения конвективной и радиационной составляющих теплообмена, а также температуры поверхности контролируемого объекта и средней температуры окружающих его поверхностей (см. далее §1.2).

Приборы ИТП-23М и ИТП-24 являются более универсальным СИТ по объему получаемой измерительной информации, поскольку в них предусмотрена возможность измерения кроме плотности теплового потока через ОК еще и температуры: контролируемых внутренних и наружных поверхностей ОК, разности значений температуры этих поверхностей и воздуха по обе стороны от ОК, например, в модели ИТП-24. Эти модели выполнены двух- и трехпараметрическими, на неодинаковые диапазоны измерения плотности теплового потока: от 10 до 19,9 и от 200 до 1999,9 Вт/м<sup>2</sup> в ИТП-23М и от 2,0 до 19,9, от 20 до 199,9 и от 200 до 1999,9 Вт/м<sup>2</sup> в ИТП-24, соответственно.

Эти модели ИТП предназначены для оперативного контроля теплотерь и теплового сопротивления теплоизоляционных конструкций энергетических объектов, в том числе и трубопроводов горячей воды. Обе модели укомплектовываются несколькими ПТП, главным образом термостойкими до 150 °С, в гибком и жестком исполнении, схемы конструкции которых приведены на рисунке 1.5.

ПТП в жестком исполнении (см. рис. 1.5а) представляет собой монолитную конструкцию, содержащую термобатарей ПТП и термопару для измерения температуры поверхности.



1, 2 – теплочувствительная зона ПТП с батареей термоэлементов; 3 – спай термопары (ПТ); 4 – охранный зона; 5 – корпус конусообразный; 6 – крепежная пластина; 7 – крепежные отверстия; 8 – кабель измерительный (выводы ПТП и ПТ); 9 – разъем

Рис. 1.5. Схемы конструкций термостойких ПТП в жестком (а) и гибком (б) исполнении

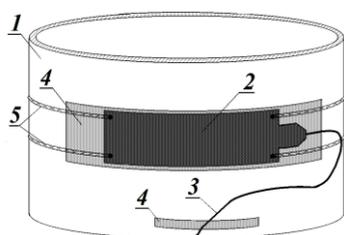
ПТП в гибком исполнении (см. рис. 1.5б) является пластиной прямоугольной формы. В связи с повышенной температурой эксплуатации ПТП (до 150 °С) батарею выполняют из константан-никелевых термоэлементов и заливают электроизоляционным компаундом из украинского полимера (УП-60) с наполнителем – порошкообразным корундом для моделей в жестком исполнении и кремнийорганическим каучуком для гибких ПТП.

Кроме ПТ поверхности (ПТ<sub>ПОВ</sub>), приборы ИТП-23М и ИТП-24 имеют ПТ<sub>ВОЗ</sub> для измерения приповерхностного слоя воздуха.

ПТП устанавливают на контролируемом участке объекта в зоне, которая не должна находиться в непосредственной близости от деталей, обладающих высокой теплоотдачей, чтобы избежать искажения измеряемых значений плотности теплового потока. Если изолированная конструкция имеет стойки, подвески или опорные кольца, то зона измерения должна быть расположена между ними. Кроме того зона измерения с установленным ПТП должна быть защищена от попадания прямых солнечных лучей и теплового излучения посторонних источников, а также от резких колебаний воздуха (ветер, сквозняк и пр.).

ПТП в жестком исполнении устанавливают и прикрепляют с обеспечением хорошего теплового контакта с поверхностью объекта с применением между соприкасающимися поверхностями вязкой теплопроводной смазки (например, технического вазелина), уменьшающей контактное тепловое сопротивление, либо приклеиванием клеящим составом, который пригоден для использования в условиях эксплуатации ПТП, или с помощью односторонней или двусторонней клеящей ленты (скотча), а также механическим прижимом с использованием специального телескопического жезла.

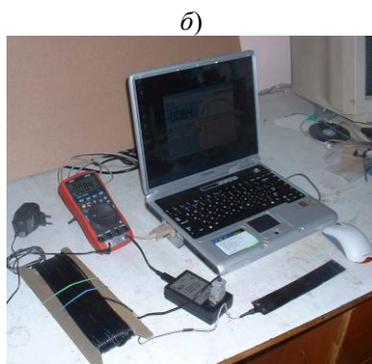
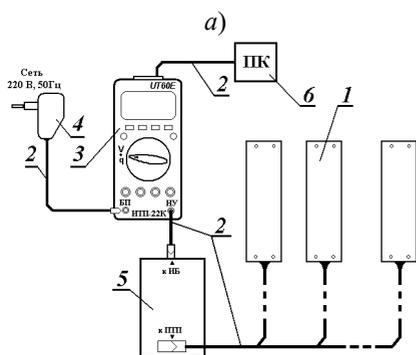
ПТП в гибком исполнении укрепляют на криволинейной поверхности объекта указанными способами, а также механическим прижимом с использованием затягивающего шнура, пропускаемого в крепежные отверстия, как это показано на рисунке 1.6. Функциональных возможностей приборов ИТП-23М и ИТП-24 достаточно, чтобы с их применением определять не только теплопотери через ОК, но и эффективное тепловое сопротивление теплообмену ОК с окружающей средой (далее – ОС) на контролируемой поверхности ОК согласно действующим в Украине нормативным документам [1.7 – 1.12].



1 – объект с криволинейной поверхностью (труба); 2 – ПТП; 3 – ПТ; 4 – отрезки скотча, крепящие ПТП и выводы ПТП и ПТ к поверхности объекта; 5 – шнур крепления

Рис. 1.6. Способы крепления гибких ПТП к цилиндрической поверхности трубы

Трудности ручной регистрации сигналов первичных преобразователей при пользовании прибором ИТП, укомплектованным несколькими ПТП и ПТ, привели к необходимости разработки прибора с автоматической системой регистрации, обработки и хранения измерительной информации. Автоматизация процесса теплового контроля качества теплоизоляции реализована в приборе модели ИТП-22К (рис. 1.7).



1 – группа ПТП (гибких и жестких); 2 – кабели соединительные; 3 – измерительный блок; 4 – блок сетевого питания; 5 – нормирующий усилитель; 6 – ноутбук (с ПО)

Рис. 1.7. Структурная блок-схема (а) и внешний вид (б) компьютеризированного прибора модели ИТП-22К

Прибор ИТП-22К предназначен для измерения плотности теплового потока в двух диапазонах: от 50 до 399,9 Вт/м<sup>2</sup> и от 400 до 1999,9 Вт/м<sup>2</sup> [5\*] с возможностью вывода измерительной информации через последовательный интерфейс RS-232 на переносной ПК (ноутбук), где данные накапливаются для дальнейшей обработки с помощью специализированного программного обеспечения (далее – ПО).

В отечественных и зарубежных приборах типа ИТП применяют, как правило, такие первичные преобразователи:

– для измерения плотности теплового потока многоэлементные батарейные гальванические термоэлектрические ПТП [2\*] согласно требованиям стандарта [1.4] и рекомендациям методики [1.7];

– для измерения значений температуры и разности температуры термоэлектрические ПТ или термометры сопротивления (далее – ТС) согласно стандартам ДСТУ 2837 и ДСТУ 2858 [1.5, 1.6].

При конструктивном оформлении термочувствительного элемента ПТ учтены назначение и условия эксплуатации. На рисунке 1.8 показаны варианты исполнения ПТ для измерения температуры поверхностей (ПТ<sub>пов</sub>) [1.7, 1.8].

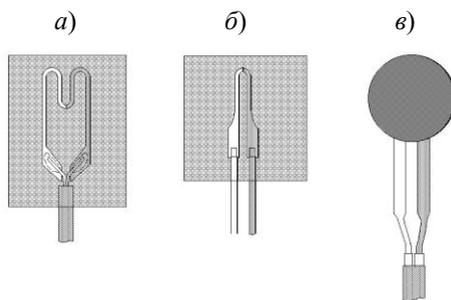


Рис. 1.8. Варианты исполнения термочувствительного элемента преобразователя ПТ<sub>пов</sub>: а, б – ПТ с прямоугольной, в – ПТ с дискообразной приемной площадкой

Габаритные размеры приемных площадок ПТ<sub>пов</sub> составляют для прямоугольных  $(5 - 15) \times (5 - 20) \times (0,2 - 1,5)$  мм, для дискообразных  $\varnothing(1 - 6) \times (0,2 - 1,5)$  мм, диаметр термоэлектродной проволоки 0,1 – 0,3 мм. Диапазон измерения температуры от минус 50 до 100 °С, пределы основной допускаемой абсолютной погрешности измерения  $\pm 0,5$  К.

На рисунке 1.9 показана схема конструкции ПТ<sub>воз</sub> для измерения температуры окружающего воздуха [1.7, 1.8].

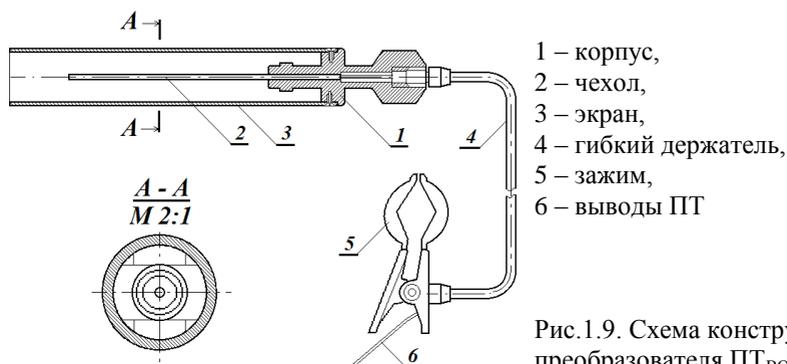
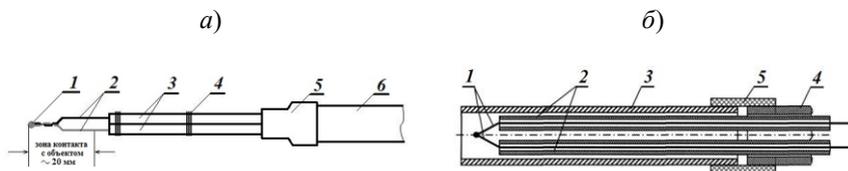


Рис.1.9. Схема конструкции преобразователя ПТ<sub>воз</sub> с цилиндрическим экраном

Для измерения температуры ОС (воздуха) применяемые ПТ<sub>воз</sub>, как правило, изготавливают с цилиндрическим экраном для защиты термочувствительного элемента от теплового излучения. Степень черноты наружной поверхности цилиндрического экрана составляет 0,20 – 0,25.

Для контроля температуры при тепловых испытаниях строительных конструкций и изделий в климатических камерах и натуральных условиях по ДСТУ ISO 6946, ДСТУ ISO 9869, ДСТУ БВ.2.6-17 и ДСТУ БВ.2.6-101 [1.9 – 1.12] применяют комплект термоэлектрических ПТ, состоящий из ПТ<sub>пов</sub> и ПТ<sub>воз</sub>, схемы конструкции которых представлены на рисунке 1.10, и ПТ<sub>ос</sub> – термопары с опорным спаем, наличие которой позволяет реализовать более точный дифференциальный метод измерения температуры.



1 – спай термоэлектродов; 2 – термоэлектроды; 3 – трубки фторопластовые; 4 – бандаж из проволоки; 5 – трубка термоусадочная; 6 – наружная изоляционная трубка

Рис. 1.10. Схемы конструкций ПТ<sub>ПОВ</sub> (а) и ПТ<sub>ВОЗ</sub> (б), применяемых при испытании строительных конструкций и изделий

Преобразователь ПТ<sub>ПОВ</sub> выполняют с термочувствительным элементом в виде точечного спаея термопары (см. рис. 1.10а), а преобразователь ПТ<sub>ВОЗ</sub> – в виде цилиндрической конструкции (см. рис. 1.10б) за счет размещения рабочего спаея термоэлектродов в корпусе из тонкостенной металлической трубки 6 с габаритными размерами  $\text{Ø}3 \times 75$  мм. Термопару с опорным спаея ПТ<sub>ОС</sub> выполняют по технологии изготовления преобразователя ПТ<sub>ВОЗ</sub>, но с габаритными размерами  $\text{Ø} 3 \times 40$  мм, которую при работе помещают в термостатирующее устройство (активного или пассивного типа).

Все ПТ снабжены коммутационными медными проводами, переход к которым от термоэлектродов размещают в пассивном температуровыравнивающем блоке в виде медного металлического цилиндра, из которого выходит кабель удлинительных проводов, концы которых оформлены разъемом, например, ДВ-37. Длина термоэлектродной проволоки во фторопластовых трубках составляет от 1 до 5 м, длина кабеля коммутационных проводов от 3 до 7 м, а удлинительных проводов от 5 до 9 м.

Для применения одновременно нескольких термопар их объединяют в группы (например, по 16 шт.), для которых и предусмотрен кабель с удлинительными проводами. Диапазон измеряемой температуры в таких испытаниях от

минус 50 до 50 °С. Пределы основной допускаемой абсолютной погрешности измерения температуры  $\pm 0,5$  К.

В термоэлектрических ПТ чаще всего используют медь-константановые, медь-копелевые, хромель-алюмелевые или хромель-копелевые термопары [1.5]. Их применяют не только для измерения температуры, но и в системах регулирования, что, как правило, имеет место в различном технологическом оборудовании.

Следует отметить, что особым достоинством представленных приборов является отсутствие необходимости специальной подготовки обслуживающего персонала, простота в работе и надежность эксплуатации.

В разработку приборов типа ИТП существенный вклад внесли сотрудники отдела теплотрии ИТТФ В.Г. Карпенко [1.1], В.Т. Бузынюк [1.2], Л.И. Воробьев [1.3].

## **1.2 Методика определения действительных значений теплового потока по результатам измерений ПТП и приборами типа ИТП**

Отдельные ПТП в комплекте со стандартным измерителем напряжения постоянного тока (вольтметры, милливольтметры), а также переносные приборы ИТП (см. Приложение А), особенно цифровые двух- и трехканальные, оказались востребованными для определения тепловых потерь через различные ОК при теплотехническом обследовании жилых, административных, общественных, производственных, сельскохозяйственных зданий и сооружений: наружные стены, покрытия, чердачные перекрытия, перекрытия над проездами, холодными подпольями и подвалами, окна, двери и ворота в наружных стенах и другие ОК, разделяющие помещения с различными температурно-влажностными условиями. Это стало возможным благодаря наличию приборов, обеспечивающих одновременное измерение плотности теплового потока через ОК и температуры ее внутренних и наружных поверх-

ностей и воздуха вблизи них или разности температуры этих поверхностей и прилегающей ОС, а также стандартов на специальные методики измерений [1.7 – 1.12].

В методике, изложенной ниже, даны расчетные формулы и порядок вычислений действительного значения поверхностной плотности суммарного теплового потока и его конвективной и радиационных составляющих, а также коэффициентов теплообмена между ОК и ОС по результатам измерений плотности суммарного теплового потока и температуры. Методика позволяет обеспечить единство и правильность определения тепловых потерь или тепловых притоков через ОК за счет правильного выбора ПТП и выполнения измерений согласно методике М00013184.5.023-01 [1.7] и стандартам [1.8, 1.12].

При изложении методики использованы следующие термины, определения, размерность и обозначения необходимых тепловых величин, а также исходные формулы:

**$\Phi$**  – **тепловой поток** – количество теплоты, прошедшее в единицу времени через изотермическую поверхность в направлении нормали к ней (в Вт);

**$T$**  – **температура** (в К) поверхности ОК, прилегающей ОС и дополнительного источника теплового излучения (далее – ИТИ), (индексы, соответственно, «ОК», «ОС» и «доп»);

**$q$**  – **поверхностная плотность теплового потока** – равномерно распределенный тепловой поток, проходящий через единицу площади пронизываемой им поверхности (в Вт/м<sup>2</sup>).

**Примечание 1:** далее по тексту термин «поверхностная» опущен.

$q_{\text{пад}}$  – плотность падающего потока теплового излучения на поверхность ОК от дополнительных ИТИ;

$q_{\text{полг}}$  – плотность поглощенного потока теплового излучения поверхностью ОК;

$q_{\Sigma}$  – плотность суммарного теплового потока, проходящего через ОК и обусловленного одновременным действием

конвективной и радиационных составляющих теплообмена между ОК и ОС, равная:

$$q_{\Sigma} = q_{\varepsilon} + q_{\alpha}, \quad (1.1)$$

$q_{\varepsilon}$  – плотность радиационной составляющей суммарного теплового потока, обусловленной тепловым излучением;

$q_{\alpha}$  – плотность конвективной составляющей суммарного теплового потока с коэффициентом теплообмена  $\alpha$ , обусловленной наличием ненулевой разности температуры контролируемой поверхности ОК и прилегающей к ней ОС:

$$q_{\alpha} = \alpha \cdot (T_{ОС} - T_{ОК}); \quad (1.2)$$

$\alpha$  – коэффициент теплообмена, (в Вт/(м<sup>2</sup>·К)), характеризующий интенсивность конвективного теплообмена между контролируемой поверхностью ОК и прилегающей к ней ОС, который, исходя из формулы (1.2), равен:

$$\alpha = q_{\alpha} / (T_{ОС} - T_{ОК}); \quad (1.3)$$

$\alpha_{\varepsilon}$  – коэффициент радиационного теплообмена, характеризующий интенсивность теплообмена при ненулевой разности температуры поверхности ОК и ОС, обусловленного тепловым излучением, равный:

$$\alpha_{\varepsilon} = q_{\varepsilon} / (T_{ОС} - T_{ОК}); \quad (1.4)$$

$\alpha_{\Sigma_{ОК}}$  – коэффициент суммарного теплообмена ОК с ОС, характеризующий интенсивность сложного конвективно- радиационного теплообмена между ОК и ОС, равный:

$$\alpha_{\Sigma_{ОК}} = \alpha + \alpha_{\varepsilon}, \quad (1.5)$$

где  $\alpha$  и  $\alpha_{\varepsilon}$  – согласно формулам (1.3) и (1.4);

$a$  – **поглощательная способность** – безразмерная характеристика поверхности тела, равная отношению значений плотности потока теплового излучения, поглощенного телом и падающего на его поверхность, то есть

$$a = q_{\text{ПОГЛ}} / q_{\text{ПАД}}; \quad (1.6)$$

$q_{СОБ}$  – плотность потока собственного теплового излучения ОК, обусловленного собственной температурой ОК, отличной от термодинамического нуля, и зависящего от излучательной способности (степени черноты) контролируемой поверхности ОК, равная:

$$q_{СОБ} = \sigma \cdot \varepsilon_{th} \cdot T_{ОК}^4, \quad (1.7)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана,

$\varepsilon_{th}$  – **интегральная полусферическая степень черноты** контролируемой поверхности ОК – безразмерная характеристика, определенная как отношение интегральных излучательных способностей данного и абсолютно черного тела при одной и той же температуре;

$q_{\varepsilon_{РЕЗ}}$  – плотность потока результирующего теплового излучения, пришедшего к ОК, равная разности значений плотности потока поглощенного теплового излучения и собственного теплового излучения:

$$q_{\varepsilon_{РЕЗ}} = q_{ПОГЛ} - q_{СОБ}, \quad (1.8)$$

которая с учетом формул (1.6) и (1.7) принимает вид:

$$q_{\varepsilon_{РЕЗ}} = a \cdot q_{ПАД} - \sigma \cdot \varepsilon_{th} \cdot T_{ОК}^4; \quad (1.9)$$

**Примечание 2:** при отсутствии дополнительных ИТИ  $q_{ПАД} = 0$ .

**R** – **тепловое сопротивление**, определяемое как отношение  $\Delta T/q$ , то есть величина, характеризующая изменение разности температуры на каждую единицу плотности теплового потока (в м<sup>2</sup>·К/Вт). Исходя из закона Фурье, тепловое сопротивление, например, плоского слоя толщиной  $h$  равно

$$R = h/\chi, \quad (1.10)$$

где  $\chi$  – коэффициент теплопроводности (в Вт/(м·К)).

Таким образом, тепловое сопротивление ПТП равно  $R_{ПТП} = h_{ПТП}/\chi_{ПТП}$ .

$R_{ОК}$  – тепловое сопротивление конвективно- радиационному теплообмену, характеризующее изменение темпера-

туры контролируемой поверхности ОК в случае сложного теплообмена с ОС на единицу плотности суммарного теплового потока, равное:

$$R_{OK} = 1/\alpha_{\Sigma_{OK}} ; \quad (1.11)$$

$R_{OK_{ПТП}}$  – тепловое сопротивление конвективно- радиационному теплообмену между ПТП, установленным на поверхности ОК, и прилегающей к ПТП ОС, равное сумме значений теплового сопротивления суммарному теплообмену между ПТП и ОС ( $1/\alpha_{\Sigma_{ПТП}}$ ), самого ПТП ( $R_{ПТП}$ ) и контактного теплового сопротивления ( $R_K$ ):

$$R_{OK_{ПТП}} = T/\alpha_{\Sigma_{ПТП}} + R_{ПТП} + R_K , \quad (1.12)$$

при этом по аналогии с формулой (1.5) коэффициент  $\alpha_{\Sigma_{ПТП}}$  суммарного конвективно-радиационного теплообмена ПТП с ОС равен:

$$\alpha_{\Sigma_{ПТП}} = \alpha_{ПТП} + \alpha_{\epsilon_{ПТП}} , \quad (1.13)$$

$R_K$  – контактное тепловое сопротивление между соприкасающимися поверхностями ПТП и ОК, на практике уменьшаемое за счет применения смазочных веществ и материалов (см. Приложение Б).

$q_{ИЗМ}$  – результат измерения поверхностной плотности теплового потока с применением ПТП, вычисляемый по формуле:

$$q_{ИЗМ} = K_{ПТП} \cdot E_{ПТП} , \quad (1.14)$$

где  $K_{ПТП}$  – коэффициент преобразования (градуировочная характеристика) ПТП (в Вт/(м<sup>2</sup>·мВ));  $E_{ПТП}$  – термоэлектродвижущая сила (далее – ТЭДС), генерируемая ПТП, (в мВ);

$q_0$  – действительное значение плотности теплового потока, не искаженного присутствием ПТП на поверхности объекта.

Плотность суммарного потока  $q_{\Sigma}$  через ОК измеряют с применением ПТП, выполненного по [1.4] в виде вспомогательной стенки с тепловым сопротивлением ( $R_{ПТП}$ ), не равным нулю, который располагают на контролируемой поверхности ОК нормально направлению теплового потока. Из-за неадекватности температурных полей контролируемой поверхности ОК при наличии на ней ПТП и его отсутствии результат измерения плотности суммарного теплового потока  $q_{\Sigma_{ИЗМ}}$  и ее действительное значение  $q_{\Sigma_0}$  неодинаковы. При этом действительное значение  $q_{\Sigma_0}$  плотности суммарного теплового потока через контролируемую поверхность ОК, равно [1.6]:

$$q_{\Sigma_0} = q_{\Sigma_{ИЗМ}} \cdot (K^q)^{-1}, \quad (1.15)$$

где  $K^q$  – критерий степени искажения первоначального теплового потока, равный согласно формуле (1.14) отношению плотности искаженного присутствием ПТП теплового потока (т.е. измеренного значения) к плотности первоначального (неискаженного, действительного) теплового потока. Алгоритм определения значения критерия  $K^q$  приведен в Приложении В.

При расчете действительного значения  $q_{\Sigma_0}$  по формуле (1.15) в качестве измеренных значений  $q_{\Sigma_{ИЗМ}}$  следует брать значения, вычисленные по формуле (1.14) с использованием результатов измерения сигнала ПТП в мВ, либо считанные с табло цифрового устройства прибора ИТП показания в Вт/м<sup>2</sup>.

Действительное значение плотности суммарного теплового потока, обусловленное конвективно-радиационным теплообменом между ОК и ОС, равно:

$$q_{\Sigma_0} = q_{\alpha_0} + q_{\varepsilon_0}, \quad (1.16)$$

где  $q_{\alpha_0}$  – по формуле, аналогичной (1.2),

$q_{\varepsilon_0}$  – по формуле (1.9) с учетом примечания 2.

Действительные значения искомых величин для обследованной ОК рассчитывают с использованием полученных результатов измерения: плотности теплового потока через ОК ( $q_{ИЗМ}$ ) и температуры контролируемой поверхности ОК, прилегающей к ней ОС, а также, при необходимости, открытой поверхности ПТП – по алгоритму А или Б в зависимости от теплообмена, происходившего при обследовании ОК (в отсутствие дополнительных ИТИ либо при их наличии).

**Алгоритм А** – между ОК и ОС происходит конвективно-радиационный теплообмен в отсутствие дополнительных ИТИ, для которого справедливо равенство:

$$q_{\Sigma_0} = \alpha_{\Sigma_0} \cdot (T_{OC} - T_{OK}), \quad (1.17)$$

где  $\alpha_{\Sigma_0}$  – первоначальное (действительное) значение эффективного суммарного коэффициента конвективно- радиационного теплообмена.

Для определения значений плотности конвективной и радиационной составляющих суммарного теплового потока и коэффициентов теплообмена применяют не только ПТП, но и два ПТ для измерения температуры поверхности ОК  $T_{OK}$  и воздуха  $T_{OC}$ . Расчет действительных значений искомых величин выполняют в следующей последовательности:

А.1 – вычисляют действительное значение коэффициента  $\alpha_{\Sigma_0}$ , исходя из формулы (1.17) с учетом формулы (1.15):

$$\alpha_{\Sigma_0} = q_{\Sigma_{ИЗМ}} \cdot (K^q)^{-1} / (T_{OC} - T_{OK}), \quad (1.18)$$

где  $q_{\Sigma_{ИЗМ}}$ ,  $T_{OC}$  и  $T_{OK}$  – результаты измерения соответствующих величин, а значения критерия  $K^q$  находят согласно Приложению В;

А.2 – вычисляют действительные значения коэффициента  $\alpha_{\varepsilon_0}$  по формуле:

$$\alpha_{\varepsilon_0} = \sigma \cdot \varepsilon_{ПР_0} \cdot (T_{OC}^4 - T_{OK}^4) / (T_{OC} - T_{OK}), \quad (1.19)$$

где  $\varepsilon_{\text{ПР}_0}$  – действительное значение приведенной степени черноты контролируемой поверхности ОК, определяемое для различных случаев теплообмена по таким формулам [1.13]:

1)  $\varepsilon_{\text{ПР}_0} = \varepsilon_{\text{ПР}_{\text{ОК}}} = \varepsilon_{t_h}$  – интегральная полусферическая степень черноты поверхности ОК в случае теплообмена серой поверхности ОК в окружении черной среды;

2)  $\varepsilon_{\text{ПР}_0} = \varepsilon_{\text{ПР}_{\text{ОК}}} = (\varepsilon_{t_{h_1}}^{-1} + \varepsilon_{t_{h_2}}^{-1})^{-1}$  – для теплообмена между двумя неограниченными параллельными плоскостями, из которых одна, обозначенная индексом «1» – контролируемая поверхность ОК;

3)  $\varepsilon_{\text{ПР}_0} = \varepsilon_{\text{ПР}_{\text{ОК}}} = (\varepsilon_{t_{h_1}}^{-1} + (\varepsilon_{t_{h_2}}^{-1} - 1) \cdot A_1/A_2)^{-1}$  – для теплообмена в замкнутом пространстве, образованном двумя поверхностями с площадями  $A_1$  и  $A_2$ ;

4)  $\varepsilon_{\text{ПР}_0} = \varepsilon_{\text{ПР}_{\text{ОК}}} = \varepsilon_{t_{n_1}} \cdot \varepsilon_{t_{n_2}}$  – для теплообмена между двумя производными поверхностями с ограниченными площадями,  $\varepsilon_{t_n}$  – интегральная нормальная степень черноты.

Справочные данные о числовых значениях интегральной полусферической  $\varepsilon_{t_h}$  и нормальной  $\varepsilon_{t_n}$  степени черноты различных материалов и покрытий в зависимости от температуры поверхности приведены в Приложении Г.

А.3 – вычисляют действительное значение коэффициента конвективного теплообмена  $\alpha_0$ , исходя из формулы (1.5), по формуле:

$$\alpha_0 = \alpha_{\text{ОК}} = \alpha_{\Sigma_0} - \alpha_{\varepsilon_0}, \quad (1.20)$$

используя результаты вычислений по формулам (1.18), (1.19);

А.4 – вычисляют действительное значение плотности конвективной составляющей суммарного теплового потока  $q_{\alpha_0}$  по формуле (1.2) с использованием результата вычисления по формуле (1.20) и результатов измерения  $T_{\text{ОС}}$  и  $T_{\text{ОК}}$ ;

А.5 – вычисляют действительное значение плотности радиационной составляющей суммарного теплового потока  $q_{\varepsilon_0}$ , исходя из формулы (1.16):

$$q_{\varepsilon_0} = q_{\Sigma_0} - q_{\alpha_0}, \quad (1.21)$$

используя результаты вычисления по формулам (1.15) с учетом (1.14) и по (1.2) с учетом (1.20).

**Алгоритм Б** – между ОК и ОС происходит конвективно-радиационный теплообмен при наличии дополнительных ИТИ (например, радиаторы, излучатели, мощные светильники, работающее энергетическое оборудование и др.) или при неодинаковых степенях черноты поверхностей ОК и ПТП. При этом действительное значение плотности суммарного теплового потока через контролируемую поверхность ОК вычисляют по формуле:

$$q_{\Sigma_0} = q_{\alpha_0} + q_{\varepsilon_{PE30}}, \quad (1.22)$$

которая с учетом формул (1.1) и (1.9) принимает вид:

$$q_{\Sigma_0} = \alpha_0 \cdot (T_{OC} - T_{OK}) + a_{OK} \cdot q_{ПАД} - \sigma \cdot \varepsilon_{th} \cdot T_{OK}^4. \quad (1.23)$$

Для экспериментального определения значений плотности суммарного теплового потока, его конвективной и радиационных составляющих и коэффициентов теплообмена с ОС применяют два ПТП, имеющие одинаковое тепловое сопротивление ( $R_1 = R_2$ ), но контрастные терморрадиационные характеристики ( $\varepsilon_{th_1} \neq \varepsilon_{th_2}$  и  $a_1 \neq a_2$ ), и четыре ПТ: для измерения температуры открытых поверхностей двух ПТП ( $T_1, T_2$ ) и воздуха по обе стороны ОС ( $T_{OC_1}, T_{OC_2}$ ).

Действительные значения этих искомым величин находят, исходя из системы трех уравнений теплового баланса типа уравнения (1.23), составленных для поверхностей обоих ПТП и контролируемой поверхности ОК. Из решения такой системы получаются выражения, на которых основан алгоритм Б для определения действительных значений плотности суммарного теплового потока и его конвективной и

радиационной составляющих и коэффициентов теплообмена ОК и ОС, состоящий из таких последовательных вычислений:

Б.1 – вычисляют действительное значение плотности суммарного теплового потока по формуле:

$$q_{\Sigma_0} = \left[ (q_{ИЗМ_1} + \sigma \cdot \varepsilon_{t_{h_1}} \cdot T_1^4) \cdot (a_{ОК} - a_2 \cdot \Delta T_{ОК} / \Delta T_2) + \right. \\ \left. + (q_{ИЗМ_2} + \sigma \cdot \varepsilon_{t_{h_2}} \cdot T_2^4) \cdot (a_1 \cdot \Delta T_{ОК} / \Delta T_2 - a_{ОК} \cdot \Delta T_1 / \Delta T_2) - \right. \\ \left. - \sigma \cdot \varepsilon_{t_h} \cdot T_{ОК}^4 \cdot (a_1 - a_2 \cdot \Delta T_1 / \Delta T_2) \right] / (a_1 - a_2 \cdot \Delta T_1 / \Delta T_2), \quad (1.24)$$

где  $\Delta T_1 = T_{ОС} - T_1$ ,  $\Delta T_2 = T_{ОС} - T_2$ ,  $\Delta T_{ОК} = T_{ОС} - T_{ОК}$  – разности значений температуры, измеренных ПТ;

$q_{ИЗМ_1}$ ,  $q_{ИЗМ_2}$  – результаты измерения плотности суммарного теплового потока, соответственно, первым и вторым ПТП, установленными на поверхности ОК;

Б.2 – вычисляют плотность потока теплового излучения, падающего на поверхность ОК, по формуле:

$$q_{ПАД} = \frac{(q_{ИЗМ_1} + \sigma \cdot \varepsilon_{t_{h_1}} \cdot T_1^4) - (q_{ИЗМ_2} + \sigma \cdot \varepsilon_{t_{h_2}} \cdot T_2^4) \cdot \Delta T_1 / \Delta T_2}{a_1 - a_2 \cdot \Delta T_1 / \Delta T_2}; \quad (1.25)$$

Б.3 – вычисляют плотность потока поглощенного теплового излучения по формуле:

$$q_{ПОГЛ} = a_{ОК} \cdot q_{ПАД} \quad (1.26)$$

с использованием результата вычисления по формуле (1.25);

Б.4 – вычисляют плотность потока собственного теплового излучения  $q_{СОБ}$  по формуле (1.7);

Б.5 – вычисляют плотность потока результирующего теплового излучения  $q_{\varepsilon_{РЕЗ}}$  по формуле (1.9), используя результаты вычислений по формулам (1.7) и (1.26);

Б.6 – вычисляют коэффициент суммарного теплообмена по формуле:

$$a_{\Sigma_0} = q_{\Sigma_0} / \Delta T_{ОК} \quad (1.27)$$

с использованием результата вычисления по формуле (1.24) и результата измерения значений температуры  $T_{ОС}$  и  $T_{ОК}$ ;

Б.7 – вычисляют коэффициент конвективного теплообмена по формуле:

$$\alpha = \frac{a_1 \cdot (q_{ИЗМ_2} + \sigma \cdot \varepsilon_{t_{h_2}} \cdot T_2^4) - a_2 \cdot (q_{ИЗМ_1} + \sigma \cdot \varepsilon_{t_{h_1}} \cdot T_1^4)}{\Delta T_2 \cdot (a_1 - a_2 \cdot \Delta T_1 / \Delta T_2)}; \quad (1.28)$$

Б.8 – вычисляют плотность конвективной составляющей суммарного теплового потока по формуле (1.2), используя результат вычисления по формуле (1.28).

Выбор алгоритма определения действительных значений поверхностной плотности суммарного теплового потока, его конвективной и радиационных составляющих и коэффициентов теплообмена с ОС (случаи А и Б) производят, оценивая степень влияния дополнительных ИТИ на результат измерения.

Для каждого дополнительного ИТИ плотность потока теплового излучения  $q_{ДОП_i}$  вычисляют по формуле:

$$q_{ДОП_i} = \varepsilon_{ПР_i} \cdot \psi_i \cdot (T_{ДОП_i}^4 - T_{ОК}^4), \quad (1.29)$$

где  $\varepsilon_{ПР_i}$  – приведенная интегральная степень черноты  $i$ -го дополнительного ИТИ при этом

$$\varepsilon_{ПР_i} \approx \varepsilon_{t_{h_{ОК}}} \cdot \varepsilon_{t_n_{ДОП_i}}, \quad (1.30)$$

где  $\varepsilon_{t_{h_{ОК}}}$  – интегральная *полусферическая* степень черноты поверхности ОК;

$\varepsilon_{t_n_{ДОП_i}}$  – интегральная *нормальная* степень черноты  $i$ -го ИТИ, если  $\varepsilon_{t_{h_{ОК}}}$  и  $\varepsilon_{t_n_{ДОП_i}}$  не менее 0,7;

$\psi_i$  – угловой коэффициент излучения, определяемый для различных случаев расположения дополнительных ИТИ относительно контролируемой поверхности ОК [1.7, 1.13];

$T_{ДОП_i}$  – температура поверхности дополнительного ИТИ.

Если отношение суммы значений плотности потока теплового излучения всех присутствующих дополнительных

ИТИ ( $\sum_{i=1}^N q_{\text{ДОП}_i}$ , где  $N$  – количество дополнительных ИТИ) к результату измерения поверхностной плотности суммарного теплового потока через ОК ( $q_{\Sigma_{\text{ИЗМ}}}$ ) удовлетворяет условию:

$$\sum_{i=1}^N q_{\text{ДОП}_i} / q_{\Sigma_{\text{ИЗМ}}} \leq 0,05, \quad (1.31)$$

то реализуют алгоритм А, в противном случае – алгоритм Б.

При обследовании ОК по изложенной методике вместо отдельных ПТП и ПТ в комплекте со стандартным измерителем напряжения постоянного тока или цифровым переносным прибором типа ИТП (модели ИТП-22, -23, -24) можно использовать специализированное теплотметрическое устройство типа РКТП [1.7].

Устройство модели РКТП предназначено для экспериментального определения составляющих суммарного теплового потока при сложном радиационно-конвективном теплообмене. Оно представляет собой неразъемную плоскую конструкцию, схема которой дана на рисунке 1.11.



Рис. 1.11. Схема конструкции устройства модели РКТП

Устройство РКТП содержит два одинаковых размеров ПТП 1 и 2, смонтированных на общей температуровыравни-

вающей подложке 3, обеспечивающей условия изотермичности для контактирующих с ней поверхностей ПТП. Вторые поверхности этих ПТП снабжены тепловоспринимающими пластинками 4 и 5. Пластинки с целью обеспечения контрастности терморadiационных характеристик изготовлены из нержавеющей стали, при этом одна выполнена черной (4), а вторая – белой (5). При этом поглощающая способность черной пластинки должна быть не менее 0,80 (степень черноты не более 0,25), а белой пластинки – 0,25 (0,80).

Устройство снабжено хромель-алюмелевыми термопарами (ТХА) 6 и 7 для измерения температуры тепловоспринимающих пластинок 4 и 5 обоих ПТП, поверхности ОК 8 и воздуха 9. Термопара 9 выполнена с защитным экраном термочувствительного элемента (см. рис. 1.9, 1.10б).

Дифференциальное включение всех термопар обеспечивает получение значений разностей температуры  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$  и  $\Delta T_{OK}$  без измерения их абсолютных значений (см. рисунок 1.12).

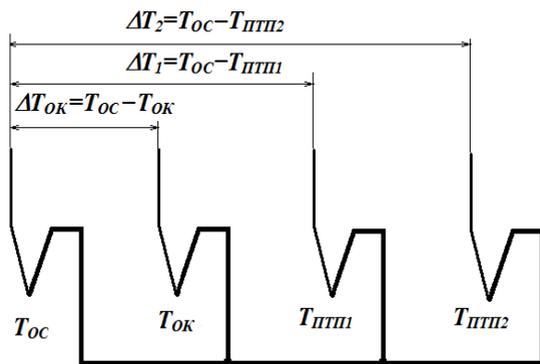


Рис. 1.12. Схема дифференциального включения термопар устройства РКТП

Часто необходимо провести измерения плотности теплового потока одновременно несколькими ПТП и ПТ (более шести первичных преобразователей), расположенными в раз-

личных точках контролируемого объекта, нередко отдаленных друг от друга. В этом случае предпочтительно применять многоканальную измерительно-регистрирующую систему с возможностью передачи данных, полученных при измерении, на ПК.

### Литература к главе 1

1.1 *Карпенко В. Г.* Исследование и разработка методов измерения теплотерь : дис. ... канд. техн. наук / В. Г. Карпенко; Институт технической теплофизики АН УССР. – Киев: ИТТФ АН УССР, 1971. – 187 с.

1.2 *Бузынюк В. Т.* Приборы для оперативных измерений тепловых потоков через ограждающие конструкции : дис. ... канд. техн. наук / В. Т. Бузынюк; Институт технической теплофизики АН УССР.. – Киев : ИТТФ АН УССР, 1984. – 170 с.

1.3 *Грищенко Т. Г.* Современные разработки ИТТФ НАН Украины в области теплофизического приборостроения / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев // Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ : сб. трудов международной научно-техн. конф., 30 ноября – 2 декабря 2010 г., СПб. – СПб. : Изд-во СПбГУНиПТ, 2010. – Кн. 1. – С. 23-43. – ISBN 978-5-89565-222-0.

1.4 Енергозбереження. Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. Загальні технічні умови : ДСТУ 3756-98 (ГОСТ 30619-98). – [Чинний від 2000-07-01]. – К. : Держстандарт України, 2000. – 21 с. – (Міждержавний стандарт).

1.5 Перетворювачі термоелектричні. Частина 1. Технічні характеристики та допустимі відхили електрорушійної сили (ЕРС) : ДСТУ EN 60584-1:2016 (EN 60584-1:2013, IDT). – [Чинний від 01.11.2016]. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 96 с.

1.6 Перетворювачі опору. Загальні технічні вимоги та методи випробування : ДСТУ 2858:2015. – [Чинний від 01.07.2017]. – 21 с. – (Державний стандарт України).

1.7 Визначення теплових потоків крізь огорожувальні конструкції : Методика М 00013184.5.023-01 / Розробники: Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша [та ін.] // Нормативний документ. – К. : ЛОГОС, 2002. – 131 с.

1.8 Енергозбереження. Будівлі та споруди. Методи вимірювання поверхневої густини теплових потоків та визначення коефіцієнтів теплообміну між огорожувальними конструкціями та доквіллям : ДСТУ 4035-2001 (ГОСТ 25380-2001) [Чинний від 01.01.2002]. – К. : Держстандарт України, 2001. – 44 с. – (Міждержавний стандарт).

1.9 Будівельні конструкції та елементи. Тепловий опір і коефіцієнт теплопередавання. Методика розраховування : ДСТУ ISO 6946:2007 (ISO 6946:1996, IDT) [Чинний від 01.10.2009]. – К. : Держстандарт України, 2009. – 23 с. – (Національний стандарт України).

1.10 Теплоізоляція. Будівельні елементи. Натурні вимірювання теплового опору та коефіцієнта теплопередавання : ДСТУ ISO 9869:2007 (ISO 9869:1994, IDT) [Чинний від 01.01.2009]. – К. : Держстандарт України, 2009. – 46 с. – (Національний стандарт України).

1.11 Конструкції будинків і споруд. Блоки віконні та дверні. Методи визначення опору теплопередачі : ДСТУ Б В.2.6-17-2000 (ГОСТ 26602.1-99) [Чинний від 01.01.2001]. – К. : Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 2001. – 30 с. – (Міждержавний стандарт).

1.12 Конструкції будинків і споруд. Метод визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій : ДСТУ Б В.2.6-101:2010. – [На заміну ГОСТ 26254-84. Чинний від 01.10.2010]. – К. : Держстандарт України, 2010. – 20 с. – (Національний стандарт України).

1.13 Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров : справочник / Х. Уонг ; пер. с англ. В. В. Яковлев, В. И. Колядин. – М. : Атомиздат, 1979. – 216 с.

## **ГЛАВА 2 ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Современное развитие техники и технологий характеризуется интенсификацией энергетических и технологических процессов. При этом возрастает роль радиационного теплообмена и увеличивается потребность в измерениях и контроле плотности потока теплового излучения и его составляющих.

Диагностика и регулирование потока теплового излучения важны в камерах сгорания газотурбинных двигателей, напряженных зонах парогенераторов, металлургических печах и др. Информация о радиационном тепловом потоке необходима при проектировании космических аппаратов для прогнозирования их теплового состояния, в медицине, биологии, сельском хозяйстве и многих других сферах жизнедеятельности человека.

### **2.1 Приемники потока теплового излучения (радиометры)**

Для измерения плотности потока теплового излучения в настоящее время существует широкая номенклатура СИТ – приемников теплового излучения (далее – ПТИ) для различных сфер применения [1\*; 2.1 – 2.14]. В данной монографии рассмотрены приемники, в которых энергия фотонов, преобразованная в тепловую, регистрируется с помощью термопары или батареи термопар, и которые принято относить к термоэлектрическим градиентным ПТИ. Малая скорость тепловых процессов обеспечивает интегрирование квантов энергии, доставляемых фотонами приемной площадке ПТИ. Степень их поглощения определяется свойствами поверхности площадки, в первую очередь – ее коэффициентом поглощения, который в широком диапазоне длины волны несущей

ственно зависит от частоты излучения. Термоэлектрические ПТИ являются неселективными, и это их основное преимущество перед иными типами тепловых приемников.

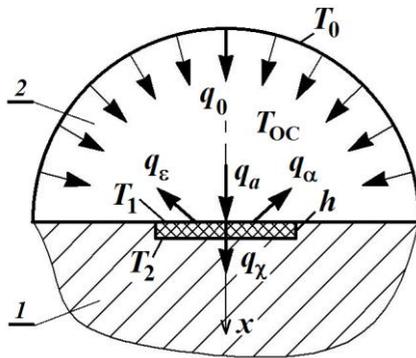
Термоэлектрические ПТИ широко применяются в инфракрасной спектроскопии, при определении энергии и мощности лазерных излучателей, в пирометрии, при определении рентгеновского и гамма-излучения, в пищевой и перерабатывающей промышленности, в сельском хозяйстве, в приборах для измерения излучения Солнца и Земли, в космической и СВЧ-технике, а также в метрологии потоков теплового излучения.

Несмотря на существование целого ряда различных типов ПТИ, многие проблемы создания и серийного производства рабочих приборов, удовлетворяющих требованиям массовых технических измерений, особенно в энергетике, долгое время оставались нерешенными. Для разработки таких ПТИ перспективно применение батарейных термоэлектрических ПТП вида вспомогательной стенки [1\*; 2\*, 1.4].

### **2.1.1 Основы измерения потока теплового излучения термоэлектрическим ПТП вида вспомогательной стенки**

Для понимания теплофизической сути задачи измерения радиационного теплового потока рассмотрим элементарную площадку, расположенную на поверхности полуограниченного твердого тела, облучаемого радиационным потоком с интегральной плотностью  $q_0$  (см. рисунок 2.1), и тепловой баланс приповерхностного слоя толщиной  $h$ .

Поглощенный тепловой поток вызывает повышение температуры поверхностного слоя, что в свою очередь приводит к активизации трех процессов теплообмена, а именно: процесса собственного полусферического интегрального излучения, процесса теплопроводности, направленного вдоль оси  $x$  в облучаемом теле, а также конвективного теплообмена между поверхностью тела и ОС.



- 1 – облучаемое тело,  
 2 – окружающая среда (ОС)  
 $q_0$  – полусферический поток  
 теплового излучения,  
 $q_a$  – тепловой поток, поглощенный  
 облучаемой поверхностью,  
 $q_\varepsilon$  – радиационная составляющая,  
 $q_\alpha$  – конвективные теплопотери,  
 $q_\chi$  – кондуктивная составляющая

Рис. 2.1. Модель теплообмена облучаемой поверхности с ОС

При установившемся тепловом режиме тепловой баланс выделенного элемента записывается в виде алгебраической суммы плотностей всех составляющих теплового потока:

$$q_a = q_\varepsilon + q_\chi + q_\alpha, \quad (2.1)$$

где  $q_a$  – плотность потока теплового излучения, поглощенного поверхностью облучаемого тела, равная  $q_a = a \cdot \sigma \cdot T_0^4$ , где  $a$  – поглощательная способность облучаемой поверхности;  $T_0$  – температура ИТИ, то есть доля поглощенной энергии характеризуется интегральной поглощательной способностью. Следовательно, если представить себе рассматриваемый элемент приповерхностного слоя как измеритель теплового потока (ИТП) толщиной  $h$ , то измерение теплового потока возможно только при значении  $a = 1$  или при наличии сведений об изменении значения  $a$  от температуры (и давления ОС в условиях тепловакуумных камер);

$q_\varepsilon$  – радиационная составляющая, то есть плотность потока собственного излучения, равная  $q_\varepsilon = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_1^4$  и являющаяся при известной и постоянной степени черноты  $\varepsilon$  однозначной функцией температуры поверхности облучаемого тела ( $T_1$ );

$q_\chi$  – кондуктивная составляющая, то есть плотность теплового потока, проникающего через поверхность внутрь ПТП и передаваемого в нормальном к ПТП направлении путем теплопроводности. Она связана с физическими параметрами ПТП через уравнение Фурье:  $q_\chi = -\chi_{\text{эф}} \cdot (T_1 - T_2)/h$ .

$q_\alpha$  – конвективная составляющая, то есть плотность теплового потока, отводимого от поверхности облучаемого тела путем конвективного теплообмена с ОС. Она связана с параметрами ОС через уравнение Ньютона:  $q_\alpha = \alpha \cdot (T_1 - T_{\text{ОС}})$ . Коэффициент теплообмена  $\alpha$  зависит от большого числа параметров, в том числе и от давления ОС. С увеличением вакуума и при некотором значении давления значение  $\alpha$  настолько приближается к нулю, что оказывается возможным пренебречь этой составляющей теплового потока, в частности, при измерении в тепловакуумных камерах [2.7].

С учетом сказанного уравнение теплового баланса (2.1) принимает вид:

$$a \cdot \sigma \cdot T_0^4 = \varepsilon \cdot \sigma T_1^4 + \chi_{\text{эф}} \cdot (T_1 - T_2)/h + \alpha \cdot (T_1 - T_{\text{ОС}}). \quad (2.2)$$

Параметры рассмотренной системы, влияющие на статьи баланса, можно разделить на внутренние и внешние. К внутренним относятся ТФХ ПТИ и его геометрические размеры, а к внешним – температура ИТИ и ОС, коэффициент теплообмена, определяемый составом среды, давлением и скоростью перемещения, а также оптические характеристики [2.7, 2.15].

При рассмотрении теплового баланса системы «ИТИ – ПТИ – ОС» следует иметь в виду, что в ПТИ может быть использован ПТП в двух вариантах его исполнения:

**1** – горячие и холодные спаи чувствительного элементе (далее – ЧЭ) ПТП размещены в сечениях, разнесенных по высоте твердой вспомогательной стенки, либо

**2** – спаи ЧЭ разделены слоем газовой среды (ГС) такой же толщины, как и ЧЭ первого исполнения.

Площадь тепловоспринимающей поверхности в обоих ПТП одинакова. Схематически тепловая и температурная обстановка этих двух систем показана на рисунке 2.2, а и б.

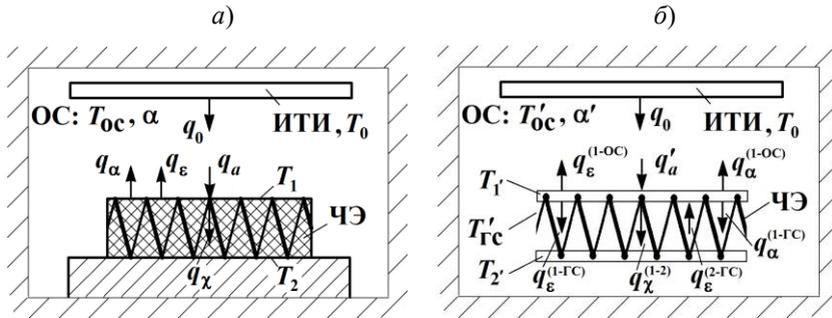


Рис. 2.2. Модель теплообмена системы «ИТИ – ОС – ПТИ»

Для 1-го случая (см. рис. 2.2а) уравнение теплового баланса имеет вид (2.2). Исходя из того, что сигнал термоэлектрического ПТП пропорционален разности значений температуры облучаемой и затененной поверхностей термобатареи, можно получить расчетную формулу для прогнозирования ожидаемых значений сигнала термобатареи. При допущении о том, что терморрадиационные характеристики (далее – ТРХ)  $a = \epsilon = 1$ , из формулы (2.2) следует такое соотношение:

$$T_1 - T_2 = \frac{\sigma \cdot (T_0^4 - T_1^4) - \alpha \cdot (T_1 - T_{OC})}{\chi_{ЭФ}/h}, \quad (2.3)$$

откуда формула для ТЭДС термобатареи – сигнала ЧЭ ПТИ ( $E_{TB}$ ) имеет вид:

$$E_{TB} = \alpha_{TB} \cdot \frac{\sigma \cdot (T_0^4 - T_1^4) - \alpha \cdot (T_1 - T_{OC})}{\chi_{ЭФ}/h}, \quad (2.4)$$

где  $\alpha_{TB}$  – коэффициент Зеебека для пары термоэлектродов термобатареи ПТИ.

Для 2-го случая (см. рис. 2.2б), то есть когда ПТП выполнен с газовой прослойкой между сечениями 1 и 2, в которых расположены горячие и холодные спаи ЧЭ, при

сохранении тех же обозначений, но не имеющих индекс «штрих», а также при допущении об одинаковой температуре по всему объему ( $T'_{OC} = T'_{ГС}$ ) уравнение теплового баланса (2.1) для сечения 1 с горячими спаями термобатареи ПТП записывается в виде:

$$q'_a = q'_\varepsilon^{(1-OC)} + q'_\varepsilon^{(1-ГС)} + q'_\varepsilon^{(2-OC)} + q'_\chi^{(1-2)} + q'_\alpha^{(1-OC)} + q'_\alpha^{(1-ГС)}, \quad (2.5)$$

где  $q'_a = a' \cdot q_0 = a' \cdot \sigma \cdot T_0^4$  – плотность поглощенного теплового потока,

$q'_\varepsilon^{(1-OC)} = \varepsilon'_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4$  – плотность потока собственного излучения поверхности сечения 1 в ОС;

$q'_\varepsilon^{(1-ГС)} = \varepsilon'_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4$  – плотность потока собственного излучения нижней поверхности сечения 1 в газовую среду внутри ПТП;

$q'_\varepsilon^{(2-ГС)} = \varepsilon'_2 \cdot \sigma \cdot T_2^4$  – плотность потока собственного излучения поверхности сечения 2 в ГС в ПТП;

$q'^{1-2} = \chi'_{ЭФ} \cdot (T_1 - T_2)/h$  – плотность кондуктивной составляющей теплового потока через ГС между сечениями 1 и 2;

$q'_\alpha^{(1-OC)}$  и  $q'_\alpha^{(1-ГС)}$  – конвективные потери от сечения 1 в ОС и ГС, соответственно, равные  $\alpha' \cdot (T_1 - T'_{OC})$  и  $\alpha' \cdot (T_1 - T'_{ГС})$ .

С учетом равенства  $T'_{OC} = T'_{ГС} = T_{OC}$  имеем:

$$q'_\alpha^{(1-OC)} = q'_\alpha^{(2-ГС)} = \alpha' \cdot (T_1 - T_{OC})$$

Исходя из изложенного, уравнение теплового баланса (2.5) принимает вид:

$$a' \cdot \sigma \cdot T_0^4 = \varepsilon'_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4 + \varepsilon'_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4 - \varepsilon'_2 \cdot \sigma \cdot T_2^4 + \chi'_{ЭФ} \cdot (T_1 - T_2)/h + 2\alpha' \cdot (T_1 - T_{OC}), \quad (2.6)$$

откуда при допущении, что  $\alpha' = \varepsilon'_1 = \varepsilon'_2 = 1$ , получаем соотношение для разности значений температуры горячих и холодных спаев в ПТП, выполненном с газовой средой:

$$T_1 - T_2 = \frac{\sigma \cdot (T_0^4 - T_1^4) - 2\alpha' \cdot (T_1 - T_{\text{ос}})}{\chi'_{\text{эф}}/h + \sigma \cdot (T_1 + T_2) \cdot (T_1^2 + T_2^2)} \quad (2.7)$$

и для термоэлектрического сигнала ПТИ:

$$E' = \alpha_{\text{ТБ}} \cdot \frac{\sigma \cdot (T_0^4 - T_1^4) - 2\alpha' \cdot (T_1 - T_{\text{ос}})}{\chi'_{\text{эф}}/h + \sigma \cdot (T_1 + T_2) \cdot (T_1^2 + T_2^2)}. \quad (2.8)$$

В выражениях (2.4) и (2.8) числители представляют собой значения плотности теплового потока, перетекающего от облучаемой поверхности к затененной, то есть пронизывающего ЧЭ ПТИ. Коэффициент пропорциональности между этим потоком и сигналом ПТИ принято называть чувствительностью ПТИ, выражения для которых, исходя из (2.4) и (2.8) имеют вид:

$$\text{для случая 1} - S = \alpha_{\text{ТБ}} \cdot h/\chi'_{\text{эф}}, \quad (2.9)$$

$$\text{для случая 2} - S' = \alpha_{\text{ТБ}} \cdot (\sigma \cdot (T_1 + T_2) \cdot (T_1^2 + T_2^2) + \chi'_{\text{эф}}/h)^{-1}. \quad (2.10)$$

Анализируя выражения (2.9) и (2.10), можно заключить, что чувствительность ПТИ вида вспомогательной стенки зависит от ТФХ материалов ЧЭ и его высоты. В то же время чувствительность ПТИ, спаи ЧЭ которого разделены газовой средой, еще имеет нелинейную зависимость от температуры горячих и холодных спаев. Кроме того, кондуктивная составляющая баланса является единственной составляющей, не зависящей от внешних параметров [2.15]. Все это подтверждает целесообразность и преимущества использования в термоэлектрическом ПТИ ЧЭ в виде вспомогательной стенки. Теория прогнозирования выходных параметров термоэлементов позволила получать ПТИ с высокой чувствительностью при относительно малой инерционности [2.7, 2.16].

### 2.1.2 Методы измерения и принципиальные схемы радиометров

Исходя из конкретных особенностей системы «ИТИ – ОС – ПТИ», условия эксплуатации в зависимости от преобладающего влияния какого-либо внешнего параметра бывают

нормальные (при которых теплообмен на приемной поверхности ПТИ определяется свободной конвекцией и излучением), вакуумные (когда конвекцией можно пренебречь) и условия, в которых ОС находится при повышенном давлении и скорости перемещения (то есть при значительной вынужденной конвекции), и может оказывать агрессивное воздействие на прибор.

В основу методических и схемных решений ПТИ, описанных далее, положена принципиальная схема измерительного устройства ПТИ, приведенная на рисунке 2.3 [2.7; 2.15].

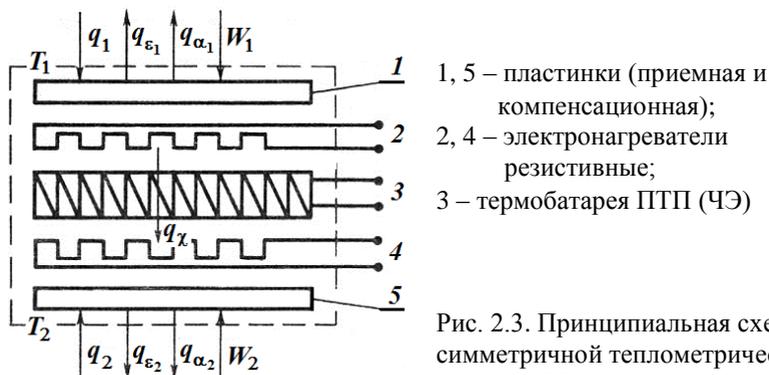


Рис. 2.3. Принципиальная схема симметричной теплометрической системы ПТИ

Термобатарея 3 расположена между двумя тонкими металлическими пластинками 1 и 5, снабженными каждая электронагревателем 2 и 4. Принцип работы прибора состоит в отождествлении измеряемой величины и эталонной меры. В связи с высокой теплопроводностью пластинок 1 и 5 процесс рассеивания теплоты не зависит от природы подведенной к ним энергии. Поэтому в качестве эталонной меры использована теплота, выделяющаяся при электрообогреве пластинок нагревателем (2 или 4). Элементом, фиксирующим результат сравнения, служит ЧЭ (термобатарея ПТП). Схема является симметричной, так как любая пластинка (1 или 5) может быть как рабочей, то есть принимающей тепловое излучение, так и

компенсационной, которую нагревают соответствующим нагревателем (2 или 4) на столько, чтобы сигнал ПТП был равен нулю.

Измерение теплового излучения может быть выполнено, исходя из конкретных условий эксперимента, методом последовательного замещения, дополнительного замещения и балансовым методом.

При **последовательном замещении** режимов измерение проводят в два этапа. Вначале прибор экспонируют исследуемым радиационным потоком и измеряют сигнал ПТП приемника. Тепловой баланс при этом записывают в таком виде:

$$q_1 - q_2 = K_{ПТП} \cdot E + (q_{\varepsilon_1} - q_{\varepsilon_2}) + (q_{\alpha_1} - q_{\alpha_2}), \quad (2.11)$$

где  $q_1$  – плотность потока теплового излучения от ИТИ;

$q_2$  – плотность потока фонового излучения из ОС;

$q_{\varepsilon_1}, q_{\varepsilon_2}, q_{\alpha_1}, q_{\alpha_2}$  – см. рис. 2.3.

Далее производят замещение потока теплового излучения потоком от электрического нагревателя. Для этого выключают ИТИ и при неизменных параметрах ОС разогревают нагревателем 2 рабочую пластину 1 до тех пор, пока сигнал ПТП в этом режиме не восстановит свое первоначальное значение  $E$ . Этому режиму соответствует следующее уравнение теплового баланса (см. рис. 2.3)

$$W_1/A - q_2 = K_{ПТП} \cdot E + (q_{\varepsilon_1} - q_{\varepsilon_2}) + (q_{\alpha_1} - q_{\alpha_2}), \quad (2.12)$$

где  $W_1$  – мощность электроэнергии, подведенной к нагревателю 2,  $A$  – площадь приемной поверхности пластинки 1.

Из уравнений (2.11) и (2.12) следует, что исходная плотность теплового излучения  $q_1 = W_1/A$ .

Как видим, метод последовательного замещения применим при неизменных параметрах ОС, что может быть обеспечено только в лабораторной обстановке.

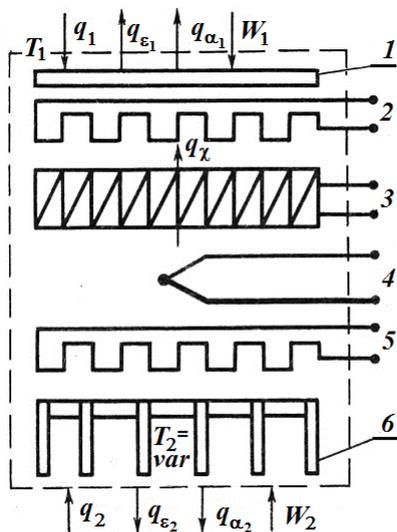
**Метод дополнительного замещения** режимов осуществляется при условии сохранения режима излучения от ИТИ и без прерывания экспозиции прибора. Он состоит в дискретном подведении к одной из пластинок от электронагревателя нормированного количества теплоты, вызывающей соответствующее приращение сигнала ПТИ. Отношение дополнительно подведенной энергии к вызванному им приращению сигнала ПТИ определяет чувствительность прибора. При этом для устранения воздействия электронагрева на параметры ПТП его производят таким образом, чтобы приращение сигнала ПТП не превышало 5 – 10 % от номинального [2.1, 2.2].

**Метод баланса** основан на использовании состояний теплометрической системы, при которых она поддерживается в режиме нулевого пронизывающего потока за счет адекватного электрического нагрева компенсационной пластины 5.

На основе указанных методов разработаны схемы приборов: балансометрические; с измерением двух сигналов (ПТП и ПТ); со стабилизацией температуры затененной пластинки и с синхронной градуировкой [2.7].

В основу балансометрических ПТИ положена схема, приведенная на рис. 2.3. Измерения выполняют по методу последовательного замещения режимов или полной компенсации сигнала ПТП, обусловленного потоком теплоты от электрического нагревателя.

Вторая группа приборов – с синхронным измерением сигналов двух преобразователей (ПТП и ПТ) выполнена по схеме, представленной на рисунке 2.4. Она основана на использовании системы, структурно аналогичной балансометрической, но отличающейся тем, что каждая из пластин может служить как нагревателем, так и измерителем температуры. Такой ПТИ, снабженный термостойким (до 600 К) ПТП, выдерживает в вакууме тепловой поток плотностью до 20 кВт/м<sup>2</sup>.



- 1 – приемная пластинка;
- 2 – электроннагреватель;
- 3 – ПТП;
- 4 – ПТ;
- 5 – электроннагреватель;
- 6 – корпус (оробранный излучатель)

Рис. 2.4. Принципиальная схема ПТИ с синхронным измерением сигналов двух преобразователей (ПТП и ПТ)

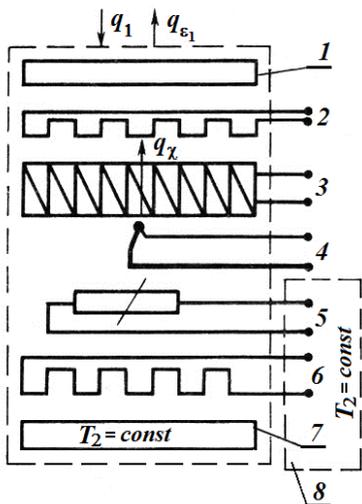
Тепловой поток, воспринятый пластинкой 1, может быть представлен в виде:

$$q_1 = f_1(T_1) + f_2(T_1) \cdot E \quad \text{или} \quad q_1 = f_1'(T_2) + f_2'(T_2) \cdot E,$$

при этом первый член в правой части этих уравнений представляет собой зависимость потока собственного излучения пластины 1 от температуры соответствующей поверхности ПТП.

Второй член описывает зависимость между пронизывающим потоком и температурой ПТП и по существу является зависимостью коэффициента термопреобразователя от температуры. Совокупность этих двух зависимостей может служить метрологической характеристикой ПТП с синхронным измерением двух сигналов [2.15].

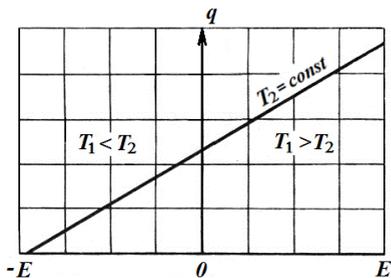
В описанных двух схемах температура ЧЭ и, следовательно, его коэффициент преобразования в значительной мере зависят от измеряемого теплового потока и условий теплоотвода в ОС. Для устранения этого недостатка разработана схема ПТИ с постоянной температурой спаев сравнения, представленная на рисунке 2.5.



- 1 – приемная пластина;
- 2 – электронагреватель;
- 3 – ПТП;
- 4 – ПТ (термопара);
- 5 – ЧЭ терморегулятора;
- 6 – нагреватель корпуса;
- 7 – корпус;
- 8 – блок терморегулятора

Рис. 2.5. Принципиальная схема ПТИ с термостабилизацией затененной поверхности

Стабилизация может быть осуществлена на уровне выше или ниже равновесной температуры для заданных условий измерения. Характеристика стабилизированной системы приведена на рисунке 2.6.



- $E$  – сигнал ПТИ;
- $T_2$  – температура корпуса

Рис. 2.6. Характеристика системы со стабилизированной температурой корпуса ПТИ

Условию  $T_1 < T_2$  при  $T_2 = const$  соответствует такое состояние системы, когда теплота перетекает от пластины 7 к пластине 1, для чего к пластине 7 должна быть подведена энергия от внешнего источника (нагревателя 6).

С точки зрения расширения диапазона измерения эффективен режим стабилизации температуры корпуса

( $T_2 = const$ ), обеспечивающий условие  $T_1 > T_2$ . В этом случае теплота от пластины 7 должна активно отводиться, например, с использованием термоэлектрического холодильника, стабилизаторов, фазопереходных и циркуляционных термостатов [2.10].

### 2.1.3 Элементная база приемников теплового излучения

Высокая надежность, технологичность, возможность прогнозирования и стабилизации чувствительности в широком диапазоне значений температуры, а также экономический фактор термоэлектрических батарейных ПТП вида вспомогательной стенки явились основанием для выбора их в качестве ЧЭ ПТИ, которые изготавливают в виде плоского монолитного теплотерического модуля, внутри которого заформована батарея термоэлементов.

Модуль первого типа представляет собой батарею с большой плотностью укладки термоэлементов (до 20 – 30 шт/см<sup>2</sup>), схематически показанный на рисунке 2.7.

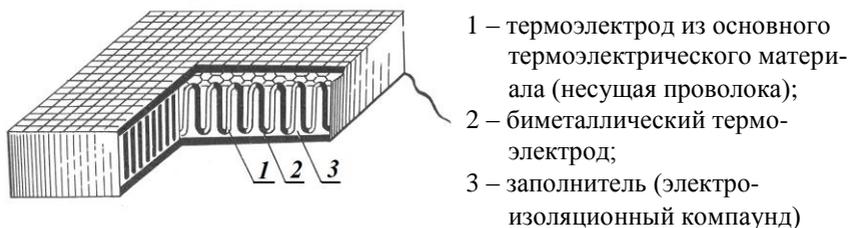
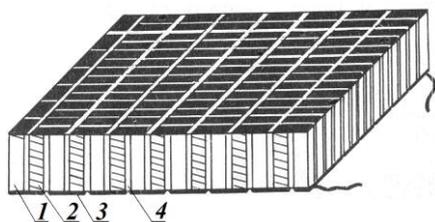


Рис. 2.7. Модуль термоэлектрического гальванического ПТП первого типа

Термоэлемент состоит из полувитка основной термоэлектродной проволоки, переходящего в биметаллический полувиток, представляющий собой участок основной термоэлектродной проволоки, покрытой гальваническим способом парным термоэлектрическим материалом [1.4]. Плоская спираль из таких термоэлементов, поставленная на «ребро» и

уложенная в виде прямоугольной (квадратной) пластинки или диска, заформована в электроизоляционный компаунд, чаще всего из эпоксидной смолы с отвердителем и наполнителем, обеспечивающими необходимую термостойкость. Например, ЧЭ, заформованный украинским полимером УП-60 с наполнителем – плавленным кварцем, имеет термостойкость до 450 К, а с корундом до 700 К [2\*].

Увеличенная термостойкость (до 900 К) получена во втором типе ПТП [2.15], представленном на рисунке 2.8.



- 1, 2 – проволочные термоэлектроды;
- 3 – коммутационные пластины;
- 4 – электроизоляционный наполнитель

Рис. 2.8. Модуль термоэлектрического проволочного ПТП

Его отличие состоит в том, что гальванический термоэлемент заменен проволочным. Две проволоки термоэлектрических материалов (1 и 2) в термостойкой изоляции навиты в виде плотной спирали на пластиковую ленточку, которая уложена зигзагообразно в форму и залита электроизоляционным компаундом 4. После спекания торцы полученного «камушка» протираются до нарушения электрической связи между витками спиралей, после чего камушек представляет собой систематический набор большого количества термоэлектродных стержней. Коммутация между парными стержнями осуществляется вакуумным напылением металлических площадок 3 через соответствующую маску.

Кроме повышения верхнего предела рабочей температуры, достоинство такого ЧЭ состоит в том, что в нем устранены верхний и нижний слои стенки, не участвующие в генерировании сигнала. Это позволило значительно снизить инерционность ПТП без ущерба для чувствительности.

Поскольку основная часть теплоты, воспринятой облучаемой (приемной) поверхностью ПТИ, отводится теплопроводностью вдоль электродов термобатареи, то распределение температуры в приборе с термостабилизированным теплосток описывается одномерным неоднородным уравнением теплопроводности [2.17]:

$$\frac{dT(x; \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \frac{d^2 T(x; \tau)}{\partial x^2}, \quad (2.13)$$

решение которого при краевых условиях

$$\begin{cases} T(x; \tau = 0) = const = 0; \\ -\chi \cdot dT(x = h; \tau)/dx = q = const; \\ T(x = 0; \tau) = const = 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

для тепловоспринимающей поверхности ПТП ( $x = h$ ) имеет вид:

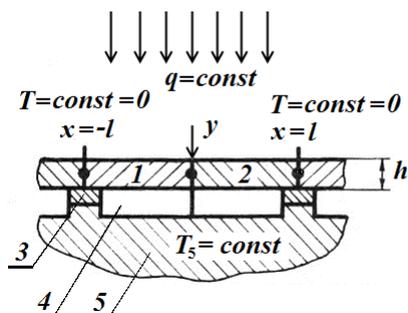
$$T(x = h; \tau) = \frac{q \cdot h}{\chi} \cdot \left( 1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \cdot \exp\left(-\frac{a \cdot (2n+1)^2 \cdot n^2 \cdot \tau}{4h^2}\right) \right), \quad (2.15)$$

где  $a$  и  $\chi$  – коэффициенты температуро- и теплопроводности ПТП.

Из выражения (2.15) видно, что быстрдействие ПТИ можно увеличить повышением коэффициента теплопроводности и уменьшением толщины ЧЭ. При этом постоянная времени снижается пропорционально квадрату изменения толщины, а потеря чувствительности имеет линейный характер [2.15]. Возможности технологии изготовления проволочных ЧЭ вида вспомогательной стенки позволяют уменьшать толщину до 0,5 мм, при этом постоянная времени ПТИ в нормальных условиях для модуля первого типа составляет 1 с, а второго – 0,5 с.

Для бóльшего быстрдействия ПТИ применяют модули третьего типа – тонкопленочные батарейные ЧЭ, изготовленные методом напыления в вакууме [2.10]. По существу их конструкция несколько отходит от канонической теплотметрической формы с использованием плоской «вспомогатель-

ной стенки», которую тепловой поток пронизывает, не изменяя своего направления. Схема термоэлемента тонкопленочного ЧЭ приведена на рисунке 2.9.



- 1, 2 – термоэлектроды
- 3 – выступы;
- 4 – пазы;
- 5 – термостатированный теплосток;

Рис. 2.9. Схема термоэлемента пленочного ЧЭ

При таком исполнении воспринятый тепловой поток проходит через термоэлемент, изменяя свое направление, из-за чего такие ПТИ получили название радиометров с поперечной составляющей [1\*]. Котельные радиометры с поперечной составляющей теплового потока, как правило, повторяют конструкцию приемника Р. Гардона [2.18], который достаточно широко применяется в мире.

В тонкопленочном батарейном ЧЭ термобатарея обычно расположена в плоскости, воспринимающей поток теплового излучения, и состоит из единичных термоэлементов, холодные спаи (т. е. спаи сравнения) которых помещены на термостатируемом ( $T_5 = const = 0$ ) корпусе, спрофилированном в виде пазов и выступов, имеющих постоянную температуру в точках  $x = l$  и  $x = -l$  ( $T(-l) = T(l) = const = 0$ ).

Активные спаи термоэлементов батареи, равновесная температура которых определяется измеряемым излучением, находятся над серединами пазов 4 в точках  $x = 0$ . Процесс формирования сигнала термоэлемента определяется закономерностью изменения температуры активного спая. В первом приближении можно считать, что термоэлектроды однородны по структуре, а их ТФХ не зависят от температуры. Так как

$l/h \gg 1$ , то разность значений температуры, возникающая в направлении оси  $y$  пренебрежимо мала, при этом воспринятая спаем теплота отводится теплопроводностью вдоль электродов. В этом случае распределение температуры в каждом из термоэлементов под воздействием внезапного скачка облученности может быть получено из одномерного неоднородного уравнения теплопроводности [2.17]

$$\frac{dT(x, \tau)}{d\tau} = a \cdot \frac{d^2T(x, \tau)}{dx^2} + \frac{q}{c\rho \cdot h} \quad (2.16)$$

при следующих краевых условиях:

$$\begin{cases} T(x, \tau = 0) \\ dT(x = 0; \tau)/dx = 0 \\ T(x = l; \tau) = T(x = -l; \tau) = const = 0 \end{cases} \quad (2.17)$$

Решение уравнения (2.16) для точки активного спая (то есть  $x = 0$ ) имеет вид:

$$T(x = 0; \tau) = \frac{q \cdot l^2}{2 \cdot \chi \cdot h} \cdot \left( 1 - \frac{32}{\pi^3} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^3} \cdot \exp\left(-\frac{a \cdot (2n+1) \cdot \pi^2 \cdot \tau}{4l^2}\right) \right). \quad (2.18)$$

Из анализа выражения (2.18) следует, что снижение инерционности ПТИ может быть достигнуто за счет уменьшения длины  $l$  термоэлектродов и увеличения коэффициента температуропроводности их материала. Оптимизация по чувствительности предполагает обратное, поэтому при конструировании выбираются компромиссные решения с учетом требуемых выходных параметров ПТИ.

Несмотря на такое достоинство ПТИ типа Гардона, как существенно меньшая инерционность по сравнению с ПТИ, выполненном с применением модуля первого или второго типа, они не нашли широкого применения в котельной практике. Этому способствовали такие недостатки как низкая механическая прочность; сложность изготовления; нарушение линейной зависимости сигнала ПТИ при измерении теплового потока больших значений в случае приемной площадки в виде тонкого диска, а в случае толстого диска – низкая чувстви-

тельность; существенная зависимость показаний от конвективной составляющей сложного теплообмена и от загрязненности приемной поверхности.

Термоэлементы, являясь генераторными преобразователями, не требуют источника питания, мостовой схемы измерения и модулятора. Они пригодны для измерения в условиях низкочастотных измерений температуры, кроме того технологично надежны и стабильны. Для регистрации их показаний применяются стандартные измерительные приборы.

Технология изготовления вспомогательной стенки из гальванической термобатарей позволяет наряду с плоской формой сформировать цилиндрическую или коническую стенки постоянной толщины. Из этих конфигураций коническая более проста в изготовлении, уменьшает влияние свободной конвекции на генерируемый сигнал и наилучшим образом обеспечивает высокую поглощательную способность ПТИ [2.19].

#### **2.1.4 Теплометрические приемники теплового излучения**

Конструктивное решение ПТИ определяется совокупностью общих требований к устройству ПТИ и специальных, зависящих от условий эксплуатации. К общим требованиям относятся: временная стабильность рабочих характеристик, высокая чувствительность при допустимой инерционности, равномерность спектральной характеристики приемной поверхности в рабочем диапазоне значений потока теплового излучения, подчинение закону Ламберта, достаточная механическая прочность, стойкость к резким колебаниям температуры и давления, возможность использования стандартной регистрирующей аппаратуры, надежность и простота эксплуатации.

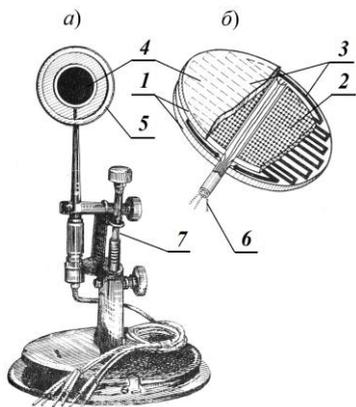
Специальные требования в каждом конкретном случае зависят от назначения приемника. Например, ПТИ для работы в условиях вакуума надо обеспечивать автономными

системами энергоснабжения и теплоотвода, возможностью регистрации только полусферического излучения со стороны ИТИ в условиях переменных боковых подсветок, возможностью проверки чувствительности ПТИ без нарушения теплового и вакуумного режимов объекта, достаточная вакуумная стойкость узлов прибора.

Специальными требованиями к ПТИ, работающим в напряженных условиях, например, в топках парогенераторов, газовых и коксовых печах, камерах сгорания, являются стойкость к агрессивной среде, специальные коммуникации для обслуживания приборов, независимость измерений от влияния переменных магнитных полей и вибраций.

С развитием элементной базы создан ряд ПТИ, предназначенных для измерения потока теплового излучения от 100 до  $3 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> при значениях температуры от минус 200 до 300 °С [3\*– 5\*]. Ниже рассмотрены типичные конструкции ПТИ, в которых использованы как унифицированные (плоские), так и специально изготовленные термобатарей.

На рисунке 2.10 представлен абсолютный двухсторонний приемник модели РАПП-II с плоскими тепловоспринимающей и теплоотдающей поверхностями, предназначенный для измерения потоков теплового излучения при актинометрических исследованиях, а также метеорологических измерениях в атмосфере и космосе [3\*, 4\*, 2.7].



- 1 – приемная и затененная пластины;
- 2 – термобатарея;
- 3 – электронагреватели;
- 4 – черное покрытие;
- 5 – кольцо;
- 6 – выводы;
- 7 – штатив;

Рис. 2.10. Внешний вид (а) и схема конструкции тепловой головки (б) абсолютного двухстороннего радиометра модели РАПП-II

Основные элементы прибора – тепловая головка (рис. 2.10б) и стандартный параллактический штатив. Головка представляет собой термобатарейку 2 (или готовый ПТП без металлической обечайки) вида вспомогательной стенки. Роль источников энергии выполняют тонкие электронагреватели 3, которые вакуумным напылением нанесены на анодированные поверхности алюминиевых фольговых дисков, которыми обклеена термобатарейка 2. Изолируя электрически, анодная пленка обеспечивает хороший тепловой контакт нагревателей с несущими дисками. Устройство реализует симметричную теплотметрическую систему (см. рис. 2.3). Каждая пластинка (диск + нагреватель) может быть использована в качестве как рабочей, воспринимающей тепловое излучение, так и компенсационной.

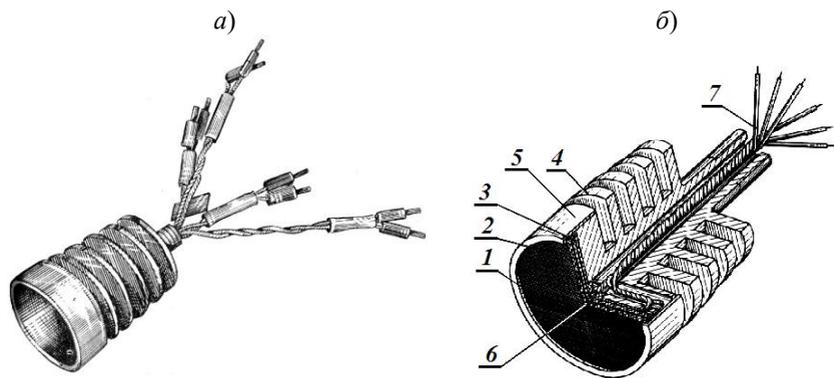
Теплотметрический блок смонтирован внутри металлического кольца 5, защищающего его от боковых подсветок и механических повреждений. Кольцо укреплено на трубке, которая одновременно служит кожухом для токоведущих проводников и креплением теплотметрической головки на параллактическом штативе 7.

Действие прибора основано на замещении теплового излучения электрическим обогревом. Измерение может проводиться двумя способами: непосредственной компенсацией сигнала ПТП нагревом затененной пластины или определением плотности потока теплового излучения по генерируемому сигналу и найденному при градуировке коэффициенту преобразования термобатарейки. Измерения и поверку прибора выполняют непосредственно на объекте контроля без нарушения режима излучения. Прибор может работать как в нормальных условиях, так и в вакууме с пределом измерения до  $25 \text{ кВт/м}^2$  при чувствительности ПТП  $0,002 \text{ мВ} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$  с пределами основной допускаемой погрешности измерения 2 %. Габаритные размеры тепловой головки  $\text{Ø}34 \times 2 \text{ мм}$  и штатива  $\text{Ø}200 \times 300 \text{ мм}$ .

На рисунках 2.11 – 2.14 представлена группа радиометров с плоской тепловоспринимающей поверхностью при вариации типа термостатирования:

- с неохлаждаемым корпусом, в котором теплоотвод осуществляется через оребренный теплосток излучением в ОС с одновременной термостабилизацией корпуса (рис. 2.11);
- с неохлаждаемым корпусом, термостабилизируемым посредством термозависимого электронагревателя в комплекте с электронным терморегулятором (рис. 2.12 и 2.13);
- с охлаждаемым корпусом путем циркуляции термостатированной жидкости, чаще всего – воды (рис. 2.14).

Представленный на рис. 2.11 радиометр модели РАСС-I выполнен по схеме теплотрической системы с измерением сигналов двух первичных преобразователей (ПТП и ПТ).



1 – тепловоспринимающая поверхность; 2 – электронагреватель; 3 – ПТП (термобатарея); 4 – оребренный теплосток; 5 – бленда; 6 – ПТ (термопара)  
7 – жгут токоведущих и потенциалосъемных проводов

Рис. 2.11 – Внешний вид (а) и схема конструкции (б) радиометра модели РАСС-I

Согласно схеме, приведенной на рис. 2.4, прибор содержит кроме ПТП 3 еще ПТ 6 (термопару) на одной из поверхностей ПТП. Для обеспечения интенсивного теплоотвода при измерении теплового потока плотностью до  $30 \text{ кВт/м}^2$

теплометрическая головка установлена на торце оребренного корпуса 4, выполняющего функции теплоотвода излучением. Вмонтированный электронагреватель 2 предназначен для выполнения метрологической аттестации прибора и его периодических поверок непосредственно на объекте контроля.

Схема конструкции ПТИ с регулируемым электроподогревом корпуса до температуры, превышающей равновесную, показана на рисунке 2.12 [2.15].



Рис. 2.12. ПТИ с регулируемым электроподогревом корпуса

На облучаемой стороне ПТП 1 смонтирован приемный диск 2 из тонкой алюминиевой фольги, на внутреннюю сторону которого напылен градуировочный нагреватель 3. Для получения хорошего теплового контакта диск прикреплен к торцу ПТП. Другой стороной ПТП приклеен к корпусу 4, нагревание которого производится электронагревателем 5. Сила тока в нагревателе 5 регулируется специальным электронным устройством по сигналу резистора 6. Номинальное значение стабилизируемой температуры контролируется термомпарой 9. Блок чувствительного элемента подвешен на трех осях 8 внутри экрана – бленды 7. Электронный термостабилизатор смонтирован в отдельном блоке. Рабочая характеристика таких ПТИ при измерении плотности потока теплового излучения до  $7,5 \text{ кВт/м}^2$  остается практически линейной.

На рис. 2.13 показан внешний вид неохлаждаемых радиометров, термостабилизация которых осуществляется за счет регулируемого электроподогрева.

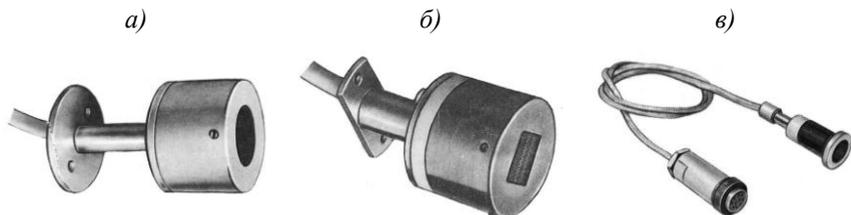


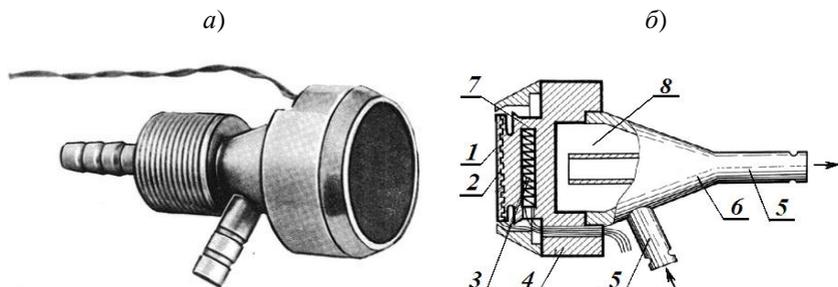
Рис. 2.13 – Радиометры моделей ПЛТП<sub>ПР</sub> (а), РОП<sub>ПЛ</sub> (б), ПТИ (в)

Радиометр модели ПЛТП<sub>ПР</sub> (см. рис. 2.13а) выполнен с проволочной термобатареей, спаи сравнения которой стабилизируют встроенным электронагревателем с помощью электронного терморегулятора. Было выпущено несколько модификаций прибора с различными тепловоспринимающими площадками: диском диаметром 12 мм, квадратом 10×10 мм, прямоугольником 10×100 мм.

В относительном термостабилизируемом радиометре модели РОП<sub>ПЛ</sub> (см. рис. 2.13б) установлена термобатарея, выполненная из тонкопленочных термоэлементов, расположенных на плоской тепловоспринимающей поверхности. Термоэлементы напылены на полиимидную пленку или пленку из оксида алюминия, укрепленную на профилированной металлической подложке. Температура спаи, находящегося над пазом подложки, изменяется в зависимости от интенсивности падающего радиационного потока. Для стабилизации температуры служит электронный терморегулятор.

Радиометр модели ПТИ (см. рис. 2.13в) предназначен для применения в системах автоматического регулирования потоков от инфракрасных излучателей в условиях, приближенных к космическим. Он основан на термобатарее, смонтированной в корпусе, термостабилизируемом посредством термозависимого электронагревателя в комплекте с электронным терморегулятором.

Показанный на рис. 2.14 водоохлаждаемый прибор модели РАП-I, снабженный градуировочным электронагревателем, является абсолютной моделью с плоской приемной поверхностью. Такой же внешний вид имеет относительный прибор модели РОП-I.



1 – тепловоспринимающая площадка; 2 – электронагреватель градуировочный; 3 – ТПП; 4 – корпус; 5 – штуцер; 6 – основание корпуса; 7 – тепловой шунт; 8 – проточная полость

Рис. 2.14. Внешний вид (а) и схема конструкции (б) водоохлаждаемого радиометра модели РАП-I (РОП-I) с тепловым шунтом

Радиометр РАП-I, выполненный с термостабилизацией корпуса, имеет проточную полость 8 со штуцерами 5, через которую прокачивают воду, термостатированную в циркуляционном жидкостном термостате. Основное преимущество таких ПТИ состоит в способности измерять тепловой поток высокой плотности и сохранять постоянство чувствительности до уровня плотности теплового потока порядка  $500 \text{ кВт/м}^2$ . Это качество получено благодаря применению теплового шунтирования приемной пластины. При этом часть поглощенной ею энергии отводится через тепловой канал 7 (шунт), параллельный основному пути прохождения теплового потока (через ТПП). Пропускная способность шунта, определяемая его сечением и ТФХ материала, рассчитывается, исходя из требуемых чувствительности и быстродействия.

Представленные на рис. 2.11, 2.13 и 2.14 радиометры предназначены для измерения плотности потока теплового

излучения в лабораторных и производственных условиях, при актинометрических исследованиях в атмосфере и космосе, а также в энергетике в системах измерения и регулирования различных инфракрасных излучателей [4\*, 2.7]. Основные характеристики этой группы радиометров систематизированы в таблице 2.1.

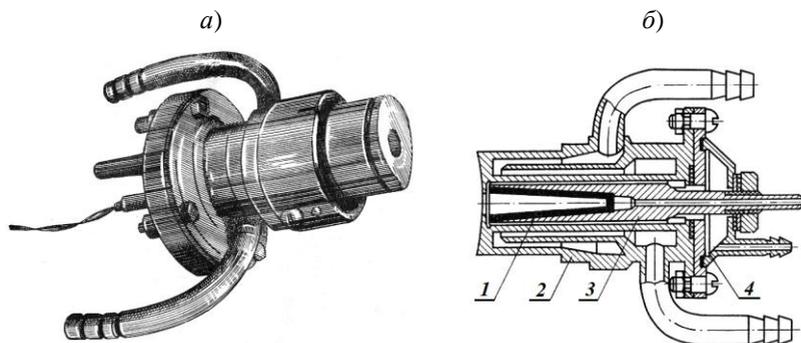
Таблица 2.1

Техническая характеристика	Модель радиометра				
	РАП-I РОП-I	РАСС-I	ПЛТП <sub>ПР</sub>	РОП <sub>ПЛ</sub>	ПТИ
Диапазон измерения плотности потока теплового излучения, Вт/м <sup>2</sup>	0,1 – 3·10 <sup>5</sup>	10 <sup>2</sup> – 3·10 <sup>4</sup>	10 <sup>2</sup> –3,3·10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup> – 3·10 <sup>5</sup>	10 <sup>2</sup> –5·10 <sup>3</sup>
Пределы основной допускаемой относительной погрешности, %	± 4	± 5	± 8	± 8	± 8
Чувствительность, мВ·м <sup>2</sup> /Вт	0,10	0,003	0,10	0,01 – 0,10	0,01
Постоянная времени	0,5	3	3	2	2,5
Спектральный диапазон, мкм	0,2 – 24	0,2 – 36	0,2 – 24	0,2 – 24	0,2 – 24
Коэффициент поглощения	0,90 – 0,95	0,90 – 0,95	0,90 – 0,95	0,90 – 0,92	0,90 – 0,92
Габаритные размеры, мм	Ø30×60	Ø30×55	Ø30×60	Ø30×50	Ø15×55
Размер приемной площадки, мм	Ø20	Ø24	Ø 12, 10×10, 10×100	10×10	Ø8

Основной задачей при создании ПТИ, предназначенных для применения в агрессивных средах, является защита ЧЭ от воздействия среды, а при измерении потока плотностью более 500 кВт/м<sup>2</sup> – от перегрева.

Конструктивное решение приборов для измерения потоков плотностью более  $500 \text{ Вт/м}^2$  базируется на двух свойствах полостей. Одно из них заключается в том, что эффективные излучательная и поглощательная способности полости определяются в основном отношением площади входного отверстия и внутренней поверхности и в меньшей степени от собственных ТРХ покрытия. При выполнении приемной поверхности в виде полости позволило сделать ПТИ устойчивым к деградации ТРХ покрытий. Второе свойство полости, обладающей еще стенкой достаточной теплопроводности, состоит в том, что воспринятая энергия, пропорциональна площади входного отверстия, а сток при этом происходит практически по всей поверхности. Таким образом, полостной вариант ПТИ открывает пути значительного управляемого снижения равновесной температуры ЧЭ.

Описанные предпосылки реализованы в полостных радиометрах с коническими преобразователями (рис. 2.15).



1 – чувствительный элемент; 2 – водоохлаждаемый корпус; 3 – корпус ЧЭ; 4 – полость, прокачиваемая жидким хладагентом

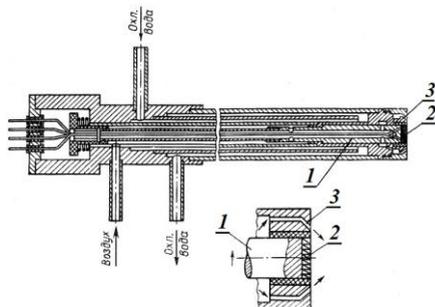
Рис. 2.15. Внешний вид (а) и схема конструкции (б) полостного приемника с коническим ЧЭ

Этот ПТИ выполнен охлаждаемым жидким хладагентом, как правило, водой, прокачиваемой через полость приемника при помощи термостата. ЧЭ выполнен из тонкой лен-

товидной спирали, которая сформирована в виде конуса путем навивки временно на коническую матрицу (до полной полимеризации), а затем приклеена к внутренней конической поверхности корпуса 3 ЧЭ.

Если конический приемник предназначен для диагностики теплового состояния в топочных пространствах, то должна быть предусмотрена мера по предотвращению непосредственного контакта ЧЭ со средой. Для этого служит диатермическая газовая завеса, причем газ, идущий на завесу, сначала работает как хладагент в системе охлаждения.

В энергетических установках, как правило, необходимо, измеряя суммарный тепловой поток, выделять его радиационную и конвективную составляющие. Для этого предназначен приемник с газовой диатермической завесой, схема которого изображена на рисунке 2.16.



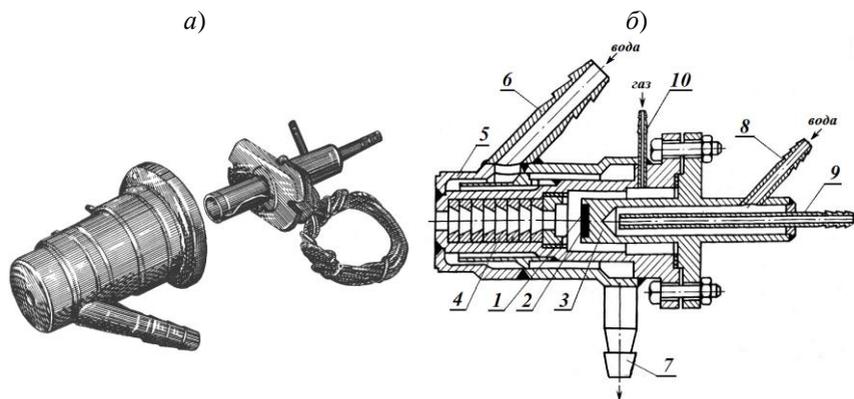
- 1 – система охлаждения;
- 2 – ПТП;
- 3 – кольцевое отверстие

Рис. 2.16. Приемник-зонд с диатермической газовой завесой

В этом ПТИ использован плоский термоэлемент 2, смонтированный на торце охлаждаемой водой трубы 1. Через центральную часть трубы подводится воздух, образующий на выходе из кольцевой щели 3 диатермическую газовую завесу [1\*; 2.20]. При отсутствии завесы ПТП регистрирует суммарный тепловой поток, а при ее наличии горючие газы или факел непосредственно с теплоприемной поверхностью не соприкасаются и таким образом отсекается конвективная составляющая. В то же время радиационный поток имеет беспрепятственный доступ к поверхности ЧЭ, который генерирует сигнал, пропорциональный плотности теплового потока.

Завеса должна быть равномерно распределена в щели, препятствовать осаждению частиц среды на поверхность ПТП и не вносить искажений в тепловой режим вблизи этой поверхности. Исследования, проведенные с целью определения размеров щели и режимов обдува [2.20], показали, что оптимальной является ширина в 1 мм с выходом газа под углом  $45^\circ$  к поверхности ЧЭ. Скорость потока газа в завесе должна превышать скорость среды в топочном объеме не менее, чем в три раза. При этом область возмущения потока горячих газов точки диатермической средой распространяется на расстояние не более 18 диаметров кольца завесы.

Высокая чувствительность теплометрических ЧЭ позволила разработать конструкции узкоугольных приемников – зондов с диафрагменной оптикой. Прибор такого типа представлен на рисунке 2.17, а, б.



1 – плоский ЧЭ; 2 – охлаждаемый торец; 3 – корпус ПТП; 4 – диафрагмирующее устройство; 5 – тубус водоохлаждаемый; 6, 7 – штуцеры системы водоохлаждения тубуса; 8, 9 – штуцеры системы водоохлаждения корпуса ПТП; 10 – штуцер подвода газа для завесы

Рис. 2.17. Внешний вид (а) и схема конструкции (б) узкоугольных приемников теплового излучения

Стремление к локализации измерений требует уменьшения телесного угла видения, а для повышения чувствительности, напротив, его увеличения. Приемлемое решение достигнуто в приборе с диаметром входного отверстия 8 мм при длине тубуса 50 мм (схему этой конструкции см. на рис. 2.17а). ЧЭ 1 смонтирован на водоохлаждаемом торце 2 корпуса 3. Диафрагмирующее устройство 4 установлено внутри водоохлаждаемого тубуса 5. Чтобы избежать образования налипающих слоев и устранения конвективного теплообмена со средой, внутренняя полость тубуса может продуваться азотом.

В промышленном применении представленные полостные ПТИ показали такие эксплуатационные преимущества, как неселективность восприятия радиационного теплового потока и нечувствительность к загрязнению и перегреву.

Опыт эксплуатации электростанций свидетельствует, что более 60% всех отказов энергоблоков приходится на долю котельных агрегатов, из них 93% – на долю поверхностей нагрева. Значительное число вынужденных остановов котлов ( $\approx 30\%$ ) происходит из-за разрывов труб радиационных поверхностей нагрева. Основной причиной повреждаемости этих поверхностей являются нарушения нормальных режимов эксплуатации теплообменного оборудования.

Доминирующий вид теплообмена в высокотемпературных топках энергетических котлов – излучение, доля которого составляет 85 – 95% [2.12]. От его интенсивности и организации процесса зависят основные технико-экономические показатели: удельный расход топлива, КПД, производительность, надежность и длительность работы агрегата. Непрерывный контроль облученности радиационных поверхностей нагрева открывает возможность построения систем диагностирования топочного процесса и автоматизированного управления котельными агрегатами [2.21].

Изложенное в п.2.1.3 показывает, что для средств измерения интегральных потоков теплового излучения в котлоагрегатах предпочтительнее выбирать ПТИ в виде конической стенки постоянной толщины с полным охватом его тепловоспринимающей поверхности ЧЭ батарейного типа из гальванических термоэлементов, включенных параллельно по тепловому потоку. Термостабилизация холодных спаев термобатарей осуществляется охлаждением проточным хладагентом по всей ее наружной поверхности [2.12].

Разработанные в ИТТФ термоэлектрические полостные ПТИ для измерения интегрального потока излучения в топках энергетических котлоагрегатов, в напряженных зонах энергетических парогенераторов, камерах сгорания газотурбинных установок, в печах для плавления тугоплавких металлов, а также в других промышленных агрегатах с автоматизированными системами управления тепловыми режимами представлены на рисунке 2.18 [4\*, 2.12].

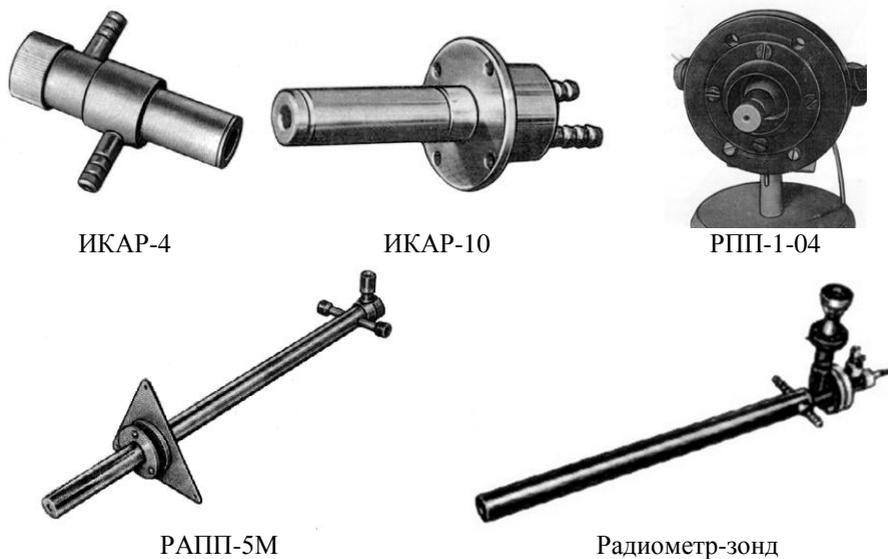


Рис. 2.18. Внешний вид абсолютных водоохлаждаемых радиометров с конической тепловоспринимающей поверхностью

Эти приборы применяют в сложных условиях эксплуатации. Все они выполнены на основе гальванических проводочных термобатарей, а тепловоспринимающая поверхность имеет коническую форму. Корпус каждого прибора является водоохлаждаемым, для работы в агрессивной среде предусмотрена продувка воздуха через кольцевую щель. Градуирование выполняется с помощью элекронагревателя в виде цилиндрического зонда, помещаемого внутрь конической полости. Эти радиометры надежны и просты в эксплуатации. Их основные характеристики даны в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Техническая характеристика	Модель радиометра				
	ИКАР-4	ИКАР-10	РПП-1-04	РАПП-5	Радиометр-зонд
Диапазон плотности потока теплового излучения, кВт/м <sup>2</sup>	0,1 – 3·10 <sup>3</sup>	0,1 – 2·10 <sup>3</sup>	0,1 – 3·10 <sup>3</sup>	50 – 800	0,1 – 2·10 <sup>3</sup>
Пределы основной допускаемой относительной погрешности, %	± 5	± 5	± 5	± 6	± 6
Чувствительность, мВ·м <sup>2</sup> /Вт	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Спектральный диапазон, мкм	0,2 – 36	0,2 – 36	0,2 – 40	0,3 – 24	0,3 – 24
Коэффициент поглощения приемной поверхности	0,99	0,99	более 0,99	0,98 – 0,99	0,98 – 0,99
Время реакции, с	20	20	25	25	25
Температуростойкость, °С	до 300	до 300	до 300	до 600	до 600
Габариты прибора, мм	45×90	30×120	90×110	35×700	80×650

Многие технологические процессы, сопровождающиеся тепловым излучением, требуют измерения и непрерывного контроля не только плотности результирующего теплового излучения, но и его составляющих: падающего, поглощенного, собственного, отраженного и других, воздействующих на контролируемый объект. Требования к проведению такого контроля установлены рядом стандартов [2.22 – 2.25], для выполнения которых создано различное испытательное оборудование, включая измерители радиационного теплового потока [4\*, 5\*, 2.26].

Для оснащения сертификационной испытательной установки, предназначенной для определения коэффициента дымообразования при огневых испытаниях веществ, материалов и изделий согласно стандарту ГОСТ 24632 [2.24], разработан прибор, позволяющий определять поверхностную плотность падающего теплового излучения [2.26, 2.27], являющийся абсолютным полостным приемником интегрального теплового излучения. В его основе также лежит преобразование поглощенной энергии теплового излучения в электрический сигнал постоянного тока, генерируемый термоэлектрическим ЧЭ. По результатам измерения плотность теплового потока вычисляют по формуле:

$$q_{ИЗМ} = K_{РАД} \cdot E_{РАД} / A, \quad (2.19)$$

где  $K_{РАД}$  и  $E_{РАД}$  – коэффициент преобразования по тепловому потоку и сигнал радиометра;

$A$  – площадь тепловоспринимающей поверхности радиометра.

По сути эта величина является плотностью потока результирующего теплового излучения ( $q_{РЕЗ.}$ ). Поскольку результирующий тепловой поток равен разности поглощенного и собственного теплового излучения (см. главу 1 в книге 1 [2\*]) справедливо равенство:

$$q_{ИЗМ} = q_{РЕЗ} = q_{ПОГЛ} - q_{СОБ} = a \cdot q_{ПАД} - \varepsilon_{ПР} \cdot \sigma \cdot T_{РАД}^4, \quad (2.20)$$

где  $\varepsilon_{IP} \geq 0,98$  – приведенная степень черноты тепловоспринимающей поверхности радиометра, равная интегральной поглощательной способности ( $\varepsilon_{IP} = a$ );

$T_{РАД}$  – температура излучающей поверхности радиометра.

Исходя из формулы (2.20), расчетная формула для плотности потока падающего теплового излучения имеет вид:

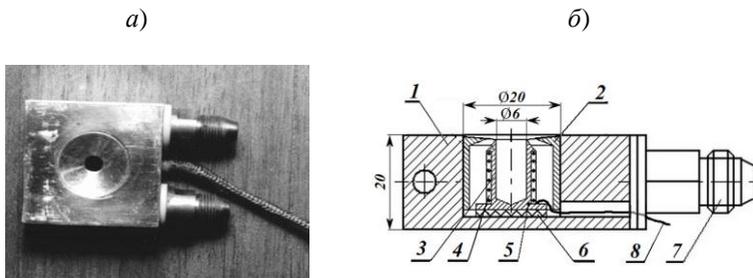
$$q_{ПАД} = K_{РАД} \cdot E / (a \cdot A) + \gamma, \quad (2.21)$$

где  $\gamma = \sigma \cdot T_{РАД}^4$  – температурная поправка.

Таким образом, имея измеренные значения  $q_{ИЗМ}$  и  $T_{РАД}$ , можно получить информацию не только о плотности  $q_{ПАД}$ , но ещё и других составляющих потока теплового излучения:

- результирующего – по формуле (2.19);
- собственного излучения  $q_{СОБ} = \varepsilon_{IP} \cdot \sigma \cdot T_{РАД}^4$ ;
- поглощенного по формуле  $q_{ПОГЛ} = q_{РЕЗ} + q_{СОБ}$ .

Эта методика измерения реализуется с помощью абсолютного полостного радиометра модели РАП-12, показанного на рисунке 2.19 [2.27].



1 – корпус; 2 – диафрагма; 3 – тепловой коллектор; 4 – термобатарея; 5 – термопара; 6 – электронагреватель; 7 – штуцера; 8 – кабели

Рис. 2.19 – Внешний вид (а) и схема конструкции (б) абсолютного полостного ПТИ модели РАП-12

Радиометр РАП-12 содержит термобатарею 4, установленную в водоохлаждаемом корпусе 1 с диафрагмой 2 и шту-

керами 7 для подачи и отвода термостатированной воды. ЧЭ прибора, состоящий из термоэлектрических преобразователей ПТП 4 и ПТ 5, а также электронагревателя 6, установленных на наружной поверхности теплового коллектора 3, является центральным узлом прибора.

Такая конструкция корпуса обеспечивает термостатирование ЧЭ с одновременным интенсивным охлаждением, позволяющим измерять поток теплового излучения плотностью до  $70 \text{ кВт/м}^2$ . Основным достоинством прибора является его высокая технологичность благодаря применению в качестве измерителя теплового потока стандартной термобатареи термоэлектрического ПТП [1.4], а в качестве измерителя температуры – термопары стандартной градуировки ХК [1.5].

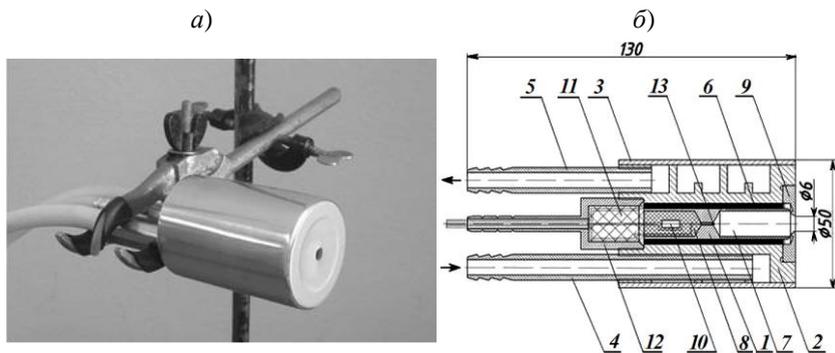
Аттестация радиометра выполняется по методу замещения радиационного теплового потока нормированной электрической мощностью, подводимой к электронагревателю 6, с пределом относительной погрешности  $\pm 2,5\%$ .

Высокая отражательная способность внутренней поверхности диафрагмы, форма и размеры полости приемника [2.28, 2.29] обеспечивают максимальную концентрацию прошедшего через входное отверстие диафрагмы потока теплового излучения на тепловоспринимающей поверхности теплового коллектора. Этому же способствует и большая поглощательная способность внутренней тепловоспринимающей поверхности теплового коллектора с V-образными канавками, покрытыми чернью марки «черное тело». Высокая теплопроводность материала коллектора способствует наилучшей передаче потока как пришедшего от внешнего ИТИ, так и от встроенного электронагревателя.

Возможно изготовление рабочего прибора с упрощенной конструкцией коллектора и без электронагревателя. Тогда он будет полостным относительным приемником (РОП), а его градуирование может быть только радиационным методом сравнения с эталонным ПТИ с пределом допускаемой погрешности измерения  $5\%$  [2.30].

Принципиально, метрологическая аттестация рабочего СИТ, основанная на методе сравнения, приводит обязательно к увеличению допускаемой погрешности на значение погрешности примененного эталонного СИТ. Поэтому при разработке современных рабочих средств измерения, требования к метрологическим характеристикам которых в настоящее время существенно возросли, целесообразно применять абсолютные методы как для аттестации, так и для поверок.

При огневых испытаниях различных веществ, материалов и изделий на пожаровзрывоопасность измерение радиационного теплового потока, воздействующего на контролируемое изделие, регламентировано рядом стандартов [2.22 – 2.25]. Для приборного обеспечения указанных стандартов в ИТТФ разработан прибор модели РАП-12М [5\*, 2.31, 2.32], являющийся абсолютным полостным водоохлаждаемым ПТИ, который применяют в комплекте с циркуляционным термостатом и измерителем напряжения постоянного тока. Внешний вид и схема конструкции радиометра РАП-12М приведены на рисунке 2.20.



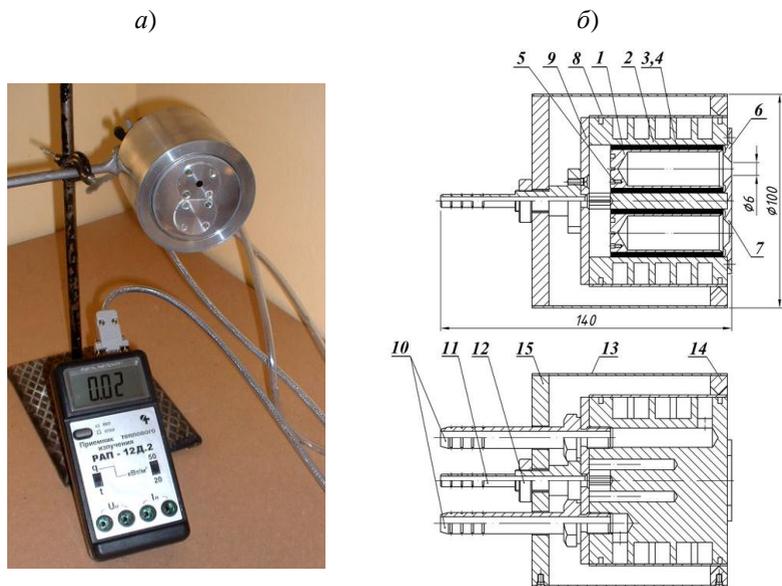
1 – тепловой коллектор; 2 – корпус; 3 – кожух; 4 и 5 – штуцера теплообменника; 6 – ПТП; 7 – приемная полость; 8 – градуировочная полость; 9 – диафрагма; 10 – калибровочный нагреватель; 11 – тепловая изоляция; 12 – штуцер; 13 – термопара

Рис. 2.20. Внешний вид (а) и схема конструкции (б) абсолютного полостного ПТИ модели РАП-12М

Прибор РАП-12М имеет одну приемную теплометрическую ячейку, которая представляет собой тепловой коллектор 1, установленный в проточном теплообменнике, образованном корпусом 2 и кожухом 3, снабженным штуцерами 4 и 5. В полости 8 теплового коллектора установлен нагреватель 10, для которого использован стандартный металлопленочный резистор типа МЛТ номиналом 200 Ом, предназначенный для задания нормированного теплового потока при проведении метрологической аттестации и поверок. Термостатирование радиометра с одновременным охлаждением осуществляют путем циркуляции хладагента через теплообменник из проточного водяного термостата.

В качестве измерителя сигналов радиометра применяются либо стандартный прибор, например, мультиметр М8906 (в радиометре модели РАП-12М.1), либо цифровое показывающее устройство (далее ЦПУ) (в модели РАП-12М.2). ЦПУ предназначено для измерения и масштабирования сигналов ПТП и ПТ и индикации измерительной информации в единицах измеряемой физической величины: плотности потока в  $\text{кВт}/\text{м}^2$  и температуры в  $^{\circ}\text{C}$ . На лицевую панель ЦПУ вынесены переключатель пределов измерения «20 – 75» и вида работ « $q - T$ ». Для нормирования сигнала ПТП и преобразования его в цифровую форму в ЦПУ вводится константа радиометра (коэффициент преобразования по тепловому потоку или по его плотности), значение которого определяется на специальном метрологическом стенде.

Приборы РАП-12М применяют для измерения потока теплового излучения с плотностью до  $75 \text{ кВт}/\text{м}^2$ . Основной их недостаток состоит в наличии дрейфа нуля при изменении температуры прокачиваемого хладагента, что особенно заметно проявляется при измерении теплового потока малой плотности. В связи с этим разработан радиометр модели РАП-12Д, показанный на рисунке 2.21, который является абсолютным дифференциальным водоохлаждаемым приемником интегрального теплового излучения.



1 – тепловой коллектор; 2 – теплообменник; 3, 4 – калибровочный нагреватель и ПТП; 5 – ПТ; 6 – диафрагма; 7 – крышка вспомогательная; 8 – кожух; 9 – крышка; 10 – штуцер системы охлаждения; 11 – штуцер вывода кабеля связи; 12 – гайка прижимная; 13 – экран; 14 – кольцо экрана; 15 – крышка экрана

Рис. 2.21. Внешний вид (а) и схемы конструкции (б) абсолютного дифференциального радиометра с ЦПУ модели РАП-12Д

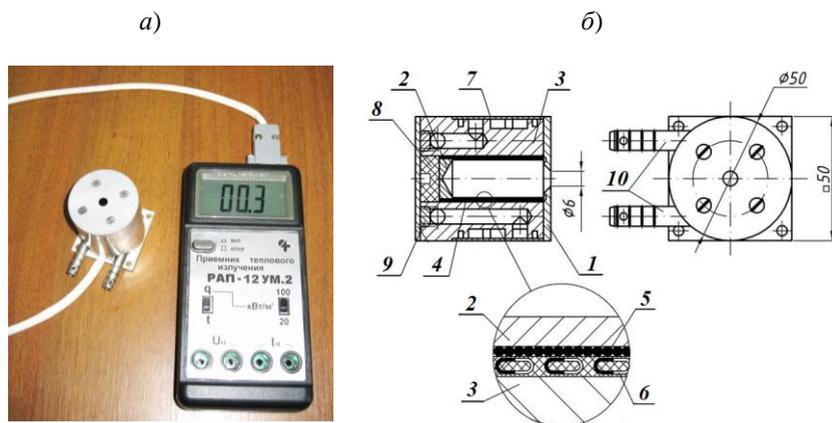
Радиометр имеет две идентичные теплотеметрические ячейки, установленные на тепловом коллекторе 1 и расположенные в одном проточном теплообменнике 2. Отличие ячеек этого радиометра от предыдущего состоит в том, что по боковой поверхности теплового коллектора в каждой ячейке размещен электронагреватель 3.

Между каждым нагревателем 3 и теплообменником расположены дифференциально соединенные ПТП 4, выполненные каждый в виде цилиндрической оболочки. Их дифференциальное включение позволяет скомпенсировать влияние неконтролируемых изменений температуры хладагента и

окружающей среды. Поэтому приборы модели РАП-12Д, предназначенные для огневых испытаний, имеют широкий диапазон измерения радиационного теплового потока  $1,0 - 100 \text{ кВт/м}^2$  с погрешностью измерения в поддиапазоне  $1 - 20 \text{ кВт/м}^2 \pm 6\%$ , а в поддиапазоне  $20 - 100 \text{ кВт/м}^2 \pm 3\%$ .

Эти радиометры применяют при испытаниях различных материалов на огнестойкость и скорость распространения пламени согласно стандартам [2.23 – 2.25].

Для ряда промышленных предприятий и лабораторий, проводящих огневые испытания продукции с использованием малогабаритных установок, разработан прибор РАП-12 УМ, являющийся уменьшенной копией прибора РАП-12М, показанный на рисунке 2.22 [2.26].



1 – диафрагма; 2 – коллектор тепловой; 3 – корпус водоохлаждаемый; 4 – оболочка коллектора; 5 – нагреватель; 6 – ПТП; 7 – кожух; 8 – крышка; 9 – шайба теплоизоляционная; 10 – штуцера; 11 – ПТ

Рис. 2.22. Внешний вид (а) и схема конструкции (б) абсолютного водоохлаждаемого приемника с ЦПУ модели РАП-12УМ.2

Основные технические характеристики радиометров серии РАП представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Техническая характеристика	Модель радиометра			
	РАП-12 (РОП-12)	РАП-12М	РАП-12Д	РАП-12УМ
Диапазон плотности потока теплового излучения, кВт/м <sup>2</sup>	5 – 70	1 – 75	1 – 50	1 – 70
Пределы допускаемой основной относительной погрешности, %	±2,5 (±5)	±6 (1 – 20) ±3 (20 – 75)	±3,5	±3
Спектральный диапазон теплового излучения, мкм	0,3 – 24	0,3 – 24	0,3 – 24	0,3 – 24
Термостойкость, °С	95	50	50	50
Коэффициент поглощения	0,98 – 0,99	0,99	0,99	0,99
Диаметр входного отверстия диафрагмы, мм	6,0±0,2	6,0±0,2	6,0±0,2	6,0±0,2
Габариты, мм – ПТИ – ЦПУ	50×70×20 –	Ø55×140 175×90×15	Ø100×140 180×85×40*	Ø50×55 180×85×40*
Масса, кг ПТИ/ЦПУ	0,2/0,5	0,5/0,5	1,5/0,5	0,5×0,5
Примечание: * стандартный мультиметр М 8906				

## 2.2 Приборы для измерения интенсивности солнечного излучения (пиранометры)

Исходя из данных метеорологических наблюдений за последние десять лет, в Украине в году бывает от 100 до 200 солнечных дней в зависимости от региона. Среднегодовое количество суммарной солнечной радиации, приходящейся на 1 м<sup>2</sup> поверхности территории Украины, равно от 1000 кВт·час/м<sup>2</sup> на севере и до 1400 кВт·час/м<sup>2</sup> в Крыму. Однако, в связи с изменениями климата как на планете, так и в нашей стране, данные об интенсивности солнечного излу-

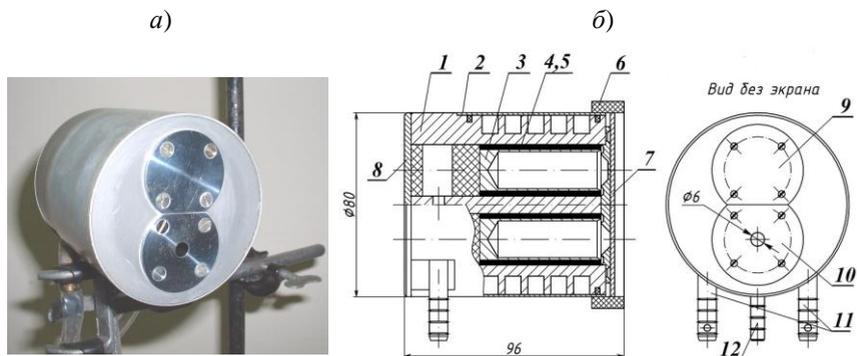
чения, что приведены в стандарте [2.33], требуют уточнения. Поэтому измерения фактического поступления солнечной радиации на поверхности зданий и сооружений являются актуальными для учета фактических значений инсоляции и их соответствия указанным в строительных нормах [2.34].

Этой цели служат термоэлектрические приборы, предназначенные для измерения поверхностной плотности потока солнечного излучения (суммарного или рассеянного), поступающего на горизонтальную поверхность. Наиболее распространен пиранометр Янишевского [2.35], который состоит из пяти теплочувствительных элементов. Прибор выполнен в виде крестовины из шести трубок, соединенных концами под углом  $90^\circ$  одна относительно другой. Четыре трубки расположены в горизонтальной плоскости, на их свободных концах укреплены теплочувствительные элементы, пятый элемент – на конце вертикальной (пятой) трубки. Шестая трубка является опорной при размещении пиранометра на крыше строения. Пиранометр применяют в комплекте с многоканальным автоматизированным измерительным комплексом.

Известны также зарубежные пиранометры общего назначения (Германия, Нидерланды, США, Китай и др.) [2.36]. Однако, высокая стоимость препятствует их широкому распространению в Украине.

Для решения задач, связанных с непрерывным и продолжительным мониторингом интенсивности солнечного излучения, достигающего поверхности Земли, и накоплением измерительной информации, в ИТТФ создана группа приборов для измерения поверхностной плотности теплового потока солнечного излучения [2.37 – 2.39].

Используя опыт создания дифференциального полостного термоэлектрического приемника теплового излучения – радиометра модели РАП-12Д (см. рис. 2.21), разработан аналогичной конструкции прибор для измерения плотности потока солнечного излучения модели РАП-12ДС [2.37], показанный на рисунке 2.23.



1 – теплообменник; 2 – кожух; 3 – тепловой коллектор; 4, 5 – калибровочный нагреватель, ПТП; 6 – съемная крышка; 7 – экран; 8 – крышка теплообменника; 9 – диафрагма ячейки референта; 10 – диафрагма рабочая; 11 – штуцера системы водоохлаждения; 12 – штуцер вывода кабеля

Рис. 2.23. Внешний вид (а) и схемы конструкции (б) радиометра РАП-12 ДС

Как и в радиометре РАП-12Д, этот прибор имеет две идентичные соединенные дифференциально ячейки: рабочую и референт, расположенные в водоохлаждаемом проточном теплообменнике 1. Каждая ячейка состоит из теплового коллектора 3, выполненного из высокотеплопроводного материала, на наружной поверхности которого расположен калибровочный нагреватель 4 в виде бифилярной спирали.

Между нагревателями 4 ячеек и теплообменником 1 расположены дифференциально соединенные термобатареи 5, выполненные в виде цилиндрических оболочек по стандарту [1.4]. Этот теплотметрический ЧЭ генерирует электрический сигнал, пропорциональный поверхностной плотности потока теплового излучения, проникающего через отверстие диафрагмы 10. Тепловой коллектор 3 вместе с диафрагмой 10, является моделью абсолютно черного тела. Вспомогательная крышка 9 из полированного дюралюминия, выполненная в размерах диафрагмы, закрывает вторую (вспомогательную) теплотметрическую ячейку-референт. Таким обра-

зом, измеряемый тепловой поток не воздействует на вспомогательную ячейку. Теплообменник 1 вместе с кожухом 2 образуют каналы для циркуляции хладагента, подаваемого от водяного термостата через штуцера 11. Средний штуцер 12 служит для выводов кабеля токоподающих и потенциолоъемных проводов. Для контроля температуры теплового коллектора 3 применен термоэлектрический ПТ (термопара). Для увеличения коэффициента поглощения внутренняя поверхность теплового коллектора 3 покрыта слоем оксидной черни.

Диапазон измерения плотности потока теплового излучения от 10 до 200 Вт/м<sup>2</sup>. Спектральный диапазон теплового излучения от 0,3 до 24 мкм. Интегральная поглощательная способность не менее 0,99.

В современных общественных и жилых зданиях значительную долю поверхностей, особенно фасадов, занимают ОК, через которые в помещение поступает солнечное излучение. Видимое излучение обеспечивает освещенность в светлое время суток, а энергетическую составляющую солнечного излучения, приходящуюся в основном на ближнюю инфракрасную (далее – ИК) область спектра, необходимо учитывать в энергетическом балансе зданий. Например, для зданий, южные фасады которых имеют значительную площадь остекления, летние затраты на кондиционирование соизмеримы с затратами на отопление в зимний период.

Теплообмен через светопрозрачные ОК обычно рассматривают как сумму двух составляющих, обусловленных, во-первых, разностью значений температуры воздуха внутри и снаружи помещения и тепловым сопротивлением ОК, и во-вторых энергией солнечного излучения, прошедшей через ОК. Плотность теплового потока, соответствующая первой из указанных составляющих, пропорциональна разности температуры и обратно пропорциональна сопротивлению теплопередаче ОК.

Вторую составляющую теплообмена характеризуют так называемым коэффициентом затенения (Shading Coefficient) SC, который характеризует способность конструкции пропускать прямое солнечное излучение. Коэффициент затенения определяется как отношение теплового потока, проходящего через данную конструкцию вследствие прямого солнечного излучения в диапазоне длины волны 0,3 – 2,5 мкм, к тепловому потоку, проходящему в тех же условиях через стекло толщиной 3 мм. Коэффициент затенения показывает долю прохождения не только прямого потока энергии солнечного излучения (ближняя ИК – область спектра), но и излучение стекол вследствие их разогрева из-за поглощения ими энергии (дальняя ИК – область спектра).

Методы расчета проходящей через окна энергии солнечного излучения, а также отраженной и поглощенной, основанные на данных о спектре излучения, спектральных характеристиках стекол и конструкции окна, нормированы в национальном (гармонизированном с международным) стандарте [2.40]. Экспериментальные методы определения указанных составляющих потока теплового излучения и характеристик в настоящее время не нормированы, и ряд исследований посвящён созданию СИТ и для натуральных условий, и с применением имитатора солнечного излучения [2.41, 2.42].

Разработанный прибор РАП-12ДС [2.37], предназначенный изначально для измерения суммарной плотности солнечного излучения, применяется также для определения коэффициента затенения светопрозрачных ОК [2.43, 2.44].

Методика измерений при определении составляющих радиационного теплообмена через светопрозрачные ОК в натуральных условиях при прямом воздействии солнечного излучения проиллюстрирована на рисунке 2.24. Для выполнения измерений составляющих солнечного излучения прибор РАП-12ДС располагают так, чтобы ось приемной ячейки была нормальна поверхности ОК. Измерения проводят летом в ясную солнечную погоду.

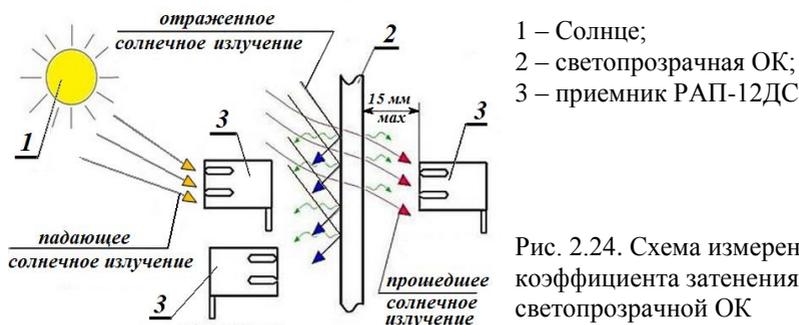


Рис. 2.24. Схема измерения коэффициента затенения светопрозрачной ОК радиометром РАП-12ДС

С учетом нестабильности падающего солнечного излучения в натуральных условиях все составляющие необходимо определять одновременно, проводя серию измерений и усредняя результаты.

Методика измерений состоит в том, что прибором РАП-12ДС измеряют значения плотности падающего, отраженного и прошедшего потока солнечного излучения и вычисляют коэффициент затенения. В этих измерениях энергию, отраженную от стен, пола и потолка помещения в сторону окна, не измеряют, полагая, что для достаточно большого помещения эта энергия незначительна и ею можно пренебречь. Энергию, поглощенную остеклением, определяют вычитанием из энергии падающего излучения суммы энергии прошедшего и отраженного потоков излучения.

Определенные экспериментально энергетические характеристики светопрозрачных конструкций используют для анализа поступающего в помещение радиационного теплового потока летом и зимой. Чем ниже коэффициент затенения, тем лучше солнцезащитные свойства остекления. При проектировании зданий и выборе типов стекол необходимо определить, что важнее – получение дополнительного солнечного подогрева помещения зимой или снижение затрат на кондиционирование летом.

Ещё одним из успешных применений прибора РАП-12ДС явилось исследование коэффициентов поглощения солнечного излучения ( $a_S$ ) тонких энергоэффективных покрытий [2.43, 2.44]. Защита от перегрева солнечным излучением является основной задачей современных тонких энергоэффективных покрытий, выполненных на основе полых стеклянных или керамических микросфер белого цвета. Покрытия, отражающие солнечное излучение, широко используются в аэрокосмической отрасли, а также для защиты рефрижераторов, газопроводов и газгольдеров, крыш зданий и сооружений в регионах с высокой инсоляцией. Качество солнцезащитных покрытий количественно оценивается коэффициентом поглощения солнечного излучения, который равен отношению поглощенной радиационной энергии к полной энергии падающего солнечного излучения.

Схема измерительного стенда для определения коэффициента поглощения солнечного излучения по методике, основанной на измерениях с применением двух термоэлектрических биметаллических ПТП и приемника солнечного излучения модели РАП-12.ДС, представлена на рисунке 2.25.

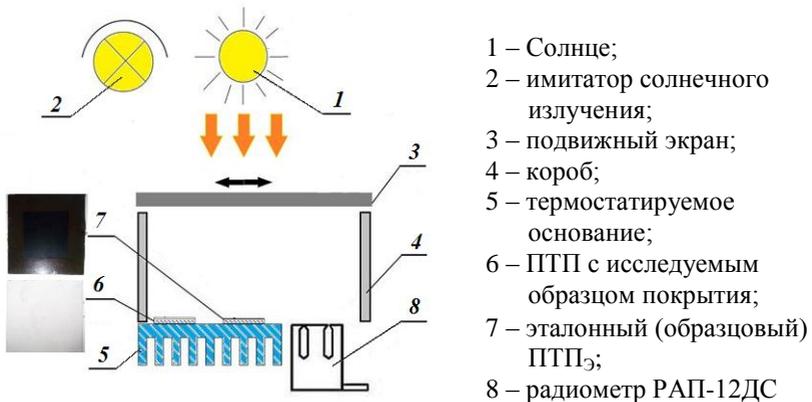


Рис. 2.25. Схема измерительного стенда для определения коэффициента поглощения солнечного излучения тонким энергоэффективным покрытием

Слой исследуемого покрытия толщиной 1 – 2 мм с неизвестным коэффициентом поглощения  $a_{s_x}$  наносят на подложку из диэлектрического материала (стекла размером не менее 190×190×2 мм), выравнивают и просушивают согласно технологии. Формируют опытный образец, устанавливая окрашенную подложку на поверхность преобразователя соответствующего размера (ППП<sub>ОБР</sub>) через высокотеплопроводную смазку для уменьшения контактного теплового сопротивления. На второй идентичный преобразователь (эталонный ПТП<sub>Э</sub>) наносят покрытие с известными коэффициентом поглощения солнечного излучения  $a_{s_3}$  и коэффициентом эмиссии  $\varepsilon_3$ , например, черную пленку «Oracal». Поскольку ТФХ ПТП и стеклянной подложки известны, несложно вычислить суммарное тепловое сопротивление опытного образца  $R_{ОБР}$ . Также желательно заранее знать или определить экспериментально коэффициент эмиссии исследуемого покрытия  $\varepsilon_x$ . Опытный образец 6 и эталонный ПТП 7 размещают на массивном термостатируемом основании 5, изготовленном из высокотеплопроводного материала.

В случае отсутствия покрытия с известными параметрами в качестве эталонного ПТП<sub>Э</sub> применяют приемник теплового излучения 8 – радиометр модели РАП-12ДС с известным коэффициентом поглощения  $a_{РАД}$ , позволяющий провести прямые измерения плотности падающего потока солнечного излучения. Радиометр устанавливают таким образом, чтобы его входная диафрагма располагалась в той же плоскости, что и исследуемое покрытие. Источником излучения в данном исследовании используется либо непосредственно Солнце, либо имитатор солнечного излучения 2, например, устройство на базе ксеноновых ламп с температурой около 6000 К. Использование Солнца возможно только при ясной безоблачной погоде, с обязательной корректировкой положе-

ния обоих ПТП или ПТП<sub>ОБР</sub> с исследуемым покрытием и радиометра по отношению к движению Солнца по небосводу.

При проведении эксперимента необходимо минимизировать воздействие на приборы переотраженного излучения от окружающих объектов или нагретых тел, а также влияние естественной конвекции. Для этого применяют защитный кожух 4, представляющий собой короб из теплоизоляционного материала (например, пенопласта), внутренняя поверхность которого зачернена. Над экспонируемыми приборами располагают подвижный теплоизолирующий экран 3 с отражающим покрытием, как показано на рис. 2.25.

Измерения проводят методом поочередной смены солнечного излучения и затенения с помощью подвижного экрана, регистрируя в каждом случае сигналы обоих ПТП (или ПТП<sub>ОБР</sub> и радиометра). По этим данным вычисляют значения плотности теплового потока от солнечного излучения  $q_{ИЗЛ}$  и при его затенении  $q_{ЗТ}$ , измеренные с помощью двух преобразователей (ПТП<sub>ОБР</sub> и ПТП<sub>Э</sub>) или одного преобразователя ПТП<sub>ОБР</sub> и радиометра.

Расчет коэффициента поглощения солнечного излучения  $a_{S_X}$  исследуемого покрытия выполняют по следующим зависимостям [2.43, 2.44]:

– по результатам измерения эталонным ПТП<sub>Э</sub>:

$$a_{S_X} = a_{S_Э} \cdot \frac{(q_{ИЗЛ} - q_{ЗТ}) \cdot (1 + R_{ОБР} \cdot (\alpha + 4 \cdot \varepsilon_X \cdot \sigma T_{ЗТ}^3))}{(q_{ИЗЛ_Э} - q_{ЗТ_Э}) \cdot (1 + R_Э (\alpha + 4 \cdot \varepsilon_Э \cdot \sigma T_{ЗТ_Э}^3))}; \quad (2.22)$$

– по результатам измерения радиометром РАП-12.ДС:

$$a_{S_X} = a_{РАД} \cdot \frac{(q_{ИЗЛ} - q_{ЗТ}) \cdot (1 + R_{ОБР} \cdot (\alpha + 4 \cdot \varepsilon_X \cdot \sigma T_{ЗТ}^3))}{q_{ИЗЛ_РАД} - q_{ЗТ_РАД}}, \quad (2.23)$$

где  $T_{ЗТ}$ ,  $T_{ЗТ_Э}$  – температура при затенении поверхности покрытия опытного образца и эталонного ПТП<sub>Э</sub>, вычисляемая по формулам:  $T_{ЗТ} = T_{ТС} + R_{ОБР} \cdot q_{ЗТ}$  и  $T_{ЗТ_Э} = T_{ТС} + R_Э \cdot q_{ЗТ_Э}$ ,

где  $T_{TC}$  – температура термостатирования основания;

$\alpha$  – коэффициент теплообмена [1.13].

Следует отметить, что применение радиометра вместо ПТПЭ, в котором исключена конвективная составляющая теплообмена, значительно облегчает проведение эксперимента и последующие расчеты. Кроме того, в таком случае возможно проведение одновременного исследования двух образцов покрытия.

Для приблизительной оценки коэффициента поглощения  $a_{S_x}$  расчетные формулы (2.22) и (2.23) можно упростить:

$$a_{S_x} = a_{S_\ominus} \cdot \frac{q_{ИЗЛ} - q_{ЗТ}}{q_{ИЗЛ_\ominus} - q_{ЗТ_\ominus}} \cdot \beta_\ominus, \quad (2.24)$$

где коэффициент  $\beta_\ominus \approx 1,12 - 1,15$

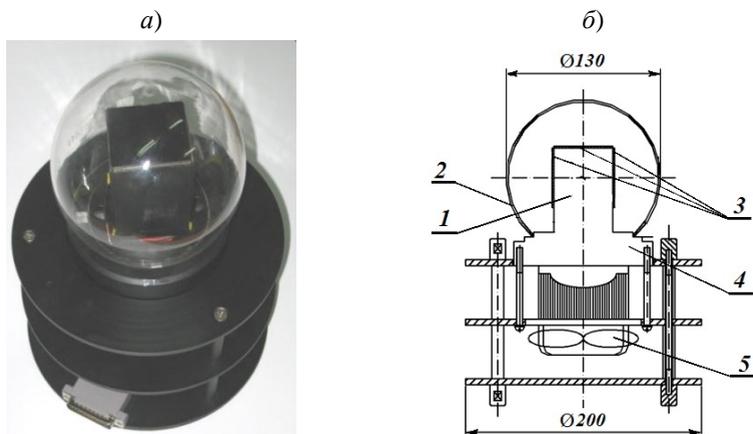
$$\text{или } a_{S_x} = a_{РАД} \cdot \frac{q_{ИЗЛ} - q_{ЗТ}}{q_{ИЗЛ_{РАД}} - q_{ЗТ_{РАД}}} \cdot \beta_{РАД}, \quad (2.25)$$

где коэффициент  $\beta_{РАД} = 1,18 - 1,20$ .

По описанной методике исследован коэффициент поглощения солнечного излучения ряда красок и покрытий, как импортных, так и разработанных в Украине. Полученные значения коэффициента  $a_S$  составляют от 0,09 до 0,20 с абсолютной погрешностью измерений  $\pm 0,02$ . Исследованные покрытия действительно являются энергоэффективными при нанесении на конструкции и оборудование, которые нужно защитить от перегрева солнечным излучением, поскольку дают возможность экономить энергию на охлаждение или кондиционирование.

Для длительных непрерывных измерений **интенсивности солнечного излучения** и сбора экспериментальных данных о ее фактических значениях в ИТТФ на базе термоэлектрических биметаллических ПТП созданы два прибора: пирометр СР-М1 и пирометр СР-У1.

*Пиранометр CP-M1*, представленный на рисунке 2.26, предназначен для определения инсоляции при ориентировании прибора по сторонам света [2.38]. Его применяют для измерения суммарной солнечной радиации (в Вт/м<sup>2</sup>), поступающей на горизонтальную поверхность и поверхности, ориентированные по сторонам света.



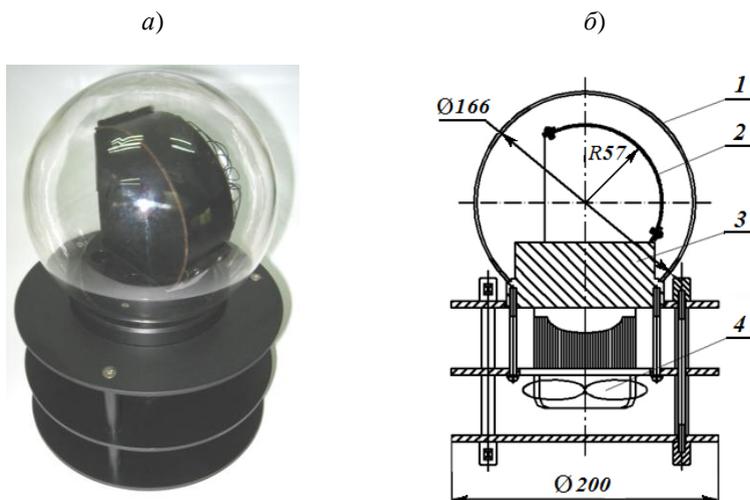
1 – теплотрическая головка; 2 – сферический стеклянный колпак; 3 – ПТП, ориентированные по сторонам света; 4 – теплосток; 5 – система принудительного охлаждения

Рис. 2.26. Внешний вид (а) и схема конструкции (б) пиранометра CP-M1

Центральным узлом прибора является теплотрическая головка 1, установленная на массивном охлаждаемом теплостоке 4 и закрытая стеклянным сферическим колпаком 2. На боковых и верхней поверхностях головки 1 установлены пять теплочувствительных элементов – традиционных биметаллических ПТП 3. При работе пиранометр размещают на крыше строения так, чтобы ПТП были ориентированы строго параллельно контролируемым ОК.

*Пиранометр CP-VI* [2.39], предназначенный для определения инсоляции при различных углах наклона относительно горизонта, показан на рисунке 2.27. Его применяют для измерения суммарной солнечной радиации, поступающей

на поверхность, которая имеет фиксированный угол наклона относительно горизонта. Теплочувствительный элемент – многозонный ПТП, выполненный в виде дугообразной прямоугольной пластины, разделенной на 10 чувствительных зон. На поверхность каждой зоны поступает солнечная радиация под определенным углом относительно нормального направления из диапазона значений от  $10^\circ$  до  $90^\circ$  с шагом прохождения  $10^\circ$ .



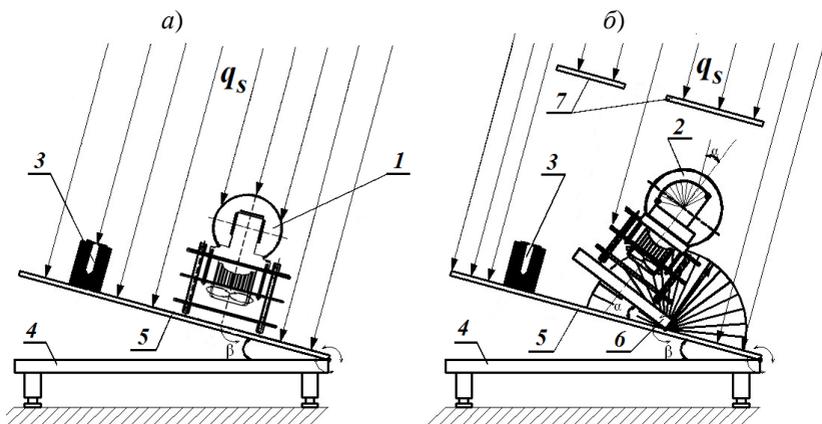
1 – сферический стеклянный колпак; 2 – многозонный ПТП; 3 – теплосток; 4 – система принудительного охлаждения

Рис.2.27. Внешний вид (а) и схема конструкции (б) пиранометра CP-U1

В обоих пиранометрах стеклянный колпак защищает ПТП от влияния окружающей среды, а теплосток, выполненный из высокотеплопроводного материала, снабжен системой принудительного воздушного охлаждения. При работе с приборами осуществляется прием и передача в ПК сигналов ПТП, их первичная обработка по заданной программе и представление на экране в числовом виде и графически. При этом данные автоматически запоминаются в файле формата Microsoft Excel, что дает возможность выполнять дальней-

шую обработку полученных экспериментальных данных этим или другим программным пакетом.

Коэффициенты преобразования ПТП, установленных в пиранометрах СР-М1 и СР-У1, первично определяют на радиационном компараторе РГУ-2 [2.45]. Аттестацию (калибрование) после их монтажа в пиранометр проводят способом, регламентированным стандартом ДСТУ ISO 9846 [2.46], с применением описанного выше, радиометра модели РАП-12.ДС вместо рекомендованного пиранометра. Суть аттестации состоит в сравнении аттестуемого пиранометра с радиометром путем измерения плотности потока прямого солнечного излучения. Искомые значения получают как разность между измеренными значениями плотности потока суммарного (полусферического) и рассеянного излучения. При измерении только рассеянного излучения применяют экран, затеняющий прибор от прямых лучей Солнца. На рисунке 2.28 *а, б* представлены схемы метрологических установок для аттестации описанных моделей пиранометра.



$q_s$  – солнечное излучение; 1 – пиранометр СР-М1; 2 – пиранометр СР-У1; 3 – радиометр РАП-12.ДС; 4 – основная платформа; 5, 6 – платформы поворотные; 7 – диски затеняющие (на рис. *а*) – не показаны)

Рис. 2.28. Принципиальная схема установок для аттестации пиранометров СР-М1 (*а*) и СР-У1 (*б*)

С целью долгосрочного наблюдения и сбора данных об интенсивности инсоляции измерения выполняют с применением пиранометров, закрепленных на металлической платформе, как показано на рисунке 2.29.



- 1 1 – пиранометр модели СР-М1  
2 – пиранометр модели СР-У1  
3 – платформа

Рис. 2.29. Установка для долгосрочных наблюдений за интенсивностью солнечной радиации

Полученные результаты представлены графически на рисунках 2.30 и 2.31.

### **2.3 Теплометрическая аппаратура для исследования параметров пламени при огневых испытаниях**

Во многих отраслях промышленности, в частности, авиа-, авто- и вагоностроении, индустрии строительных материалов, службе пожарной безопасности и других, предусмотрены испытания на воспламеняемость, горючесть, способность ограничения распространения огня различных материалов и изделий, которые при испытаниях подвергают воздействию открытого пламени, помещая испытываемый объект в пламя горелки. Существует ряд стандартов [2.22 – 2.25] на огневые испытания, в которых предусмотрено измерение таких физических величин, как температура и поверхностная плотность теплового потока, являющиеся основными параметрами пламени. Для их измерения в ИТТФ разработан автоматизированный комплекс теплометрической аппаратуры КИТП-1, показанный на рисунке 2.32 [5\*, 2.47, 2.48]

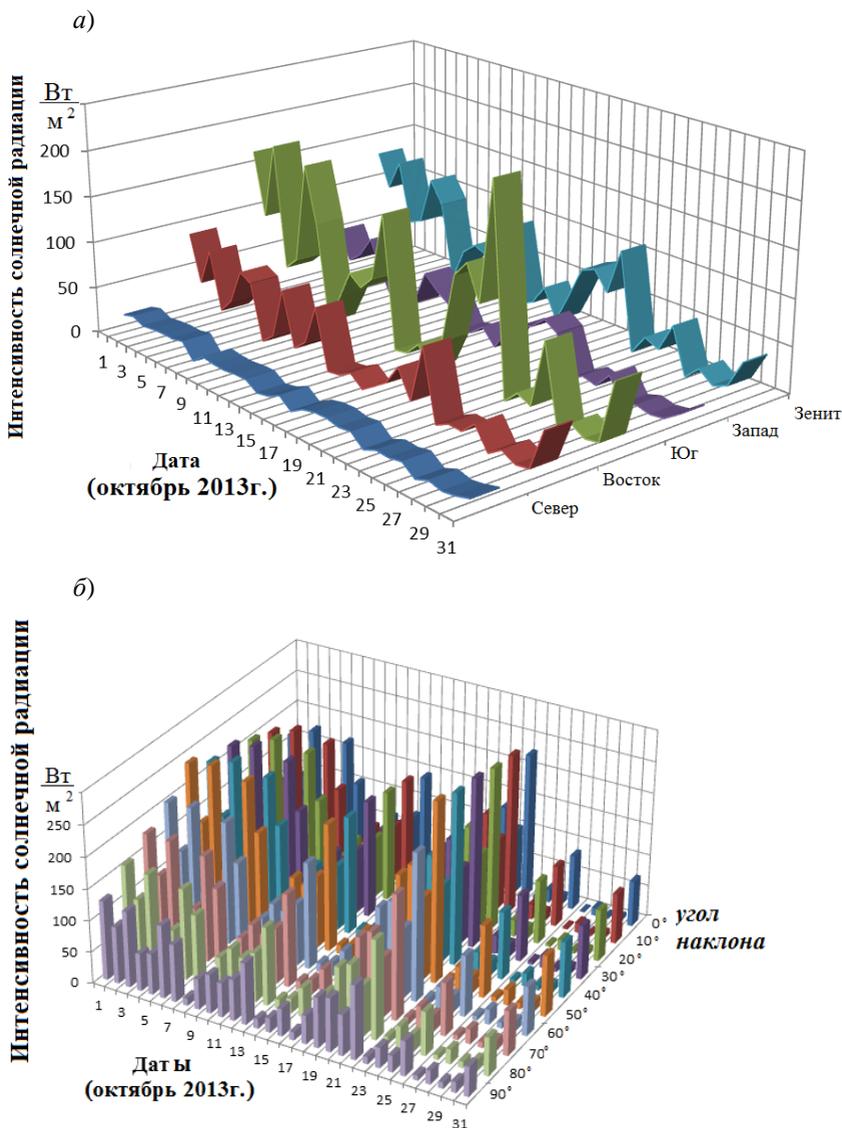


Рис. 2.30. Среднесуточные изменения интенсивности солнечной радиации в течение месяца в зависимости от ориентации по сторонам света (а) и от угла наклона относительно горизонта (б), полученные по результатам измерения приборами СР-М1 (а) и СР-У1 (б)

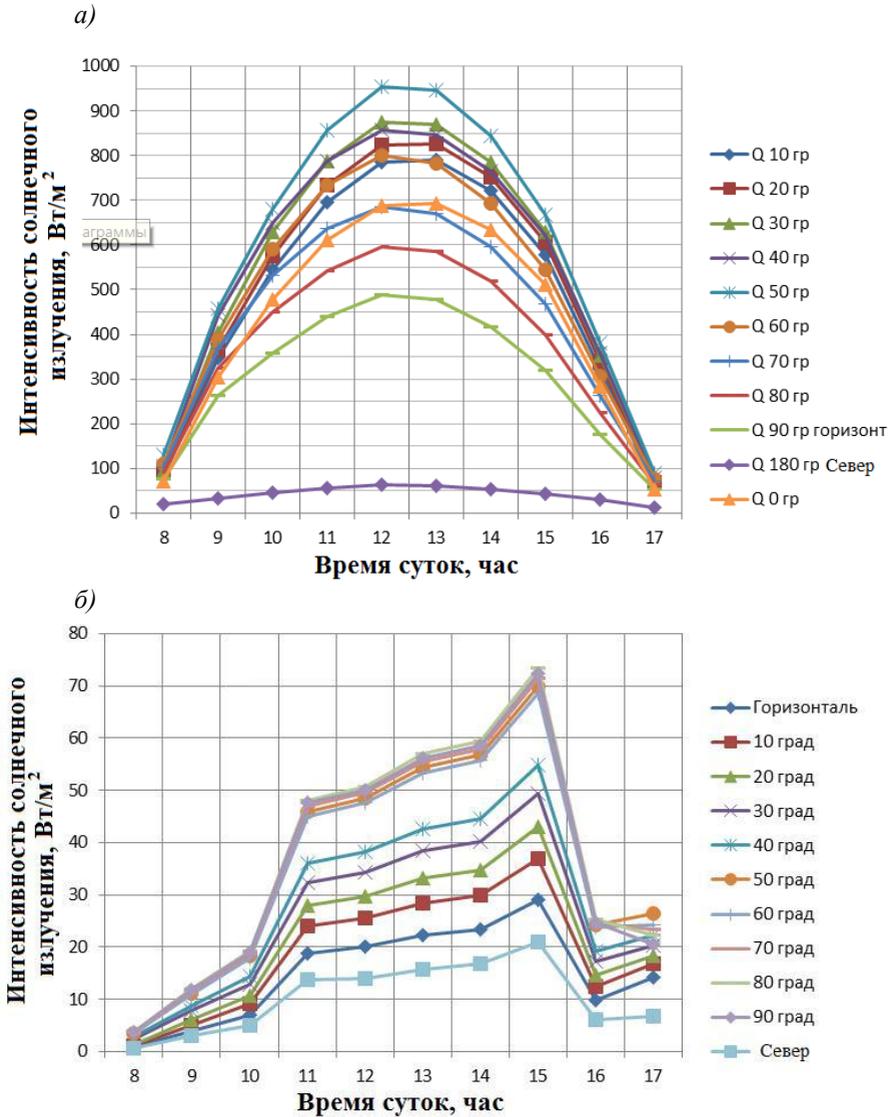


Рис. 2.31. Графики изменения максимальной (а) и минимальной (б) интенсивности солнечного излучения в течение светового дня в зависимости от угла наклона от 0° до 90° приемной поверхности прибора СР-У1

Теплометрический комплекс КИТП-1 (рис. 2.32а) содержит два измерительных первичных преобразователя 1 и 2, специализированный электронный блок 6, циркуляционный водяной термостат 7, ПК 8 и калориметр 10 для аттестации ПТП.

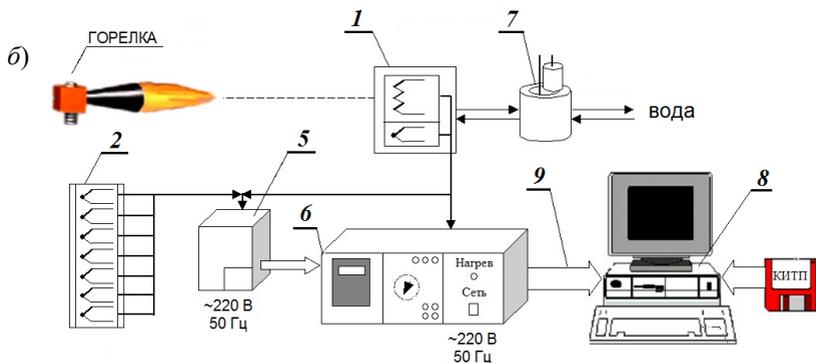
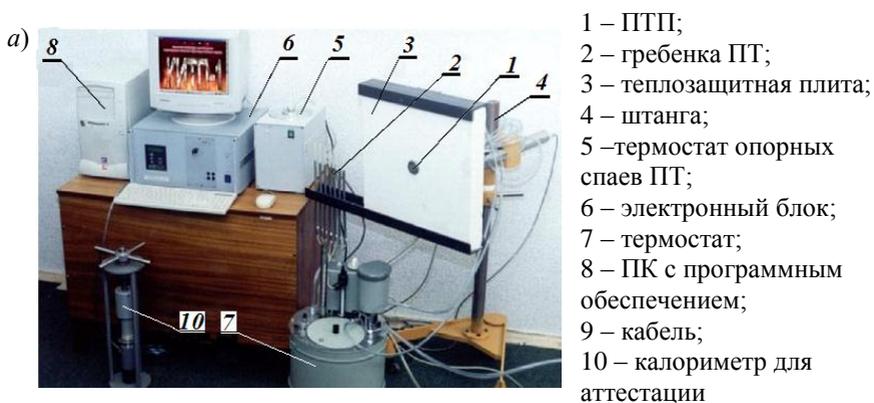


Рис. 2.32. Внешний вид (а) и функционально-структурная схема (б) измерительного комплекса КИТП-1

Автоматизированный измерительный комплекс КИТП-1 предназначен для работы в двух режимах: рабочем – при проведении огневых испытаний и метрологическом – при выполнении аттестации и периодических поверок.

В *режиме эксплуатации* реализуется метод непосредственного измерения поверхностной плотности теплового потока от пламени горелки термоэлектрическим ПТП специальной конструкции и температуры в нескольких точках по сечению температурного поля пламени горелки.

Для измерения температуры применен комплект из семи термоэлектрических ПТ (термопары ТХА), смонтированные в держателе на одинаковом расстоянии друг от друга, в сборе напоминающем гребенку. Комплект ПТ предназначен для одновременного измерения температуры в семи точках по сечению пламени горелки с целью определения степени равномерности температурного поля пламени. Каждая термопара изготовлена в виде цилиндрического зонда с оголенным спаем. Диаметр термоэлектродных проводов и их изоляция выбраны, исходя из соображений минимальной методической погрешности и максимально возможной длительности эксплуатации в условиях огневых испытаний.

ПТП 1 устанавливают в отверстие по центру теплозащитной плиты 3, выполненной из блока высокоэффективного теплоизолятора, закрепляемого между двумя направляющими металлическими профилями. На свободном конце нижнего удлиненного профиля устанавливают гребенку ПТ 2. Плита 3 укреплена на передвижной штанге 4, при этом предусмотрена возможность перемещения плиты вверх-вниз и изменения положения из вертикального на горизонтальное. Благодаря этому изделие может быть испытано в двух позициях относительно горелки: вертикально и горизонтально. Кабели связи от ПТП и гребенки термопар протянуты сквозь штангу. Таким образом корпус ПТП, силиконовые шланги и измерительные кабели надежно защищены от прямого воздействия пламени горелки и высокой температуры при испытаниях.

Устройство термостатирования 5 предназначено для термостабилизации опорных спаев термопар при температуре  $(50 \pm 2)^\circ\text{C}$  с абсолютной погрешностью  $\pm 0,5\text{ K}$ .

Электронный блок 6 представляет собой настольную конструкцию, состоящую из блока обработки измерительной информации, источника стабилизированной мощности и регулятора теплового потока, размещенных в общем конструктиве. Устройство обработки измерительной информации содержит 11-канальный коммутатор, усилитель аналоговых сигналов, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), микропроцессор, клавиатуру, индикатор, последовательный интерфейс RS-232 и вторичный источник питания.

Принятые аналоговые сигналы ПТП и ПТ после преобразования в цифровую форму по последовательному интерфейсу RS-232 передаются в ПК, где обрабатываются в специальной программе для определения измеренных значений плотности теплового потока и температуры пламени горелки и корпуса ПТП. Текущие значения измеряемых величин высвечиваются на цифровом индикаторе, размещенном на передней панели электронного блока. Выбор режима работы установки и ввод коэффициента преобразования ПТП в микропроцессор производятся с клавиатуры, также размещенной на передней панели электронного блока.

Для обеспечения работы установки в *метрологическом режиме* в электронном блоке предусмотрены источник стабилизированной мощности и регулятор теплового потока. Первый обеспечивает возможность получения десяти значений стабильного во времени постоянного напряжения в диапазоне значений 5 – 50 В, а второй предназначен для исключения тепловых потерь от основного электронагревателя, установленного в калориметре для аттестации ПТП.

Регулятор теплового потока состоит из усилителя сигнала измерительной термобатарей, регулятора, широтно-импульсного модуля, ключевого усилителя, двух трансформаторов и вторичного источника питания. Он является управляющим узлом системы автоматической компенсации теплового потока в калориметре, где формируется управляющее воздействие по отклонению от нуля текущего значения

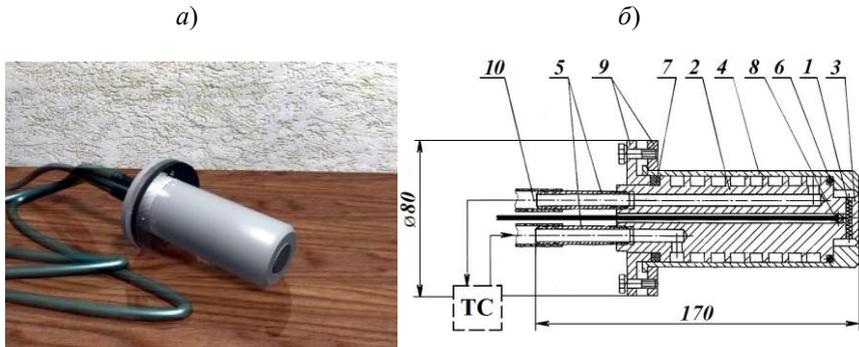
сигнала измерительной термобатареи ПТП. Закон регулирования – пропорционально-интегральный.

На переднюю панель электронного блока вынесены все органы управления, табло жидкокристаллического дисплея, переключатель выходного напряжения источника стабилизированной мощности, индикатор его перегрузки и тумблер питания; светодиод «НАГРЕВ» для индикации выхода электронагревателя на режим стабилизации теплового потока; указатели «А» и «В» для подключения амперметра и вольтметра и клавиша «СЕТЬ» для включения электронного блока.

При огневых испытаниях объект помещают в пламя горелки с заданными параметрами. При этом одним из обязательных измеряемых параметров горелки является поверхностная плотность теплового потока от пламени, значение которой может быть от 1,0 до 200 кВт/м<sup>2</sup>. Задача измерения таких значений плотности теплового потока на верхнем пределе диапазона осложнена невозможностью применения стандартного ПТП типа вспомогательной стенки в обычном исполнении [1.4]. Большое тепловое сопротивление ПТП, выполненного с использованием электроизоляционного заливочного компаунда, основанного на смолах и имеющего коэффициент теплопроводности не более 0,5 Вт/(м·К), не позволяет выдерживать тепловые нагрузки более 10 кВт/м<sup>2</sup>. Как было показано в главе 4 книги 1 [2\*], существенное уменьшение эффективного теплового сопротивления ПТП может быть достигнуто путем размещения между тепловоспринимающей и теплоотдающей поверхностями ПТП шунтов из материала с высокой теплопроводностью, равномерно распределенных в теле ПТП. При этом наружные поверхности термобатареи снабжены температуровыравнивающими покрытиями. Значение теплового сопротивления ПТП в этом случае уменьшается почти на два порядка [2\*, 2.49].

В связи с этим для применения ПТП в огневых испытаниях с целью обеспечения измерения плотности теплового потока более 10 кВт/м<sup>2</sup> его ЧЭ выполнен с тепловым шунтом.

Это реализовано посредством цельнометаллической конструкции в форме диска с высверленными сквозными каналами, в которые помещена ленточная батарея гальванических термоэлементов. Такое устройство ПТП, представленное на рисунке 2.33, продиктовано не только широким диапазоном больших значений тепловой нагрузки, но и высокой температурой [2.48].



1 – чувствительный элемент ПТП; 2 – корпус; 3 – теплопринимающая пластинка; 4 – кожух; 5 – штуцера; 6,7 – кольца уплотнительные; 8 – рабочий спай ПТ; 9 – крепежные фланцы; 10 – измерительный кабель; ТС – термостат

Рис. 2.33. Внешний вид (а) и схема конструкции (б) специализированного ПТП для огневых испытаний материалов и изделий

Согласно схеме (см. рис. 2.33б) ПТП содержит ЧЭ 1, представляющий собой монолитную жесткую плоскую конструкцию, выполненную в форме диска, установленного в торце цилиндрического корпуса 2 и снабженного теплопринимающей пластинкой 3. Внутри диска высверлены сквозные каналы, в которые уложена батарея гальванических термоэлементов. Площадь теплопринимающей поверхности ПТП составляет  $4,89 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ .

Во избежание перегрева ЧЭ корпус ПТП выполнен водоохлаждаемым. Для этого между корпусом 2 и кожухом 4 предусмотрена полость, прокачиваемая жидким хладагентом

(водой) постоянной температуры для охлаждения и термостаивания корпуса. ПТП имеет встроенную термопару (ТХА), рабочий спай 8 которой размещен в корпусе под чувствительным элементом ПТП. Измерительный кабель выходит наружу через нижний торец ПТП. Такой ПТП может быть использован при работе в пламени горелки до 200 часов.

Функция преобразования ПТП обладает нелинейностью порядка 10%, что обусловлено широким динамическим диапазоном и большой плотностью теплового потока, из-за чего происходит изменение физических свойств конструкционных материалов, что и является причиной нелинейности характеристики ПТП.

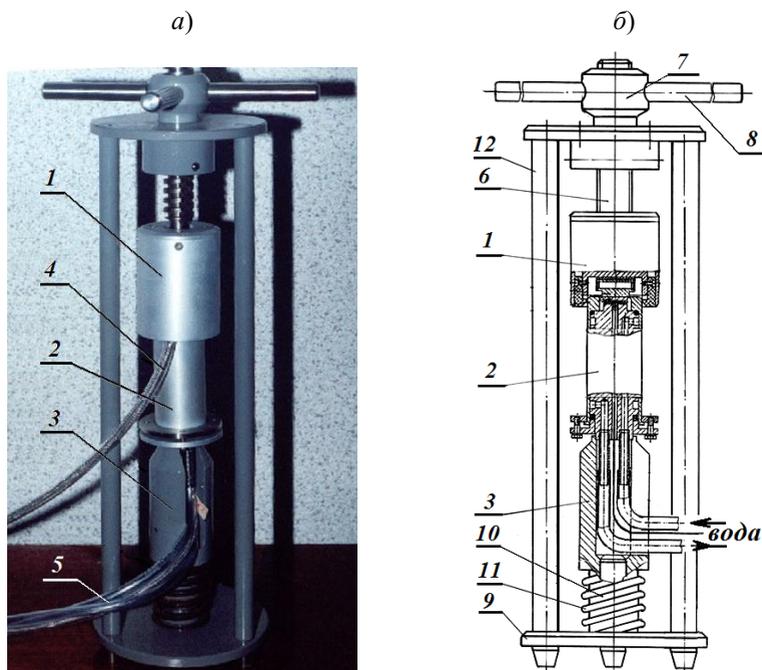
Влияние нелинейности характеристики ПТП учитывается представлением его функции преобразования по результатам измерения сигналов ПТП во время аттестации в виде аппроксимационного полинома:

$$q = a_0 + a_1 \cdot K_q \cdot E + a_2 \cdot (K_q \cdot E)^2, \quad (2.26)$$

где значение коэффициента преобразования  $K_q$  берется для середины динамического диапазона плотности теплового потока;  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  – аппроксимационные коэффициенты.

Специализированный ПТП, входящий в комплект измерительного комплекса КИТП-1, предназначен для измерения плотности теплового потока в диапазоне от 30 до 170 кВт/м<sup>2</sup> при значениях температуры от 20 до 95 °С с пределом допускаемой относительной погрешности 2 %, установленным в результате метрологической аттестации в УкрЦСМ. Назначенный ресурс работы в пламени горелки до 200 часов.

Для выполнения метрологических работ комплекс КИТП-1 имеет в своем составе специальный калориметр для определения функции преобразования ПТП в требуемых динамических диапазонах плотности теплового потока и температуры, внешний вид и схема конструкции которого представлены на рисунке 2.34.

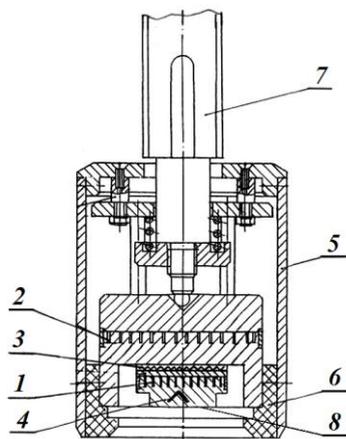


1 – тепловая головка; 2 – аттестуемый ПТП; 3 – гнездо-подставка под ПТП; 4 – кабель тепловой головки; 5 – кабели и шланги аттестуемого ПТП; 6 – ходовой винт; 7, 8 – гайка с рукояткой; 9 – основание калориметра; 10 – шток; 11 – пружина; 12 – тяга

Рис. 2.34. Внешний вид (а) и схема конструкции (б) калориметра для аттестации специализированного ПТП

Калориметр представляет собой настольную конструкцию, центральным узлом которой является тепловая головка 1, к которой в собранном состоянии примыкает аттестуемый ПТП 2, закрепленный в гнезде-подставке 3. Для тепловой головки обеспечена возможность вертикального перемещения вверх-вниз с помощью пары «винт 6 – гайка 7 с рукояткой 8». На нижнем диске 9 (основании калориметра) укреплен вертикально шток 10 с пружиной 11 и подставкой 3, выполняющей роль держателя аттестуемого ПТП.

Тепловая головка 1, схема конструкции которой приведена на рисунке 2.35, содержит основной 1 и компенсационный 2 электронагреватели, между которыми размещена измерительная термобатарея 3.



- 1 – электронагреватель основной;
- 2 – электронагреватель компенсационный;
- 3 – измерительная термобатарея;
- 4 – рабочий спай термопары ТХА;
- 5 – защитный кожух;
- 6 – центральная втулка;
- 7 – ходовой винт;
- 8 – теплоотдающая поверхность конструкции

Рис. 2.35. Схема конструкции тепловой головки аттестационного калориметра

В тепловой головке размещен также рабочий спай термопары ТХА 4 для измерения температуры корпуса основного нагревателя. Сборка «1 – 2 – 3» защищена от окружающей среды кожухом 5, сцентрирована втулкой 6 и шарнирно закреплена в калориметре на ходовом винте 7 (см. также поз. б на рис. 2.34). Потенциалосъемные провода измерительной термобатареи, выводы термопары, коммутационные провода от обоих нагревателей выведены из корпуса тепловой головки единым кабелем (см. поз. 4 на рис. 2.34а).

Нормированные значения плотности теплового потока задают подведением электроэнергии постоянной мощности к основному нагревателю 1.

После размещения аттестуемого ПТП в калориметре его тепловоспринимающая поверхность находится в контакте с теплоотдающей поверхностью 8 основного нагревателя. За счет совместной работы компенсационного нагревателя 2 и электронного регулятора весь тепловой поток при нулевом

сигнале термобатареи 3 направлен через аттестуемый ПТП. Между соприкасающимися поверхностями обеспечивается хороший тепловой контакт. Значения температуры задаются определенным напряжением постоянного тока, соответствующим заданному нормированному значению температуры согласно номинальной статической характеристике преобразования ПТ ТХА [1.5].

В связи со спецификой применения комплекса КИТП-1, обусловленной высокими тепловыми нагрузками, большое внимание уделено определению его метрологических характеристик. Их исследование выполнено путем многократных наблюдений в пяти точках рабочего диапазона измерения плотности теплового потока, при этом 1-я и 5-я точки отстоят от начала и конца диапазона на 5% его ширины, а также измерения и преобразования сигналов ТХА в соответствующие значения температуры для двух диапазонов: от 10 до 100 °С и от 900 до 1200 °С.

Экспериментальный образец установки после метрологических испытаний в УкрЦСМ был передан для эксплуатации в испытательный центр Научно-технического комплекса «Антонов» (2000 г.).

Основные характеристики комплекса КИТП-1 систематизированы в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Наименование характеристики	Размерность	Значение
1	2	3
Диапазон измерения поверхностной плотности теплового потока	кВт/м <sup>2</sup>	30 – 170
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения поверхностной плотности теплового потока	%	±2
Диапазон измерения температуры	°С	900 – 1300
Диапазоны значений контролируемой индицируемой температуры,	°С	10 – 100 10 – 1300

Окончание таблицы 2.4

1	2	3
Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности преобразования сигналов ТХА в значения температуры	К	$\pm 1,1$
Температура термостатирования опорных спаев термопар	$^{\circ}\text{C}$	$49,90 \pm 0,05$
Пределы основной абсолютной погрешности термостатирования температуры	К	$\pm 0,15$
Диапазон значений нормированной поверхностной плотности теплового потока, задаваемой аттестационным калориметром	$\text{кВт/м}^2$	10 – 200
Электрическое сопротивление основного нагревателя калориметра при температуре $(25 \pm 1)^{\circ}\text{C}$	Ом	23,3
Электрическое сопротивление компенсационного нагревателя калориметра при температуре $(25 \pm 1)^{\circ}\text{C}$	Ом	20,4
Электрическое сопротивление измерительной термобатареи при температуре $(25 \pm 1)^{\circ}\text{C}$	Ом	$190 \pm 1$
Габаритные размеры/масса	мм/кг	
– ПТП		$\text{Ø}80 \times 170/1$
– калориметра		$\text{Ø}280 \times 700/15$

Существенный вклад в создание и разработки СИТ, описанных в главе 2, внесли С.А. Сажина, А.Н. Пилипко, Л.В. Декуша [2.7, 2.12, 2.26]

### Литература к главе 2

2.1 *Блох А. Г.* Теплообмен излучением : Справочник / А. Г. Блох, Ю. А. Журавлев, Л. Н. Рыжков. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 431 с.

2.2 *Марков М. Н.* Приемники инфракрасного излучения / М. Н. Марков ; отв. ред. В. С. Вавилов. – М. : Наука, 1968. – 168 с.

2.3 *Tunmore B. G.* A simple radiometer for the measurement of radioactive heat exchange between buildings and the environment / B. G. Tunmore. – Journ. Sci, Instr., 1962. – Vol. 39. – P. 5.

2.4 *Джемисон Дж. Э.* Физика и техника инфракрасного излучения. (Infrared physics and engineering) : монография / Дж. Э. Джемисон, Р. Х. Мак-Фи, Дж. Н. Пласс, Р. Г. Грубе, Р. Дж. Ричардс ; перевод с англ. : под ред. Н. В. Васильченко. – Москва : Советское радио, 1965. – 642 с.

2.5 *Kendall J. M., Sr.* Two blackbody radiometers of high accuracy / J. M. Kendall, Sr., C. M. Berdahl // Appl. Optics. – 1970. – Vol. 9. – P. 1082-1091 – ISSN 1559-128X.

2.6 *Федоров В. Г.* Теплотрия в пищевой промышленности / В. Г. Федоров. – М. : Пищевая промышленность, 1974. – 176 с.

2.7 *Сажина С. А.* Теплотрические приборы для измерения лучистой энергии : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.04/ Светлана Алексеевна Сажина. – Киев, 1978. – 177 с.

2.8 *Геращенко О. А.* Теплотрические приборы для измерения лучистой энергии в вакууме / О. А. Геращенко, С. А. Сажина // Космические исследования на Украине. – 1979. – № 12. – С. 76-80.

2.9 *Криксунов Л. З.* Справочник по основам инфракрасной техники / Л. З. Криксунов, В. А. Волков, В. К. Вялов [и др.] – Киев : Техника, 1980. – 232 с.

2.10 *Сажина С. А.* Современное состояние теплотрии лучистых потоков / С. А. Сажина // Современные экспериментальные методы исследования процессов теплообмена и массообмена : материалы международной школы-семинара, 1981 г., г. Минск. – Минск, 1981. – Часть 1. – С. 22-34.

2.11 *Волков В. А.* Справочник по приемникам оптического излучения / В. А. Волков, В. К. Вялов, Л. Г. Гассанов [и др.] ; под ред. Л. З. Криксунова, Л. С. Кременчугского. – Киев : Техника, 1985. – 216 с.

2.12 *Пилипко А. Н.* Теплометрические средства диагностики процесса горения и управления энергетическими котлами : дис ... канд. техн. наук : 05.11.04 / Александр Николаевич Пилипко. – Киев : ИГТФ АН УССР, 1988. – 247 с.

2.13 *Журавель А. М.* Использование радиационной теплометрии для контроля теплоточного пространства в газомазутных котлоагрегатах / А. М. Журавель, А. Н. Пилипко, С. А. Сажина, А. В. Остапенко // Надежность котельных поверхностей нагрева и актуальные вопросы теплообмена и гидродинамики. – Л. : Ротапринт НПИ ЦКТИ, 1984. – С. 280-282.

2.14 *Larason T. C.* NIST Measurement Services : Spectroradiometric Detector Measurements : Part I Ultraviolet Detectors. Part II Visible and Near-Infrared Detectors / T. C. Larason, S. S. Bruce, A. C. Parr. – NIST Special Publication 250-41. – 1998.

2.15 *Драганов Б. Х.* Теплометрия в сельском хозяйстве / Б. Х. Драганов, С. А. Сажина, Ю. М. Сергиенко, В. Г. Федоров // Киев: УСХА, 1993. – 280 с. – ISBN 5-7987-0144-1.

2.16 *Геращенко О. А.* Методика конструирования оптимальных преобразователей теплового потока / О. А. Геращенко, Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша // Проблемы энергосбережения : Респ. межвед. сб. науч. тр. – К. : Наук. думка, 1990. – Вып. 3. – С. 36-42. – ISSN 0236-4077.

2.17 *Лыков А. В.* Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 599 с.

2.18 *Gardon R.* An Instrument for the Direct Measurement of Intense Thermal Radiation / Robert Gardon // Review of Scientific Instruments, 1953. – Vol. 24. – Issue 5.

2.19 *Зинченко Н. И.* Определение коэффициента поглощения конусных ячеек калориметров / Н. И. Зинченко, А. А. Либерман // Измерительная техника, 1981, № 8. – С. 37-38.

2.20 *Пикашов В. С.* Узкоугольный радиометр-зонд полного излучения / В. С. Пикашов // Теплофизика высоких температур. – № 2. – М.: Российская академия наук, 1969.

2.21 *Блох А. Г.* Тепловое излучение в котельных установках / А. Г. Блох. – Л.: Энергия, 1967. – 326 с.

2.22 ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения : ГОСТ 12.1.044-89 (ISO 4589-84). – (Межгосударственный стандарт).

2.23 Матеріали будівельні. Методи випробувань на горючість : ДСТУ Б В.2.7-19-95 (ГОСТ 30244-94). – [Введ. в дію 01.09.1996]. – К.: Держкоммістобудування України, 1998. – 30 с. – (Міждержавний стандарт).

2.24 Материалы полимерные. Метод определения дымообразования : ГОСТ 24632-81. – [Введен 01.01.82]. – М.: Госком СССР по стандартам, 1981. – 6 с.

2.25 Будівельні матеріали. Метод випробування на розповсюдження полум'я : ДСТУ Б В.2.7-70-98 (ГОСТ 30444-97). – [Введ. в дію 01.10.1998]. – К.: Держкоммістобудування України, 1998. – 10 с. – (Міждержавний стандарт).

2.26 *Декуша Л. В.* Средства теплотриии на базе термоэлектрических преобразователей теплового потока : дис ... докт. техн. наук : 05.11.04 / Декуша Леонид Васильевич. – Львов, 2016. – 495 с.

2.27 *Декуша Л. В.* Полостной приемник теплового излучения / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Л. И. Воробьев // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2002. – Т. 24, № 4 – С. 89-92. – ISSN 0204-3602.

2.28 *Русин С. П.* Тепловое излучение полостей / С. П. Русин, В. Э. Пелецкий. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 152 с.

2.29 *Хадсон Р.* Инфракрасные системы / Р. Хадсон. ; пер. с англ. ; под ред. Н. В. Васильченко. – М. : Мир, 1972. – 534 с.

2.30 *Орлов В. А.* Метрологическая аттестация теплотеметрических приемников излучения / В. А. Орлов, Н. И. Профатилова, С. А. Сажина [и др.] // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 1980. – Т. 2, № 1. – С. 94–97. – ISSN 0204-3602.

2.31 *Грищенко Т. Г.* Полостные приемники теплового излучения / Т. Г. Грищенко, Л. И. Воробьев, Л. В. Декуша [и др.] // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія 2006) : матеріали V Міжн. наук.-техн. конф. – Харків, 2006. – Т. 1. – С. 38-40.

2.32 *Трикоз П.* Приемники теплового излучения для обеспечения стандартов ГОСТ 24632-81, ГОСТ 12.1.044-89, ДСТУ Б В.2.7.-70-98 (ГОСТ 30444-97) в Украине / П. Трикоз, Л. Декуша, Л. Воробьев [и др.] // Вимірювальна техніка та метрологія. – Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2008. – Вип. 68. – С. 133-137. – ISSN 0368-6418.

2.33 Будівельна кліматологія: ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. – [Чинний від 2011-11-01]. / Мінрегіонбуд України. – К. : Укрархбудінформ, 2011. – 123 с. – (Національний стандарт України).

2.34 Отопление, вентиляция и кондиционирование : СНиП 2.04.05-91\*У. – Издание неофициальное. – Киев : КиевЗНИИЭП, 1996 – с. 89.

2.35 *Кондратьев К. Я.* Актинометрия : учебное пособие для вузов / К. Я. Кондратьев. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1965. – 693 с.

2.36 Kipp & Zonen Product Catalogue [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.kippzonen.com/DownloadCategory/52/Product-Catalogue> . – Title from the screen.

2.37 *Декуша Л. В.* Комплекс приборов для определения коэффициента затенения светопрозрачных конструкций / Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, В. И. Шаповалов, А. В. Гайдучек // Світотехніка та електроенергетика : Міжн. наук.-техн. журнал. – Харків, 2009. – № 3 (19). – С. 30-33

2.38 *Басок Б. І.* Прилад для вимірювання інсоляції будівель та споруд / Б. І. Басок, Л. В. Декуша, С. М. Гончарук, Н. О. Чорна // Будівельні конструкції : міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – Вип. 77. – Київ : вид-во ООО «Тофі Кіме», 2013. – С. 55-59. – ISSN 978-966-97183-8-9.

2.39 *Басок Б. І.* Прилад для дослідження надходження сонячної енергії на похилий геліоколектор / Б. І. Басок, Л. Й. Воробйов, С. М. Гончарук [та ін.] // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2013. – Т. 35, № 5. – С. 78-87. – ISSN 0204-3602.

2.40 Будівельні матеріали. Методи випробування скла в будівництві. Визначення світлопропускання, прямого сонячного пропускання, загального пропускання сонячної енергії, ультрафіолетового пропускання та відповідні параметри

скління (ISO 9050:2003, IDT) : ДСТУ Б ISO 9050:2010. – [На заміну ДСТУ Б В.2.7-13-95 ; Чинний від 2011-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2012. – 39 с. – (Національний згармонізований з ISO Стандарт України).

2.41 *Hakansson H.* A new Solar simulation facility for calorimetric measurements on windows and shading devices / H. Hakansson, B. Fredlund // The 5-th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Aug. 1999, Goteborg, Sweden.

2.42 *Inoue T.* Simplified on-site method for evaluating solar shading performance of advanced windows / T. Inoue, M. Momota // The 23-th Conference on Passive and Low Energy Architecture, 6-8 Sept. 2006, Geneva, Switzerland.

2.43 *Бурова З. А.* Методика измерения коэффициента поглощения солнечного излучения тонких покрытий / З. А. Бурова, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев // Мир науки и инноваций. – 2015. – Том 3, Выпуск № 2 (2). – С. 85-88. – ISSN 2410-6615 (Online) / ISSN 2410-6941 (Print).

2.44 *Мазуренко А. Г.* Исследование теплофизических свойств тонких энергоэффективных покрытий теплометрическими методами / А. Г. Мазуренко, З. А. Бурова, Л. И. Воробьев, Л. В. Декуша // Наукові праці НУХТ. – К., 2014. – Т. 20, № 4. – С. 174-185.

2.45 *Ковтун С. И.* Аппаратурное обеспечение поверочной схемы для теплоточных измерений / С. И. Ковтун, Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев // Вимірювальна техніка та метрологія. Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка». – 2008. – Вип. 68. – С. 126-133. – ISSN 0368-6418.

2.46 Энергія сонячна. Калібрування піранометра із застосуванням піргеліометра : ДСТУ ISO 9846:2006 (ISO

9846:1993, IDT) [Введ. в дію 01.01.2008]. – Вид. офіц. – К. : Держспоживстандарт України, 2009 – 23 с. – (Національний згармонізований з ISO Стандарт України).

2.47 *Грищенко Т. Г.* Комплекс аппаратуры для измерения и регистрации тепловых параметров пламени [Текст] / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев [и др.] // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2002. – Т. 24, № 1. – С. 113-117. – ISSN 0204-3602.

2.48 *Грищенко Т. Г.* Термоэлектрический преобразователь теплового потока для измерения тепловых потоков высокой интенсивности [Текст] / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, Н. А. Ласточкин // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2002. – Том 24, № 1. – С. 117-122. – ISSN 0204-3602.

2.49 *Грищенко Т.* Преобразователи теплового потока с тепловыми шунтами и температуровыравнивающими покрытиями / Т. Грищенко, Л. Декуша, Е. Шмаров, Л. Воробьев // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2013. – Т. 35, № 3. – С. 94-102. – ISSN 0204-3602.

### **ГЛАВА 3 ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА, ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ И ПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕПЛОТЫ**

#### **3.1 Состояние контроля теплоэффективности различных объектов**

Современная цивилизация не может отказаться от выработки и потребления энергии для своего существования, поэтому нет альтернативы ее рациональному использованию, основанному на экономии энергоресурсов и внедрении энергоэффективных технологий. Так на производство одной тонны условного топлива требуется в 3 – 4 раза больше инвестиций, чем на его сбережение.

В Украине на отопление расходуется более 40% всех топливно-энергетических ресурсов, причем значительная доля теплотребления приходится на жилищно-коммунальный сектор и превышает соответствующие показатели европейских стран более, чем в два раза. Повышение энергоэффективности топливно-энергетического комплекса страны является одной из основных актуальных задач структурного преобразования жилищно-коммунального хозяйства и общественного производства как за счет введения новых мощностей, так и за счет внедрения энерго- и ресурсосберегающих мероприятий.

В условиях роста стоимости топливно-энергетических ресурсов реконструкция и модернизация устаревшего оборудования теплоэнергетических объектов и доведение их показателей до современного уровня является альтернативой увеличению импорта энергоресурсов и единственно возможным способом снижения технологического влияния на окружающую среду, что особенно актуально для Украины.

В развитых странах на производство 1 Гкал теплоты расходуют 145 – 155 кг условного топлива (у. т.), а в Украине – 175 – 190 кг у. т. Разность порядка 25% является потенциалом энергосбережения в системах коммунальной и промышленной энергетики. Только в коммунальной собственности находится более 6,7 тысяч котельных, общее техническое состояние оборудования которых является критичным. Из установленных котлов более 20% эксплуатируются уже более 30 лет, а 30% – устаревшее с малоэффективным КПД (82%).

В настоящее время одним из путей решения задач энергосбережения, например, в энергетической, жилищно-коммунальной и строительной областях, является улучшение теплозащитных свойств ОК зданий и сооружений различного назначения, главным образом, путем внедрения новых строительных и теплоизоляционных материалов и изделий, удовлетворяющих повышенным нормативным требованиям к их тепловому сопротивлению [3.1], соблюдение которых позволяет минимизировать допустимый уровень неизбежных тепловых потерь. Эти требования должны выполняться как при строительстве новых и термомодернизации поставленных на ремонт или восстановление зданий (сооружений), находящихся в эксплуатации с 50-х – 80-х годов XX ст., но и учитываться при проектировании новых объектов.

Внедрение мероприятий, направленных на экономное расходование энергетических и других ресурсов, а также своевременное обнаружение мест утечки теплоты, оперативный контроль ТФХ материалов, используемых при ремонтно-восстановительных работах, и определение их фактических значений, регламентированных в соответствующих нормативных документах или рекламированных производителем, невозможно без массового применения СИТ для учета и контроля потребления не только воды, газа, электроэнергии, но и теплоты [1.8 – 1.12, 3.2, 3.3], основанных на измерении плотности теплового потока и (или) температуры.

Наиболее распространенными в Украине являются объекты малой энергетики, которые, несмотря на свое название, используют почти 60% топлива, расходуемого всем энергетическим комплексом Украины. Это – районные котельные, заводские теплоэлектростанции, промышленные печи, бытовые энергоустановки, предназначенные для обслуживания как коттеджей, так и многочисленных сооружений и строений.

Длительная эксплуатация котлоагрегатов, трубопроводов и запорной аппаратуры приводят к существенным повреждениям их теплоизоляции, что сопровождается увеличением теплотерь. Например, теплотери от внешнего охлаждения котла составляют от 0,1 до 5 % теплового баланса и практически не контролируются, на трубопроводах теплосетей потери колеблются от 5 до 25 %, а в магистралях с малым диаметром трубопровода могут достигать 30 %.

Диагностика реального теплового состояния ОК котлов, котельного оборудования, трубопроводов, зданий (сооружений) и определение ресурса их дальнейшей эксплуатации невозможны без наличия информации об уровне значений поверхностных температуры и теплового потока от объекта в ОС, а также о ТФХ используемых материалов.

Следует отметить, что на цели теплоснабжения расходуется примерно третья часть всех потребляемых в стране ресурсов, в которых существенную долю занимают высококачественные виды топлива – природный газ и нефтепродукты, представляющие большую ценность для других отраслей народного хозяйства. В связи с этим вопросы контроля за осуществлением теплоснабжения и состоянием его топливной базы имеют исключительную актуальность.

Среди мероприятий, направленных на решение этих задач, существенное место занимает оптимизация элементов производственного цикла теплоснабжения, начиная с обеспечения качества топлива и процесса его сжигания и заканчивая контролем теплотерь в зданиях (сооружениях) различного назначения. Для обеспечения минимальных потерь теплоты

на всех этапах от производства теплоты на теплогенерирующем оборудовании и передачи ее по теплопроводам до потребления на различных объектах, которым для их функционирования необходима энергия, требуется надежная, метрологически аттестованная контрольно-измерительная аппаратура нового поколения.

При внедрении мероприятий по энергоэффективности и ресурсосбережению в разных областях народного хозяйства возникают задачи, решение которых сопряжено с разработкой новых СИТ и соответствующих методик измерений. Накопленный в ИТТФ опыт создания первичных измерительных преобразователей теплового потока (ППП) и температуры (ПТ) и теплометрических приборов на их основе для прямых измерений поверхностной плотности теплового потока, температуры, тепловых эффектов, ТФХ материалов и параметров тепловых процессов [1\* – 5\*, 1.3, 1.7, 2.7, 2.10, 2.12, 2.15, 3.2, 3.3] позволяет успешно преодолеть многочисленные проблемы, возникающие на современном этапе в строительной отрасли и коммунальной энергетике.

Созданные в ИТТФ теплометрические СИТ, исходя из цели применения, можно классифицировать на группы, предназначенные для контроля теплоэффективности при производстве теплоты (см. §3.2), ее транспортировании (см. §3.3) и потреблении (см. §3.4).

### **3.2 Приборы для контроля эффективности производства теплоты**

При реализации энергосберегающих технологий для увеличения эффективности работы теплогенерирующих предприятий за счет оптимизации процесса сжигания топлива и контроля его качества применяются разрабатываемые и изготовленные в ИТТФ теплометрические приборы, представленные на рисунке 3.1

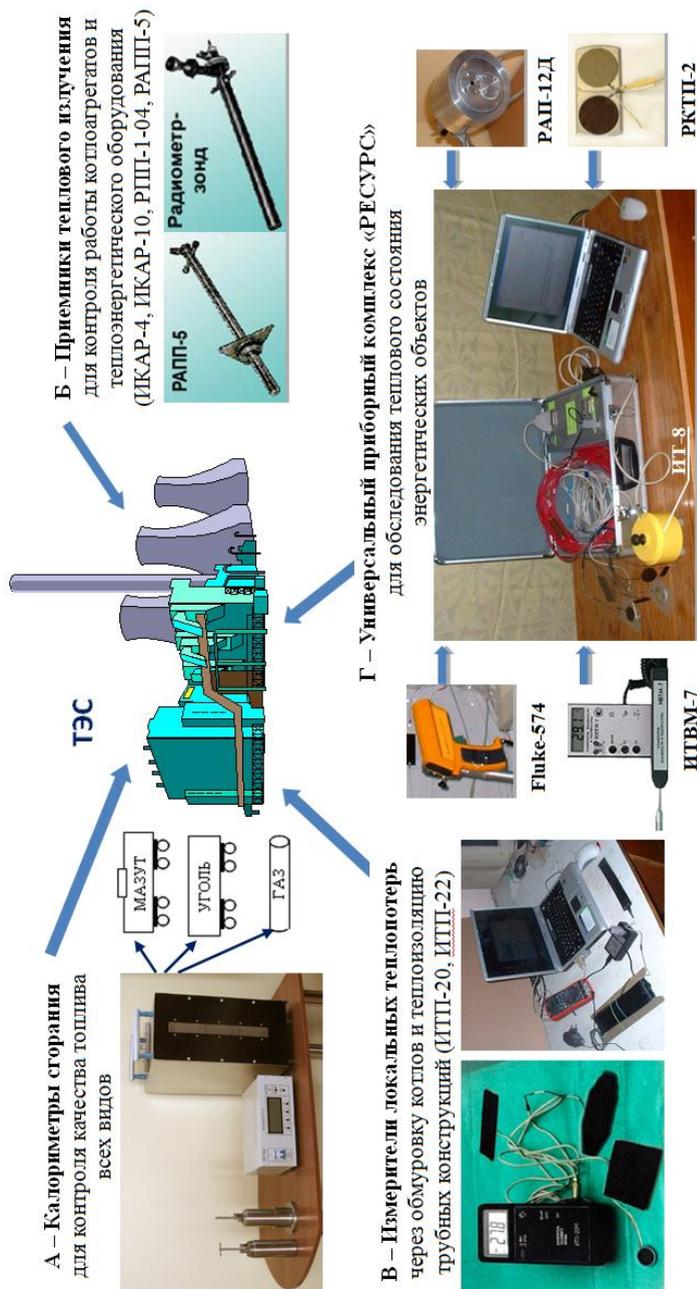


Рис. 3.1. Теплометрические средства контроля эффективности теплогенерирующих предприятий

**А – Калориметры сгорания модели КТС** (см. рис. 3.1, поз. А), предназначенные для измерения теплотворной способности различных видов органического топлива, добываемого в Украине и поступающего по импорту, а также образцов биотоплива, получили в последнее время достаточно широкое применение. Создано последовательно четыре модели калориметра, которые после государственной метрологической аттестации были переданы в эксплуатацию на теплогенерирующие предприятия Украины и способствуют экономии топлива за счет своевременного контроля его качества. Существенный вклад в создание и внедрение калориметров КТС в народном хозяйстве Украины внесен Л.И. Воробьевым [3.4]. Подробнее этот прибор представлен далее (см. том 2 главу 7, §7.4).

**Б – Приемники теплового излучения** (см. рис.3.1, поз. Б) не менее актуальны в связи с проблемами обеспечения необходимого уровня надежности и эффективности работы теплоэнергетического оборудования. Эти СИТ, главным образом ПТИ, предназначены для измерения плотности локального и интегрального теплового потока при контроле процессов в камерах сгорания газотурбинных установок, на солнечных энергетических станциях, в оптических печах и лазерной технике; в напряженных зонах и топке энергетических парогенераторов и котлоагрегатов, а также для определения радиационных теплопотерь и контроля тепловых и температурных режимов при выплавке тугоплавких металлов в вакуумных печах [2.7, 2.12, 3.2, 3.3].

ПТИ оказались весьма полезными для контроля радиационных экранных поверхностей нагрева в топочном пространстве котлоагрегатов. Среди многих причин разрушения экранных труб является их перегрев при облучении, что приводит к существенному снижению ресурса работы поверхностей нагрева.

При экспериментальных исследованиях установлено, что низкая надежность этих поверхностей обусловлена совокупным влиянием длительности перегрева металла, пароводяной коррозии и коррозии со стороны топочных газов, а также процессами термической усталости. Как показано в диссертации А.Н. Пилипко [2.12], причиной перегрева труб являются внутренние железистоокисные отложения, интенсивность роста которых пропорциональна плотности полученного теплового потока. Образования таких отложений приводят не только к росту средних значений температуры металла, но и к резкой дестабилизации температурного режима труб, что вызывает термоусталостные повреждения экранов. Кроме того, внутренние отложения увеличивают гидравлическое сопротивление и тем самым снижают эффективность работы поверхностей нагрева.

Практически одним из основных способов повышения надежности топочных экранов считается ограничение максимальных тепловых нагрузок и непрерывный контроль их распределения по экранам, что обеспечивается только при постоянном измерении локальной плотности потока теплового излучения в наиболее теплонапряженных участках радиационных поверхностей нагрева. Кроме того, для обеспечения нормальных температурных и гидравлических условий в топочном пространстве без прогрессирующих загрязнений экранов сжигание топлива надо осуществлять при оптимальном положении факела в топочной камере.

Наиболее реальный путь решения задачи по стабилизации тепловыделения в топке состоит в использовании в системах автоматического регулирования измерительной информации о плотности потока теплового излучения. Высокая динамичность процессов, протекающих в топочных камерах теплоагрегатов, выдвигает повышенные требования к оперативности этой информации и к инерционности задействованных СИТ. Необходимость непрерывного контроля потока по топочным экранам и использование измерительной информа-

ции в системах регулирования котлов в свою очередь требуют обеспечения длительной безотказной работы СИТ.

Для теплотрического контроля тепловой радиации в топочном пространстве и по экранам в ИТТФ разработана гамма радиометров (см. главу 2, [4\*, 2.12]). При их разработке основное внимание уделено ПТИ для котлоагрегатов с уравновешенной тягой, поскольку их больше всего среди эксплуатируемых в Украине котлов. Например, ПТИ РАПП-3 применяют для измерения плотности потока теплового излучения в стационарных и переходных режимах работы котлов, а также для регистрации низкочастотных колебаний интенсивного излучения в условиях пылеугольных топок.

Приемная поверхность прибора РАПП-3 сформована в виде полостной модели абсолютно черного тела (далее – АЧТ). При этом поглощательная способность приемника близка единице, что достигается при малых углах при вершине конуса ( $10^\circ$ ) и больших – между осью и образующей усеченного конуса ( $40^\circ$ ).

В эксплуатационных условиях топочных камер котлоагрегатов с уравновешенной тягой корпус ПТИ из-за прямого облучения может нагреваться, что не может не сказываться на его метрологических характеристиках. В связи с этим корпус прибора обеспечен системой охлаждения с двумя независимыми хладагентами (вода и воздух), что существенно повысило его надежность (см. рис 2.16, 2.17). Другая модель радиометра – РАПП-5 (см. рис. 2.18) эксплуатируется в топках газомазутных котлоагрегатов с уравновешенной тягой. Их применяют в качестве как стационарно устанавливаемых в топочной камере, так и переносных зондов для контроля плотности радиационного потока в топочных камерах практически всех существующих типов котлоагрегатов. Метрологическая аттестация приборов подтвердила линейность их функции преобразования, несущественность дополнительных погрешностей, малую селективность и высокое значение поглощательной способности приемной полости.

Непрерывный контроль теплового потока позволяет организовать текущее корректирование режимных факторов, к которым относятся: общий расход воздуха, распределение расхода топлива и воздуха по горелкам, соотношение первичного и вторичного воздуха, угла поворота горелок и др. Точность оценок максимального уровня плотности теплового потока и его распределения по топочным экранам, то есть результативность корректировки режимных параметров, зависит от количества ПТИ и зон их размещения по топочным экранам. При этом обязательным условием является размещение ПТИ над каждой горелкой и на свободных от горелочных устройств экранах в зонах максимального облучения.

Для современных котлов необходимое количество точек контроля может быть несколько десятков. Это создает значительные трудности оператору в осуществлении контроля процесса горения в топках котельного агрегата. С целью представления оператору всей информации в сжатом виде с сохранением ее полноты разработан способ контроля процесса горения в топках котлов с привлечением компьютерной обработки [2.12]. Реализация этого способа требует размещения ПТИ в одном или нескольких поперечных сечениях топки и синтеза системы, структурная схема которой приведена на рисунке 3.2.



Рис. 3.2. Система контроля процесса горения в топке котлоагрегата

Отметим, что радиометры РАПП-5 предназначены для измерения плотности интегрального теплового потока в диапазоне  $50 - 800 \text{ кВт/м}^2$  вместе с системами автоматизиро-

ванного управления тепловым режимом. Радиометр-зонд (см. рис. 2.18) предназначен для контроля расхода энергии и режимных параметров в нормальных условиях и в вакууме в диапазоне  $0,1 - 2 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>, в частности, при выплавке тугоплавких металлов в вакуумных печах. ПТИ явились первичным звеном в системах автоматического управления процессами теплообмена в промышленных технологических установках. Оперативный сбор измерительной информации, ее обработка и своевременное предоставление оператору позволяют оценивать реальную ситуацию в топке котла и осуществлять корректное вмешательство в процесс управления котлоагрегатом [5\*, 2.12].

**В – Измерители локальных теплопотерь ИТП** (см. рис. 3.1, поз. В и главу 1, §1.1) через обмуровку котлов и теплоизоляцию трубных конструкций предназначены для контроля качества теплозащиты котельного оборудования. Путем исследования теплообмена высокотемпературных поверхностей котла и соответствующих трубных коммуникаций с помощью приборов ИТП-20 и ИТП-22 (см. главу 1; приложение А; [4\*, 5\*, 3.3]) получают данные о локальных тепловых потерях через эти конструкции. Это позволяет оценивать качество их теплоизоляции и, в отдельных случаях, предотвращать аварийные ситуации, например, из-за прогара обмуровки котельного агрегата.

Прибор ИТП-20 выполнен одноканальным и двухпредельным (5 и 15 кВт/м<sup>2</sup>), оснащен термостойким ПТП (300°С) и устройством преобразования и измерения сигнала ПТП. При этом предусмотрено значительное подавление флуктуаций из-за конвективного теплообмена с ОС при измерении на поверхностях, температура которых может быть до 300 °С.

Прибор ИТП-22 выполнен многоканальным для возможности измерения теплового потока на участках поверхностей ОК, имеющих неодинаковое тепловое сопротивление. Для этого его укомплектовывают от трех до пяти ПТП не-

одинаковой чувствительности, позволяющей проводить измерения в трех поддиапазонах: от 2 до 20, от 20 до 200 и от 200 до 2000 Вт/м<sup>2</sup> на поверхностях с температурой от 10 до 150 °С соответственно.

При обследовании объектов, которые имеют большие теплоотдающие поверхности и неоднородные теплоточные поля и требуют выполнения длительных синхронных измерений плотности теплового потока и температуры одновременно во многих точках поверхности объекта, с применением приборов ИТП путем только контактных измерений становится нецелесообразным. Это обусловлено рядом характерных факторов, присущих крупногабаритным энергетическим объектам, таких как нестабильные режимы работы, зависящие от нагрузки, изменяющейся не только на протяжении сезона, но и в течение суток; необходимость проведения длительных синхронных измерений плотности теплового потока и температуры одновременно во многих точках поверхности объекта, а также трудности реализации контактных измерений из-за удаленности мест размещения ПТП и ПТ на высоко расположенных поверхностях объекта и сопутствующая большая трата времени.

Повысить продуктивность труда и сократить время обследования объекта позволяет бесконтактный метод измерения температуры поверхности и потока теплового излучения [3.5]. Для обследования таких объектов требуется большое количество первичных преобразователей (ПТП, ПТ) и многоканальная измерительная система с возможностью присоединения к ней преобразователей других физических величин, а также применение компьютерной техники. Компьютеризированная измерительная система дает возможность автоматизировать измерения, сохранять и накапливать информацию для последующей ее обработки, предусмотреть возможность контроля ТФХ задействованных в объекте материалов, а также установить соответствие их реальных значений регламентированным или рекламированным.

**Г – Универсальный измерительный комплекс «Ресурс»** (см. рис. 3.1, поз. Г; [3.6, 3.7]) предназначен для одновременного измерения нескольких ТФХ и параметров в натуральных условиях. Основными элементами универсального комплекса «Ресурс», предназначенного для обследования, главным образом, объектов энергетики, включая коммунальную, являются измерительный блок, размещенный в переносном кейсе, партия различных типов ПТП и ПТ и зондовый переносной прибор ИТ-8 (см. главу 5, §5.4) для измерения коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов, переносной ПК (ноутбук) с необходимым программным обеспечением (далее – ПО) и соединительные кабели.

Измерительный блок позволяет в произвольной последовательности измерять напряжение на всех каналах. Он построен на основе модулей серии I-7000, которые предназначены для создания промышленных измерительных сетей. Базовыми элементами являются модули восьмиканальных 16-разрядных аналогово-цифровых преобразователей (далее – АЦП) типа I-7018 для измерения малых (термопарных) сигналов, которые объединены между собой шиной интерфейса RS-485, а для связи с компьютерным последовательным интерфейсом RS-232 служит модуль преобразователя интерфейсов типа T-7520. Для каждого из модулей типа I-7018 программно из ПК может быть задан свой диапазон измерения:  $\pm 15$ ;  $\pm 50$  или  $\pm 150$  мВ, что дает возможность последовательно измерять сигналы различных рабочих преобразователей с необходимой разрешающей способностью.

Электропитание модулей осуществляется от блока питания типа KB 4524, преобразующего сетевое напряжение (220 В, 50 Гц) в постоянное напряжение 24 В при токовой нагрузке 1,5 А. Измерительный блок выполнен в металлическом прямоугольном кожухе, на котором размещены разъемы для подключения первичных преобразователей.

Для измерения температуры поверхности ОК и пограничного слоя воздуха в состав комплекса «Ресурс» включают

термоэлектрические ПТ (термопары) [1.5] или термометры сопротивления [1.6], а для измерения плотности теплового потока стандартные термоэлектрические ПТП вида вспомогательной стенки [1.4]. ПТП выполнены с вмонтированной ТХА с учетом рекомендаций относительно выбора параметров ПТП, исходя из условий на предполагаемом объекте контроля [1.7, 2.16]. ПТП могут быть изготовлены в виде прямоугольной пластинки, жесткой и гибкой, либо в виде диска, поверхность которого имеет низкую или высокую степень черноты.

Комплекс укомплектован термопарами, предназначенными для измерения температуры поверхности объекта и воздуха, а также для размещения в гильзах трубопроводов для измерения температуры теплоносителя при определении теплотерь в теплосетях.

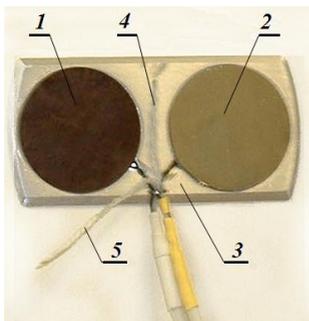
Для измерения нестационарного теплового потока, который характерен для современного энергетического оборудования, комплекс оснащают малоинерционными ПТП<sub>КБ</sub> (см. главу 5 книги 1 [2\*]) и ленточными термопарами с постоянной времени на уровне 0,3 с.

Для термостатирования опорных спаев термопар применяют термостат с транзисторным измерителем температуры, который выведен от одного из группы модулей I-7018 измерительного блока, в состав которого и входит термостат.

Модули I-7018, на основе которых построен измерительный блок комплекса «Ресурс», позволяют производить опрос восьми каналов за 0,1 с. Такое быстроедействие достаточно для сравнительно небольшой измерительной системы на 8-16 каналов. При необходимости построения системы на большее количество каналов для вторичной аппаратуры используется другая элементная база. Например, модуль E14-140 может производить измерения по 16 или 32 дифференциальным каналам с «общей землей» при разрядности 14 битов, частоте дискретизации в одноканальном режиме 100 кГц и многоканальном – 20 кГц.

ПО комплекса «Ресурс» позволяет создавать для каждого обследуемого объекта индивидуальные конфигурационные файлы, в которых указаны последовательность опроса каналов, промежутки времени между опросами, скорость обмена и номер порта ПК.

Для проведения полного теплотехнического обследования комплекс «Ресурс» дополнительно оснащают автономными приборами: стандартным измерителем относительной влажности и температуры воздуха в помещении модели ИВТМ-7, пирометром Fluke-574 для бесконтактного измерения температуры удаленных поверхностей, абсолютным дифференциальным приемником теплового излучения РАП-12Д (см. главу 2, §2.1.4 и [2.27, 2.31]) и устройством РКТП для определения эффективного коэффициента теплообмена и составляющих теплового потока (радиационной и кондуктивной) при сложном теплообмене между объектом и ОС, разработанные в ИТТФ). Вариант исполнения устройства РКТП приведены на рисунках 1.11, 3.1 (поз. Г) и 3.3.



- 1 – ПТП с «черной» тепло-воспринимающей поверхностью;
- 2 – ПТП с «белой» тепло-воспринимающей поверхностью;
- 3 – температуровыравнивающая подложка;
- 4 – термометр для измерения температуры подложки;
- 5 – термометр для измерения температуры воздуха

Рис. 3.3. Устройство РКТП-2 для определения эффективного коэффициента теплообмена и составляющих теплового потока

Теплометрический блок устройства РКТП-2 (рис. 3.3) представляет собой неразъемную плоскую конструкцию с габаритами 45×100×4 мм, которая имеет два ПТП 1 и 2 одинакового размера  $\varnothing 40 \times 2$  мм на общей металлической подложке 3, где вмонтирован электронагреватель. Он обеспечи-

вает изотермические условия для поверхностей ПТП, контактирующих с подложкой. Другие плоские поверхности (теплопринимающие) обоих ПТП покрыты пластинками, имеющими неодинаковые (контрастные) степени черноты.

Диапазоны значений степени черноты (интегрального полусферического коэффициента излучения) этих поверхностей составляют от 0,80 до 0,90 для «черного» ПТП и от 0,02 до 0,25 для «белого» ПТП. Устройство также комплектуется термопарами для измерения температуры подложки и воздуха.

Плотность результирующего суммарного теплового потока  $q_{\Sigma}$ , прошедшего через теплопринимающую поверхность каждого ПТП ( $i = 1$  – черный ПТП,  $i = 2$  – белый ПТП), рассчитывают по формуле (1.1) (см.§1.2), то есть  $q_{\Sigma_i} = q_{\alpha_i} + q_{\varepsilon_i}$ , а его конвективную  $q_{\alpha}$  и радиационную  $q_{\varepsilon}$  составляющие определяют по формулам (1.2) и (1.4). При этом их значения вычисляют по результатам измерения сигналов  $i$ -ых ПТП по формуле (1.14).

Уравнение теплового баланса с учетом того, что  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ , для каждого ПТП имеет вид:

$$q_{\Sigma_i} = \alpha \cdot (T_{ПОВ_i} - T_{ОС}) + (a_i \cdot q_{ПАД} - \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot T_{ПОВ_i}^4), \quad (3.1)$$

Из решения системы двух уравнений (3.1) при  $i = 1$  и  $2$  получены формулы для расчета плотности конвективной составляющей и потока падающего теплового излучения:

$$q_{\alpha_1} = \frac{\frac{q_{\Sigma_1} - q_{\Sigma_2}}{a_1 - a_2} + \left( \frac{\varepsilon_1 \cdot T_{ПОВ_1}^4}{a_1} - \frac{\varepsilon_2 \cdot T_{ПОВ_2}^4}{a_2} \right)}{\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2} \cdot \left( 1 - \frac{T_{ПОВ_1} - T_{ПОВ_2}}{T_{ПОВ_1} - T_{ОС}} \right)}, \quad (3.2)$$

$$q_{ПАД} = \frac{1}{a_1 - a_2} \cdot \left( q_{\Sigma_1} - q_{\Sigma_2} - q_{\alpha_1} \cdot \frac{T_{ПОВ_1} - T_{ПОВ_2}}{T_{ПОВ_1} - T_{ОС}} \right) + \sigma \cdot (\varepsilon_1 \cdot T_{ПОВ_1}^4 - \varepsilon_2 \cdot T_{ПОВ_2}^4) \quad (3.3)$$

Исходя из формулы (3.3), плотность радиационной составляющей сложного теплового потока равна:

$$q_{\varepsilon_i} = a_i \cdot q_{\text{Пад}} - \sigma \cdot \varepsilon_i \cdot T_{\text{ПОВ}_i}^4, \quad i = 1; 2 \quad (3.4)$$

где значения температуры поверхностей вычислены по формуле:

$$T_{\text{ПОВ}_i} = T_3 + R_i \cdot K_i \cdot E_i, \quad (3.5)$$

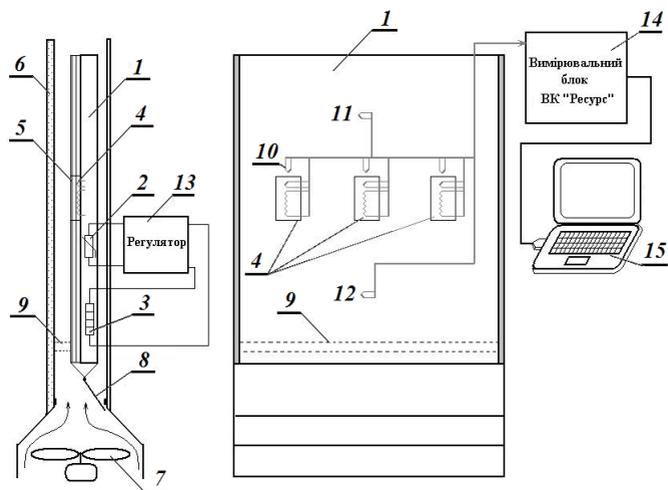
где  $T_3$  – температура, измеренная термопарой, вмонтированной по центру термовыравнивающей пластины (подложки 3);

$R_i$  – тепловое сопротивление  $i$ -ого ПТП.

Устройства типа РКТП позволяют определять составляющие сложного теплового потока в диапазоне значений его плотности от 100 до 2000 Вт/м<sup>2</sup> при температуре от 300 до 450 К с пределами допускаемой относительной погрешности  $\pm 5\%$ .

Для определения коэффициента теплопроводности ОК и ее отдельных элементов в условиях эксплуатации комплекс «Ресурс» оснащен переносным экспресс-измерителем теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов модели ИТ-8 (или ИТ-8М) (см. рис. 3.1, поз. Г). Подробно этот прибор описан в главе 5, §5.4.

Кроме указанных СИТ, в связи с возникшей необходимостью исследовать теплопроводность и поглотительную способность новых тонкослойных материалов, таких, как краски, лаки, мастики, покрытия из них и других материалов, стекол (с толщиной не более 2 мм), не имеющих достоверных данных о ТФХ и ТРХ, для которых некорректно применять стандартные методы измерения, в комплекс «Ресурс» вводят специальное измерительное устройство [3.8]. В нем создаются условия теплообмена, характерные для объектов, использующих указанные материалы. Его функционально-конструктивная схема показана на рисунке 3.4.



1 – плита из дюралюминия; 2 – термометр сопротивления; 3 – электронагреватель; 4 – ПТП; 5 – контролируемое покрытие; 6 – экран; 7 – вентилятор; 8 – заслонка; 9 – турбулизирующие решетки; 10, 11, 12 – ПТ; 13 – регулятор температуры; 14 – измерительный блок; 15 – ПК

Рис. 3.4. Структурная схема устройства для контроля теплозащитных свойств материалов малой толщины

Основой конструкции устройства является плита 1 из дюралюминия, в которую вмонтированы термометр сопротивления 2 и электронагреватель 3, которые совместно с регулятором 13 составляют систему регулирования температуры плиты 1. Во время эксперимента эта температура задается равной температуре объекта, для которого предназначено покрытие. На рабочей поверхности плиты установлены три ПТП 4. На поверхность одного из них наносится контролируемое покрытие 5, поверхность другого – оставляют свободным для контроля теплообмена на поверхности без покрытия, а на поверхность третьего наносят покрытие с известными свойствами для сравнения с исследуемым. Напротив поверхности плиты с ПТП установлен экран 6.

Для имитации различных условий теплообмена применяют экраны с разной поглотительной способностью от 0,1

(для фольги) до 0,9 (для оргстекла). При исследовании покрытий для защиты от внешнего теплового излучения (например, от солнца) в качестве экрана целесообразно использовать тонкую полиэтиленовую пленку с широким спектром пропускания.

Экран 6 и рабочая поверхность плиты 1 создают плоский канал, в котором продувается с помощью вентилятора 7 воздух для воспроизведения конвективного теплообмена. Заслонка 8 позволяет при необходимости направить часть воздушного потока на обратную сторону плиты для ее охлаждения. Решетки 9 служат для пространственного выравнивания коэффициента теплообмена в канале. Устройство оснащено также терморпарами 10, 11 и 12 для измерения температуры поверхности покрытия, плиты и воздуха вблизи плиты. Сигналы ПТП и ПТ поступают в измерительный блок 14 комплекса «Ресурс», откуда по последовательному интерфейсу передаются в ПК. Устройство позволяет сравнивать интегральные теплозащитные свойства разных тонких материалов и оценивать их тепловое сопротивление и поглощательную способность.

Это устройство было применено для исследования покрытий типа «мастик», которые фирмы-поставщики рекламируют как эффективные «теплоизоляционные» и «энергосберегающие». Такие покрытия предлагаются под различными фирменными и торговыми названиями: «Thermo-Shield», «Thermal Coat», «Delta-T», «Superthermo» и другие, однако, описания истории их создания очень похожи. Прототипы покрытий разработаны в NASA (США) для космических аппаратов. В качестве связующего использована акриловая смола, а наполнителя – полые керамические шарики (боросиликатные) с размерами в несколько десятков микрометров и меньше. Утверждается, что различные «энергосберегающие» краски отражают от 85 до 98 % инфракрасного теплового излучения. В некоторых рекламных проспектах указывают, что эффективный коэффициент теплопроводности не превышает

0,001 Вт/(м·К), а слой краски толщиной 2 мм по теплозащитным свойствам соответствует слою минеральной ваты толщиной 150 мм. Такие рекламируемые характеристики этих красок вызывают удивление и естественное недоверие.

Исследованиями на предложенном устройстве определены интегральные коэффициент поглощения и степень черноты покрытий при различных значениях температуры излучателя, а также при воздействии прямого солнечного излучения, то есть при различном спектральном распределении теплового излучения. Определен был также коэффициент теплопроводности слоя покрытия при значениях температуры близких комнатным. Установлено, что коэффициент поглощения красок для солнечного излучения весьма малый. Так для слоя краски «Superthermo» толщиной 2 мм коэффициент поглощения солнечного излучения составил 0,04 – 0,05. Однако, для температуры излучателя от комнатных значений до нескольких сотен градусов интегральный коэффициент излучения составил 0,8 – 0,9, то есть покрытие поглощает значительную часть длинноволнового инфракрасного спектра. Коэффициент теплопроводности исследованных красок и покрытий оказался в диапазоне значений от 0,05 до 0,13 Вт/(м·К), что соответствует теплопроводности обычных теплоизоляционных материалов и не противоречит расчетным данным для пористой акриловой краски. Полученные значения оказались на два порядка больше задекларированных в рекламе. Использование покрытий из этих красок в качестве изоляторов уже принесло немалые убытки ряду предприятий нашей страны, но их, к сожалению, продолжают распространять в Украине.

Таким образом, предложенные краски действительно могут защитить от теплового солнечного излучения, а также они эффективны для нанесения на оборудование, которое надо защитить от перегрева солнечным излучением: космические аппараты, газгольдеры, крыши домов в южных регионах и прочие. В этом смысле краски действительно являются

энергоэффективными, так как позволяют экономить энергию на охлаждение и кондиционирование. Однако, эти покрытия не способны заменить тепловую изоляцию тех объектов, где надо предотвратить теплопотери: теплотрассы, фасады домов, энергетическое и технологическое оборудование, температура поверхности которых достигает нескольких сотен градусов. В таких случаях необходимо использовать традиционные теплоизоляционные материалы, толщина которых рассчитывается по известным методикам и, как правило, значительно превышает толщину слоя краски.

Для применения приборного комплекса «Ресурс» была разработана методика измерения, описанная в [3.3], которая распространяется на обследование различных энергетических объектов: водогрейных и паровых котлов и дополнительного оборудования (теплообменники, деаэраторы, трубопроводы и прочее), которые эксплуатируют в помещениях с нормированной температурой воздуха. Экспериментальная проверка методики обследования с применением комплекса «Ресурс» выполнена на теплофикационном водогрейном газовом котле ТВГ-8, который относится к прямоточным секционными



Рис. 3.5. Распределение плотности теплового потока и температуры на боковых стенках водогрейного котла ТВГ-8

котлам с принудительной циркуляцией воды, с одинаковыми наружными поверхностями стен, за исключением верхней поверхности, которая имеет выступы из-за расположенных на ней труб верхних коллекторов. Распределение измеренных с помощью комплекса «Ресурс» значений плотности теплового потока (верхние цифры) и температуры в °С (нижние цифры) на поверхностях водогрейного котла ТВГ-8 представлено на рисунке 3.5.

Котел предварительно был выведен на 80% режим нагрузки, имел коэффициент полезного действия 92,4% и отработал в этом режиме 2 часа. В результате обследования были получены фактические значения плотности теплового потока через стенки котла и температуры поверхностей. Каждая стенка была разделена на двадцать участков одинаковой площади, на которых были выполнены измерения контактным способом. Такие измерения позволили рассчитать тепловые потери от внешнего охлаждения котла наиболее точно по сравнению с измерениями температуры поверхностей и окружающего его воздуха и использованием справочных данных о коэффициентах теплообмена [1.13].

Основным достоинством методик, реализующих контактный метод теплотехнического обследования, является возможность определения численных значений теплового сопротивления ОК. Однако, при использовании только контактных измерений трудно обнаруживать все возможные локальные дефекты в ОК (см. §3.4.2).

### **3.3 Приборы для контроля эффективности транспортирования теплоты по тепловым сетям**

Одной из основных составляющих систем централизованного теплоснабжения являются тепловые сети, предназначенные для передачи теплоты, произведенной на теплогенерирующем предприятии, многочисленным потребителям. Задача транспортирования теплоты с наименьшими тепловыми потерями по теплотрассе чрезвычайно актуальна.

Бесперебойная и малозатратная работа системы центрального теплоснабжения зависит, главным образом, от качества теплосетей и правильности их эксплуатации. Важными предпосылками надежной работы систем теплоснабжения являются минимальные потери теплоты и теплоносителя из сети. Утечки теплоносителя приводят к снижению давления в отдельных точках сети, недостаточному напору на вводе к

потребителю, попаданию воздуха в системы отопления и нарушению циркуляции теплоносителя в них. Значительные теплопотери являются причиной существенного охлаждения теплоносителя на пути транспортирования от источника к потребителю.

Контроль тепловых потерь на этапе транспортирования теплоты от производителя до объектов потребления имеет большое значение, поскольку реальное состояние теплоизоляции трубопроводов далеко не идеально. Кроме того, теплотсети в Украине весьма разветвленные и многие десятки лет эксплуатируются без каких-либо существенных средств диагностики их состояния, что приводит к частым авариям с последствиями различной тяжести. Они являются дорогостоящими сооружениями, забирающими на себя значительную часть капитальных и эксплуатационных расходов [3.9].

Большие потери, к сожалению, имеют место при использовании тепловой энергии, к основным потребителям которой относятся здания и сооружения, отапливаемые в холодную пору года. Математическая модель системы отопления подобна школьной задаче про бассейн, в который через одну трубу вливается, а через другую одновременно выливается вода. В этой аналогии уровню воды в бассейне соответствует температура в помещении. Повышения комфортности можно достичь либо увеличением качества подводимой теплоты через систему отопления, либо уменьшением теплопотерь в окружающее пространство. При этом ошибочно основное внимание уделяется интенсивности работы систем отопления, хотя более правильным и актуальным является уменьшение теплопотерь.

Применяемые известные методы и средства контроля состояния теплотрасс [3.2, 3.10 – 3.13], к сожалению, не в полной мере соответствуют задачам точного обнаружения поврежденных участков теплопроводов, определения состояния их теплоизоляции и достоверного измерения теплопотерь в теплосетях. В связи с этим проблема создания современных

эффективных методов диагностики и надежной аппаратуры, которая бы соответствовала современным требованиям проведения контроля теплотерь в системах теплоснабжения как бесканальной, так и канальной прокладок, является особенно актуальной. В ИТТФ для решения этих задач разработаны приборы и измерительные комплексы, показанные на рисунке 3.6 [1.3; 3.1].

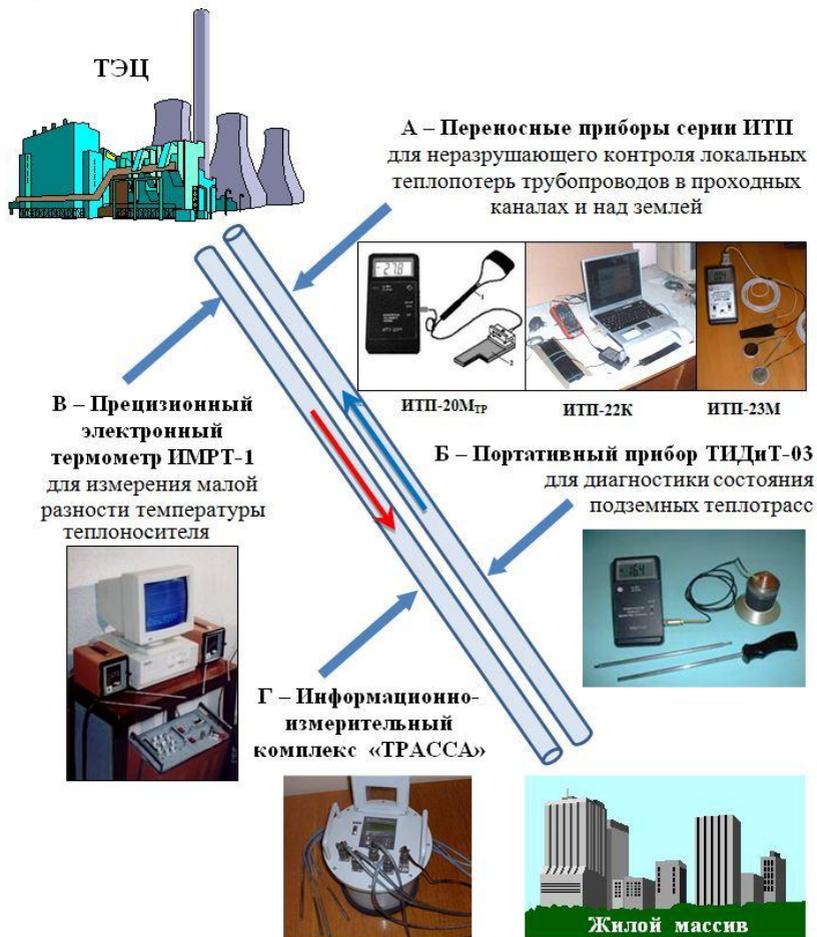


Рис. 3.6. Теплофизические приборы для контроля эффективности транспортирования теплоты по теплотрассам

**А – Переносные приборы ИТП** (см. рис. 3.6, поз. А), предназначенные для контактного измерения поверхностных плотности теплового потока и температуры, подробно представлены в главе 1, § 1.1 и публикациях [1.1, 1.2, 3.3]. Для обнаружения дефектных участков тепловой изоляции трубопроводов в проходных туннелях (каналах) и над землей применяют малогабаритные цифровые приборы моделей ИТП-20Мтр, ИТП-22К, ИТП-23, укомплектованные ПТП в жестком и гибком исполнении, специализированными для трубопроводов теплосетей. При необходимости снабжены автономной или встроенной в ПТП термопарой.

**Б – Переносной прибор ТИДиТ** (см. рис. 3.6, поз. Б) индикаторного типа, предназначенный для неразрушающей диагностики подземных теплопроводов канальной и бесканальной прокладок теплосетей с целью обнаружения поврежденных участков по результатам измерения плотности потока теплового излучения от поверхности грунта над прокладкой теплотрассы в реальных условиях ее эксплуатации [3.14, 3.15]. Под повреждениями имеют ввиду разрушенную теплоизоляцию или наличие утечки теплоносителя.

Принцип метода такой диагностики следует из результатов исследования действующих теплосетей, свидетельствующих о том, что любое повреждение теплоизоляционного покрытия трубопровода и нарушение режима работы теплотрассы приводят к изменению температурных и теплопоточных полей в поверхностном слое грунта (покрытия) над прокладкой. В случае увлажнения изоляции из-за утечки теплоносителя из трубы или полного ее разрушения на поверхности грунта наблюдается повышенный или равномерный тепловой след. Аналогичная ситуация может возникнуть в ряде случаев, не связанных с каким-либо нарушениями. То есть влияние различных факторов может привести к одинаковому распределению теплового потока (или температуры) в поверхностном слое над теплотрассой. В таких случаях целе-

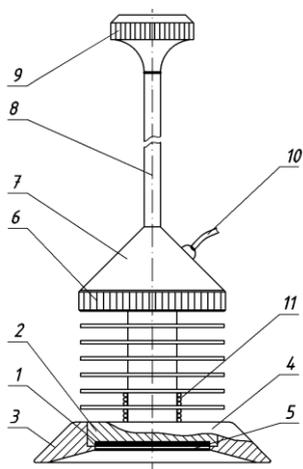
сообразно количественно оценить локальную теплоотдачу на контролируемой поверхности вдоль теплотрассы.

Исходя из этого, диагностика состояния тепловой изоляции трубопроводов состоит в:

- измерении значений плотности теплового излучения (или температуры) поверхности грунта над прокладкой обследуемого участка теплотрассы;
- построении распределений теплового потока (или температуры) с учетом исходных технологических факторов и метеорологических условий, зафиксированных во время измерений;
- сравнении полученных результатов с предварительно построенными эпюрами распределения теплового потока или температуры по справочным данным для конкретного вида прокладки;
- формулировании заключения о реальном состоянии теплоизоляции обследованной теплотрассы.

Таким образом, процесс обследования действующих участков теплосети сводится к простым действиям оператора, которые проводятся без раскрытия насыпного грунта над прокладкой сети, то есть неразрушающим способом.

Прибор ТИДиТ состоит из теплотрического зонда (рис. 3.7), снабженного штоком с рукояткой для удобства пользования при обследовании теплотрасс, и электронного малогабаритного показывающего устройства с автономным батарейным электропитанием [3.15]. Корпус зонда 2 представляет собой теплоприемник цилиндрической формы, один торец которого выполнен в виде оребренной поверхности теплообмена с ОС с целью обеспечения изотермических условий при проведении измерений. На другом торце установлена защитная бленда 3, снабженная металлическим экраном 4 и полиэтиленовой пленкой 5, предохраняющая ПТП 1 от воздействия внешних источников теплового излучения. Зонд прикреплен к держателю 8 с рукояткой 9 и соединен кабелем 10 с цифровым измерительным прибором.



- 1 – термоэлектрический ПТП;
- 2 – корпус зонда;
- 3 – бленда защитная;
- 4 – экран;
- 5 – пленка полиэтиленовая;
- 6 – гайка накидная;
- 7 – крышка;
- 8 – держатель (шток);
- 9 – рукоятка;
- 10 – кабель;
- 11 – преобразователь температуры  
TSM 100M

Рис. 3.7. Конструкция теплотрического зонда прибора ТИДиТ-3 с держателем

Считываемые с цифрового табло показания соответствуют значениям генерируемого ЧЭ ПТП сигнала, пропорционального плотности теплового излучения. При обследовании оператор переносит прибор вдоль оси подземных коммуникаций с шагом перемещения зонда 1 м и фиксирует показания цифрового прибора. При этом также производится контроль теплотерь от грунта вне зоны теплового влияния теплотрассы. Таким образом реализуется возможность сравнения теплотерь над прокладкой и вне зоны ее влияния.

Результаты измерения (разностные значения) сопоставляются с расчетными значениями теплотерь, обусловленными типом и характеристиками прокладки (диаметр трубопровода, их количество, глубина заложения, материал изоляции и пр.). Обнаруживаемые при этом аномально высокие значения теплотерь соответствуют проблемным участкам.

На рисунке 3.8 представлены графики, показывающие характер изменения теплового потока вдоль теплотрассы, обусловленного наличием двух видов наиболее типичных повреждений (течь или разрушенная теплоизоляция).



- 1 – распределение плотности теплового потока над осью теплотрассы;  
 2 – график по справочным данным для конкретного вида прокладки

Рис. 3.8. Характер распределения плотности теплового потока над осью теплотрассы

Результаты обследования теплосетей в городах Украины (Киев, Черкассы, Одесса, Новая Каховка, Харьков, Херсон, Львов, Чернигов, Полтава, Черновцы, Ирпень, Бровары и др.) показали реальную возможность локализации мест утечки теплоносителя и участков сетей с поврежденной, сильно увлажненной или полностью разрушенной теплоизоляцией.

Применение приборов моделей ТИДиТ позволило исключить затраты на проведение шурфовок при отыскании мест повреждения теплопроводов, а также проводить коррекцию плана перекладок участков теплосетей, подлежащих ремонту, своевременно определяя места теплотрассы с неудовлетворительным состоянием тепловой изоляции подземных теплопроводов. Существенный вклад в разработку и внедрение приборов моделей ТИДиТ внес П. И. Трикоз [3.14].

### **В – Измерительные комплексы для контроля интегральных тепловпотерь на участках теплотрасс**

При явных преимуществах портативных СИТ их основной недостаток состоит в том, что приборы типа ИПП дают

информацию лишь о локальных тепловых потерях. Для снижения теплопотерь в магистральных теплотрассах большое значение имеет поучастковый контроль теплового состояния теплопроводов с определением фактических значений теплопотерь. Для реализации такого контроля в регламент обслуживания теплотрасс входит проведение трудоемких и дорогих периодических испытаний, поэтому их часто избегают, ограничиваясь текущими ремонтами в случае аварийной ситуации. Задача осложнена еще и тем, что на магистральных участках при больших значениях передаваемой тепловой энергии относительные теплопотери значительно меньше, чем погрешность измерения современных теплосчетчиков, а разность значений температуры теплоносителя в начале и конце трубопровода длиной в несколько километров в эксплуатационном режиме составляет всего несколько десятых или даже сотых долей Кельвина.

Для традиционных испытаний отдельные участки теплотрассы закольцовывают, предварительно отключив от потребителя, и при малом расходе теплоносителя (воды) определенной температуры измеряют перепады температуры на каждом участке [3.16, 3.17].

Мощность интегральных теплопотерь  $\Phi$  на отдельном участке теплотрассы может быть рассчитана как отношение разности полной энергии теплоносителя, прошедшего через начальное и конечное сечения контролируемого участка, к продолжительности измерений  $d\tau$ :

$$\Phi = \left( \int_{\tau_1}^{\tau_2} T_{M1} \cdot R_{M1} \cdot c_V \cdot dt - \int_{\tau_1 + \Delta\tau_1}^{\tau_2 + \Delta\tau_2} T_{M2} \cdot R_{M2} \cdot c_V \cdot d\tau \right) / (\tau_2 - \tau_1) \quad (3.6)$$

где  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – начальный и конечный моменты проведения измерений в начальном сечении участка трубопровода;

$\Delta\tau_1$  и  $\Delta\tau_2$  – длительность прохождения участка теплотрассы элементарным объемом воды, что поступил на участок в начальный и конечный моменты измерения;

$T_{M1}$  и  $T_{M2}$  – мгновенные значения температуры воды в начальном и конечном сечениях участка;

$R_{M1}$  и  $R_{M2}$  – мгновенные значения объемного расхода (в кг/с) воды в начале и конце участка;

$c_V$  – объемная теплоемкость воды (в Дж/(К·кг)).

В общем случае переменными величинами являются не только значения температуры  $T_{M1}$  и  $T_{M2}$ , но и расходы воды  $R_{M1}$  и  $R_{M2}$  из-за чего значения длительности прохождения участка теплотрассы элементарным объемом воды  $\Delta\tau_1$  и  $\Delta\tau_2$  – не одинаковые. Таким образом, для достоверного определения мощности теплопотерь необходимо измерять с большой точностью не только температуру, но и расход теплоносителя в начальном и конечном сечениях контролируемого участка трубопровода, а также фиксировать текущее время замеров и время, за которое элементарный объем теплоносителя пройдет весь участок. При относительно малом изменении температуры, характерном для теплотрасс, теплоемкость  $c_V$  теплоносителя можно считать постоянной.

При постоянном расходе теплоносителя  $R_{M1} = R_{M2} = R$  длительность прохождения участка  $\Delta\tau_1$  и  $\Delta\tau_2$  тоже постоянны ( $\Delta\tau_1 = \Delta\tau_2 = \Delta\tau$ ). В этом простейшем случае вычисление теплопотерь может быть выполнено по формулам:

– мощность интегральных теплопотерь  $\Phi_{III}$  на участке:

$$\Phi_{III} = (T_1 - T_2) \cdot R \cdot c_V, \quad (3.7)$$

– мощность удельных теплопотерь  $\Phi_{VII}$ :

$$\Phi_{VII} = \Phi_{III} / L, \quad (3.8)$$

где  $L$  – длина участка;  $T_1$  – средняя температура теплоносителя в начале участка трубопровода за время  $\Delta\tau_1$  и  $\Delta\tau_2$ ;

$T_2$  – средняя температура теплоносителя в конце участка за время от  $(\tau_1 + \Delta\tau)$  до  $(\tau_2 + \Delta\tau)$ .

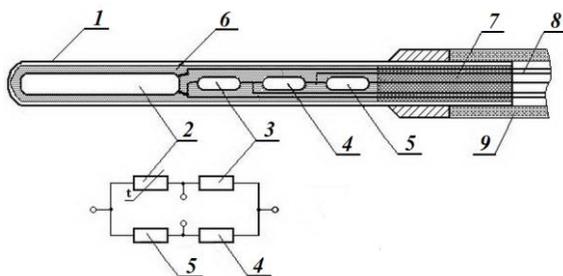
Из отношения (3.7) следует, что достоверно определять интегральные и удельные теплототери можно только в случае прецизионного измерения температуры теплоносителя на концах участка и его расхода. Таким образом в приборах для этих целей должна быть предусмотрена возможность длительных непрерывных и синхронных измерений температуры с погрешностью на уровне 0,01 К и сохранение сложных температурно-влажностных условий в смотровых тепловых камерах теплотрассы. Ни один теплосчетчик, изготавливаемый в мире, не имеет требуемых технических характеристик.

**В.1 – Прецизионный электронный термометр ИМРТ-1** (см. рис. 3.5, поз. В, [5\*, 3.3, 3.16]), являющийся измерительным комплексом, предназначен для определения интегральных теплототерь на участках теплотрассы с повышенной точностью в режимных условиях эксплуатации теплотрассы, то есть без отключения теплотребителей.

В комплект ИМРТ-1 входят по два идентичных измерительных устройства и аккумулятора, калибровочный термостат с набором образцовых ртутных термометров и ПК с соответствующим ПО. Каждое измерительное устройство содержит два одинаковых термометра сопротивления ТС модели ТЕМП и специализированный электронный блок (ЭБ).

Погрешность измерения температуры электронным термометром ИМРТ-1 в диапазоне от 30 до 80 °С не превышает 0,03 К. Полный диапазон температуры от 0 до 130 °С при разрешающей способности до уровня 0,004 К.

На рисунке 3.9 приведена схема мостового прецизионного ТС модели ТЕМП-02 [5\*], который выполнен в корпусе 1 из тонкостенной нержавеющей трубки Ø 6,2×240 мм. Внутри трубки размещен ЧЭ 2, изготовленный в виде бескаркасной спирали из медной лакированной проволоки Ø 0,05 мм с электрическим сопротивлением 1000 Ом при 0 °С. Для стабилизации характеристик ТС состарен при температуре 160 °С в течении 500 часов.



1 – корпус; 2 – термочувствительный элемент; 3, 4, 5 – прецизионные резисторы; 6 – наполнитель электроизоляционный; 7 – пробка; 8 – коммутационные провода; 9 – силиконовая трубка

Рис.3.9. Схема специального прецизионного мостового термометра сопротивления модели ТЕМП-02

Измерение электрического сопротивления ЧЭ ТС проводится по схеме несимметричного моста с питанием стабильным током [3.18, 3.19]. Элементы мостовой схемы, отобранные из одной партии прецизионных резисторов по минимальным отклонениям от номинала, имеют малые одинаковые значения температурного коэффициента сопротивления и конструктивно расположены в том же корпусе, что и ЧЭ ТС. Последнее исключает влияние подводящих проводов на точность измерения температуры.

Стабилизатор тока, питающий измерительный мост, выполнен по схеме с обратной связью по току через ТС, а напряжение в диагонали моста усиливается с помощью усилителя фирмы «Vurr Brown» с малыми значениями напряжения и токов смещения.

Все функциональные электронные узлы, обеспечивающие высокую точность измерений, размещены в специальном устройстве, установленном в измерительном ЭБ и независимо от условий эксплуатации работают при температуре  $(70 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ , что обеспечивает стабильность их характеристик. ЭБ обеспечивает измерение и обработку сигналов ТС, индикацию и запоминание значений температуры в энергонезависимый флэш-памяти. Объем памяти позволяет сохранять

данные измерения температуры в течение семи суток с периодичностью 30 с.

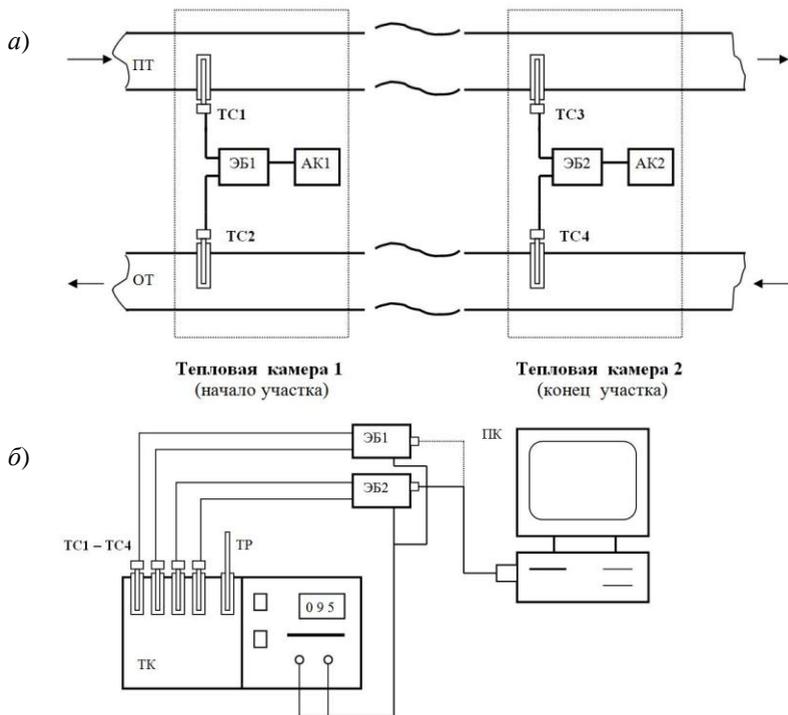
Для компенсации нелинейности функции преобразования ТС пересчет измеренных значений сопротивления ЧЭ в значения температуры происходит в микропроцессорном устройстве с помощью аппроксимирующего полинома третьей степени, коэффициенты которого определяют экспериментально для каждого экземпляра ТС при настройке. Встроенный таймер с автономным батарейным питанием позволяет выполнять привязку проведенных измерений к соответствующему моменту времени.

Электронный блок имеет конструкцию, обеспечивающую защиту от пыли и капель воды. Все элементы управления и индикации размещены под герметичной прозрачной крышкой. Электропитание в условиях эксплуатации осуществляется от аккумулятора напряжением 12 В или через понижающий трансформатор от сети 220 В, 50 Гц.

При выполнении испытаний теплотрассы ТС устанавливают в штатные трубки-гильзы, сваренные в стенку трубопровода (прямого то есть подающего теплоноситель и обратного) на концах обследуемого участка в соответствующих смотровых колодцах или павильонах, в каждом из которых также размещают ЭБ и аккумулятор.

На рисунке 3.10 *а, б* приведены схемы размещения и соединения элементов измерительного комплекса ИМРТ-1 на участке теплотрассы (*а*) и в лабораторных условиях (*б*).

Калибровочный термостат предназначен для контроля идентичности двух измерительных ЭБ комплекса ИМРТ-1 и стабильности их метрологических характеристик после испытаний теплотрассы. Контроль выполняется в лабораторных условиях после снятия с теплотрассы методом сличения с образцовыми (или эталонными) ПТ (ртутный термометр) в узком рабочем температурном диапазоне и определяют поправки по накопленным данным.



ПТ и ОТ – прямой и обратный трубопроводы; ТС1,...,ТС4 – рабочие термометры сопротивления; ЭБ1, ЭБ2 – электронные блоки; АК1, АК2 – аккумуляторы; ТР – термометр ртутный (эталонный); ТК – термостат калибровочный; ПК – персональный компьютер

Рис. 3.10 . Схемы размещения и соединения элементов комплекса ИМРТ-1 при испытаниях на участке теплосети (а) и в лаборатории при калибровке и поверке термометров ТЕМП (б)

На рис. 3.11 представлены результаты одного из испытаний, проведенного на действующей магистральной тепло-трассе между Киевской ТЭЦ-6 и котельной РТМ-6. Начальная точка контролируемого участка – павильон 1П1, конечная – насосная станция РТМ-6. Общая длина участка 2970,7 м в том числе надземной прокладки – 146,5 м, подземной (двух-трубной в непроходном канале) – 2824,2 м; диаметр трубопровода Ø1200 мм.

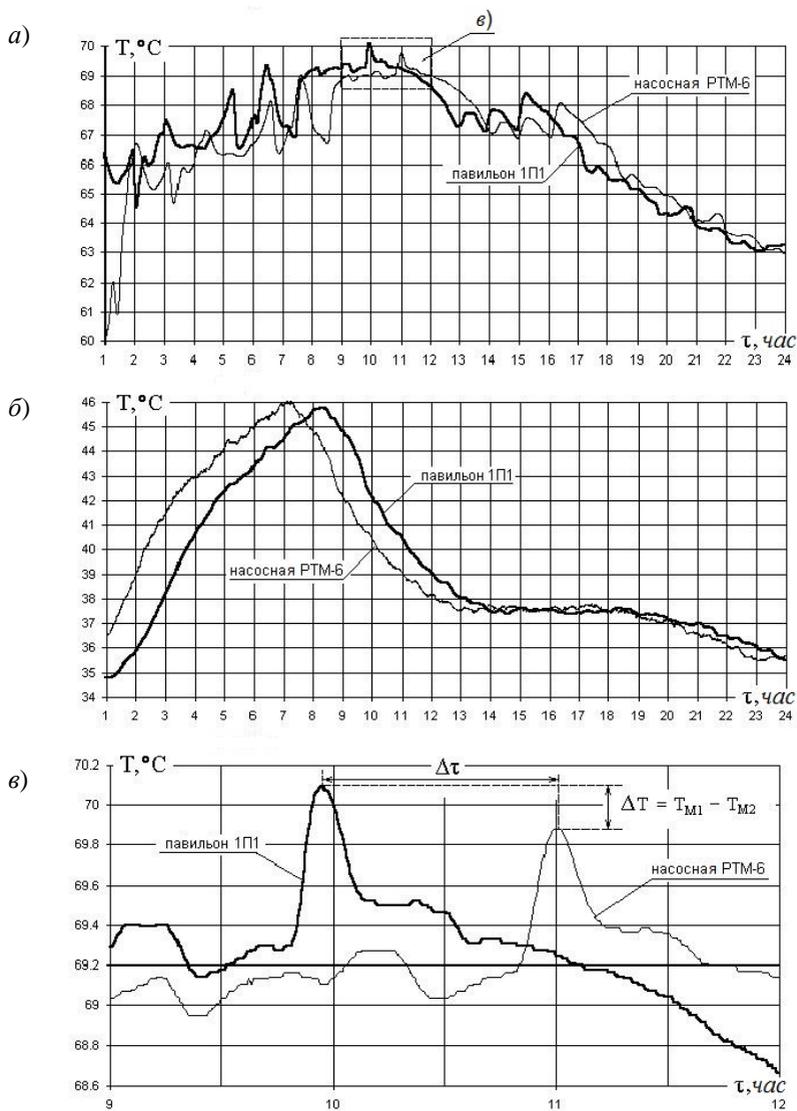


Рис. 3.11. Графики изменения температуры теплоносителя в прямом (а) и в обратном трубопроводе (б); фрагмент графика в увеличенном масштабе (в)

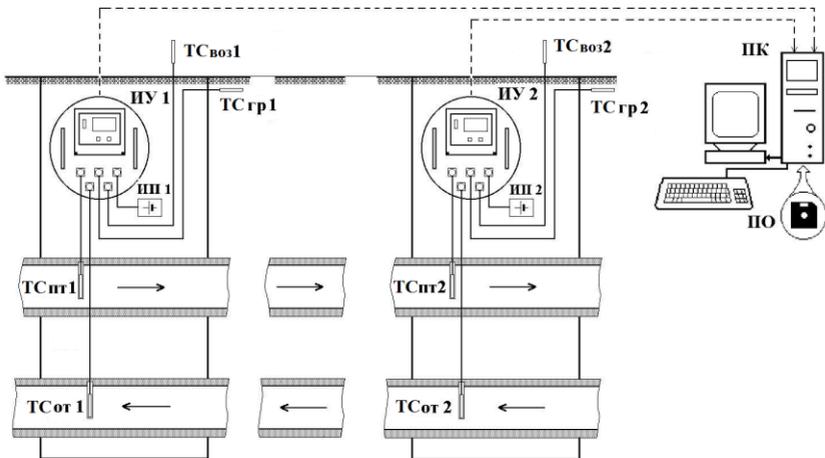
Испытания проведены в экспериментальном режиме работы теплосети с расходом теплоносителя  $\sim 3000$  т/час. Как видно из графиков, с помощью комплекса ИМРТ-1 записаны изменения температуры теплоносителя в трубопроводе. Это позволило наблюдать динамику расхода энергии потребителем и характерные штрихи поддержки температуры та расхода теплоносителя на ТЭЦ. Средний перепад температуры в прямом трубопроводе на контролируемом участке при заданном расходе воды составил  $\sim 0,105$  К. С учетом ошибки и разброса результатов измерения удельные теплотери на участке не превышают  $\Phi_{уд} = 176$  Вт/м. Значение теплотерь на верхней границе вероятности меньше предельно допустимых, установленных по методике ОРГРЭС для исследуемого типа теплотрасс при среднегодовой разности температуры теплоносителя и воздуха 65 К.

Были рассчитаны также средние значения температуры и разности значений температуры на участке обратного трубопровода. В различные интервалы времени перепад температуры на участке обратного трубопровода составил от нескольких тысячных до двух сотых Кельвина. Поскольку полученные значения фактически не превышают погрешности измерения, они лишь качественно свидетельствуют о малых теплотерях в обратном трубопроводе, которые не оказывают существенного влияния на общие траты энергии.

Длительная эксплуатация комплекса ИМРТ-1 на теплотрассах г. Киева подтвердила его пригодность для выполнения испытаний теплотрасс в рабочих режимах их эксплуатации (то есть без отключения теплопотребителей) и перспективность метода контроля интегральных теплотерь, основанного на измерении разности значений температуры на участке теплотрассы.

Опыт, полученный при испытании теплотрасс с применением прецизионного электронного термометра ИМРТ-1, лег в основу модернизированного комплекса «ТРАССА» с расширенными функциями.

**В.2 – Информационно-измерительный комплекс ТРАССА** (см. рис. 3.5, поз. Г [5\*, 3.3, 3.17]), в состав которого входят два измерительных устройства, два источника питания и ПК. Каждое измерительное устройство, в отличие от комплекса ИМРТ-1, содержит четыре прецизионных мостовых ПТ модели ТЕМП-02 (см. рис. 3.8) и электронный блок. Как и в случае испытаний с комплексом ИМРТ-1, измерительные устройства ИУ-1 и ИУ-2 располагают в смотровых колодцах на концах участка теплотрассы, подлежащего тепловому обследованию. При этом, как показано на рис. 3.12, ПТ устанавливают в штатные трубки-гильзы для измерения температуры стенок, контактирующих с теплоносителем в прямом и обратном трубопроводах ( $T_{C_{ПТ}}$  и  $T_{C_{ОТ}}$ ) и дополнительные преобразователи температуры для измерения температуры воздуха ( $T_{C_{Воз}}$ ) и грунта ( $T_{C_{Гр}}$ ).



ИУ1, ИУ2 – измерительные устройства; ИП1, ИП2 – источники питания;  $T_{C_{ПТ}}$ ,  $T_{C_{ОТ}}$  – термометры сопротивления, установленные в начале (1) и конце (2) прямого и обратного трубопровода соответственно;  $T_{C_{Воз}}$  и  $T_{C_{Гр}}$  – термометры сопротивления, установленные в воздухе и грунте

Рис. 3.12. Схема размещения и соединения элементов комплекса ТРАССА на участке при испытании магистральной теплотрассы

Электронные блоки с источником питания предназначены для приема и обработки сигналов ТС, индикации результатов измерений на экране, а также накопления массива данных в независимой флэш-памяти. По окончании испытаний устройства ИУ-1 и ИУ-2 снимают с теплотрассы и в лабораторных условиях полученную при испытании измерительную информацию передают в ПК.

Специализированное ПО обеспечивает вычисление средних значений температуры за любой заданный оператором промежуток времени, расчет поправок по результатам сличения термометров сопротивления ТЕМП-02 с образцовым (эталонным) ПТ и внесение их в результаты измерений.

Дополнительная погрешность измерения, обусловленная наличием теплоотвода по установочной арматуре и соединительному кабелю, при установке ТС на трубопроводе зависит от глубины его погружения в теплоноситель, от геометрических размеров и теплопроводности арматуры, термометра и жидкости, заполняющей установочную гильзу, от разности значений температуры теплоносителя и окружающего воздуха, от коэффициента теплообмена между теплоносителем и гильзой.

Для наиболее неблагоприятных условий эксплуатации и конструкций установочной арматуры при погружении ЧЭ термометра в теплоноситель на глубину более 250 мм, дополнительная погрешность составляет  $\sim 0,005$  К и может быть уменьшена в 3 – 5 раз с помощью тщательной теплоизоляции места установки термометра.

Комплекс ТРАССА предназначен для применения в диапазоне измеряемой температуры от минус 30 до 130 °С с дискретностью измерения температуры 0,001 К. Погрешность сличения измерительных устройств в калибровочном калориметре не более 0,005 К.

Применение измерительных комплексов ИМРТ-1 и ТРАССА на теплотрассах г. Киева продемонстрировало их достоинства, заключающиеся в высокой точности измерения

интегрального теплового потока на магистральных участках теплосетей в любое время года без отключения потребителей, а наличие калибровочного термостата позволяет контролировать идентичность применяемых ПТ и степень стабильности их чувствительности после испытаний.

Измерительный комплекс ТРАССА является универсальным, он может быть применен также для контроля эффективности теплообменных аппаратов, в калориметрических измерениях и других исследованиях, когда предстоят прецизионные непрерывные синхронные измерения температуры и разности малых значений температуры.

#### **3.4 Информационно-измерительные комплексы и приборы для контроля эффективности теплоснабжения на жилищно-коммунальных и строительных объектах**

На отопление и вентиляцию жилых домов и промышленных помещений расходуется до 40% теплоэнергетических ресурсов, из которых от 30 до 50% уходят тепловыми потерями через ОК. Это – много миллионов тонн у.т., а в денежном выражении – миллиарды гривен, что буквально выкидываются на улицу.

Теплопотери можно существенно сократить путем увеличения теплового сопротивления теплоизоляционных материалов и теплозащитных конструкций, поднимая его реальные (фактические) значения до установленных норм [3.1].

Степень соответствия качества теплозащиты ОК зданий (сооружений) существующим нормам устанавливают, как правило, путем экспериментального исследования ТФХ и ТРХ строительных материалов и конструкций как в лабораторных условиях на специальных стендах и установках, так и в натуральных условиях эксплуатации с помощью переносных приборов и информационно-измерительных комплексов. Среди этой аппаратуры, как показала практика, значительное место занимают теплотермические СИТ.

Исходя из назначения, выделены такие СИТ, представленные на рисунке 3.13:

**Группа А** – для оперативного измерения тепловых потерь зданий (сооружений) и энергетического оборудования, к которой отнесены малогабаритные переносные цифровые измерители теплового потока и температуры моделей ИТП-23, ИТП-23М и ИТП-22К, описанные в главе 1 (§1.1).

**Группа Б** – для определения теплозащитных характеристик ОК и отдельных фрагментов или изделий, а также их контроля при теплотехнических испытаниях, к которой отнесены измерительные комплексы, реализующие теплопоточные и температурные измерения в лабораториях и натуральных условиях: ИТС-1, ИТС-2, ИТС-3, Ресурс-С и Ресурс-РК (см. §3.42 и 5.5).

**Группа В** – для определения и контроля ТРХ материалов и изделий, к которым отнесены измерители коэффициента теплопроводности, теплового сопротивления и комплекса ТФХ в зависимости от температуры и давления.

Обоснование принципов действия и устройство конкретных типов приборов этой группы приведено в главах 4 и 5.

### **3.4.1 Информационно-измерительные комплексы «Ресурс-С» и «Ресурс-РК» для теплотехнического обследования зданий (сооружений)**

Изначально, в 50-е–70-е годы прошлого столетия, теплотехническое обследование объектов строительной отрасли, как и объектов энергетики, сводилось к экспериментальному определению локальных теплопотерь с применением переносных измерителей теплового потока аналогового типа (см. главу 1, § 1.1). Несмотря на такие достоинства, как оперативность измерений в производственных и полевых условиях автономность электропитания и локальность измерений, применяемые приборы не позволяли проводить полноценное теплотехническое обследование в реальных условиях.

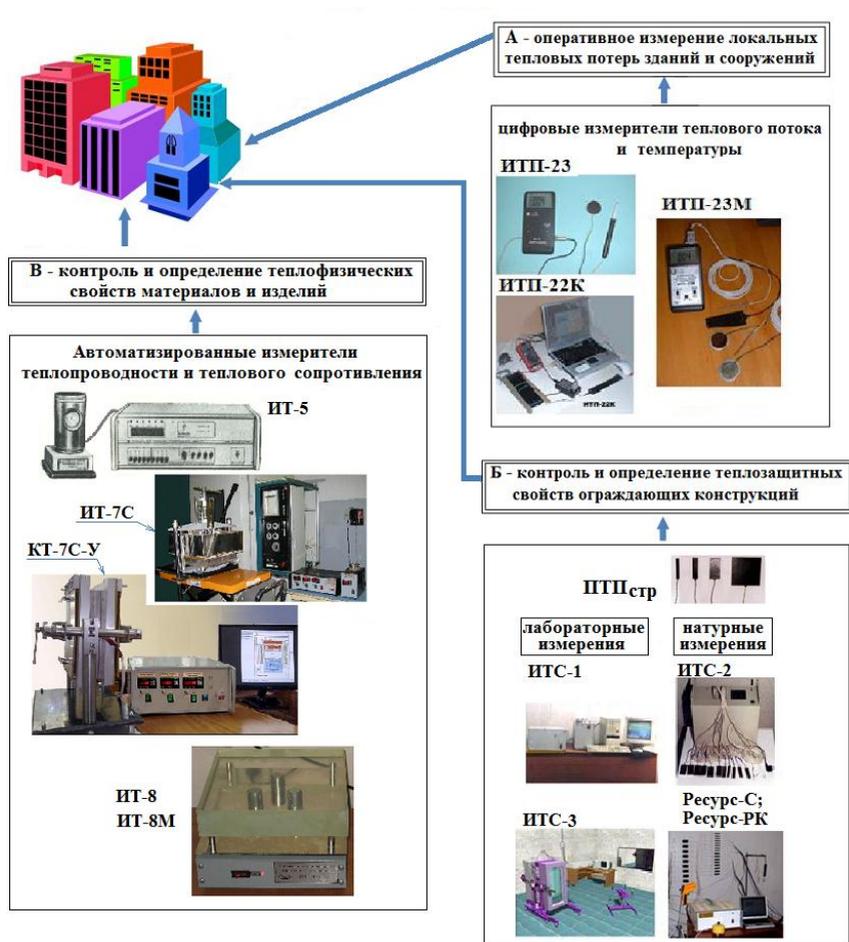
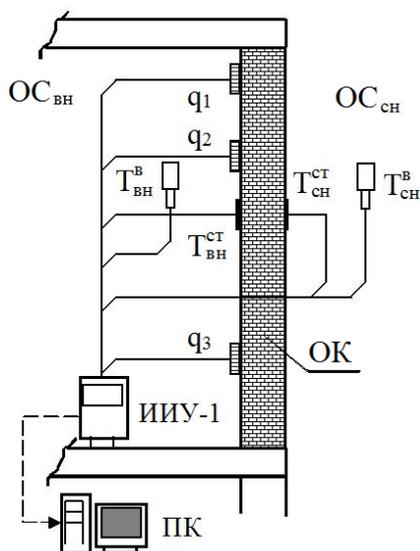


Рис. 3.13. Приборы, установки и измерительные комплексы для контроля эффективности потребления теплоты

Как результат дальнейшего развития появились информационно-измерительные комплексы для решения задач теплотехнического обследования различных строительных объектов ИИУ-1, ИТС-1, ИТС-2 [5\*, 1.7, 3.3], которые были универсальными и компьютеризированными, предназначенными для сертификации и энергоаудита с определением теплового сопротивления ОК, сопротивления теплопередаче и трансмиссионных теплопотерь согласно национальному стандарту ДСТУ БВ 2.6-101 [1.12].

Эти СИТ отличаются от приборов типа ИТП возможностью проведения измерений одновременно во многих точках поверхности объекта, автоматизацией процессов измерения, обработки данных и документирования протоколов.

**Устройство ИИУ-1** предназначено для обследования ОК в натуральных условиях и укомплектовано несколькими ПТП и ПТ, располагаемыми на поверхности ОК. Схему его применения показано на рисунке 3.14 [1.7].



q – каналы опроса ПТП;  
 T – каналы опроса термомпар;  
 ОК – ограждающая конструкция;  
 ОС – окружающая среда;  
 (индексы: воз – воздух;  
 сн – снаружи, вн – внутри)

Рис. 3.14. Схема применения устройства ИИУ-1 при теплотехническом обследовании ОК зданий (сооружений)

Устройство ИИУ-1 обеспечивает непрерывность и синхронность длительных измерений с последующей передачей информации в ПК для ее обработки согласно соответствующему ПО с целью определения теплового сопротивления теплообмену между ОК и ОС. Диапазон значений измеряемого входного напряжения  $\pm 100$  мВ с разрешающей способностью 1 мкВ. Абсолютная погрешность измерения сигналов ПТП и ПТ  $\pm 5$  мкВ. Габариты устройства  $740 \times 220 \times 470$  мм при массе 10 кг [1.7].

**Информационно-измерительный комплекс ИТС-1** (см. рис. 3.13 Б, [1.7]), предназначен для автоматического измерения эффективного сопротивления теплопередаче через ОК: окна, двери, фрагменты стен, потолка, пола, установленные в стандартной климатической камере при постоянной разности значений температуры воздуха по обе стороны от ОК в стационарных условиях теплообмена. Метод заключается в измерении температуры обеих поверхностей ОК и плотности проходящего через нее теплового потока в нескольких характерных точках объекта согласно стандарту [1.12] и температуры воздуха в теплом и холодном отсеках климатической камеры с последующим вычислением теплового сопротивления ОК и приведенного сопротивления теплопередаче. В состав комплекса ИТС-1 входят электронный блок, устройство термостабилизации опорных спаев термопар, ПК с соответствующим ПО, преобразователи ПТП (до 30 шт.) и ПТ (до 100 шт.). Термопары объединены в группы по 16 шт., а ПТП – по 15 шт., подключенные к электронному блоку с помощью разъема.

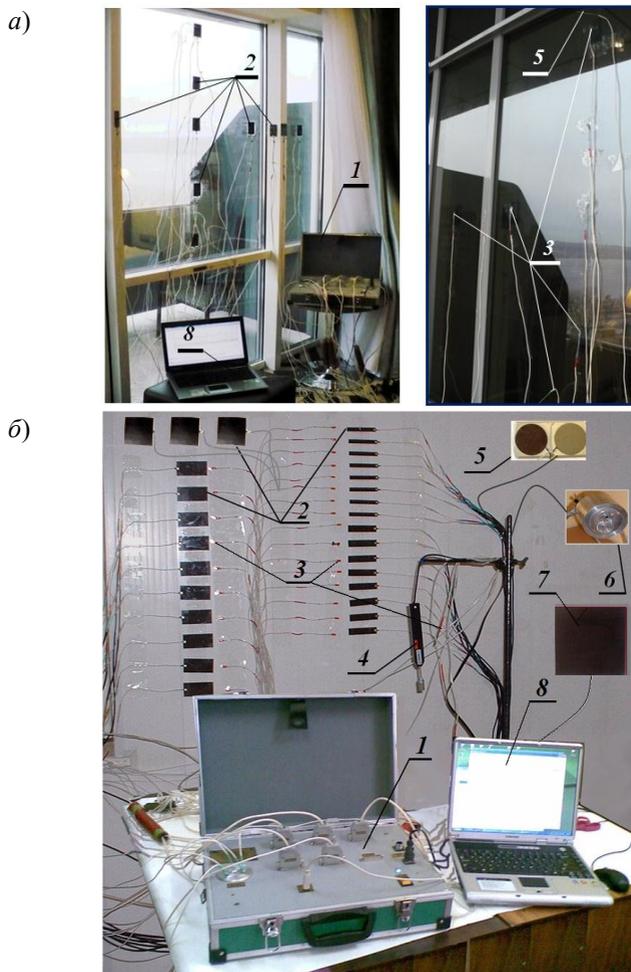
Измерения проводились в диапазоне от 10 до  $500 \text{ Вт/м}^2$  при температуре от минус 30 до  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  с пределами допускаемой основной относительной погрешности  $\pm 5\%$ . Погрешность поддержания температуры свободных спаев термопар  $\pm 0,001 \text{ К}$ . Габариты электронного блока  $400 \times 220 \times 470$  мм, устройства термостабилизации –  $320 \times 200 \times 320$  мм при массе комплекса более 30 кг.

**Информационно-измерительный комплекс ИТС-2** (см. рис. 3.13 Б, [5\*, 3.3]) предназначен для диагностики теплозащитных качеств ОК зданий и сооружений в реальных условиях и реализует метод определения теплового сопротивления ОК и приведенного сопротивления теплопередаче согласно стандартам ДСТУ Б.В.2.6-17 и ДСТУ БВ 2.6-101 [1.11, 1.12]. Его применение обеспечивает возможность проведения непрерывных синхронных наблюдений за параметрами теплового состояния ОК в нескольких характерных точках ее поверхности с высоким метрологическим уровнем контроля ОК зданий (сооружений) в натуральных условиях. Основные характеристики комплексов типа ИТС одинаковы.

**Измерительный комплекс «Ресурс-С»** (см. рис. 3.13 Б, [3.3, 3.20, 3.21]) позволил расширить объем функций измерительных комплексов ИТС, упростить процедуру измерений и повысить их точность при теплотехнических испытаниях крупногабаритных строительных объектов с учетом достигнутого в измерительном комплексе «Ресурс» (см. § 3.2).

Полученная с применением комплекса «Ресурс-С» измерительная информация позволяет выявлять различные дефекты теплоизоляции ОК, степень однородности отдельных зон (участков), оценивать тепловое состояние здания (сооружения) и оформлять раздел «Теплотехнические показатели» энергетического паспорта с фактическими значениями требуемых тепловых характеристик согласно [3.1].

Измерительный комплекс «Ресурс-С», представленный на рисунке 3.15 а, б, состоит из одного или нескольких электронных блоков, переносного ПК (ноутбука) с соответствующим ПО, а также набора первичных преобразователей и теплофизических измерительных устройств, в частности, оснащен устройствами РКТП (альфамер) и «Мишень» с регулятором температуры. Наличие двух и более электронных блоков позволяет проводить измерения одновременно в нескольких отдаленных друг от друга зонах.

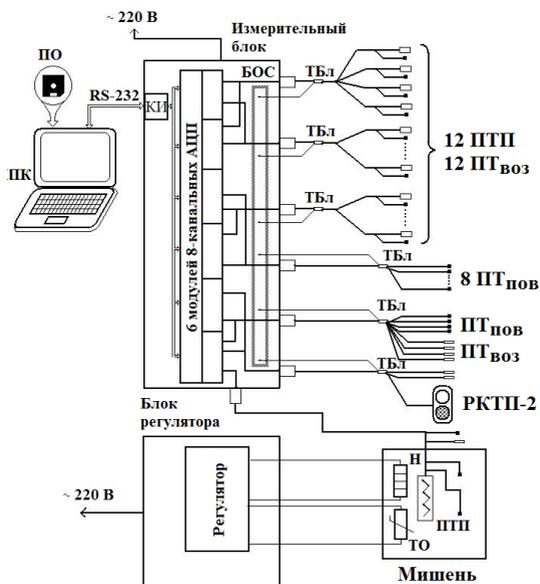


1 – электронный блок в переносном кейсе; 2 – комплект ПТП<sub>СТР</sub>; 3 – термопары (ПТ<sub>ПОВ</sub> и ПТ<sub>ВОЗ</sub>); 4 – измеритель влажности; 5 – РКТП; 6 – радиометр РАП-12Д; 7 – «Мишень»; 8 – ПК (ноутбук); 9 – температуровыравнивающий блок (пассивного типа)

Рис. 3.15. Размещение ПТП<sub>СТР</sub> и термопар на контролируемом объекте (а) и внешний вид измерительного комплекса «Ресурс-С» (б)

В зависимости от количества каналов измерения напряжения постоянного тока в измерительном блоке, которых может быть 32, 48 и 96-канальным, имеется несколько модификаций комплекса «Ресурс-С».

Модификация «Ресурс-С-48», функциональная схема которого приведена на рисунке 3.16, содержит два электронных блока на 48 каналов измерения, 12 шт. ПТП<sub>СТР</sub> с вмонтированным спаем термопары для контроля температуры поверхностей ОК, 12 шт. термопар для измерений на внешней поверхности ОК (Т<sub>ПОВ</sub>) и 6 шт. термопар для контроля температуры воздуха (Т<sub>ВОЗ</sub>) по обе стороны от ОК.



ПТП<sub>СТР</sub> – преобразователи теплового потока для для строительных конструкций; ПТП<sub>ПОВ</sub> и ПТП<sub>ВОЗ</sub> – преобразователи температуры поверхности и воздуха; БОС – блок опорных спаев; ТБл – температуровыравнивающий блок (пассивный); КИ – конвертер интерфейсов; Н – нагреватель; ТС – термометр сопротивления

Рис. 3.16 Функциональная схема комплекса «Ресурс-С-48»

Диапазон измерения значений напряжения определяется программно и может быть выбран из ряда:  $\pm 15$ ;  $\pm 50$ ;  $\pm 100$  мВ. Электронный(-ые) блок(-и) комплекса позволяют последовательно в произвольном порядке измерять напряжение на всех каналах. Он также имеет встроенный блок термостатирования опорных спаев термопар, температура которого учитывается при вычислении значений температуры, измеряемой термопарами. Комплекс смонтирован в переносном кейсе и имеет разъемы для подключения первичных измерительных преобразователей и интерфейса (USB или RS-232) для передачи их сигналов в ПК.

Информация о тепловом режиме обследуемой ОК преобразуется в первичных преобразователях в аналоговые электрические сигналы, которые подаются на вход электронного блока, где происходит их последовательное измерение. Результаты измерения в цифровом коде по интерфейсу USB или последовательному интерфейсу RS-232 передаются в ПК, где согласно ПО преобразуются в числовые значения плотности теплового потока и температуры в соответствующих единицах измерения ( $\text{Вт/м}^2$ ;  $^{\circ}\text{C}$  или К) и запоминаются в файле для дальнейшей обработки. ПО комплекса «Ресурс-С», аналогичное ПО рассмотренного ранее комплекса «Ресурс» (см. главу 3, § 3.2.), позволяет создавать индивидуальные файлы для каждого обследуемого объекта, в которых устанавливают последовательность опроса каналов, промежутки времени между отдельными опросами, скорость обмена и номер порта. В связи с этим имеется возможность для каждого типа ОК создать соответствующий конфигурационный файл.

При работе с комплексом измерения сигналов ПТП<sub>СТР</sub> и ПТ осуществляются по заданной программе, включающей первичную обработку сигналов и выведение в окно на экране монитора как в виде таблиц с численными данными, так и в виде графиков их изменения во времени. Одновременно все результаты запоминаются в файле в формате Microsoft Excel,

что дает возможность выполнять их дальнейшую обработку этим программным пакетом.

Комплекс «Ресурс-С» применяют для измерения плотности теплового потока в диапазоне от 10 до 500 Вт/м<sup>2</sup> при температуре от минус 40 до 50 °С с пределами допускаемой основной относительной погрешности ±4 %. В набор первичных преобразователей комплекса «Ресурс-С» входят, кроме ПТП и ПТ, и другие первичные преобразователи с нормированным электрическим выходом, например, прибор, являющийся стандартным преобразователем температуры и влажности воздуха, устройство измерения коэффициента теплообмена РКТП-альфамер, специальное устройство «Мишень» для настройки тепловизора, а также, при необходимости, устройство для измерения степени черноты покрытий и экспресс-измеритель коэффициента теплопроводности строительных материалов ИТ-8 (или ИТ-8М).

Как известно, в современных требованиях к теплоизоляции зданий [3.1] нормативы по сопротивлению теплопередаче ОК в 2 – 3 раза выше действовавших ранее. Значения плотности теплового потока через ОК, выполненную с соблюдением этого требования, уменьшаются до уровня 10 – 20 Вт/м<sup>2</sup>. В связи с этим повышаются требования к чувствительности и другим характеристикам ПТП, применяемых на

строительных объектах.

С учетом особенностей ОК зданий и сооружений, разработано несколько модификаций ПТП<sub>СТР</sub> (рис. 3.17, [5\*]), предназначенных для установки на различные типы строительных ОК:

1 – фрагмент стены;

2 – стекла;

3 – оконные рамы;

4 – коробки оконных блоков.

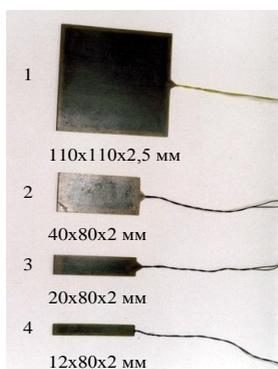


Рис. 3.17. ПТП<sub>СТР</sub> для измерений на элементах строительных конструкций

ПТП<sub>СТР</sub> выполнены в виде бескорпусной монолитной жесткой пластинки прямоугольной (квадратной) формы. Концы выводов оформлены контактными штекерами для подключения к гнездам кабеля связи, который изготавливают длиной не менее 5 м. Вторые концы кабеля распаяны на разъем DB-25 для подключения к разъемам электронного блока.

При измерении на строительных объектах существенно увеличивается динамическая погрешность измерения из-за нестационарности контролируемого теплового процесса, пропорциональная изменению теплосодержания самого ПТП, включенного последовательно в цепь измерения теплового потока, то есть динамическая погрешность пропорциональна собственной теплоемкости ПТП и скорости изменения температуры. Для уменьшения этой составляющей погрешности измерения в диапазоне малых значений теплового потока, характерных для хорошо изолированных строительных элементов, в наборе преобразователей предусмотрены ПТП<sub>КБ</sub> с корректирующей термобатареей ([2\*]), которые имеют постоянную времени в 5 – 10 раз меньшую, чем у традиционных ПТП таких же размеров и чувствительности.

В качестве первичного ПТ в комплексе применяют хромель-копелевые термопары ТХК (L) двух моделей: ПТ<sub>ПОВ</sub> и Т<sub>ВОЗ</sub> (см. главу 1 и [1.7]), при этом они выполнены дифференциальными с опорным спаем, термостатируемым в специальном блоке стабилизации опорных спаев (БОС), размещенном в электронном блоке комплекса.

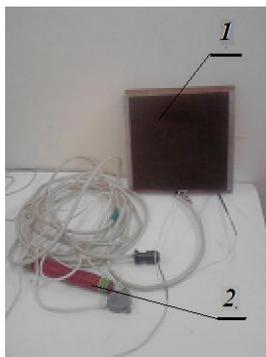
Преобразователь ПТ<sub>ПОВ</sub> выполнен с термочувствительным элементом в виде спая термоэлектродных проволок, смонтированного на тонкой медной прямоугольной (или круглой) подложке с размерами 6×12 мм (см. рис. 1.4). В качестве изоляции термоэлектродов использованы фторопластовые трубки, для пары термоэлектродов – трубки из поливинила (см. рис. 1.6). Длина готовой термопары 5 м. Преобразователь ПТ<sub>ВОЗ</sub> выполнен с ЧЭ в корпусе цилиндрической

формы, где размещен спай термоэлектродов, с размерами  $\varnothing 3 \times 60$  мм (см. главу 1 и рис. 1.6, [1.7]).

Все ПТ обеспечены коммутационными медными проводами марки МГШВ, причем переходы от термоэлектродов к коммутационным проводам размещены в пассивном температуровыравнивающем металлическом блоке (ТБл) цилиндрической формы.

*Специальное устройство РКТП-2* (см. рис. 3.3) предназначено для определения коэффициента теплообмена и плотности радиационного теплового потока, что поступает на поверхность обследуемой ОК от окружающих объектов. Во время работы устройства его регулятор температуры обеспечивает перегрев подложки на 5 – 10 К относительно температуры воздуха окружающего пространства. По измеренным сигналам ПТП и ПТ определяются значения температуры воздуха, поверхностей обоих ПТП и плотность теплового потока через них. На основании этих данных вычисляют конвективную и радиационную составляющие теплового потока и значение коэффициента теплообмена.

*Специальное устройство «Мишень»* (рис. 3.18 [1.12])



1 – пластина-мишень  
2 – температуровыравнивающий блок

Рис. 3.18. Внешний вид устройства «Мишень»

служит для настройки параметров тепловизора перед тепловизионной съемкой поверхностей ОК обследуемого здания (сооружения). Оно позволяет определить температуру и степень черноты поверхности ОК и ввести их значения в память тепловизора. Устройство содержит собственно мишень в виде пластины из высокотеплопроводного материала (металла) с габаритами не меньше  $0,25 \times 0,25$  м, которую можно закрепить на поверхности намеченного участка, и стандартный электронный измеритель температуры с автономным электропитанием.

Поверхность пластины-мишени может иметь одну (или две) зоны со стабильным и известным коэффициентом излучения (степень черноты). Если предусмотрены две зоны, то их степени черноты выполняют контрастными, соответствующими диапазону значений степени черноты наиболее часто встречающихся строительных материалов, например, для черной зоны  $\varepsilon_1 \approx 0,93$ , для другой  $\varepsilon_2 \approx 0,70$ . Если устройство выполнено с одной зоной, то ее степень черноты обеспечивают на уровне  $\varepsilon \approx 0,88 - 0,93$ .

Для измерения температуры поверхности устройства имеется встроенная термопара. В случае двух зон каждая из них снабжена термопарой. Кроме того имеется еще термопара, спай которой закрепляют на контролируемой поверхности ОК для измерения ее температуры. Эти термопары при работе устройства по очереди специальным переключателем соединяют со входом электронного измерителя температуры.

Методика работы с устройством «Мишень» состоит в следующем:

- устанавливают пластину – мишень на поверхность ОК на участке или вблизи него, который должны обследовать с помощью тепловизора;

- закрепляют на поверхности ОК с неизвестной степенью черноты спай соответствующей термопары устройства;

- после стабилизации температуры пластины-мишени оператор с тепловизором отходит от ОК на расстояние, с которого намечено производить тепловизионную съемку и по очереди, вводя в тепловизор значения степени черноты зоны термографирования, подбирает температуру фона таким образом, чтобы значение температуры зоны поверхности пластины-мишени, измеренные тепловизором, совпадали с показаниями электронного измерителя температуры устройства «Мишень»;

- при определенной таким образом температуре фона с помощью тепловизора контролируют температуру поверхности ОК в месте установки спаев термопары и подбирают такое

значение степени черноты, при котором показания тепловизора и электронного измерителя температуры устройства «Мишень» будут совпадать.

Найденные значения температуры фона и степени черноты поверхности ОК используют при дальнейшей тепловизионной съемке ОК. Если условия термографирования изменяются таким образом, что это может повлечь изменение температуры фона, или на поверхности ОК имеются участки с другой степенью черноты, процедуру настройки тепловизора повторяют.

При проведении теплотехнического обследования строительного объекта размещение первичных преобразователей (ПТП<sub>СТР</sub> и термопар) выполняют согласно рекомендациям стандартов ДСТУ Б.В.2.6-17 и ДСТУ БВ 2.6-101 [1.11, 1.12].

**Измерительный комплекс «Ресурс-РК» с радиоканалом связи** предназначен для одновременного синхронного обследования объекта, отдельные точки которого находятся на расстоянии нескольких десятков метров. Измерительная система комплекса «Ресурс-РК», выполненного с радиоканалом связи [1.14] имеет несколько многоканальных измерительных модулей с первичными преобразователями, которые можно располагать на значительном расстоянии друг от друга и центральный блок управления.

Центральный блок управления составлен из ПК (ноутбука) и связанного с ним по интерфейсу приемо-передатчика. К каждому измерительному модулю можно подключить до восьми первичных преобразователей различных типов. Электропитание модулей осуществляется от аккумулятора напряжением 12 В. Для передачи данных по радиоканалу применяются вмонтированные в модуль маломощностные приемо-передатчики с мощностью до 10 мВт и частотой 433 МГц, применение которых не требует получения специального разрешения.

Каждый многоканальный измерительный модуль, являющийся системой сбора и сохранения измерительной инфор-

мации, функционирует под управлением микроконтроллера. Питание модуля осуществляется от источника напряжения 10 – 30 В, которое преобразователем напряжения преобразуется в напряжение +5 В для питания элементов модуля. Для уменьшения шумов и повышения точности измерения аналоговая часть модуля гальванически развязана с цифровой частью.

Радиосвязь между модулями осуществляется с помощью стандартных радиочастотных модулей YS-1100U, которые предназначены для применения в различных системах малого радиуса действия с двухсторонней передачей данных в безлицензионном диапазоне частоты 433 МГц и позволяют организовать беспроводную передачу данных на расстояние до 500 м между двумя устройствами с интерфейсом RS-232 или RS-485. Благодаря встроенному запрограммированному микроконтроллеру NXP радиомодуль YS-1100U может передавать данные в «прозрачном» режиме по одному из частотных каналов. Выходная мощность (17 ДБм) и высокая чувствительность (112 ДБм) позволяют обеспечить надежную передачу данных даже в промышленных условиях.

Комплекс «Ресурс-РК» эксплуатируют в диапазоне измерения плотности теплового потока от 10 до 200 Вт/м<sup>2</sup>, с допускаемой основной относительной погрешностью измерения плотности теплового потока  $\pm 4\%$  при температуре от минус 40 до 50 °С. Допускаемая основная абсолютная погрешность измерения температуры составляет  $\pm 1,0$  К.

### **3.4.2 Методика теплотехнического обследования зданий и сооружений комбинированным тепловизионно-теплетрическим методом**

Для определения теплопотерь зданий и сооружений существует несколько методик. Одна из них основана на принципе теплового баланса, описываемого следующим уравне-

нием для трансмиссионных тепловых потерь  $\Phi_{ТР}$  через теплозащитную оболочку обследуемого объекта [3.22]:

$$\Phi_{ТР} = \Phi_{ОТОПЛ} + \Phi_{СОЛН} + \Phi_{ЭЛ.ОБ} + \Phi_{ЧЕЛ} + \Phi_{ИНФ}, \quad (3.9)$$

где  $\Phi_{ОТОПЛ}$  и  $\Phi_{СОЛН}$  – теплота, поступающая от системы отопления и от Солнца, соответственно;

$\Phi_{ЭЛ.ОБ}$  и  $\Phi_{ЧЕЛ}$  – выделяемая работающим внутри помещений электрооборудованием и присутствующим персоналом;

$\Phi_{ИНФ}$  – инфильтрационные потери теплоты, то есть обусловленные движением воздуха естественным путем или принудительным при работе вентиляционного оборудования.

Эта методика позволяет определить общие трансмиссионные потери через теплоизоляционную оболочку здания (сооружения), однако, не выявляет ни конкретных причин этих теплопотерь, ни дефектов или плохо изолированных участков ОК. В связи с этим трудно осуществить наиболее эффективные направления термомодернизации строительного объекта.

Другая методика – термографическая [3.23 – 3.25] – основана на дистанционном измерении поверхностной температуры ОК с применением тепловизионной техники. Она характеризуется высокой производительностью при обследовании, возможностью продиагностировать полностью объект и выявить локальные дефекты теплоизоляции путем сравнения температуры поверхности различных участков. Однако, сам по себе тепловизионный метод не дает возможности определять фактические численные значения искомых величин.

Наиболее точные результаты получают теплотрическим контактным методом, основанным на измерении плотности теплового потока через ОК и температуры ее обеих поверхностей и воздуха по обе стороны от ОК с последующим вычислением теплового сопротивления ОК, приведенного сопротивления теплопередаче и трансмиссионных теплопотерь [1.7, 3.5, 3.26].

Первоначально материальной базой, как уже отмечалось выше, для выполнения контактных теплоточных измерений при теплотехническом обследовании различных объектов служили отдельные ПТП, измерение сигналов которых выполняли с помощью стандартных электрических приборов прямого преобразования, например, милливольтметров. Потом стали применять приборы типа ИТП (аналоговые и позже – цифровые). Однако, при обследовании теплового состояния энергетического оборудования, ОК жилых и административных зданий и промышленных сооружений для определения тепловых потерь в ходе эксплуатации необходимо измерять одновременно тепловой поток и температуру во многих точках объекта на протяжении длительного времени. Это обусловлено тем, что на всех этих объектах, как правило, изменяются режимы работы в зависимости от нагрузки, колеблющейся не только на протяжении сезона, но и суток. Кроме того, тепловое состояние зданий еще изменяется в течение суток в зависимости от погоды. Следует также помнить, что контактные измерения теплового потока и температуры на удаленных или практически недоступных участках обследуемой поверхности являются невозможными.

Сочетание различных методов позволяет реализовать достоинства каждого из них и в значительной мере нивелировать недостатки и воплотилось в методике, реализующей комбинированный тепловизионно-теплометрический метод [3.27], которая стала в Украине действующим нормативно-методическим документом [3.28].

Методика распространяется на объекты строительной индустрии и учитывает особенности внутренней структуры и состава фрагментов обследуемой ОК (наличие участков с неодинаковыми характеристиками, теплопроводных включений, узлов, стыковых соединений, скрытых производственных дефектов и прочее), которые приводят к термической неоднородности, вследствие чего оказывается нарушенной од-

номерность температурного поля и искаженным тепловой поток, пронизывающий такой участок.

Методика основана на сочетании закономерностей инфракрасного (бесконтактного) обследования полей поверхностной температуры ОК с количественными контактными измерениями значений температуры и плотности теплового потока в намеченных точках поверхности с применением ПТП и ПТ и многоканальной измерительно-регистрирующей системы «Ресурс-С». Методика сводится к качественному анализу с помощью тепловизионной техники температурных полей поверхностей ОК и количественному определению теплотехнических параметров и характеристик: температуры внутренней и наружной поверхностей ОК и воздуха по обе стороны от нее, поверхностной плотности теплового потока через ОК, коэффициентов теплообмена с прилегающей ОС и теплового сопротивления пограничных слоев воздуха по обе стороны ОК с применением СИТ контактного типа с последующим вычислением значений искомых величин.

Комбинированная методика обследования ОК направлена на определение фактических значений теплотехнических характеристик ОК при наличии значительного температурного напора (не менее 15 К) и включенной системе отопления в осенне-зимний период за счет искусственного подогрева или усиленной вентиляции воздуха внутри помещения в весенне-летний период. При этом измерения выполняют на характерных (базовых и аномальных) участках представительных зон ОК.

Представительная зона (или зоны) ОК, устанавливаемая по результатам термографирования с применением тепловизора, должна включать максимально возможное количество различных типов характерных термически однородных участков, например, однородный участок стены, фрагмент фасада здания, окно, надоконную балку, забатарейный участок стены, участки стены вдоль тепловых коммуникаций, лестничного пространства и прочее. Путем анализа проект-

ной и нормативно-технической документации и результатов предварительной тепловизионной съемки и обмерных работ с целью определения фактических значений площади участков, на которых запланировано проводить теплотехнические измерения, осуществляется выбор характерных базовых участков представительной зоны и участков, которые могут быть отнесены к аномальным. Последние требуют более детального обследования путем бесконтактных и контактных измерений.

Основную тепловизионную съемку проводят по всей наружной поверхности теплозащитной оболочки здания, а затем выполняют тщательное термографирование и фотографирование наружных поверхностей выбранных представительных зон с целью уточнения границ, размеров и площади участков, определения степени их термической однородности, наличия теплопроводных включений, «мостиков» холода, а также возможных мест установки контактных измерительных преобразователей.

Детальному термографированию также подвергают внутренние поверхности помещений с базовыми и аномальными участками. Кроме того, внутри проводят термографирование поверхностей помещений верхних этажей зданий. По результатам анализа полученного распределения значений поверхностной температуры устанавливают степень однородности температурных полей и выявляют участки с температурными отклонениями от характерных базовых участков, на которых следует провести серию бесконтактных и контактных измерений температуры и плотности теплового потока с применением первичных преобразователей (ППП и ПТ) и вторичной измерительной аппаратуры в одних и тех же характерных участках поверхностей ОК.

Усредненные значения результатов контактных измерений в установившемся тепловом режиме позволяют рассчитывать фактические значения искомых теплотехнических характеристик ОК, пользуясь следующим алгоритмом вычислений.

Для каждого однородного участка  $n$ -ого типа по среднеарифметическим значениям измеренных плотности теплового потока, температуры поверхности ОК и воздуха в пограничных слоях по обе стороны ОК вычисляют значения следующих величин:

- $\Delta T_{OK}$  – температурный перепад между внутренней («вн») и наружной («н») поверхностями («пов») ОК:

$$\Delta T_{OK} = T_{ПОВ.ВН} - T_{ПОВ.Н}; \quad (3.10)$$

- $\Delta T_{OC}$  – температурный напор окружающей среды («ос»), как правило, воздуха с внутренней и наружной сторон ОК:

$$\Delta T_{OC} = T_{OC.ВН} - T_{OC.Н}; \quad (3.11)$$

- $\Delta T_{OC-ПОВ.ВН(Н)}$  – температурный перепад между ОС и прилегающей поверхностью ОК с внутренней (наружной) сторон:

$$\Delta T_{OC-ПОВ.ВН} = T_{OC.ВН} - T_{ПОВ.ВН}, \quad (3.12)$$

$$\Delta T_{OC-ПОВ.Н} = T_{ПОВ.Н} - T_{OC.Н}; \quad (3.13)$$

- $q_{ФАК}$  – фактическая плотность теплового потока:

$$q_{ФАК} = q_{ИЗМ} \cdot \Delta T_{OC-ПОВ.ВН} / \Delta T_{OC-ПОВ.ППП}, \quad (3.14)$$

где  $\Delta T_{OC-ПОВ.ВН}$  – по формуле (3.12), а  $\Delta T_{OC.ВН-ПОВ.ППП}$  вычисляется по аналогии с (3.13) как разность  $T_{ПОВ.Н} - T_{OC.Н}$ ;

- $R_{OK}$  – тепловое сопротивление однослойной термически однородной ОК:

$$R_{OK} = h_{OK} / \chi_{OK} = \Delta T_{OK} / q_{ФАК}, \quad (3.15)$$

где  $h_{OK}$  и  $\chi_{OK}$  – толщина ОК и коэффициент эффективной теплопроводности материала ОК;  $\Delta T_{OK}$  – по формуле (3.10);

- $R_{OK.ПР}$  – приведенное («пр») тепловое сопротивление термически неоднородной ОК, содержащей  $N$  типов характерных термически однородных участков:

$$R_{OK.ПР} = \sum_{n=1}^N A_n / \sum_{n=1}^N (A_n / R_{OK,n}), \quad (3.16)$$

где  $R_{OK,n}$  – рассчитанное по формуле (3.15) для каждого;  $A_n$  – площадь  $n$ -ого участка;

•  $R_{OK.MC}$  – эффективное тепловое сопротивление многослойной ОК:

$$R_{OK.MC} = \sum_{j=1}^J R_{OK,j}, \quad (3.17)$$

где  $R_{OK,j}$  – тепловое сопротивление  $j$ -ого слоя ОК,  $J$  – количество слоев в многослойной ОК;

•  $R_{\Sigma}$  – суммарное сопротивление теплопередаче через термически однородную однослойную ОК (или через термически однородный  $n$ -й участок ОК):

$$R_{\Sigma} = \Delta T_{OC} / q_{\Phi AK} \quad (\text{или } R_{\Sigma,n} = \Delta T_{OC,n} / q_{\Phi AK,n}), \quad (3.18)$$

где  $\Delta T_{OC}$  – по формуле (3.11).

Для получения более точного результата с учетом влияния движения воздуха по обе стороны ОК, то есть конвективной составляющей теплообмена между ОК и ОС на момент обследования, значение  $R_{\Sigma}$  вычисляют при известных значениях коэффициентов теплообмена  $\alpha$  по обе стороны ОК по формуле:

$$R_{\Sigma} = R_{OC.BH} + R_{OK} + R_{OC.H} = 1/\alpha_{BH} + R_{OK} + 1/\alpha_H, \quad (3.19)$$

где  $\alpha_{BH} = q_{\Phi AK} / (T_{OC} - T_{ПОВ})_{BH}$  и  $\alpha_H = q_{\Phi AK} / (T_{ПОВ} - T_{OC})_H$ ;

•  $U_l$  – линейный коэффициент теплопередачи через  $m$ -ое узкое теплопроводное включение шириной  $d$  и длиной  $l$  ( $d \ll l$ ):

$$U_l = d \cdot (\Delta T_{ПОВ.ОК} / q_{\Phi AK} + 1/\alpha_{BH} + 1/\alpha_H)^{-1}; \quad (3.20)$$

•  $R_{\Sigma.ПР}$  – приведенное суммарное сопротивление теплопередаче через термически неоднородную ОК, содержащую  $N$  типов характерных однородных участков:

$$R_{\Sigma.ПР} = \sum_{n=1}^N A_n / \sum_{n=1}^N (A_n / R_{\Sigma,n}); \quad (3.21)$$

•  $R_{\Sigma.ПР.ТВ}$  – приведенное сопротивление теплопередачи через неоднородную ОК, содержащую кроме  $N$  типов характерных термически однородных участков еще  $M$  линейных теплопроводных включений (индекс «ТВ») длиной  $L_m$  с известными значениями линейного коэффициента теплопередачи  $U_{l,m}$  через каждое включение:

$$R_{\Sigma.ПР.ТВ} = A_o / \left( \sum_{n=1}^N (A_n / R_{\Sigma,n}) + \sum_{m=1}^M (L_m \cdot U_{l,m}) \right), \quad (3.22)$$

где  $A_o$  – общая площадь обследуемой ОК;  $L_m$  – линейный размер  $m$ -ого теплопроводного включения по внутренней поверхности ОК;  $U_{l,m}$  – по формуле (3.20);

•  $q_{\PhiАК.ПР.ТВ}$  – приведенная плотность теплового потока через термически неоднородную ОК, содержащую кроме  $N$  типов характерных однородных участков еще  $M$  линейных теплопроводных включений:

$$q_{\PhiАК.ПР.ТВ} = \Delta T_{OC} / R_{\Sigma.ПР.ТВ}, \quad (3.23)$$

где  $R_{\Sigma.ПР.ТВ}$  – по формуле (3.22);

•  $U_{ТР}$  – трансмиссионный коэффициент теплопередачи через теплоизоляционную оболочку ОК (при необходимости):

$$U_{ТР} = q_{\PhiАК.АР.ТЭ} / \Delta T_{OC} = \Phi_{\PhiАК} / (A_o \cdot \Delta T_{OC}), \quad (3.24)$$

где  $\Phi_{\PhiАК}$  – кондуктивный тепловой поток через ОК (то есть поток без инфильтрационной составляющей).

По результатам обработки измерительной информации при необходимости рассчитывают общие трансмиссионные потери теплоты  $\Phi_{ТР}$  через теплоизоляционную оболочку здания (сооружения) за отопительный сезон по формуле:

$$\Phi_{TP} = U_{TP} \cdot A_{OT} \cdot D \cdot 10^{-9} = \frac{\Phi_{ФАК}}{\Delta T_{OC}} \cdot D \cdot 8,64 \cdot 10^{-7}, \quad (3.25)$$

где  $U_{TP}$  – по формуле (3.24),  $A_{OT}$  – общая отапливаемая площадь строения;  $D$  – количество градусо-суток отопительного сезона, а также коэффициент термической неоднородности основного поля ОК, равный отношению  $R_{\Sigma, ПР} / R_{\Sigma}$ , где  $R_{\Sigma}$  – сопротивление теплопередаче через основное поле ОК.

Нормативный документ [3.28], посвященный этой методике, распространяется на разные наружные ОК строительных объектов, требующих энергии на их функционирование, например, жилых, административных, производственных зданий и сооружений, то есть на наружные стены, крыши, чердачные и подвальные перекрытия, окна, витражи, фонари, двери и ворота в наружных стенах и др. Он предназначен для организаций и специалистов, осуществляющих теплотехническое обслуживание зданий (сооружений) с целью контроля состояния его теплозащиты на этапах строительства и приемки объекта после завершения стройки, а также последующей эксплуатации, реконструкции и капитального ремонта и может быть применен для обследования как оболочки здания в целом, так и отдельных ее зон и строительных элементов.

По результатам проведенного по этой методике обследования ОК осуществляется качественный и количественный анализ степени соответствия полученных значений теплотехнических характеристик ОК нормативным требованиям.

Качественный анализ проводят по результатам информации (на РС-карте или непосредственно в компьютерной системе) изображений температурных полей поверхностей ОК, которые получены при тепловизионной съемке различных зон элементов оболочки здания. При этом определяют участки тепловых аномалий и индицируют их, принимая решение о соответствии участка либо скрытому дефекту определенного типа или конструктивной особенности строения.

При количественном анализе определяют фактические значения основных теплотехнических характеристик ОК и сравнивают с ожидаемыми расчетными значениями. Это дает возможность трезво оценивать степень опасности обнаруженных тепловых аномалий для нормального функционирования обследованной ОК. К существенным дефектам, рассмотренных по уровню теплового сопротивления, следует относить дефект, если его наличие приводит к локальному уменьшению теплового сопротивления более, чем на 15%. Если степень влияния дефекта оценивалась по уровню температурного перепада на аномальном участке, то к существенным его дефектам следует отнести, если температурный перепад в этой зоне относительно перепада на базовом участке меньше не более, чем на 6% в безветренную погоду, и 12% при наличии ветра.

Таким образом типовая методика МВУ 048/06–2012 [3.28] в сочетании со строительными нормами ДБН В.2.6-31:2006 [3.1] позволяет устанавливать степень соответствия характеристик теплозащиты ОК требованиям нормативных документов, обнаруживать скрытые дефекты строительства и появившиеся во время эксплуатации, но главное, обеспечивает единство проведения теплотехнических обследований ОК и правильность определения реальных значений теплового сопротивления ОК, приведенного сопротивления теплопередаче и трансмиссионных тепловых потерь (или притоков) ОК зданий и сооружений.

Разработанные компьютеризированные измерительные комплексы «Ресурс-С» и «Ресурс-РК» и комбинированная тепловизионно-теплотехническая методика обследования теплозащиты ОК зданий и сооружений неоднократно были применены для обследования жилых зданий [3.29].

В разработке, создании и внедрении приборов и измерительных комплексов, описанных в главе 3, активное участие приняли сотрудники отдела теплотехники ИТТФ Л.В. Декуша, Л.И. Воробьев, О.Л. Декуша, В.В. Василевская.

### Литература к главе 3

3.1 Конструкції будівель і споруд. Теплова ізоляція будівель : ДБН В.2.6–31:2006. – [Чинні від 2007–04–01] // Мінбуд України. – К. : Укрархбудінформ, 2006. – 65 с. – (Державні будівельні норми України).

3.2 *Долинский А. А.* Теплофизические приборы ИТТФ НАН Украины для контроля и учета тепловой энергии / А. А. Долинский, Т. Г. Грищенко // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2001. – Т. 23, № 2. – С. 45–48. – ISSN 0204-3602.

3.3 *Декуша Л. В.* Засоби вимірювальної техніки для діагностики, моніторингу та оптимізації режимів роботи об'єктів у комунальній теплоенергетиці та будівельній індустрії / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Л. Й. Воробйов // В кн. : Комунальна теплоенергетика України: стан, проблеми, шляхи модернізації. – Том I. – К. : ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2007. – С. 346–386.

3.4 *Воробьев Л. И.* Кондуктивный бомбовый калориметр для измерения теплоты сгорания топлива [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.04 / Воробьев Леонид Иосифович ; Институт технической теплофизики НАН Украины. – К., 2001. – 185 с. – Библиогр. : С. 158–169.

3.5 *Долинский А. А.* Оперативное определение тепловых потерь объектов энергетики бесконтактным способом / А. А. Долинский, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев [и др.] // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2007. – Т. 29, № 3. – С. 99–109. – ISSN 0204-3602.

3.6 *Долінський А. А.* Вимірювально-діагностичний комплекс «Ресурс» для теплових обстежень котлів, котельного обладнання та трубопроводів / А. А. Долінський, Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Л. Й. Воробйов [та ін.] // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин.

– Київ : Видавництво ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 255-260.

3.7 *Декуша Л. В.* Вимірювально-діагностичний комплекс «Ресурс» для дослідження теплового стану енергетичних об'єктів / Л. В. Декуша, Л. Й. Воробйов, В. О. Виноградов-Салтиков [та ін.] // Проблемы учета теплоты и воды в Украине : сборник трудов V Международной научно-практической конференции. – К., 2006. – С. 75-79.

3.8 *Декуша Л. В.* Устройство для контроля тонких энергосберегающих покрытий и результаты исследования «теплоизоляционных» красок / Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, А. Г. Мазуренко [и др.] // Оконные технологии, 2006. – № 24. – С. 45-46.

3.9 *Авдолимов Е. М.* Водяные тепловые сети / Е. М. Авдолимов, А. П. Шальков. – М. : Стройиздат, 1984. – 288 с.

3.10 Диагностика состояния трубопроводов тепловых сетей // Информационное письмо № 5-88. – М. : Союзтехэнерго, 1988. – 18 с.

3.11 *Левкович В. В.* Расчетно-экспериментальный метод определения потерь тепла в водяных тепловых сетях / В. В. Левкович, Г. В. Бондарь, И. Е. Андреев // Изв. ВУЗов. – Энергетика, 1974. – № 8. – С. 91-95.

3.12 *Левкович В. В.* Определение тепловых потерь в водяных сетях по методу тепловой волны / В. В. Левкович // Изв. ВУЗов. – Энергетика, 1971. – № 4. – С. 84-87.

3.13 *Левкович В. В.* Определение тепловых потерь в водяных сетях по методу поучастковых испытаний / В. В. Левкович // Минск : Изд-во БГУ, 1956. – 28 с.

3.14 *Трикоз П. І.* Теплометрична діагностика підземних теплотрас [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.04 / Трикоз Павло Іванович; Інститут технічної теплофізики НАН України. – К., 1997. – 198 с.

3.15 *Трикоз П. І.* Теплометрические приборы для неразрушающего контроля подземных теплопроводов / П. И Трикоз, Т. В. Менделеева // Промышленная теплотехника :

Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2001. – Т. 23, № 6. – С. 152-156. – ISSN 0204-3602.

3.16 *Грищенко Т. Г.* Контроль теплопотерь на участках теплотрасс / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, А. А. Беспрозванный [и др.] // Энергетика и электрификация, 2000. – № 8. – С. 44-48.

3.17 *Декуша Л.* Термометрическая аппаратура для измерения тепловых потерь на теплотрассах / Л. Декуша, Л. Воробьев, А. Бутенко, А. Гайдучек // Міжвідомчий наук.-техн. збірник : Вимірювальна техніка та метрологія. – Вип. 64. – Львів : «Львівська політехніка», 2003. – С. 122-125. – ISSN 0368-6418.

3.18 *Линеверг Ф.* Измерение температур в технике : Справочник / Ф. Линеверг // Пер. с нем. под ред. Чарихова Л. А. – М. : Металлургия, 1980. – 544 с.

3.19 *Герашенко О. А.* Температурные измерения : Справочник / О. А. Герашенко, А. Н. Гордов, А. К. Еремина [и др.] ; Отв. ред. Герашенко О. А. ; АН УССР, Ин-т проблем энергосбережения. – Киев : Наукова думка, 1989. – 704 с.

3.20 *Декуша Л.* Інформаційно-обчислювальний комплекс для забезпечення теплових випробувань будівельних матеріалів, виробів та конструкцій / Л. Декуша, Л. Воробійов, В. Зайцев, О. Декуша, В. Шаповалов // Міжвідомчий наук.-техн. збірник : Вимірювальна техніка та метрологія. – Вип. 68. – Львів : «Львівська політехніка», 2008. – С. 72-78. – ISSN 0368-6418.

3.21 *Декуша Л. В.* Компьютеризированный измерительный комплекс для мониторинга теплового состояния фасадных систем / Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко [и др.] // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. – 2009, № 1 (31). – С. 57-60.

3.22 Здания жилые. Метод определения удельного потребления тепловой энергии на отопление : ГОСТ 31168-2003. – [Введен в действие 2003-07-01]. – М. : Стандартиформ, 2003. – 30 с. – (Межгосударственный стандарт).

3.23 *Вавилов В. П.* Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике. / В. П. Вавилов, А. Н. Александров. – М. : «Энергопрогресс», 2003. – 76 с. [Библиотека электротехника / Приложение к журналу «Энергетик». – Вып. 9 (57)].

3.24 *Маслова В. А.* Термография в диагностике и неразрушающем контроле / В. А. Маслова, В. А. Стороженко. – Харьков: Компания СМІТ, 2004. – 160 с.

3.25 Теплові характеристики будівель. Якісне виявлення теплових відмов в огорожувальних конструкціях. Інфрачервоний метод. ДСТУ Б EN 13187:2011 (EN13187:1998, IDT). – К. : Мінрегіон України, 2012.

3.26 *Грищенко Т. Г.* Комплекс приборов для контроля тепловых характеристик ограждающих конструкций, материалов и изделий / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики (Севастополь-2002) : труды XII конф. СНГ с международным участием. – Киев : ИПЦ «АЛКОН» НАУ, 2002. – С. 75-80.

3.27 *Грищенко Т. Г.* Комбинированный тепловизионно-теплометрический метод контроля трансмиссионных тепловых потерь через ограждающие конструкции зданий и сооружений / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, [и др.] // Проблеми обліку теплоти та води в Україні : збірник доповідей міжнародної науково-практичної конференції. – К., 2008. – С. 88-93.

3.28 Метрологія. Опір теплопередаванню крізь огорожувальні конструкції будівель та споруд різного призначення. Методика виконання вимірювань комбінованим тепловізійно-теплометричним методом : МВУ 048/06-2012. – К., 2013. – 34с.

3.29 Дослідження опору теплопередаванню огорожувальних конструкцій житлових приміщень № 806 та № 807 готельного комплексу в м. Запоріжжя [Рукопис] : звіт з г/д № 530 від 6.12.2011. – К. : ІТТФ НАН України; кер. Л. В. Декуша ; викон. : Н. О. Чорна, Є. В. Шмаров. – К., 2011. – 21 с.

## **ГЛАВА 4 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ**

Интенсивное развитие атомной энергетики, ракетной и космической техники, химии полимеров, радиоэлектроники, холодильной и криогенной техники, горной теплофизики и других отраслей науки и техники, которое наблюдалось во второй половине прошлого столетия, сопровождалось увеличивающимся спросом на различные материалы и большим разнообразием их использования. Это потребовало большого объема информации о ТФХ материалов, знание которых необходимо для расчетов тепловых режимов энергетических установок, строительных конструкций, трубопроводов, при разработке технологических процессов и аппаратов для переработки сырья и материалов, термической обработки и пр.

Отсутствие информации о ТФХ не позволяет в полной мере осуществлять мероприятия, направленные на решение многочисленных задач энерго- и ресурсосбережения, при этом наибольшее число запросов промышленных и научных организаций касается такой тепловой характеристики как теплопроводность.

Несмотря на большие успехи развития методов прогнозирования и расчета ТФХ, основным, наиболее надежным источником информации о них все же является эксперимент. Поэтому разработки средств измерения ТФХ вообще и коэффициента теплопроводности в частности относятся к актуальным проблемам отечественного приборостроения.

Так как промышленный выпуск приборов для измерения ТФХ в СССР отсутствовал вплоть до 1978 г., необходимую информацию получали на единичных лабораторных

установках. Анализ состояния работ по созданию средств измерения ТФХ путем изучения научно-технической и патентной литературы, а также контакты со специалистами заинтересованных организаций показали, что за редким исключением каждая из таких установок являлась уникальной и эксплуатировалась только у самого разработчика. Они отличались высокой стоимостью и не имели должного метрологического обеспечения, что не способствовало единству и достоверности измерений в данной области.

## **4.1 Стационарный теплотметрический метод пластины**

### **4.1.1 Особенности стационарного метода пластины и принципиальные схемы измерительных ячеек**

В практике создания приборов для измерения коэффициента теплопроводности широко применяют стационарные абсолютные методы измерения, в основе которых лежит феноменологический закон Фурье [4.1]:

$$\vec{q} = -\chi \cdot \text{grad}\vec{T}, \quad (4.1)$$

где  $\vec{q}$  и  $\text{grad}\vec{T}$  – векторы плотности теплового потока и градиента температуры вдоль нормали к поверхности ( $\text{grad}\vec{T} = \vec{n}_o \cdot dT/dn, \vec{n}_o$  – единичный вектор нормали к изотермической поверхности).

В середине прошлого столетия появились публикации об измерении коэффициента теплопроводности методом пластины в стационарном тепловом состоянии [4.2 – 4.5]. Приборы плоского типа особенно привлекательны возможностью использования стационарного одномерного теплового потока в образце, имитирующем бесконечный плоский слой, в виду физической наглядности процесса теплопроводности и простоты соответствующей расчетной формулы, которая, исходя из выражения (4.1) закона Фурье, имеет вид:

$$\chi = h \cdot q / \Delta T. \quad (4.2)$$

Согласно определению теплового сопротивления расчетная формула для него, исходя из формулы (4.2), имеет вид

$$R = h/\chi = \Delta T/q. \quad (4.3)$$

Стационарный метод с плоскими изотермами по сути совпадает с определением понятия теплопроводности как меры пропорциональности между тепловым потоком, пронизывающим пластину в перпендикулярном направлении, и установившимся по ее сечению градиентом температуры.

Для реализации данного метода изготавливают плоский образец в виде квадрата или диска конечных размеров. Для получения одномерного теплового потока при выборе размеров образца автором работы [4.6] рекомендовано соотношение  $h/D \ll 0,1$ , где  $D$  – поперечный размер образца. Толщина образца обычно выбирается в пределах от 5 до 50 мм. Большие размеры образцов и необходимость достижения стационарного режима приводят к весьма длительным испытаниям: от 6 – 8 часов до 1 – 2 суток, что является существенным недостатком стационарного метода пластины.

Нагрев одной рабочей поверхности плоского образца, зажато между источником и стоком теплоты, до постоянной температуры  $T_1$  производят, как правило, за счет электроэнергии, подводимой к электронагревателю. Теплоотвод от второй рабочей поверхности образца с одновременным ее термостатированием при температуре  $T_2$  осуществляют чаще всего при помощи проточного холодильника.

В современных приборах применяют электронагреватели, которые способны обеспечивать температуру горячей поверхности от 300 до 1000 К. Температура холодной поверхности от 300 до 370К создается посредством водяного холодильника. Более низкие значения температуры получают при использовании криогенных жидкостей. Однако, при этом разность температуры  $\Delta T = T_1 - T_2$  горячей и холодной поверхностей образца бывает значительной, что приводит к большим погрешностям. В связи с этим одним из требований

для обеспечения точного измерения коэффициента теплопроводности является осуществление теплового режима при малых значениях разности температуры. Согласно О. А. Сергееву [4.7] эта разность должна быть не более 5 К.

Более высокие значения температуры холодной поверхности можно создавать путем электронагрева в сочетании с интенсивным теплоотводом конвективным способом [4.8 – 4.10]. В случае выполнения измерений при значениях температуры значительно выше или ниже комнатных прибор должен обязательно иметь теплоизоляцию боковой поверхности.

Существенным условием корректного определения коэффициента теплопроводности является отсутствие воздушных зазоров между соприкасающимися поверхностями образца, источника и стока теплоты (нагревателя и холодильника) и их надежный тепловой контакт. Погрешность за счет контактного теплового сопротивления может достигать 15 – 30 % при толщине образца от 0,3 до 1,5 мм и 10 – 20 % при толщине от 1,5 до 3 мм [4.5]. Тщательная обработка соприкасающихся поверхностей, использование смазок (масло, вазелин, графитовые, алюминиевые и другие порошки, сплавы на основе галлия) также способствуют уменьшению контактного теплового сопротивления. Кроме того для его снижения в приборах нередко используют сжимающие усилия.

Одномерность температурного поля в пластине обеспечивают путем компенсации тепловых потерь рабочего нагревателя с применением охранных нагревателей (бокового и (или) торцевого) и размещением всей системы в теплоизолирующем кожухе. При точном регулировании мощности питания охранных нагревателей удается добиться того, что весь тепловой поток от рабочего нагревателя проходит через образец. Контроль режима осуществляют с помощью термопар или ПТП, применяемого в роли нуль-индикатора.

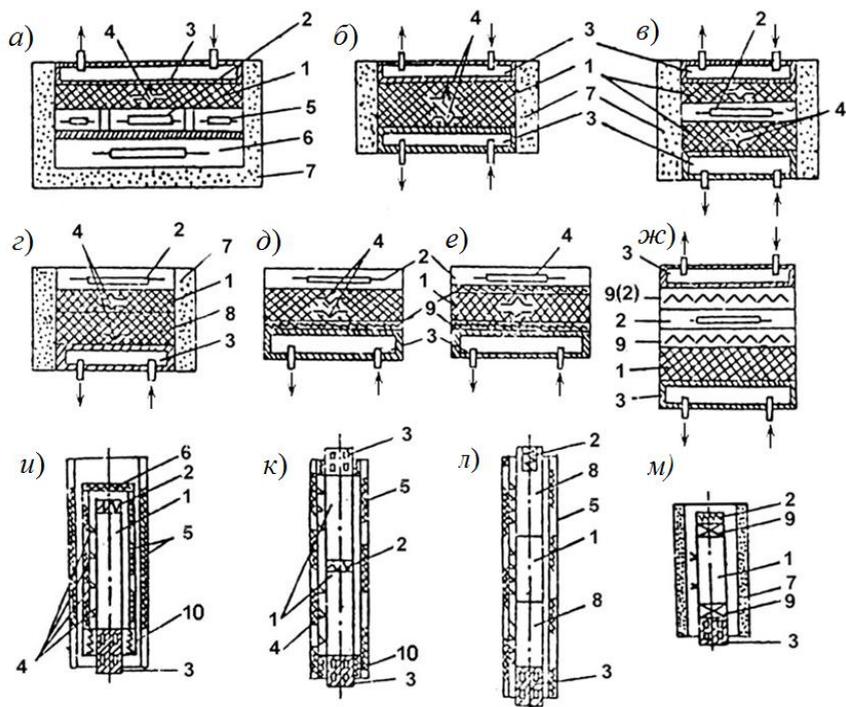
Для измерения разности температуры в качестве ПТ чаще применяют две термопары, спаи которых вмонтированы либо в поверхности самого образца, либо в прилегающие к

образцу поверхности нагревателя и холодильника. Во втором случае необходимо особенно заботиться о хорошем контакте между соприкасающимися поверхностями. При исследовании неэлектропроводного материала целесообразно использовать дифференциальную схему соединения термопар для обеспечения большей точности [4.7]. Измерение плотности теплового потока через образец выполняют либо калориметрическим способом, при котором измеряют температуру рабочей жидкости на входе и выходе калориметрической ячейки и расход ее в течение опыта, либо специальным устройством – тепломером (ПТП).

Метод бесконечного плоского слоя, применяемый обычно для исследования неметаллических материалов, можно использовать и для металлов. Исходя из того, что коэффициент теплопроводности металлов имеет большие значения, а исследуемый образец в направлении переноса теплоты должен иметь перепад температуры, достаточный для его измерения, размеры образца в направлении теплового потока должны быть значительными. В связи с этим образцу придается вытянутую форму стержня или цилиндра, длина которого должна быть не менее 15-ти диаметров [4.6]. Один из концов стержня нагревают, как правило, электрическим током, другой охлаждают. Боковую поверхность тщательно теплоизолируют, чтобы радиальный тепловой поток в образце был пренебрежимо малым. Тогда тепловой поток через образец можно считать однонаправленным, а коэффициент теплопроводности вычислять по формуле (4.2).

Различие в способах нагрева и охлаждения, организации одномерности теплового потока и определения его значения, особенности эксперимента при низких, умеренных и высоких значениях температуры, влажности и давления, а также большое разнообразие исследуемых материалов способствовали тому, что к настоящему времени имеется множество конструктивных решений тепловой ячейки прибора, реализующего стационарный метод пластины, что отражено в мно-

гочисленных публикациях [4.8 – 4.11]. На рисунке 4.1 представлены принципиальные измерительные схемы тепловых ячеек стационарных приборов для измерения коэффициента теплопроводности методом одномерного теплового потока.



1 – исследуемый образец; 2 – нагреватель рабочий; 3 – холодильник; 4 – измерители температуры; 5 – боковой компенсационный нагреватель; 6 – торцевой компенсационный нагреватель; 7 – теплоизоляционный кожух; 8 – эталонный образец; 9 – тепломер; 10 – охранный нагреватель

Рис. 4.1 – Принципиальные схемы тепловых ячеек стационарных приборов, выполненных по методу одномерного теплового потока

Благодаря потенциальным возможностям стационарного метода пластины, то есть одномерного теплового потока, именно ему отдано предпочтение за рубежом. При это приборы, выполненные с хорошо защищенными поверхностями тепловой ячейки для неактуальных направлений теплового

потока, получившие название приборов с «защищенной горячей плитой» («guarded hot plate apparatus»), стали основным средством измерений для получения высокоточных результатов и для метрологической аттестации образцов эталонных материалов [4.12]. Схемы, приведенные на рисунке 4.2, распространяются на плоские приборы, выполненные по методу защищенной горячей плиты в симметричном исполнении (*a* – с двумя исследуемыми образцами) и в асимметричном (*б* – с одним образцом).

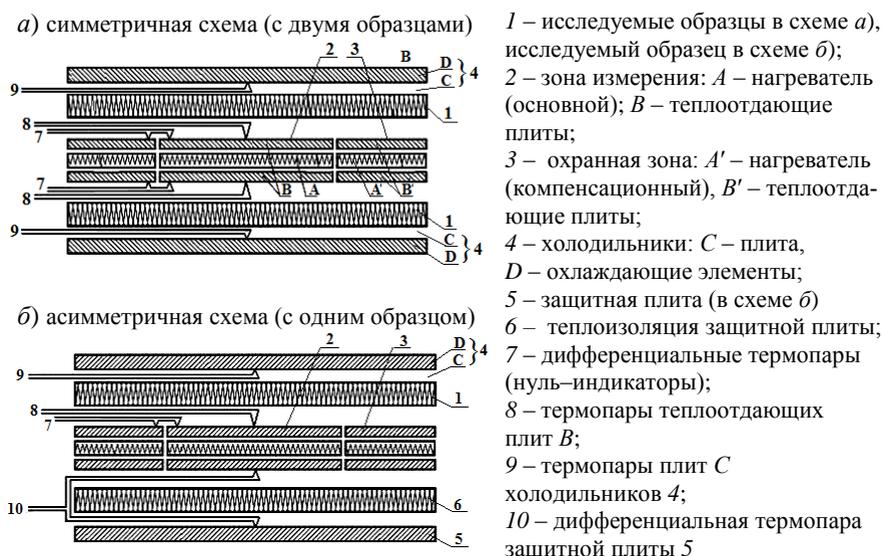


Рис. 4.2. Принципиальные схемы конструкции плоского стационарного прибора для измерения коэффициента теплопроводности методом защищенной горячей плиты [4.12]

В симметричном приборе защищенная горячая плита – измерительная зона 2, расположенная между двумя идентичными исследуемыми образцами 1, состоит из центрального нагревателя, окруженного по периметру охраняемым нагревателем. Каждый нагреватель снабжен поверхностными металлическими пластинами. Тепловой поток от центрального

нагревателя проходит через образцы 1 в направлении к охлаждающим элементам холодильников.

В асимметричном приборе на месте второго образца находится узел, препятствующий тепловому потоку от центрального нагревателя в этом направлении. При этом разность температуры в неактуальных для теплового потока направлениях, контролируемая дифференциальными термодарами, поддерживается равной нулю либо пассивно слоем высокоэффективного теплоизолятора, либо активно за счет работы охранных нагревателей.

Основные ограничения при работе с такими приборами состоят в трудностях непрерывного поддержания однонаправленного теплового потока с постоянной плотностью, точных измерений подаваемой на центральный нагреватель мощности, температуры и толщины образца, а также по соблюдению максимальной идентичности структуры, толщины и качества поверхностей двух образцов в случае симметричного прибора. Кроме того, большое внимание следует уделять минимизации контактного теплового сопротивления.

Согласно [4.12] в приборах по методу защищенной горячей плиты поперечный размер образца должен быть от 0,3 до 0,5 м. При исследовании гомогенного материала он может быть уменьшен до 0,2 м, а при большой толщине материала – увеличен до 1 м. Предел допускаемой относительной погрешности при комнатной температуре составляет 2%, во всем температурном диапазоне – 5%.

#### **4.1.2 Особенности теплометрического метода пластины**

С появлением ПТП вида вспомогательной стенки получили развитие теплометрический метод и реализующие его приборы для измерения коэффициента теплопроводности. Этот метод стал основой нового направления в теплофизическом приборостроении – теплометрического [1\*, 4.13 – 4.19], также распространенным в теплофизической практике, как и

применяемый метод «защищенной горячей плиты» (особенно в США и европейских странах) [4.12].

Сущность теплотметрического метода измерения коэффициента теплопроводности на плоском образце заключается в том, что информацию о тепловом потоке или его плотности получают непосредственно по показаниям ПТП вида вспомогательной стенки, входящего в конструкцию прибора наряду с преобразователями температуры (ПТ) и, при необходимости, других величин. Это направление оказалось особенно успешным применительно к измерениям в условиях установившегося теплового состояния в образце, имитирующем бесконечный плоский слой.

Создав стационарный тепловой режим в плоском образце с известной толщиной  $h$ , достаточно измерить термоэлектрическим ПТП плотность теплового потока в направлении нормали к изотермическим поверхностям образца и разность температуры  $\Delta T$  между ними также термоэлектрическим ПТ (дифференциальной термопарой). В этом случае расчетная формула для теплотметрического прибора, выполненного по методу пластины, имеет вид:

$$\chi = h \cdot q / \Delta T = h \cdot K_{ПТП} \cdot E_{ПТП} \cdot S_{ПТ} / \Delta E_{ПТ}, \quad (4.4)$$

где  $K_{ПТП}$  и  $E_{ПТП}$  – коэффициент преобразования и сигнал ПТП;

$S_{ПТ}$  и  $\Delta E_{ПТ}$  – чувствительность и сигнал дифференциальной термопары.

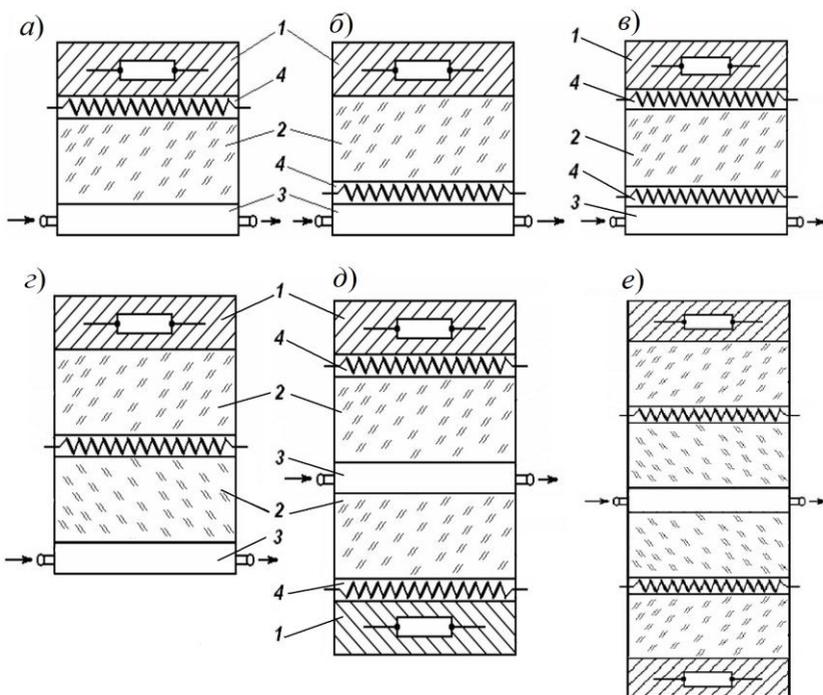
Так как на территории бывшего СССР достаточно много находилось в обращении плоских приборов, включая теплотметрические, для этого направления еще в 50-е годы прошлого столетия была разработана стандартная методика определения коэффициента теплопроводности, распространяющаяся главным образом на строительные и теплоизоляционные материалы (ГОСТ 7076-54), которая в дальнейшем была усовершенствована в последующих редакциях нормативного документа. Последняя редакция этого стандарта ГОСТ 7076-99 [4.20] является межгосударственным стандартом, в том числе

признанным в Украине. Однако, позже в Украине был разработан национальный стандарт ДСТУ Б.В.27–105 [4.21] и ДСТУ ISO 8301 [4.22], гармонизированные со стандартами [4.21] и [4.23], соответственно.

К настоящему времени и в Украине, и в Российской Федерации, и за рубежом имеется ряд нормативных документов на методы определения ТФХ различных материалов и изделий, преимущественно распространяющихся на теплопроводность и тепловое сопротивление теплоизоляционных и строительных материалов [4.12; 4.20 – 4.31].

Методы теплотрический и защищенной горячей плиты регламентированы в международных стандартах ISO 8301 [4.23] и ISO 8302 [4.12], с которыми позже были гармонизированы национальные стандарты Украины: ДСТУ БВ.2.7–105 [4.20] ДСТУ ISO 8301 [4.22] и ДСТУ ISO 8302 [4.24]. Согласно этим стандартам, искомую характеристику (коэффициент эффективной теплопроводности  $\chi_{\text{эф}}$  или тепловое сопротивление  $R$ ) определяют в установившемся тепловом режиме на плоском образце в форме квадрата или диска относительно больших размеров. Указанными нормативными документами рекомендовано при создании плоского прибора для измерения коэффициента эффективной теплопроводности и теплового сопротивления использовать схемы, представленные на рис. 4.2 для метода защищенной горячей плиты [4.24] и на рисунке 4.3 – для теплотрического метода [4.21, 4.22].

Как видно на рис. 4.3, теплотрический прибор, выполняемый по асимметричной схеме, оснащают одним ПТП, измеряющим плотность теплового потока либо на входе (см. рис. 4.3а), либо на выходе (см. рис. 4.3б) образца. В приборе по симметричной схеме, оснащенном двумя ПТП (см. рис. 4.3в), плотность теплового потока измеряют одновременно на входе и выходе образца. Теплотрические приборы по схемам г, д и е не нашли такого широкого распространения, как приборы, выполненные по схемам а, б и в.



1 – нагреватель; 2 – образец; 3 – холодильник; 4 – ПТП

Рис. 4.3. Принципиальные схемы плоских теплотметрических приборов для измерения коэффициента теплопроводности или теплового сопротивления: *а, б* – асимметричные схемы; *в* – симметричная схема с одним образцом и двумя ПТП; *г* – симметричная схема с двумя образцами и одним ПТП; *д, е* – двойные приборы

Если прибор для измерения теплопроводности оснащен термоэлектрическими преобразователями ПТП, соответствующими стандартам [1.4] и ПТ по [1.5], то сокращается количество необходимых вторичных приборов, упрощается процесс измерений и существенно уменьшается продолжительность работы на приборе по сравнению со временем наступления стационарного теплового состояния. Эта особенность теплотметрического метода была отмечена и исследована в работе Т.Г. Грищенко [4.18] (см. § 4.1.3).

### 4.1.3 Динамические характеристики теплометрических приборов

В теплометрическом приборе имеются одновременно, как правило, два термоэлектрических преобразователя (ПТП и ПТ), каждый со своей постоянной времени. Ни одна из них по отдельности не может представлять динамическую характеристику прибора в целом, так как время выхода прибора на установившийся режим определяется выходом на постоянное значение отношения плотности теплового потока к соответствующей разности температуры, то есть отношения показаний ПТП и ПТ. Постоянная времени теплометрического прибора была исследована экспериментально и результаты приведены на рисунке 4.4 [4.18].

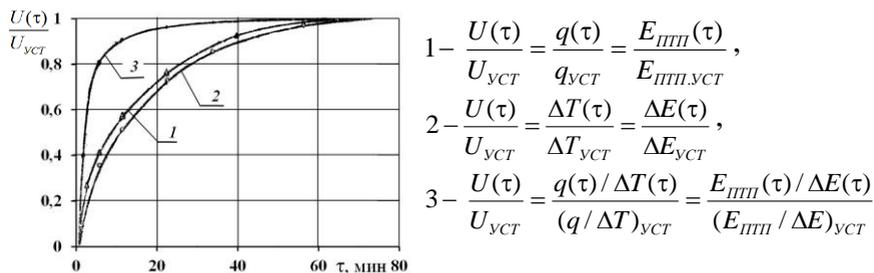


Рис. 4.4. Графики выхода на установившиеся значения показаний первичных преобразователей теплометрического прибора:  
1 – ПТП, 2 – ПТ, 3 – их отношения

Как видно из рис. 4.4, на установившиеся значения значительно быстрее выходит отношение  $E_{ПТП} / \Delta E_{ПТ}$  одновременно измеряемых показаний ПТП и ПТ (график 3), чем отдельно рассмотренные отношения показаний ПТП (график 1) и ПТ (график 2). Это открыло возможность применять приборы плоского типа с термоэлектрическими преобразователями (ПТП и ПТ) для экспрессных измерений, что весьма актуально при массовых технических измерениях.

На более высоком теоретическом и экспериментальном уровне исследование динамических особенностей приборов

плоского типа осуществлено З.А. Буровой в работе [4.32]. При этом получена теоретическая оценка возможной продолжительности процесса измерения на приборах, выполненных по наиболее распространенным схемам (см. рис.4.3, а, б, в), по сравнению с временем достижения установившихся значений показаний ПТП и ПТ. При этом использованы готовые аналитические решения [4.33] известного нестационарного уравнения теплопроводности [2.17; 4.34] при соответствующих граничных условиях. Всего рассмотрено четыре случая, включая для сравнения динамических характеристик результаты дополнительного исследования прибора по методу защищенной горячей плиты.

**Случай 1** – для прибора по схеме рис. 4.1а модель теплообмена представлена на рисунке 4.5.

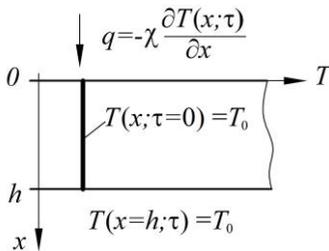


Рис. 4.5. Модель теплообмена в приборе по методу защищенной горячей плиты (в симметричном исполнении)

Образец исследуемого материала рассмотрен как бесконечная пластина толщиной  $h$  с коэффициентом теплопроводности  $\chi$ , в которой происходит теплообмен при следующих краевых условиях:

$$\begin{cases} T(x; \tau = 0) = T_0 = const, \\ -\chi \cdot \frac{\partial T(x = 0; \tau)}{\partial x} = q = const, \\ T(x = h; \tau) = T_0 \end{cases} \quad (4.5)$$

Готовые аналитические решения [4.33], полученные в безразмерных координатах  $\eta = x/h$  и  $Fo = a \cdot \tau / h^2$ , имеют вид, соответственно:

- для температуры образца:

$$T(x; \tau) = T_0 + \frac{q \cdot h}{\chi} \cdot \Theta_1, \quad (4.6)$$

где  $\Theta_1$  – безразмерный параметр температуры, равный

$$\Theta_1 = 1 - \eta - \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cdot \sin(\mu_n \cdot (1 - \eta)) \cdot \exp - \mu_n^2 \cdot Fo) \quad (4.7)$$

с коэффициентами разложения в ряд  $A_n = (-1)^{n+1} \cdot 2/\mu_n^2$  и  $\mu_n = (2n - 1) \cdot \pi/2$ ;

- для градиента температуры:

$$\partial T(x; \tau) / \partial x = -G_1 \cdot q / \chi, \quad (4.8)$$

где  $G_1$  – безразмерный параметр градиента температуры, равный

$$G_1 = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} (C_n \cdot \cos(\mu_n \cdot (1 - \eta)) \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo)) \quad (4.9)$$

с коэффициентами разложения в ряд  $C_n = (-1)^{n+1} \cdot 2/\mu_n$ .

Исходя из того, что измеряемые (текущие) значения коэффициента теплопроводности образца определяются соотношением

$$\chi_{ИЗМ} = q \cdot h / (T(x; \tau) - T_0), \quad (4.10)$$

перепад температуры  $T(x; \tau) - T_0$  с учетом выражения (4.6) записывается в виде

$$T(x; \tau) - T_0 = \Theta_1 \cdot q \cdot h / \chi. \quad (4.11)$$

Исходя из формул (4.10) и (4.11), функции отношения  $\chi_{ИЗМ} / \chi_{УСТ}$  для рассмотренного случая 1 имеет вид:

$$f_1(Fo) = \chi_{ИЗМ} / \chi_{УСТ} = \Theta_1^{-1}. \quad (4.12)$$

**Случай 2** – для прибора, оснащенного одним ПТП, установленным над образцом (см. рис. 4.3а), модель теплообмена представлена на рисунке 4.6.

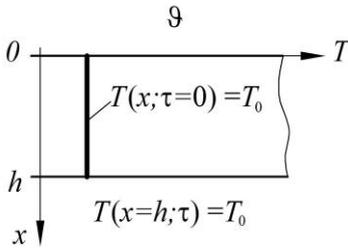


Рис. 4.6. Модель теплообмена в приборе, оснащённом одним ПТП, установленным над образцом

В данном случае теплообмен рассмотрен для бесконечной пластины с начальным условием, как в случае 1, но с граничным условием III-го рода на поверхности образца, где установлен ПТП:

$$\begin{cases} -\chi \cdot \frac{\partial T(x=0; \tau)}{\partial x} = \alpha \cdot (\Theta - T(x=0; \tau)), \\ T(x=h; \tau) = T_0, \end{cases} \quad (4.13)$$

где  $\alpha = R_{ПТП}^{-1}$  – коэффициент теплообмена поверхности образца с прилегающей средой – установленным ПТП, температура которого принята постоянной (то есть при  $h=0$   $T_{ПТП} = \Theta = const$ ).

Аналитические решения уравнения теплопроводности для этого случая, полученные в безразмерных координатах и при числе Био, равном  $Bi = h \cdot \alpha / \chi = h / (\chi \cdot R_{ПТП})$ , имеют вид, соответственно:

- для температуры образца:

$$T(x; \tau) = T_0 + \Theta_2 \cdot (\Theta - T_0), \quad (4.14)$$

где  $\Theta_2$  – безразмерный параметр температуры, равный

$$\Theta_2 = \frac{(1-\eta) \cdot Bi}{1+Bi} - \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cdot \sin(v_n \cdot (1-\eta)) \cdot \exp(-v_n^2 \cdot Fo)) \quad (4.15)$$

с коэффициентами разложения в ряд

$$A_n = 2Bi / ((v_n^2 + Bi^2 + Bi) \cdot \sin v_n)$$

и корнями  $v_n$  характеристического уравнения  $tg v_n = v_n / Bi$ ;

- для градиента температуры:

$$\frac{\partial T(x; \tau)}{\partial x} = \frac{\vartheta - T_0}{h} \cdot G_2, \quad (4.16)$$

где  $G_2$  – безразмерный параметр градиента температуры, равный

$$G_2 = \frac{Bi}{Bi + 1} - \sum_{n=1}^{\infty} (C_n \cdot \cos(v_n \cdot (1 - \eta)) \cdot \exp(-v_n^2 \cdot Fo)) \quad (4.17)$$

с коэффициентами разложения в ряд  $C_n = A_n \cdot v_n$ .

Исходя из формулы (4.10), для измеренного коэффициента теплопроводности  $\chi_{ИЗМ}$  при перепаде температуры  $T(x; \tau) - T_0 = \Theta_2 \cdot (\vartheta - T_0)$ , где с учетом (4.16) разность  $\vartheta - T_0 = -q \cdot h / (\chi \cdot G_2)$ , получена формула для функции искомого отношения  $\chi_{ИЗМ} / \chi_{УСТ}$  для рассмотренного случая 2:

$$f_2(Fo, Bi) = \chi_{ИЗМ} / \chi_{УСТ} = -G_2 / \Theta_2. \quad (4.18)$$

**Случай 3** – для прибора, оснащенного одним ПТП, установленным под образцом (см. рис. 4.3б), модель теплообмена представлена на рисунке 4.7.

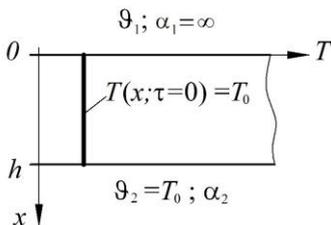


Рис. 4.7. Модель теплообмена в приборе, оснащенный одним ПТП, установленным под образцом

Теплообмен в этом случае происходит при том же начальном условии, а граничные условия имеют вид:

$$\begin{cases} -\chi \cdot \frac{\partial T(x=0; \tau)}{\partial x} = \alpha_1 \cdot (\vartheta_1 - T(x=0; \tau)), & \vartheta_1 = const, \\ -\chi \cdot \frac{\partial T(x=h; \tau)}{\partial x} = \alpha_2 \cdot (\vartheta_2 - T(x=h; \tau)), & \vartheta_2 = T_0, \end{cases} \quad (4.19)$$

при этом  $\alpha_1 = \infty$ ,  $\alpha_2 = R_{ПТП}^{-1}$ , которым соответствуют числа Био, равные  $Bi_1 = \infty$ ,  $Bi_2 = h / (\chi \cdot R_{ПТП})$ .

Готовые аналитические решения для рассматриваемого случая [4.33] имеют вид, соответственно:

- для температуры образца:

$$T(x; \tau) = T_0 + \frac{1 + Bi_2 \cdot (1 - \eta)}{1 + Bi_2} \cdot (\vartheta_1 - T_0) \cdot \Theta_3, \quad (4.20)$$

где  $\Theta_3$  – безразмерный параметр температуры, равный

$$\Theta_3 = \frac{1}{1 + Bi_2} - \sum_{n=1}^{\infty} \left( A_n \cdot \cos(\xi_n \cdot (1 - \eta)) + \frac{Bi_2}{\xi_n} \cdot \sin(\xi_n \cdot (1 - \eta)) \cdot \exp(-\xi_n^2 \cdot Fo) \right) \quad (4.21)$$

с коэффициентами разложения в ряд

$$A_n = \left( \frac{\sin \xi_n \cdot \cos \xi_n + \xi_n + \frac{Bi_2}{\xi_n} \cdot \sin \xi_n}{2 \sin \xi_n} \right)^{-1} \text{ и корнями } \xi_n \text{ характеристического уравнения } ctg \xi_n = -Bi_2 / \xi_n ;$$

- для градиента температуры на поверхности  $x = h$ :

$$\frac{\partial T(x; \tau)}{\partial x} = - \frac{Bi_2}{1 + Bi_2} \cdot \frac{\vartheta_1 - T_0}{h} \cdot \Theta'_3, \quad (4.22)$$

$$\text{где } \Theta'_3 = \Theta_3(\eta = 1) = \frac{1}{1 + Bi_2} - \sum_{n=1}^{\infty} \left( A_n \cdot \exp(-\xi_n^2 \cdot Fo) \right) \quad (4.23)$$

Исходя из формулы (4.10) для измеренного коэффициента теплопроводности  $\chi_{ИЗМ}$  и выражений, полученных из (4.20) при перепаде температуры

$$T(x; \tau) - T_0 = \frac{1 + Bi_2 \cdot (1 - \eta)}{1 + Bi_2} \cdot (\vartheta_1 - T_0) \cdot \Theta_3, \text{ где с учетом выражения}$$

(4.22) разность  $\vartheta_1 - T_0 = -q \cdot h(1 + Bi_2) / (\chi \cdot Bi_2 \cdot \Theta'_3)$ , полу-

чена формула для функции искомого отношения  $\chi_{ИЗМ} / \chi_{УСТ}$  для рассмотренного случая 3:

$$f_3(Fo, Bi) = \chi_{ИЗМ} / \chi_{УСТ} = - \frac{Bi_2}{1 + Bi_2 \cdot (1 - \eta)} \cdot \frac{\Theta'_3}{\Theta_3}. \quad (4.24)$$

**Случай 4** – для симметричного прибора, оснащенного двумя ПТП, (см. рис. 4.3в), модель теплообмена представлена на рисунке 4.8.

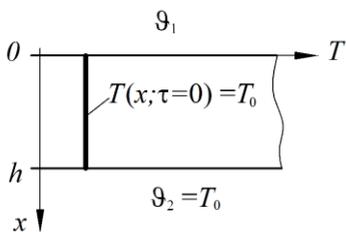


Рис. 4.8. Модель теплообмена в приборе, оснащенном двумя ПТП, установленным по обе стороны образца

Теплообмен в рассматриваемом случае происходит при следующих граничных условиях:

$$\begin{cases} -\chi \cdot \frac{\partial T(x=0; \tau)}{\partial x} = \alpha_1 \cdot (\vartheta_1 - T(x=0; \tau)), & \vartheta_1 = const, \\ -\chi \cdot \frac{\partial T(x=h; \tau)}{\partial x} = \alpha_2 \cdot (\vartheta_2 - T(x=h; \tau)), & \vartheta_2 = T_0, \end{cases} \quad (4.25)$$

при этом принято допущение, что  $\alpha_1 = \alpha_2 = R_{ППП}^{-1}$ .

Аналитические решения уравнения теплопроводности для этого случая, полученные в безразмерных координатах при одинаковых числах Био с обеих сторон образца, имеют вид, соответственно:

- для температуры образца:

$$T(x; \tau) = T_0 + (\vartheta_1 - T_0) \cdot \Theta_4, \quad (4.26)$$

где  $\Theta_4$  – безразмерный параметр температуры, равный

$$\Theta_4 = \frac{1 + Bi \cdot (1 - \eta)}{2 + Bi} - \sum_{n=1}^{\infty} \left( A_n \cdot \cos(\zeta_n \cdot (1 - \eta)) + \frac{Bi}{\zeta_n} \cdot \sin(\zeta_n \cdot (1 - \eta)) \cdot \exp(-\zeta_n^2 \cdot Fo) \right) \quad (4.27)$$

с коэффициентами разложения в ряд

$$A_n = \left( \cos \zeta_n + \frac{\zeta_n}{\sin \zeta_n} + Bi \cdot \frac{\sin \zeta_n}{\zeta_n} \right)^{-1} \text{ и корнями } \zeta_n \text{ характери-}$$

стического уравнения  $tg \zeta_n = \zeta_n \cdot \frac{2Bi}{\zeta_n^2 - Bi^2}$ ;

- для градиента температуры:

$$\frac{\partial T(x; \tau)}{\partial x} = -\frac{\vartheta_1 - T_0}{h} \cdot G_4, \quad (4.28)$$

где  $G_4$  – безразмерный параметр градиента температуры, равный

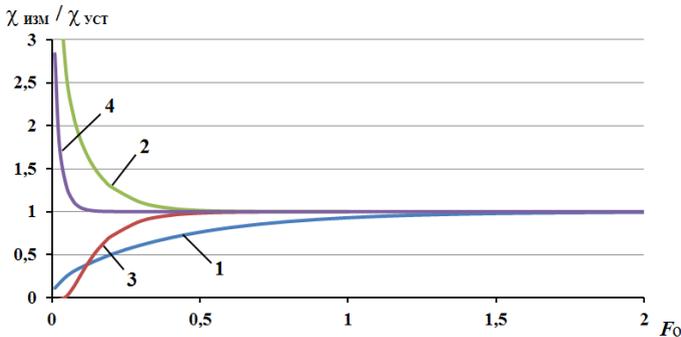
$$G_4 = \frac{Bi}{2 + Bi} + \sum_{n=1}^{\infty} \left( C_n \cdot \sin(\zeta_n \cdot (1 - \eta)) - \frac{Bi}{\zeta_n} \cdot \cos(\zeta_n \cdot (1 - \eta)) \cdot \exp(-\zeta_n^2 \cdot Fo) \right) \quad (4.29)$$

с коэффициентами разложения в ряд  $C_n = A_n / \zeta_n$ .

Исходя из формулы (4.10) перепад температуры равен  $T(x; \tau) - T_0 = \Theta_4 \cdot (\vartheta_1 - T_0)$ , где с учетом выражения (4.27) и разности  $\vartheta_1 - T_0 = -q \cdot h / (\chi \cdot G_4)$ , получена формула для функции искомого отношения  $\chi_{ИЗМ} / \chi_{УСТ}$  для рассмотренного случая 4:

$$f_4(Fo, Bi) = \chi_{ИЗМ} / \chi_{УСТ} = -G_4 / \Theta_4. \quad (4.30)$$

По полученным формулам (4.12), (4.18), (4.24) и (4.30) выполнены расчеты, результаты которых систематизированы на рисунке 4.9, где представлены графики выхода на установившийся режим отношения  $\chi_{ИЗМ}(\tau) / \chi_{ОБР}(\infty)$  для приборов, собранных по указанным схемам.



- 1 – прибор по методу защищенной горячей плиты (симметричная схема);
- 2 – прибор с одним ПТП, установленным над образцом (асимметричная схема);
- 3 – прибор с одним ПТП, установленным под образцом (асимметричная схема);
- 4 – прибор с двумя ПТП (симметричная схема)

Рис. 4.9. Функции выхода на установившийся режим для приборов, выполненных по различным схемам

Из сравнения графиков рис. 4.9 очевидно, что наибольшей экспрессностью обладает прибор, выполненный по симметричной схеме (с двумя ПТП), тогда как наибольшей длительностью выхода на стационарный режим обладает прибор, выполненный по методу защищенной горячей плиты.

Результаты экспериментальных исследований на этих приборах образцов различных теплоизоляционных и строительных материалов, коэффициент теплопроводности которых составляет от 0,04 Вт/(м·К) у минеральной ваты до 2,9 Вт/(м·К) у гранита при толщине образца 50 мм, приведены в таблице 4.1.

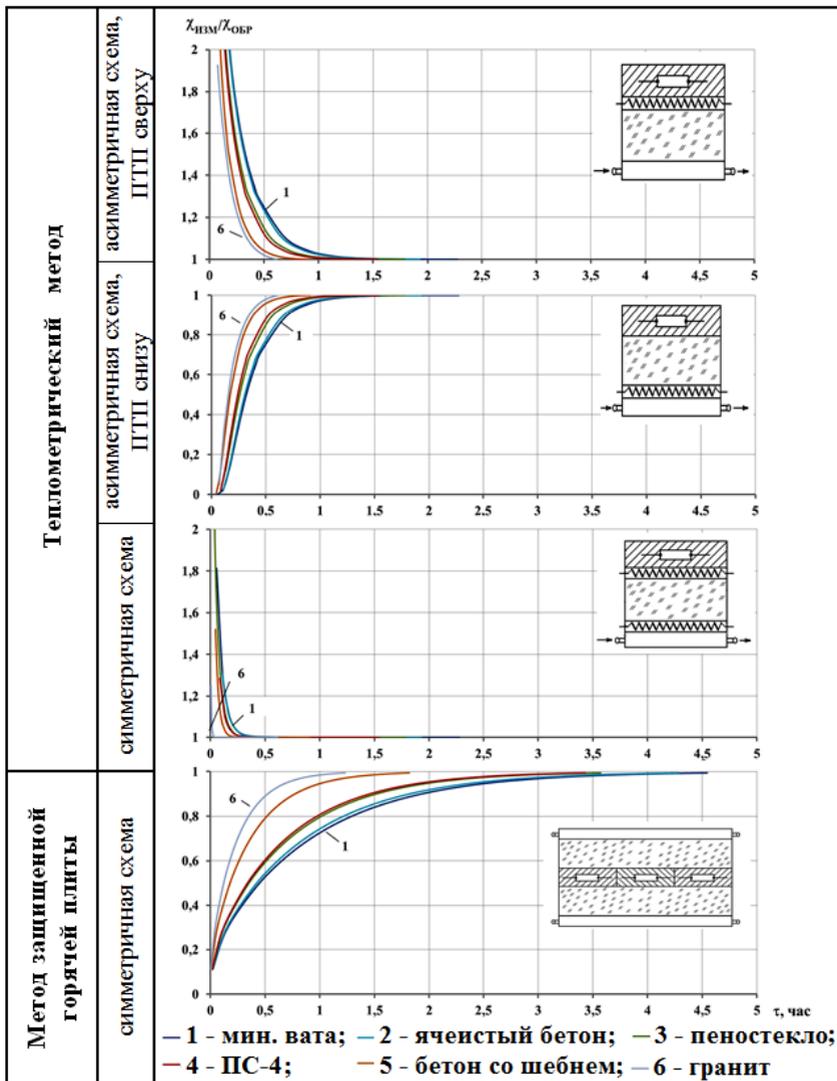
Из полученных результатов следует, что длительность измерений до наступления стационарного состояния уменьшается для образцов с большей теплопроводностью материала. Более экспрессными оказались теплотметрические приборы по сравнению с прибором по методу защищенной горячей плиты, так как их время выхода на установившийся режим не превышает (1 – 1,5) часа, при этом наиболее производительным является прибор, выполненный по симметричной схеме (с двумя ПТП).

#### **4.1.4 Искажения теплового и температурного полей в теплотметрических приборах плоского типа**

*А – Обоснование корректности измерений при асимметричном исполнении прибора*

При реализации симметричного прибора следует учитывать, что при явном достоинстве теплотметрического метода, заключающемся в непосредственном измерении поверхностной плотности теплового потока, он обладает таким недостатком, как возможное несоответствие действительного теплового потока, прошедшего через образец, измеренному посредством ПТП, из-за неэффективной защиты боковой поверхности системы «ПТП<sub>1</sub> – образец – ПТП<sub>2</sub>». Кроме того, ТФХ ПТП и исследуемого материала, как правило, различны, что также приводит к искажениям температурного и теплового

Таблица 4.1. Графики выхода на стационарный режим приборов, выполненных по различным схемам, при исследовании образцов строительных материалов



полей в образце, что нельзя не учитывать. Исходя из этого, теплометрические приборы, как правило, выполняют с соблюдением принципа одномерности температурного поля, что корректно только в случае, когда радиальная составляющая вектора теплового потока пренебрежимо мала по сравнению с его осевой составляющей.

При малых значениях коэффициента теплопроводности материала образца концепция, основанная на одномерности температурного поля, при некоторых условиях может привести к ощутимым искажениям получаемых результатов. Поэтому в создаваемых приборах часто прибегают к организации мер охранного и компенсационного назначения для обеспечения одномерности теплового потока.

В работе [4.18] было проведено аналитическое исследование плоского теплометрического прибора модели ИТ-3 в асимметричном исполнении, цель которого состояла в определении области распространения искажений и степени их влияния на погрешность измерения плотности теплового потока. Для этого рассмотрено осесимметричное распределение температуры и плотности теплового потока в образце, имеющем форму короткого цилиндра высотой  $h_{ОБР}$  и диаметром  $2r_{ОБР}$ . Модель теплообмена в системе «нагреватель – образец – холодильник» приведена на рисунке 4.10.

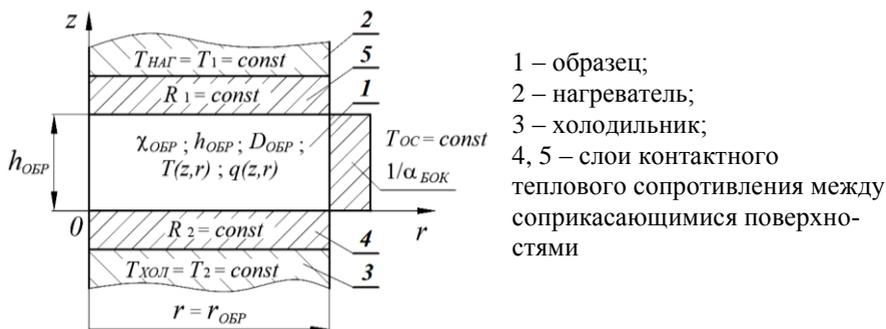


Рис. 4.10. Модель теплообмена в системе «нагреватель – образец – холодильник» при определении коэффициента теплопроводности

На торцевых поверхностях образца с тепловым сопротивлением  $R_{ОБР} = h_{ОБР} / \chi_{ОБР}$  имеется тепловое сопротивление между образцом и контактирующими с ним поверхностями нагревателя ( $R_1$ ) и холодильника ( $R_2$ ), температура которых постоянна:  $T_{НАГ} = T_1 = const$  и  $T_{ХОЛ} = T_2 = const$ .

На боковой поверхности цилиндра происходит теплообмен с ОС, температура которой  $T_{ОС} = const$ , при коэффициенте теплообмена  $\alpha_{БОК}$ . При этом сопротивление теплоотдаче  $R_{БОК} = 1/\alpha_{БОК}$ .

При независимых от температуры ТФХ образца и осевой симметрии стационарное распределение температуры в образце описывается двухмерным уравнением Лапласа [2.17, 4.34] в цилиндрических координатах  $z$  и  $r$ :

$$\frac{\partial^2 T(z, r)}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(z, r)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(z, r)}{\partial r^2} = 0 \quad (4.31)$$

с такими граничными условиями:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \chi \cdot \frac{\partial T(z, r)}{\partial z} = \frac{1}{R_1} \cdot (T_1 - T(z, r)) & \text{при } z = h, \\ \chi \cdot \frac{\partial T(z, r)}{\partial z} = \frac{1}{R_2} \cdot (T(z, r) - T_2) & \text{при } z = 0, \\ \chi \cdot \frac{\partial T(z, r)}{\partial r} = \alpha_{БОК} \cdot (T_{ОС} - T(z, r)) & \text{при } r = r_{ОБР}, \\ \frac{\partial T(z, r)}{\partial r} = 0 & \text{при } r = 0. \end{array} \right. \quad (4.32)$$

При переходе к безразмерным координатам  $\xi = z/h_{ОБР}$ ,  $\rho = r/r_{ОБР}$  и безразмерной форме температуры  $\vartheta = (T(z, r) - T_{ОС})/T_{ОС}$  с введением безразмерных параметров:  $\gamma = D_{ОБР}/h_{ОБР} = 2r_{ОБР}/h_{ОБР}$ ;  $H_i = h_{ОБР}/(\chi_{ОБР} \cdot R_i) = R_{ОБР}/R_i$  ( $i = 1; 2$ ) и числа Био  $Bi_{БОК} = \alpha_{БОК} \cdot r_{ОБР}/\chi_{ОБР}$  поставленная задача записывается в таком виде:

$$\frac{\chi^2}{4} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta(\xi; \rho)}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \vartheta(\xi; \rho)}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 \vartheta(\xi; \rho)}{\partial \rho^2} = 0 \quad (4.33)$$

при  $0 \leq \xi \leq 1$  и  $0 \leq \rho \leq 1$ ;

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{\partial \vartheta(\xi; \rho)}{\partial \xi} = \frac{R_{OБP}}{R_1} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta(\xi; \rho)) & \text{при } \xi = 1, \\ \frac{\partial \vartheta(\xi; \rho)}{\partial \xi} = \frac{R_{OБP}}{R_2} (\vartheta(\xi; \rho) - \vartheta_2) & \text{при } \xi = 0, \\ \frac{\partial \vartheta(\xi; \rho)}{\partial \rho} + Bi_{BOK} \cdot \vartheta(\xi; \rho) = 0 & \text{при } \rho = 1, \\ \frac{\partial \vartheta(\xi; \rho)}{\partial \rho} = 0 & \text{при } \rho = 0. \end{array} \right. \quad (4.34)$$

Решение этой задачи, полученное методом интегральных преобразований [4.35], выполненных по переменной  $\rho$  вследствие однородности граничных условий (4.33) и (4.34), имеет вид:

$$\vartheta(\xi; \rho) = \frac{2 \cdot Bi_{BOK}^2}{\alpha_{BOK} \cdot R_1} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(v_n \cdot \rho)}{v_n \cdot J_0(v_n) \cdot (Bi_{BOK}^2 + v_n^2)} \cdot P_n(\xi), \quad (4.35)$$

где

$$\begin{aligned} P_n(\xi) = & \left[ \vartheta_1 \cdot (sh(2v_n \cdot \xi/\gamma) + D_{n,2} \cdot ch(2v_n \cdot \xi/\gamma)) + \right. \\ & \left. + \vartheta_2 \cdot (sh(2 \cdot v_n (1-\xi)/\gamma) + D_{n,1} \cdot ch(2 \cdot v_n (1-\xi)/\gamma)) \right] \times \\ & \times \left[ (D_{n,2} + D_{n,1}^{-1}) sh(2v_n/\gamma) + (1 + D_{n,2} \cdot D_{n,1}^{-1}) \cdot ch(2v_n/\gamma) \right]^{-1}, \quad (4.36) \end{aligned}$$

где  $D_{n,1} = v_n \cdot \alpha_{BOK} \cdot R_1 / Bi_{BOK}$ ,  $D_{n,2} = v_n \cdot \alpha_{BOK} \cdot R_2 / Bi_{BOK}$ ;

$J_0(v_n \cdot L)$  – функции Бесселя, являющаяся ядром интегрального преобразования, а собственные числа  $v_n$  – корни характеристического уравнения [4.36]:

$$v \cdot J'_0(v) + Bi_{BOK} \cdot J_0(v) = 0. \quad (4.37)$$

Для анализа влияния граничных условий на тепловое поле образца рассмотрена функция средней по поверхности

пластины плотности теплового потока  $q_{CP}$  в направлении, перпендикулярном торцевым поверхностям образца. По определению средняя по поверхности плотность теплового потока в этом направлении, записанная в безразмерных координатах, равная

$$q_{CP} = \frac{1}{\pi r^2} \cdot \int_0^r \frac{\partial \vartheta(\xi; \rho)}{\partial \xi} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot d\rho, \quad (4.38)$$

после подстановки частной производной от функции (4.35) по переменной  $\xi$  имеет вид:

$$q_{CP}(\xi; \rho) = \frac{4Bi_{БОК}^2}{\alpha_{БОК} \cdot R_1 \cdot \gamma} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(v_n \cdot \rho)}{v_n \cdot \rho \cdot J_0(v_n) \cdot (Bi_{БОК}^2 + v_n^2)} \cdot P_n(\xi), \quad (4.39)$$

где  $P_n(\xi)$  – по формуле (4.36).

Характер влияния искажений на среднюю плотность теплового потока изучен с помощью безразмерной функции – приведенной средней плотности теплового потока [4.18]:

$$П(\xi'; \rho) = q_{CP}(\xi'; \rho) / q_{CP}(\xi'; \rho'), \quad (4.40)$$

где  $\xi'$  – любое фиксированное сечение по высоте образца;

$\rho'$  – имеет конкретное фиксированное значение,  $\rho' = 0,1$ .

Поскольку все сечения для данной стационарной задачи равноценны, то для упрощения вычислений взято  $\xi' = 0$ , соответствующее сечению, в котором, как правило, устанавливают ПТП при асимметричной схеме исполнения прибора, размещая его, например, как в приборах типа ИТ, под образцом (см. рис. 4.3б).

Значительный объем вычислений предопределил решение задачи на ЭВМ. Программа, реализующая выражение (4.39) и (4.40), предусматривала цикличность вычислений по всем исходным данным и переменным параметрам. Исходные значения температуры  $T_1$  и  $T_2$  проварьированы таким образом, чтобы иметь результаты для нескольких характерных режимов по средней температуре (минус 20; 20; 30; 60 и 100 °С) и температурному градиенту (250; 500; 1000; 2000;

4000; 8000 и 16000 К/м). Толщина образцов была задана рядом: 1; 2; 4; 8; и 16 мм. Изменение числа Био задано вариацией коэффициента теплопроводности материала, отличающимися на порядок ( $\chi = 0,025; 0,25; 2,5$  Вт/(м·К)) при постоянном значении  $\alpha_{\text{БОК}} = 5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , что соответствует теплообмену на боковой поверхности образца свободной конвекцией. Результаты счета по формуле (4.40) систематизированы на рисунках 4.11 и 4.12.

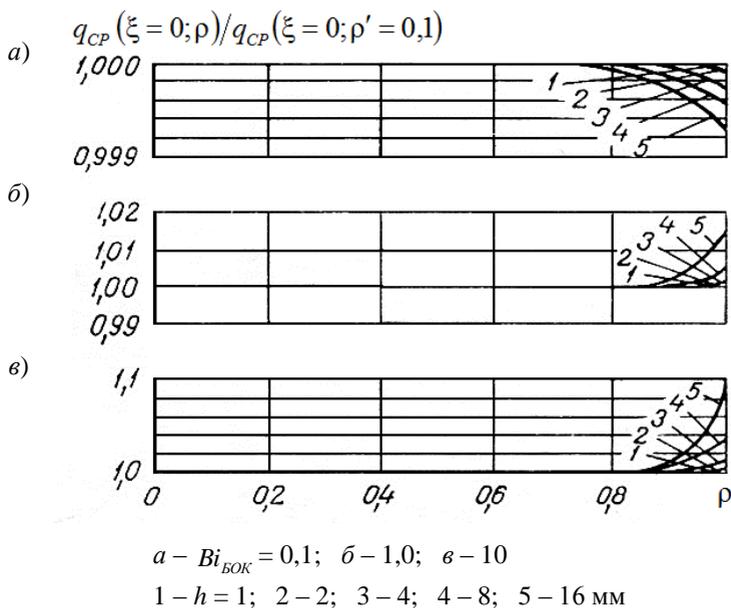


Рис. 4.11. Приведенная средняя плотность теплового потока в зависимости от радиуса образца при вариации его толщины  $h$  и числа  $Bi_{\text{БОК}}$  при средней температуре  $T_{\text{ОБР}} = T_{\text{ОС}} = 20^\circ \text{C}$

Это исследование показало, что относительное изменение плотности теплового потока вдоль радиуса образца при условии равенства средней температуры образца температуре ОС весьма мало зависит от толщины образца и теплообмена его боковой поверхности.

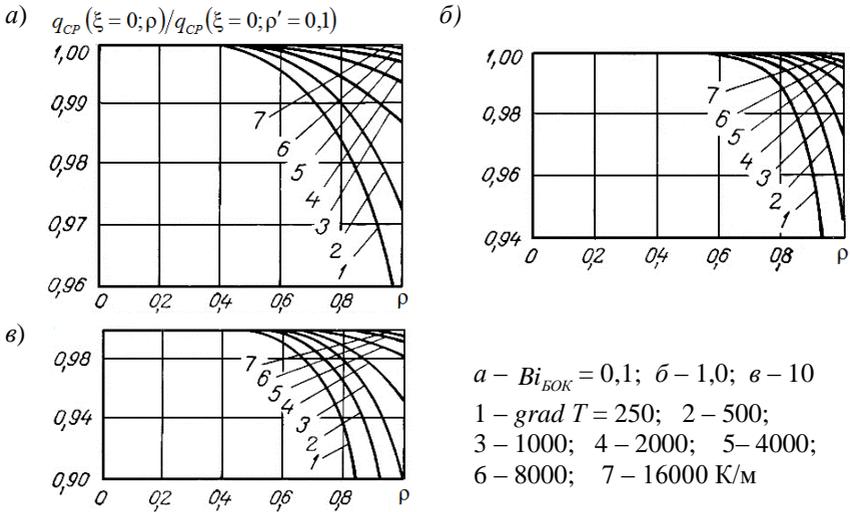
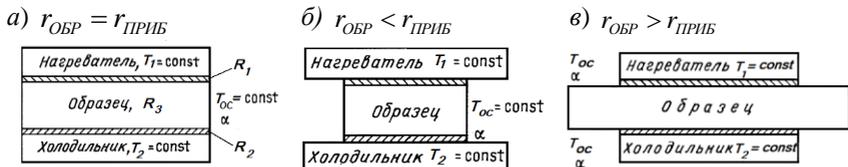


Рис. 4.12. Приведенная средняя плотность теплового потока в зависимости от радиуса образца при вариации градиента температуры  $grad T$  и числа  $Bi_{БОК}$  при средней температуре  $T_{ОБР} = 30$  °С

Как видно на графиках 1 – 7 рис. 4.12, искажения теплового потока вдоль радиуса внутрь образца проникают не далее значения  $\rho = 0,5$  при незначительном отличии температуры образца от окружающей среды. В противном случае искажения теплового поля становятся существенными и проникают внутрь образца довольно далеко, достигая  $\rho = 0,3$  при  $T_{ОБР} = -20$  °С и  $T_{ОБР} = 60$  °С и  $\rho = 0,2$  при  $T_{ОБР} = 100$  °С.

Эти результаты получены для значения теплового сопротивления  $R_1 = 0,005$  м<sup>2</sup>·К/Вт, определяемого тепловым сопротивлением ПТ<sub>1</sub>, помещенного между образцом и изотермической поверхностью источника теплоты, и  $R_2 = 0,007$  м<sup>2</sup>·К/Вт, состоящего из теплового сопротивления ПТ<sub>2</sub> между образцом и приемником теплоты и теплового сопротивления заливочного компаунда, внутри которого находится ЧЭ ПТП, установленный на металлической поверхности теплоприемника (холодильника). Это сопротивление принято одинаковым вдоль радиуса и равным тепловому сопротивлению ПТП.

Кроме рассмотренного случая, когда диаметры образца, нагревателя и холодильника выполнены одинаковыми, представляют интерес еще два, в которых диаметр ПТП отличается в одну и другую сторону от диаметра рабочего участка прибора, как показано на рисунке 4.13.



$$r_{\text{ПРИБ}} = r_{\text{НАГ}} = r_{\text{ХОЛ}} - \text{радиус рабочего участка прибора}$$

Рис. 4.13. Схемы расположения образца на рабочем участке плоского теплотемрического прибора

В случае *б* для меньшего размера образца его температурное поле описывается в безразмерных координатах системой, аналогичной (4.33) – (4.34), поэтому все результаты, полученные при ее решении, распространяются и на случай (*б*). Таким образом минимальный диаметр образца должен превышать диаметр ЧЭ установленного в приборе ПТП не менее чем в два раза.

Если образец выступает за пределы рабочего участка прибора, как видно на рисунке 4.13, *в*, граничные условия на торцевых поверхностях существенно изменяются и в безразмерных координатах записываются таким образом:

$$\frac{\partial \vartheta(\xi = 1; \rho)}{\partial \xi} = \begin{cases} H_1 \cdot (\vartheta_1 - \vartheta(\xi = 1; \rho)) & \text{при } 0 \leq \rho \leq 1, \\ -H_4 \cdot \vartheta(\xi = 1; \rho) & \text{при } 1 > \rho \leq \rho', \end{cases} \quad (4.41)$$

$$\frac{\partial \vartheta(\xi = 0; \rho)}{\partial \xi} = \begin{cases} H_2 \cdot (\vartheta(\xi = 0; \rho) - \vartheta_2) & \text{при } 0 \leq \rho \leq 1, \\ H_4 \cdot \vartheta(\xi = 0; \rho) & \text{при } 1 < \rho \leq \rho', \end{cases} \quad (4.42)$$

где  $\rho = r_{\text{ОБР}} / r_{\text{ПРИБ}} > 1$ ;  $H_4 = \alpha_{\text{БОК}} \cdot h / \chi$ .

Как видим, граничные условия (4.41) и (4.41) выражены кусочно-непрерывными функциями. Входящая в них частная

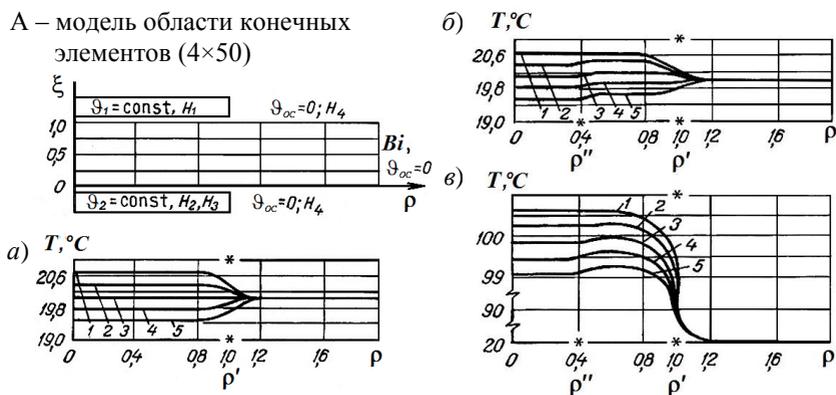
производная температуры  $\partial\vartheta(\xi; \rho)/\partial\xi$  по перемещенной  $\xi$  при значениях при  $\xi = 0$  и  $\xi = 1$  имеет конечные разрывы при  $\rho = 1$ , то есть на выходе образца из прибора. Ввиду этого аналитическое решение затруднительно, а решение получено на ЭВМ с использованием программы «LAPLAS», разработанной в Московском научно-исследовательском институте типового и экспериментального проектирования (1976 г.).

Согласно программе образец был представлен в виде области конечных элементов, для узлов которой на ЭВМ получены значения температуры. Счет был выполнен для уравнения (4.33) при граничных условиях: (4.34) для  $\rho = \rho'$  и  $\rho = 0$ ; (4.41) для  $\xi = 1$  и (4.42) для  $\xi = 0$ . Для случая, когда слой, в котором расположен ЧЭ ПТП, состоит из двух участков с неодинаковым тепловым сопротивлением, в условие (4.42) введен еще один конечный разрыв при  $\rho = \rho''$ . Таким образом условие (4.42) преобразовано к виду:

$$\frac{\partial\vartheta(\xi=0; \rho)}{\partial\xi} = \begin{cases} H_2 \cdot (\vartheta(\xi=0; \rho) - \vartheta_2) & \text{при } 0 \leq \rho \leq \rho'', \\ H_3 \cdot (\vartheta(\xi=0; \rho) - \vartheta_2) & \text{при } \rho'' \leq \rho \leq 1, \\ H_4 \cdot \vartheta(\xi=0; \rho) & \text{при } 1 < \rho < \rho', \end{cases} \quad (4.43)$$

где  $\rho'' = r/r_{\text{ПТП}} < 1$ ;  $H_3 = h/(\chi \cdot R_3)$ .

Результаты счета в случае рис. 4.13в для образца диаметром 200 мм, толщиной 4 мм с коэффициентом теплопроводности 0,25 Вт/(м·К) приведены на рисунке 4.14. При этом на рис. 4.14, А показана область конечных элементов (4×50), на рис. 4.14а представлены функция распределения температуры для пяти сечений по высоте (то есть по координате  $\xi$ , графики 1 – 5) при средней температуре  $T_{CP} = 20^\circ\text{C}$  и наличии разрыва в граничных условиях только при  $\rho = 1$ ; на рис. 4.14 б и в – аналогичные графики функции  $T_{OБП} = f(\xi = \text{var}, \rho)$  с учетом разрыва граничных условий при  $\rho = \rho''$  при средней температуре  $T_{CP} = 20^\circ\text{C}$  (б) и  $T_{CP} = 100^\circ\text{C}$  (в).



1 –  $\xi = 1$ ; 2 – 0,75; 3 – 0,50; 4 – 0,25; 5 – 0

Рис. 4.14 – Функции распределения температуры для пяти сечений по высоте образца при  $T_{CP} = 20\text{ }^\circ\text{C}$  при наличии разрыва в граничных условиях только при  $\rho = 1$  (а) и то же при  $T_{CP} = 20\text{ }^\circ\text{C}$  (б) и  $100\text{ }^\circ\text{C}$  (в) с учетом разрыва в граничных условиях при  $\rho = \rho''$

Из анализа полученных температурных полей следует, что кусочно-непрерывный характер граничных условий приводит к искажениям полей в окрестности точек разрыва, но особого влияния на равномерность теплового потока в центральной части образца не оказывает. Различие в тепловом сопротивлении ПТП и окружающего слоя заливки весьма заметно отражается на равномерности измеряемого теплового потока. Для исключения этого влияющего фактора вокруг ПТП (вернее его ЧЭ) должна быть создана зона, однородная с ПТП по тепловому сопротивлению, так называемая «охранная зона».

Таким образом, при измерении коэффициента теплопроводности теплотметрическим стационарным методом в асимметричном приборе, то есть выполненном с одним ПТП согласно схеме а или б рис. 4.3, плотность теплового потока через образец, измеряемая ПТП с соответствующей охранной зоной по периметру его ЧЭ, является одномерной в зоне образца не менее радиуса образца при возможных воздействиях

внешних условий в рассмотренных диапазонах значений средней температуры образца и температурного градиента. Это позволяет использовать в качестве расчетной формулы для коэффициента теплопроводности известное соотношение (4.2), которое справедливо для одномерной задачи теплопроводности.

*Б – Обоснование корректности измерений при симметричном исполнении прибора*

Несмотря на явные достоинства теплотметрических приборов в ассиметричном исполнении получить результат измерения коэффициента теплопроводности с погрешностью менее 5% весьма затруднительно. Более точные результаты возможны в приборах выполненных по симметричной схеме, то есть с двумя ПТП, установленными по обе стороны исследуемого образца. Для исследования точностных возможностей теплотметрического метода измерения коэффициента теплопроводности твердых материалов на плоском образце в виде ограниченного короткого цилиндра, помещенного в прибор, выполненный по симметричной схеме, рассмотрена задача теплообмена в системе тел «нагреватель – ПТП<sub>1</sub> – образец – ПТП<sub>2</sub> – холодильник» [4.32].

Теплопроводность в стационарном режиме образца, помещенного в теплотметрический прибор, выполненный без каких-либо охранных приспособлений, описывается уравнением Лапласа (4.31) при граничных условиях третьего рода на всех поверхностях образца. Как и в задаче, рассмотренной выше, изотермическими поверхностями служат поверхности металлических корпусов нагревателя и холодильника ( $T_1 = T_{Наг} = const$ ,  $T_2 = T_{Хол} = const$ ), обращенные, соответственно, к ПТП<sub>1</sub> и ПТП<sub>2</sub>, установленным над и под испытываемым образцом. Со стороны боковой поверхности система окружена экраном, являющимся также изотермической поверхностью с постоянной температурой  $T_{ЭК} = const$ . Модель теплообмена в такой системе тел представлена на рисунке 4.15.

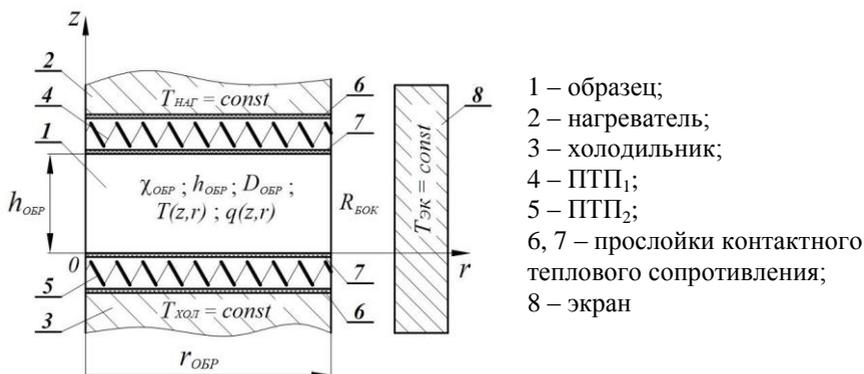


Рис. 4.15. Модель теплообмена в системе тел «нагреватель – ПТП 1 – образец – ПТП 2 – холодильник» при  $T_{\text{НАГ}} \geq T_{\text{ЭК}} \geq T_{\text{ХОЛ}}$

Решение задачи направлено на определение осесимметричного стационарного распределения плотности теплового потока в плоском образце 1 цилиндрической (или квадратной) формы с высотой  $h_{\text{ОБР}}$  и диаметром  $D_{\text{ОБР}} = 2r_{\text{ОБР}}$ , установленном соосно с нагревателем 2, холодильником 3 и двумя идентичными преобразователями ПТП<sub>1</sub> – 4 и ПТП<sub>2</sub> – 5, как показано на рис. 4.15. Поперечные размеры перечисленных элементов одинаковые. Между соприкасающимися плоскими поверхностями указанных элементов имеются две пары прослоек 6 и 7, оказывающих контактное тепловое сопротивление кондуктивному теплообмену между нагревателем и холодильником через систему «ПТП<sub>1</sub> – образец – ПТП<sub>2</sub>». Между боковой поверхностью образца 1 и поверхностью теплозащитного экрана 8 происходит теплообмен с эффективным коэффициентом теплообмена  $\alpha_{\text{БОК}}$ , учитывающим конвективную и радиационную составляющие теплообмена в зазоре между образцом и экраном.

Определение стационарного температурного поля в цилиндрическом образце при описанных условиях и допущении о независимости ТФХ ПТП от температуры и наличии осевой симметрии сведено к решению уравнения (4.31) при соответ-

ствующих граничных условиях (4.32), в которые подставляют  $R_{ПТП,i}$  вместо  $R_i$  ( $i = 1; 2$ ) и  $T_{ЭК}$  вместо  $T_{ОС}$ .

Задача решена в таких же безразмерных координатах  $\zeta = z/h_{ОБР}$  и  $\rho = r/r_{ОБР}$  для температуры, безразмерная форма которой задана равенством  $\theta(\zeta, \rho) = (T(z, r) - T_{ЭК})/T_{ЭК}$ . При этом принято, что температура тепловоспринимающей поверхности образца (сечение  $z = h_{ОБР}$ )  $T_1$  равна температуре экрана, то есть  $T_1 = T_{ЭК}$ , а теплоотдающей поверхности (сечение  $z = 0$ )  $T_2$  поддерживается при нулевом значении. Таким образом значения температуры образца в безразмерной форме равны:  $\vartheta_1(1; \rho)$  и  $\vartheta_2(0; \rho) = -1$ .

Кроме того, введены такие обозначения и допущения:

- $R_{ОБР}$  – тепловое сопротивление образца, равное отношению  $h_{ОБР}/\chi_{ОБР}$ ;
- $R_{БОК}$  – тепловое сопротивление теплообмену между боковой поверхностью образца и экраном:  $R_{БОК} = 1/\alpha_{БОК}$ ;
- $R_1$  и  $R_2$  – тепловое сопротивление ПТП<sub>1</sub> и ПТП<sub>2</sub>, причем принято, что  $R_1 = R_2 = h_{ПТП}/\chi_{ПТП}$ , то есть ПТП<sub>1</sub> и ПТП<sub>2</sub> выполнены идентичными;
- $R_{6+7}$  – суммарное контактное тепловое сопротивление на двух поверхностях каждого ПТП, установленного на входе ( $i = 1$ ) и выходе ( $i = 2$ ) теплового потока через образец, также принято одинаковым с обеих сторон образца;
- $R_{ПТП}$  – тепловое сопротивление на входе (и выходе) образца, равное сумме теплового сопротивления соответствующих ПТП<sub>*i*</sub> ( $R_1$  и  $R_2$ ) и суммарного контактного сопротивления  $R_{6+7}$  обеих прилегающих к ПТП прослоек 6 и 7;
- $\gamma$  – геометрический параметр образца

$$\gamma = D_{ОБР}/h_{ОБР} = 2r_{ОБР}/h_{ОБР}.$$

При введенных обозначениях и допущениях уравнение теплопроводности для данной задачи совпадает с уравнением (4.33) предыдущей задачи (см. 4.1.4 – А), а граничные условия принимают вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{R_{ППП}}{R_{ОБР}} \cdot \frac{\partial \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \zeta} = -\vartheta(\zeta; \rho) \quad \text{при } \zeta = 1, \\ \frac{R_{ППП}}{R_{ОБР}} \cdot \frac{\partial \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \zeta} = \vartheta(\zeta; \rho) + 1 \quad \text{при } \zeta = 0, \\ \frac{\partial \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \rho} + Bi_{БОК} \cdot \vartheta(\zeta; \rho) = 0 \quad \text{при } \rho = 1, \\ \frac{\partial \vartheta(\zeta; \rho = 0)}{\partial \rho} = 0 \quad \text{при } \rho = 0, \end{array} \right. \quad (4.44)$$

где  $Bi_{БОК}$  – число Био, характеризующее теплообмен в зазоре между боковой поверхностью образца и экраном, равное  $Bi_{БОК} = r_{ОБР} \cdot \alpha_{БОК} / \chi_{ОБР} = r_{ОБР} / (\chi_{ОБР} \cdot R_{БОК}) = R_{ОБР} / R_{БОК}$ .

Аналитическое решение для локальной температуры  $\vartheta(\zeta; \rho)$  с учетом результатов, полученных в [4.18], имеет вид:

$$\vartheta(\zeta; \rho) = \gamma \cdot \frac{Bi_{БОК}}{R_{ППП} / R_{ОБР}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{J_0(v_n \cdot \rho)}{v_n \cdot J_0(v_n) (Bi_{БОК}^2 + v_n^2)} \cdot S_n(\zeta) \right), \quad (4.45)$$

где  $J_0(v_n \cdot \rho)$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка [4.36],

$v_n$  – собственные числа, определяемые из характеристического уравнения (4.37);

$S_n(\xi)$  – функция отличающаяся от функции  $P_n$  (см. (4.36)) тем, что благодаря симметричной схеме исполнения прибора коэффициенты  $D_{n,1} = D_{n,2} = v_n \cdot R_{ППП} / (Bi_{БОК} \cdot R_{БОК})$ , а функция  $S_n$  имеет вид:

$$\begin{aligned} S_n(\xi) = & \left( (D_{n,1} + D_{n,1}^{-1}) \cdot sh(2 \cdot v_n / \gamma) + 2ch(2v/\gamma) \right)^{-1} \times \\ & \times (\vartheta_1 \cdot (sh(2 \cdot v_n \cdot \xi / \gamma) + D_{n,1} \cdot ch(2 \cdot v_n \cdot \xi / \gamma)) + \\ & + \vartheta_2 \cdot (sh(2 \cdot v_n \cdot (1 - \xi) / \gamma) + D_{n,1} \cdot ch(2 \cdot v_n \cdot (1 - \xi) / \gamma))) \end{aligned} \quad (4.46)$$

Поскольку сигнал термоэлектрического ПТП, выполненного в виде вспомогательной стенки с конкретными размерами и ТФХ, пропорционален плотности среднеинтегрального по поверхности ЧЭ ПТП теплового потока  $q_{CP}$ , целесообразно воспользоваться при исследовании искажений действительного теплового потока через образец формулой для  $q_{CP}$ . Исходя из закона Фурье о пропорциональности плотности теплового потока производной от температуры по координате в направлении теплового потока, выражение для плотности локального теплового потока в безразмерных координатах имеет вид:

$$q_{ЛОК}(\zeta, \rho) = -\frac{\chi_{ОБР} \cdot T_{ЭК}}{h_{ОБР}} \cdot \frac{\partial \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \zeta}, \quad (4.47)$$

где частная производная от температуры найдена с использованием выражения (4.45):

$$\frac{\partial \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \zeta} = \frac{2Bi_{БОК}}{R_{ПТП}/R_{ОБР}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{J_0(v_n \cdot \rho)}{J_0(v_n) (Bi_{БОК}^2 + v_n^2)} \cdot M_n(\zeta) \right), \quad (4.48)$$

где

$$M_n(\zeta) = \frac{\vartheta_1 (ch(2v_n \cdot \zeta/\lambda) + D_{n,1} \cdot sh(2v_n \cdot \zeta/\gamma))}{(D_{n,1} + D_{n,1}^{-1}) \cdot sh(2v_n/\gamma) + 2 \cdot ch(2 \cdot v_n/\gamma)} - \frac{\vartheta_2 \cdot (ch(2v_n \cdot (1-\zeta)/\gamma) + D_{n,1} \cdot sh(2v_n \cdot (1-\zeta)/\gamma))}{(D_{n,2} + D_{n,1}^{-1}) \cdot sh(2v_n/\gamma) + 2 \cdot ch(2v_n/\gamma)}. \quad (4.49)$$

Исходя из соотношения (4.47) для плотности локального теплового потока и для плотности среднеинтегрального теплового потока согласно определению  $q_{CP} = \frac{1}{A_F} \int q_{ЛОК} dA$ ,

значение  $q_{CP}$  в безразмерных координатах имеет вид:

$$q_{CP}(\zeta, \rho) = -\frac{\chi_{ОБР} \cdot T_{ЭК}}{h_{ОБР}} \cdot \frac{1}{\pi \rho^2} \int_0^{\rho} \frac{\partial \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \zeta} 2\pi \rho d\rho. \quad (4.50)$$

С учетом выражения (4.35) путем интегрирования по безразмерному радиусу  $\rho$  из выражения (4.50) получена

формула для плотности среднеинтегрального теплового потока:

$$q_{CP}(\zeta, \rho) = -\frac{4 \cdot T_{ЭК} \cdot Bi_{БОК}}{\gamma \cdot R_{ПП}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(v_n \cdot \rho) \cdot M_n(\xi)}{v_n \cdot \rho \cdot J_0(v_n) \cdot (Bi_{БОК}^2 + v_n^2)}, \quad (4.51)$$

где  $J_1(v_n \cdot \rho)$  – функция Бесселя первого рода первого порядка [4.36].

При выполнении вычислительных экспериментов по оцениванию возможных искажений действительного теплового потока через образец при измерении коэффициента теплопроводности в симметричном теплотемрическом приборе использованы диапазоны значений основных параметров для твердых материалов, представленные в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Тип материала	Коэффициент теплопроводности $\chi_{ОБР}$ , Вт/(м·К)	Высота образца $h_{ОБР}$ , мм	Геометрический параметр образца $\gamma = 2r_{ОБР}/h_{ОБР}$
Теплоизоляционные материалы	0,02 – 0,1	1 – 100	3 – 20
Неметаллические материалы:			
	- пластмассы, стекла	0,1 – 10	2 – 50
- горные породы, камни, керамика	1 – 5	5 – 50	3 – 20
Металлы, сплавы	6 – 480	20 – 100	3 – 20

Совокупность представленных диапазонов охватывает широкую гамму твердых материалов, поэтому результаты вычислительных экспериментов являются достаточно информативными. Кроме того, они показывают возможность создания подобного прибора для исследования также и высокотеплопроводных материалов.

Для оценки возможных искажений действительного теплового потока  $q_0$  под влиянием ряда факторов использо-

вана функция приведенной плотности теплового потока  $q_{CP}(\zeta, \rho)/q_0$ , выражение для которой в отсутствие теплообмена на боковой поверхности образца имеет вид:

$$\frac{q_{CP}(\zeta, \rho)}{q_0} = \left(2 + \frac{R_{OBR}}{R_{ПТП}}\right) \cdot \frac{4Bi_{БОК}}{\gamma} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(v_n \cdot \rho) \cdot M_n(\zeta)}{v_n \cdot \rho \cdot J_0(v_n) (Bi_{БОК}^2 + v_n^2)}, \quad (4.52)$$

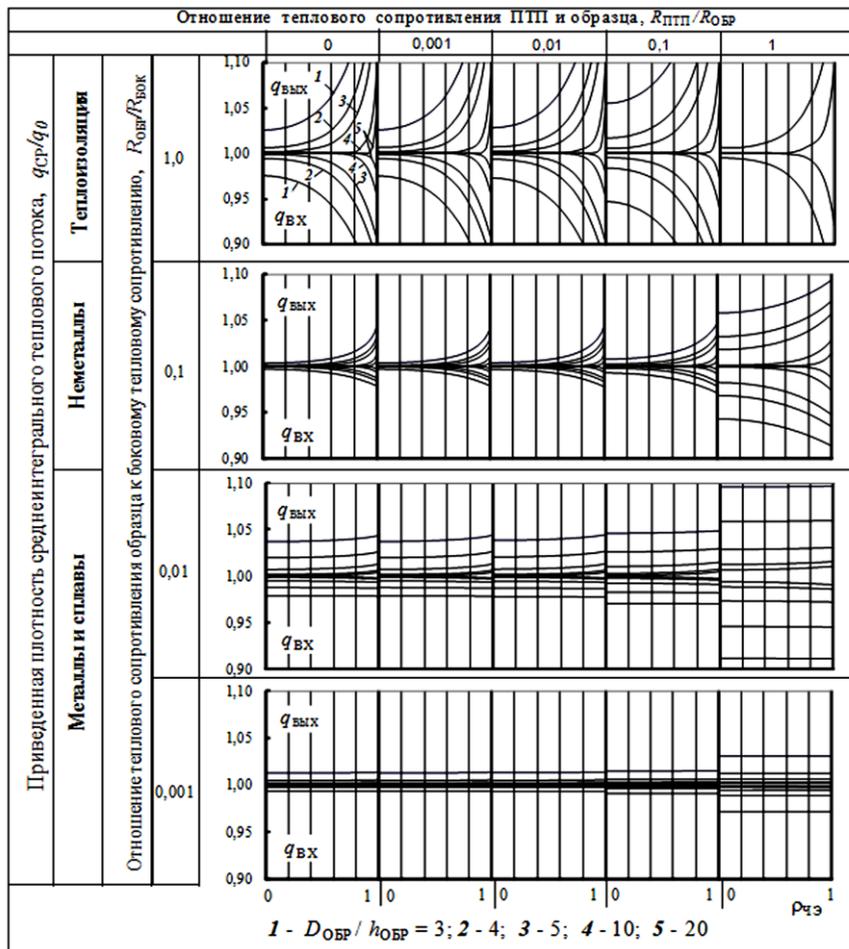
где  $q_0 = \frac{\chi_{OBR} \cdot T_{ЭК}}{h_{OBR}} \cdot \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{1 + 2R_{ПТП}/R_{OBR}}$  – плотность действитель-

ного теплового потока через образец в отсутствие бокового теплообмена с учетом принятых выше допущений, а также равенства  $\vartheta_1 - \vartheta_2 = 1$ .

К влияющим факторам отнесены размеры и ТФХ исследуемого образца и примененных ПТП, условия теплообмена по боковой поверхности образца и способ термостатирования экрана. Первые три из перечисленных факторов: геометрический параметр образца  $\gamma$ , отношение значений теплового сопротивления ПТП и образца  $R_{ПТП}/R_{OBR}$  и теплового сопротивления образца к теплоемому сопротивлению теплообмену по боковой поверхности  $R_{OBR}/R_{БОК}$ , – позволяют оценить боковые тепловые потери образца и решить вопрос о применении такой теплоизоляции, при которой они могут быть сведены к разумному минимуму.

Для групп материалов, указанных в табл. 4.2, выполнены вычисления по формуле (4.52) значений приведенной плотности среднеинтегрального теплового потока  $q_{CP}/q_0$  в зависимости от безразмерного радиуса чувствительного элемента ПТП  $\rho_{ЧЭ} = r_{ЧЭ}/r_{OBR}$  для  $\zeta = 1$  и  $\zeta = 0$  при следующих вариациях влияющих факторов:  $\gamma = 3, 4, 5, 10, 20$ ;  $R_{OBR}/R_{БОК} = 0,001; 0,01; 0,1; 1$ ;  $R_{ПТП}/R_{OBR} = 0; 0,001; 0,01; 0,1; 1$ . Полученные результаты счета систематизированы в таблице 4.3 при условии термостатирования боковой поверхности образца, соответствующем равенству  $T_{ЭК} = T_{НАГ}$  (или  $T_{ХОЛ}$ ).

Таблица 4.3. Характер изменения в радиальном направлении приведенной плотности среднеинтегрального теплового потока на входе  $q_{ВХ}$  и выходе  $q_{ВЫХ}$  образца при температуре экрана  $T_{ЭК} = T_{НАГ}$



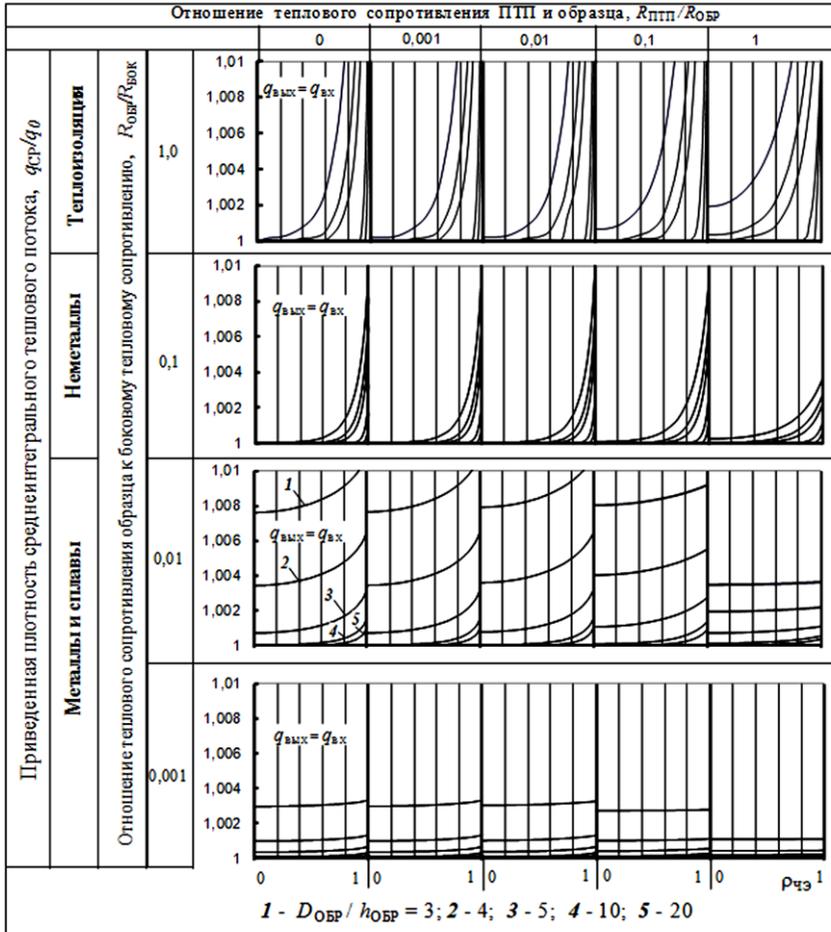
Из анализа полученных семейств графиков следует, что значения приведенной плотности среднеинтегрального теплового потока на входе в образец ( $\zeta = 1$ ) меньше 1, а на выходе ( $\zeta = 0$ ) – больше 1 для всех групп материалов. Одновременно эти значения практически одинаковы для теплоизоляционных и неметаллических материалов, в связи с чем их полусумма  $0,5 \cdot (q_{CP.BX} + q_{CP.BYX})$  незначительно отличается от 1 во всем диапазоне изменения безразмерного радиуса  $\rho_{\zeta}$ . Особенно четко это проявляется при одинаковом тепловом сопротивлении ПТП и образца ( $R_{ПТП}/R_{OБP} = 1$ ). Таким образом, результат, представленный в табл. 4.3, подтверждает преимущество симметричной схемы исполнения теплотрического прибора для измерения коэффициентов теплопроводности теплоизоляционных и строительных материалов. Расчетная формула для измеренных значений коэффициента теплопроводности имеет вид:

$$\chi_{ИЗМ} = \frac{h_{OБP} \cdot 0,5(q_{CP.BX}(1, \rho) + q_{CP.BYX}(0, \rho))}{T_{ЭК} \cdot (\vartheta_1(1, \rho) - \vartheta_2(0, \rho))}, \quad (4.53)$$

где значения  $q_{CP.BX}$  и  $q_{CP.BYX}$  рассчитаны по формуле (4.52).

В таблице 4.4 представлены результаты аналогичных вычислений по формуле (4.52) для случая термостатирования боковой поверхности образца, при котором  $T_{ЭК} = 0,5 \cdot (T_{НАГ} + T_{ХОЛ})$ . Как следует из графиков табл. 4.4, приведенная плотность  $q_{CP.BX}/q_o = q_{CP.BYX}/q_o \geq 1$  для всех рассматриваемых групп материалов, при этом зона неискаженного теплового потока шире по сравнению с аналогичными участками соответствующих графиков табл. 4.3, а составляющая методической погрешности на порядок меньше. В связи с этим при проектировании теплового блока теплотрического прибора целесообразно отдать предпочтение именно такому режиму термостатирования экрана.

Таблица 4.4. Характер изменения в радиальном направлении приведенной плотности среднеинтегрального теплового потока на входе  $q_{ВХ}$  и выходе  $q_{ВЫХ}$  образца при температуре экрана  $T_{ЭК} = 0,5 \cdot (T_{НАГ} + T_{ХОЛ})$

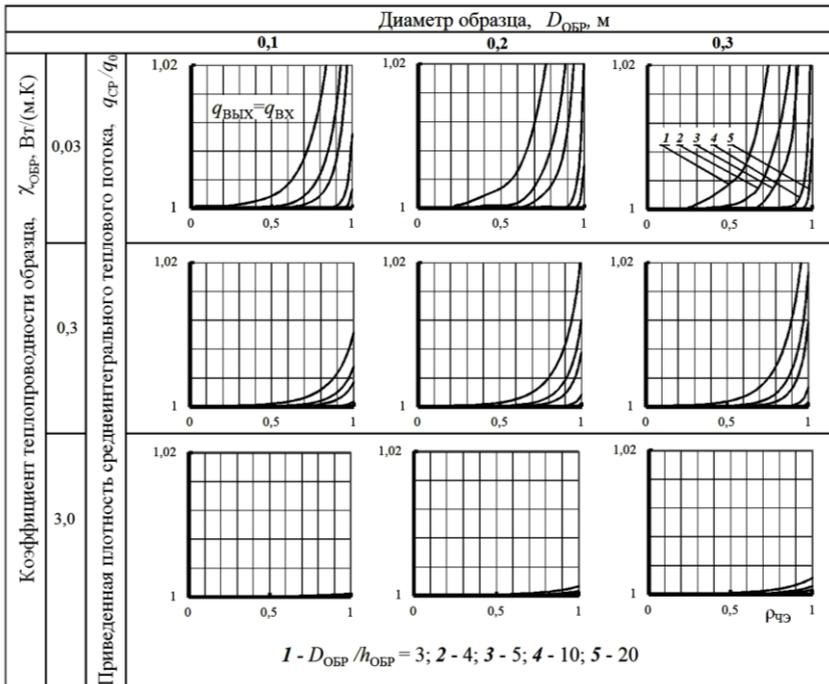


Для анализа критериев выбора геометрических размеров исследуемых образцов и применяемых ПТП выполнен расчет по формуле (4.52) значений отношения  $q_{СР}/q_0$  для режима термостатирования  $T_{ЭК} = 0,5 \cdot (T_{НАГ} + T_{ХОЛ})$  при

фиксированных значениях бокового теплового сопротивления  $R_{БОК} = 1 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  и теплового сопротивления ПТП  $R_{ПТП} = 0,01 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  при вариации коэффициента теплопроводности образца  $\chi_{ОБР} = 0,03; 0,3$  и  $3 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  и его геометрического параметра  $\gamma = 3; 4; 5; 10$  и  $20$ .

Результаты расчетов, представленные в таблице 4.5, подтверждают требования к геометрическому параметру опытных образцов и размерам чувствительной зоны ПТП, регламентированные действующими стандартами [4.21, 4.22].

Таблица 4.5. Характер изменения в радиальном направлении приведенной плотности среднеинтегрального теплового потока на входе  $q_{ВХ}$  и выходе  $q_{ВЫХ}$  образца в режиме термостатирования экрана  $T_{ЭК} = 0,5 \cdot (T_{НАГ} + T_{ХОЛ})$  для трех фиксированных значений диаметра образца и его коэффициента теплопроводности



Из анализа кривых **1 – 2** графика табл. 4.5 для теплоизоляционных материалов ( $\chi_{OBF} = 0,03$  Вт/(м·К)) при размере  $D_{OBF} = 0,3$  м следует, что в теплотрическом приборе симметричного типа возможно проводить исследования коэффициента эффективной теплопроводности на образцах, вырезанных из готовых блоков без удаления внешних слоев. При этом для исследования однородных материалов без потери точности можно использовать ПТП с меньшим размером ЧЭ.

Для испытаний образцов, содержащих значительные неоднородные включения, необходимый размер ЧЭ ПТП должен быть увеличен, при этом для сохранения высокой точности и универсальности средства измерения коэффициента теплопроводности широкого спектра неметаллических материалов целесообразно применять ПТП, имеющий две теплочувствительные зоны (или более), выполненные с одинаковыми ТФХ и расположенные соосно: центральную зону с безразмерным радиусом  $\rho_{ЧЭ} \cong 0,2$  для однородных материалов, и дополнительную кольцевую, включенную аддитивно термобатарее с геометрическим параметром, соответствующим максимальному значению, регламентированному стандартами [4.21, 4.22], т.е.  $\rho_{ЧЭ} = 0,4$ .

Кроме того, семейства графиков табл. 4.5 для образцов низкотеплопроводных материалов с диаметром 0,1 м и 0,2 м подтверждают возможность использования многозонных ПТП для исследования образцов с меньшими размерами при сохранении рекомендованных значений их геометрического параметра, что решает проблему мониторинга измерений ТФХ материалов, изъятых в натуральных условиях, при невозможности соблюдения требований к габаритам образцов.

#### 4.1.5 Требования к конструктивным и технологическим параметрам прибора и применяемых преобразователей теплового потока

Кроме рассмотренных в 4.1.4 (*A* и *B*) искажений теплового и температурного полей исследуемого образца, находящегося в плоском теплотметрическом приборе, искажения наблюдаются и в самих ПТП, обусловленные некорректностью их изготовления. Например, приборы для измерения коэффициента теплопроводности первого поколения оснащали ПТП, изготовленными в форме диска или квадрата, вся площадь которого была занята ЧЭ ПТП, а монтировали его на теплоотдающей поверхности нагревателя или принимающей поверхности холодильника, размеры которых были значительно больше поперечного размера ПТП. При этом всю свободную от ПТП поверхность заливали электроизоляционным компаундом. Толщина этого слоя равна толщине ПТП, а внешний поперечный размер соответствовал габаритам нагревателя (холодильника) Эта зона предназначалась для выполнения охранных функций для ЧЭ ПТП. Но ТФХ ЧЭ и материала охранной зоны были зачастую не согласованы, что приводило к искажению температурного поля не только в исследуемом образце, но и в ПТП, а это также является источником методической погрешности измерения коэффициента теплопроводности.

Принципиальная схема прибора, в симметричном исполнении – оснащенного двумя идентичными ПТП, выполненными с охранной зоной ЧЭ, представлена на рисунке 4.16.

В режиме термостатирования бокового экрана, при котором  $T_{ЭК} = (T_1 + T_2)/2$ , распределение температуры в системе симметрично относительно половины высоты образца, то есть по средней плоскости проходит изотерма  $T_{ИЗ} = const$ . Это позволяет определить искомое температурное поле в образце путем решения задачи теплообмена в пластине, высота которой равна половине высоты образца  $h_{ПЛ} = 0,5h_{ОБР}$ .

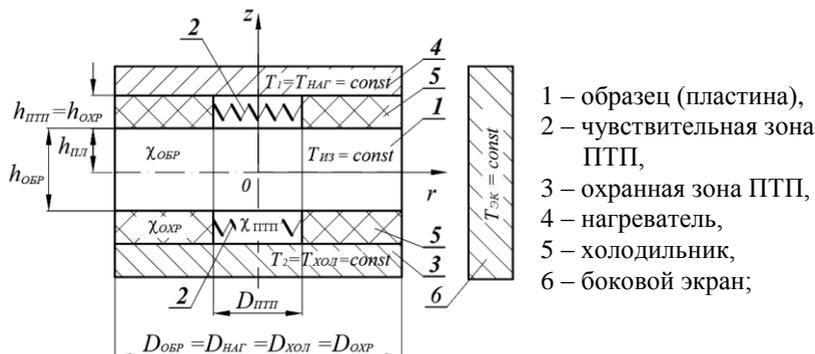


Рис. 4.16. Принципиальная схема измерительной ячейки симметричного теплотрического прибора для измерения коэффициента теплопроводности

Так как продольные размеры исследуемого образца намного больше размеров ЧЭ ПТП, слой из ЧЭ и окружающей его охранной зоны можно также рассматривать как неограниченную пластину, процесс теплообмена в которой является осесимметричным и задача может быть рассмотрена в системе цилиндрических координат  $(z, r)$ .

В отсутствие ЧЭ ПТП, то есть при наличии только сплошной охранной зоны с тепловым сопротивлением  $R_{OXP}$ , изменение температуры происходит только в направлении, перпендикулярном пластине, благодаря чему плотность неискажённого теплового потока  $q_0$  одномерна и равна:

$$q_0 = (T_1 - T_{ИЗ}) / R_{\Sigma}, \quad (4.54)$$

где  $R_{\Sigma} = h_{ПЛЛ} / \chi_{OБР} + R_{OXP}$  – полное тепловое сопротивление теплопередаче;  $T_1 = T_{НАГ}$ .

Значения температуры поверхностей неограниченной пластины в стационарном режиме при заданных условиях находятся по формулам:

$$T_{ПОВ,1} = T \Big|_{z=h_{ПЛЛ}} = q_0 \cdot R_{OXP} + T_1;$$

$$T_{ПОВ,2} = T \Big|_{z=0} = T_{ИЗ}.$$

Присутствие ЧЭ ПТП, установленного, как показано на рис. 4.16, вносит возмущение в распределение температуры в пластине, так как в общем случае тепловое сопротивление ЧЭ и охранной зоны не одинаковы, вследствие чего температурное поле пластины перестает быть одномерным, а тепловой поток, проходящий через ПТП, становится неидентичным действительному тепловому потоку  $q_0$ .

Радиальными теплоперетоками через боковую поверхность ПТП можно пренебречь. Это упрощение дает возможность сделать допущение об осевой одномерности теплового потока в самом ПТП и рассмотреть трансформированную задачу по определению распределения температуры в неограниченной пластине конечной толщины  $h_{ПТП} = 0,5h_{ОБР}$  при граничных условиях третьего рода на поверхности одной (при  $0,5h_{ОБР}$ ) и первого рода на второй ( $z = 0$ ). При этом на первой из поверхностей (в данном случае верхней) теплообмен происходит со скачкообразным изменением теплового сопротивления на границе ЧЭ и охранной зоны от  $R_{ЧЭ}$  к  $R_{ОХР}$ . Модель теплообмена трансформированной задачи представлена на рисунке 4.17.

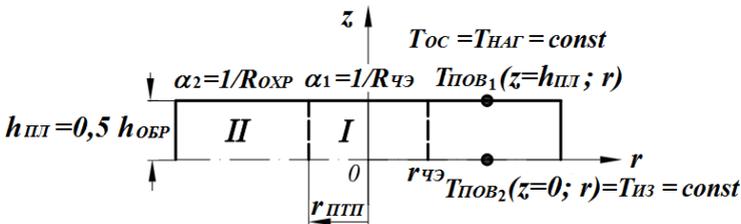


Рис. 4.17. Модель теплообмена трансформированной задачи

Стационарное температурное поле в пластине  $T(z, r)$  в силу осевой симметрии описывается классическим стационарным двумерным уравнением теплопроводности при граничных условиях, сформулированных выше.

Следуя методу, предложенному в [4.37], имеются две отдельные области – **I** и **II**, температура которых  $T_I(z, r)$  и  $T_{II}(z, r)$ . Область **I** представляет собой ограниченный сплошной цилиндр высотой  $h_{III}$  и радиусом  $r_{III}$  ( $0 \leq z \leq h_{III}$ ,  $0 \leq r \leq r_{III}$ ), а область **II** – полый цилиндр высотой  $h_{III}$  с внутренним радиусом  $r_{III}$  и бесконечным наружным радиусом ( $0 \leq z \leq h_{III}$ ,  $r_{III} \leq r \leq \infty$ ). При этом граничные условия записываются следующим образом:

$$- \text{ для области } \mathbf{I}: \begin{cases} -\chi_{OBR} \cdot \frac{\partial T_I(h_{III}; r)}{\partial z} = \frac{1}{R_{CЭ}} (T_{ПОВ1}(h_{III}; r) - T_{НАГ}), \\ T_I(0; r) = T_{ИЗ}; \end{cases} \quad (4.55)$$

$$- \text{ для области } \mathbf{II}: \begin{cases} -\chi_{OBR} \cdot \frac{\partial T_{II}(h_{III}; r)}{\partial z} = \frac{1}{R_{OXP}} (T_{ПОВ1}(h_{III}; r) - T_{НАГ}), \\ T_{II}(0; r) = T_{ИЗ}; \end{cases} \quad (4.56)$$

– на общей границе областей ( $0 \leq z \leq h_{III}$ ,  $r = r_{III}$ )

$$\begin{cases} T_I(z; r_{III}) = T_{II}(z; r_{III}) \\ \frac{\partial T_I}{\partial r}(z; r_{III}) = \frac{\partial T_{II}}{\partial r}(z; r_{III}). \end{cases} \quad (4.57)$$

При переходе к безразмерным координатам  $\zeta = z/h_{III}$ ,  $\rho = r/r_{III}$  и введении таких обозначений для температуры в безразмерной форме

$$- \text{ для области } \mathbf{I} \quad \vartheta_I(z, r) = (T_I(z, r) - T_{НАГ}) / (T_{ИЗ} - T_{НАГ}),$$

$$- \text{ для области } \mathbf{II} \quad \vartheta_{II}(z, r) = (T_{II}(z, r) - T_{НАГ}) / (T_{ИЗ} - T_{НАГ}),$$

при которых температура поверхностей в безразмерном виде равны:

$$\vartheta_{ПОВ1}(\zeta = 1; \rho) = (T_{ПОВ1}(1, r) - T_{НАГ}) / (T_{ИЗ} - T_{НАГ}) = 0,$$

$$\vartheta_{ПОВ2}(\zeta = 0; \rho) = (T_{ПОВ2}(0; r) - T_{НАГ}) / (T_{ИЗ} - T_{НАГ}) = 1,$$

а числа Био для областей **I** и **II**, соответственно:

$$Bi_I = (h_{\text{ПЛ}} / \chi_{\text{ОБР}}) / R_{\text{ЧЭ}} = 0,5 h_{\text{ОБР}} / (\chi_{\text{ОБР}} \cdot R_{\text{ЧЭ}}), \quad (4.58)$$

$$Bi_{II} = (h_{\text{ПЛ}} / \chi_{\text{ОБР}}) / R_{\text{ОХР}} = 0,5 h_{\text{ОБР}} / (\chi_{\text{ОБР}} \cdot R_{\text{ОХР}}). \quad (4.59)$$

Решение трансформированной задачи в соответствии с работой [4.38], имеет вид:

- для температуры:

$$\vartheta_I(\zeta, \rho) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot I_0(\mu_n \cdot \rho) \cdot \sin(\zeta \cdot \varepsilon_n), \quad (4.60)$$

где  $A_n$  – коэффициенты разложения в ряд, которые находятся из системы алгебраических уравнений, получаемых из условий (4.57) «сшивания» решений для обеих областей;

$I_0(\mu_n \cdot \rho)$  – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка [4.36];  $\mu_n = \varepsilon_n \cdot h_{\text{ПЛ}} / r_{\text{ЧЭ}}$ , где  $\varepsilon_n$  – собственные числа – корни характеристического уравнения

$$\varepsilon_n \cdot \text{tg} \varepsilon_n = -Bi_I; \quad (4.61)$$

- для среднеинтегральной плотности измеряемого теплового потока:

$$q_{\text{СР}}(\zeta, \rho) = -\chi_{\text{ОБР}} \cdot 2(T_{\text{ИЗ}} - T_{\text{НАГ}}) / h_{\text{ОБР}} \times$$

$$\times \left[ \sum_{m=1}^{\infty} \left( 2A_m \cdot \frac{I_1(\mu_m \cdot \rho)}{\mu_m \cdot \rho} \cdot \varepsilon_m \cdot \cos(\varepsilon_m \cdot \zeta) \right) - \frac{Bi_I}{1 + Bi_I} \right], \quad (4.62)$$

где  $I_1(\mu_n \cdot \rho)$  – модифицированная функция Бесселя первого рода первого порядка [4.36].

С учетом формулы (4.54), определяющей плотность входящего невозмущенного теплового потока, и формулы (4.62) при  $\zeta = 1$  и  $\rho = 1$ , которая определяет измеряемую среднеинтегральную плотность теплового потока, функция приведенной плотности теплового потока имеет вид:

$$\frac{q_{\text{ИЗМ}}}{q_0} = \frac{q_{\text{СР}}(1;1)}{q_0} = -\frac{Bi_{II}}{1 + Bi_{II}} \cdot \left[ \sum_{n=1}^{\infty} 2A_n \cdot \frac{I_1(\mu_n)}{\mu_n} \cdot \varepsilon_n \cdot \cos(\varepsilon_n \cdot \zeta) - \frac{Bi_I}{1 + Bi_I} \right] = \quad (4.63)$$

$$= -\frac{0,5 \cdot h_{OBR} / (\chi_{OBR} \cdot R_{OXP})}{1 + 0,5 h_{OBR} / (\chi_{OBR} \cdot R_{OXP})} \cdot \left[ \sum_{n=1}^{\infty} 2A_n \cdot \frac{I_1(\mu_n)}{\mu_n} \cdot \varepsilon_n \cdot \cos(\varepsilon_n \cdot \zeta) - \frac{0,5 h_{OBR} / (\chi_{OBR} \cdot R_{ПТП})}{1 + 0,5 h_{OBR} / (\chi_{OBR} \cdot R_{ПТП})} \right]$$

Исходя из того, что измеренное значение плотности теплового потока можно выразить через разность измеренных значений температуры на обеих поверхностях пластины по оси ПТП:

$$q_{ИЗМ} = -(T(1;0) - T(0;0)) / (h_{OBR} / \chi_{ИЗМ}), \quad (4.64)$$

а плотность неискаженного теплового потока  $q_0$  определяется формулой (4.54), получено следующее выражение для отношения  $q_{ИЗМ} / q_0$  в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} \frac{q_{ИЗМ}}{q_0} &= \frac{\chi_{ИЗМ}}{\chi_{OBR}} \cdot (9(0;0) - 9(1;0)) \cdot (R_{OXP} / (0,5 \cdot R_{OBR}) + 1) = \\ &= \frac{\chi_{ИЗМ}}{\chi_{OBR}} \cdot \left( 1 - \theta(1;0) - \frac{1}{1 + Bi_I} \right) \cdot \left( \frac{1}{Bi_{II}} + 1 \right), \end{aligned} \quad (4.65)$$

которое, исходя из равенства для температуры  $\theta(1;0) = 0$  и выражений (4.58) и (4.59) для чисел Био  $Bi_I$  и  $Bi_{II}$ , преобразуется к виду:

$$\frac{q_{ИЗМ}}{q_0} = \frac{\chi_{ИЗМ}}{\chi_{OBR}} \cdot \frac{Bi_I}{1 + Bi_I} \cdot \frac{1 + Bi_{II}}{Bi_{II}} = \frac{\chi_{ИЗМ}}{\chi_{OBR}} \cdot \frac{R_{OXP}}{R_{ЧЭ}} \cdot \frac{1 + 0,5 \cdot R_{OBR} / R_{OXP}}{1 + 0,5 \cdot R_{OBR} / R_{ЧЭ}}, \quad (4.66)$$

откуда следует:

$$\frac{\chi_{ИЗМ}}{\chi_{OBR}} = \frac{q_{ИЗМ}}{q_0} \cdot \frac{R_{ЧЭ}}{R_{OXP}} \cdot \frac{1 + 0,5 h_{OBR} / (\chi_{OBR} \cdot R_{ЧЭ})}{1 + 0,5 h_{OBR} / (\chi_{OBR} \cdot R_{OXP})} = \frac{q_{ИЗМ}}{q_0} \cdot \frac{2R_{ЧЭ} + R_{OBR}}{2R_{OXP} + R_{OBR}}. \quad (4.67)$$

Для оценки точностных возможностей выполнены расчеты с использованием формулы (4.66), которая после введения параметра  $\psi$ , равного  $\psi = 2R_{OXP} / D_{ЧЭ} = R_{OXP} / r_{ЧЭ}$ , принимает вид:

$$\frac{\chi_{ИЗМ}}{\chi_{OBR}} = \frac{q_{ИЗМ}}{q_0} \cdot \frac{2R_{ЧЭ} + R_{OBR}}{2r_{ЧЭ} \cdot \psi + R_{OBR}} = \frac{2h_{ЧЭ} / \chi_{ЧЭ} + h_{OBR} / \chi_{OBR}}{2r_{ЧЭ} \cdot \psi + h_{OBR} / \chi_{OBR}}, \quad (4.68)$$

где  $\chi_{ЧЭ}$  – коэффициент теплопроводности чувствительной зоны ПТП.

Результаты вычислительного эксперимента для четырех значений относительной толщины образца  $h_{\text{ОБР}}/D_{\text{ЧЭ}} = 0,10; 0,25; 0,50; 0,75$  представлены на рисунке 4.18 в виде семейств графиков зависимости значений приведенного коэффициента теплопроводности  $\chi_{\text{ИЗМ}}/\chi_{\text{ОБР}}$  от безразмерного аргумента  $\chi_{\text{ОБР}} \cdot \Psi$  при вариации отношения коэффициентов теплопроводности чувствительной и охранной зон ПТП  $\chi_{\text{ОБР}}/\chi_{\text{ОХР}} = 1,03; 1,04; 1,05; 1,06$ .

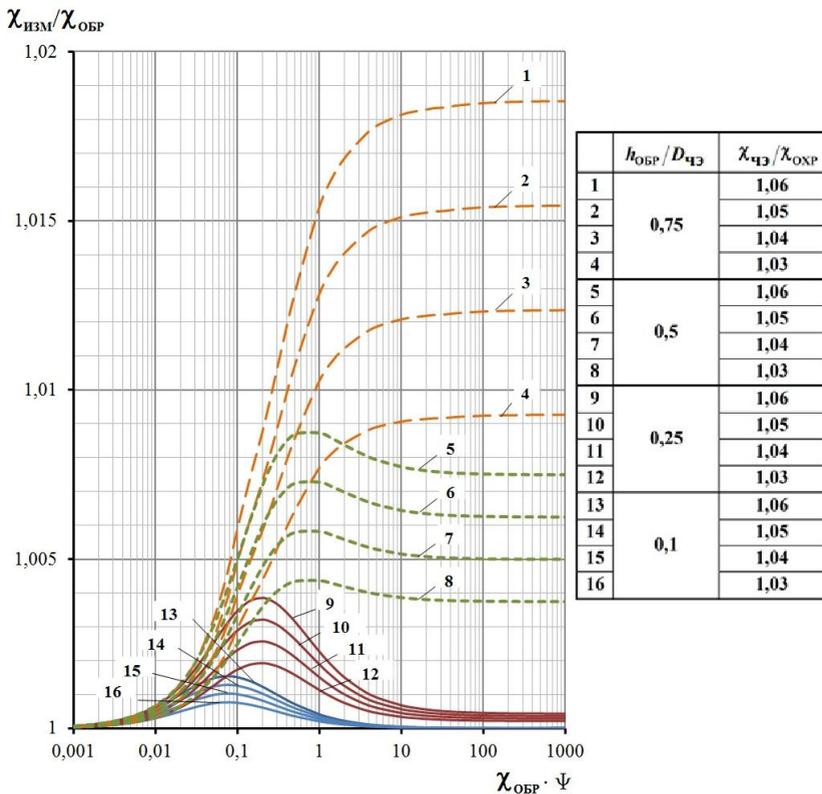


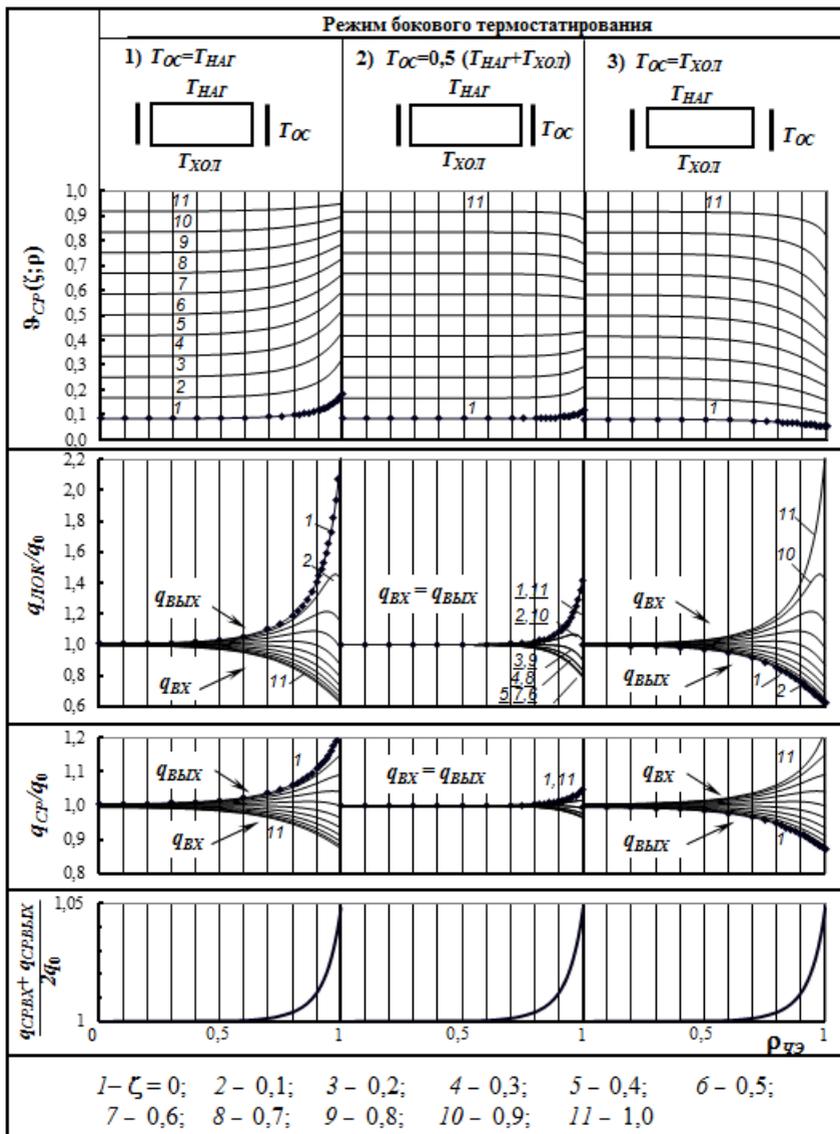
Рис.4.18. Характер изменения приведенного коэффициента теплопроводности в зависимости от безразмерного аргумента  $\chi_{\text{ОБР}} \cdot \Psi$  при вариации отношения коэффициентов теплопроводности ЧЭ и охранной зоны ПТП

Из анализа полученных графиков следует, что методическая погрешность теплотрического прибора в значительной степени зависит от соотношения геометрических размеров образца и ЧЭ и ПТП и коэффициентов теплопроводности ЧЭ и охранной зоны ПТП. При этом чем ближе теплопроводность охранной зоны к теплопроводности ЧЭ, тем измеренное значение коэффициента теплопроводности образца ближе к его истинному значению. При  $\chi_{ЧЭ}/\chi_{ОХР} = 1,0$  выполняется соотношение  $\chi_{ИЗМ}/\chi_{ОБР} = 1,0$ , то есть эта составляющая погрешности измерений сводится к нулю.

Для рекомендуемого стандартами [4.21, 4.22] диаметра чувствительной зоны ПТП 120 мм при толщине образца не более 60 мм, чему на рис. 4.16 соответствуют графики 5 – 8, методическая погрешность меньше 1% с тенденцией снижения при уменьшении отличия между  $\chi_{ЧЭ}$  и  $\chi_{ОХР}$ . Таким образом, при соблюдении рекомендованного для теплоизоляционных материалов соотношения размеров  $h_{ОБР}/D_{ЧЭ} = 0,2$  для диапазона значений отношения  $\chi_{ЧЭ}/\chi_{ОХР}$  от 1,03 до 1,04 методическая погрешность не превышает 0,5%. Зоны графиков, соответствующие аргументу  $\chi_{ОБР} \cdot \psi > 10$ , свидетельствуют, что погрешность измерения материалов с коэффициентом  $\chi > 200$  Вт/(м·К) очень мала, особенно при  $h_{ОБР}/D_{ЧЭ} < 0,25$  (см. рис. 4.18, графики 9 – 16).

Кроме того, вычислительными экспериментами исследован характер изменения в радиальном направлении среднеинтегральной температуры образца  $\vartheta_{СР}$ , приведенной плотности локального  $q_{ЛОК}/q_0$  и среднеинтегрального  $q_{СР}/q_0$  теплового потока и полусуммы значений приведенной плотности входящего и выходящего теплового потока  $0,5(q_{СР.ВХ} + q_{СР.ВЫХ})/q_0$  при вариации относительной высоты образца  $\zeta = z/h_{ОБР}$  для трех способов бокового термостатирования. Эти результаты систематизированы в таблице 4.6.

Таблица 4.6. Характер изменений теплофизических параметров в радиальном направлении для трех вариантов бокового термостатирования при вариации относительной высоты образца



Расчеты выполнены при таких фиксированных значениях параметров:  $\gamma = D/h = 5$ ;  $Bi = r_{OБP} / (R_{BOK} \cdot \chi_{OБP}) = 2,5$ ;  $R_{OБP} / R_{BOK} = 1$ ;  $R_{\text{чЭ}} / R_{OБP} = 0,1$ , которые соответствуют типичному образцу строительного материала с геометрическим параметром  $\gamma > 5$ , регламентированным стандартом [4.21].

Несмотря на то, что глубина проникновения к центру образца искажений функций  $\theta_{CP}$ ,  $q_{ЛОК}/q_0$  и  $q_{CP}/q_0$  при условиях термостатирования  $T_{ЭК} = T_{НАГ}$  и  $T_{ЭК} = T_{ХОЛ}$  больше, чем при условии  $T_{ЭК} = 0,5 \cdot (T_{НАГ} + T_{ХОЛ})$ , значения полусуммы плотностей входящего и выходящего (графики 1 и 11) теплового потока вдоль безразмерного радиуса оказались практически одинаковыми во всех случаях термостатирования. Это открывает возможность в симметричном приборе осуществлять боковое термостатирование при любой температуре из диапазона значений  $(T_{ХОЛ}, T_{НАГ})$ , что значительно упрощает конструирование прибора.

При асимметричной схеме прибора предпочтение следует отдать термостатированию бокового экрана при температуре, равной  $0,5 \cdot (T_{НАГ} + T_{ХОЛ})$ . Учитывая, что характер искажения входящего и выходящего среднеинтегрального теплового потока одинаков, а полусумма значений их плотности  $0,5 \cdot (q_{CP.BX} + q_{CP.BYX}) = q_{CP.BYX} = q_{CP.BX}$ , можно без потери точности измерения обходиться одним ПТП со стороны теплоотдающей или тепловоспринимающей поверхности образца. Это дает значительное преимущество в тех случаях, когда на одной из граней образца размещение ПТП по каким-либо техническим (например, недостаточная термостойкость ПТП) или экономическим причинам затруднено.

Кроме того, исследованиями установлено, что защита боковой поверхности образца путем увеличения теплового сопротивления способствует уменьшению отличия между среднеинтегральными значениями входящего и выходящего

теплового потока, то есть организация термостатирования бокового экрана с одновременным обеспечением большого теплового сопротивления теплообмену в зазоре между образцом и экраном способствуют повышению точности измерений коэффициента теплопроводности твердых материалов, что особенно актуально для теплоизоляционных материалов.

Эффективное тепловое сопротивление между нагревателем и образцом, образцом и холодильником (включая контактное сопротивление) практически не сказывается на характере изменения функции  $\chi_{ИЗМ} / \chi_{ОБР}$ . Это позволяет при необходимости использовать эластичные (резиновые или силиконовые) прокладки при монтаже ленточных термопар, измеряющих температуру поверхностей образца [4.18], и снизить требования к качеству подготовки его поверхностей.

Таким образом, можно констатировать, что

– обе схемы (асимметричная и симметричная) исполнения теплотрического прибора для измерения коэффициента теплопроводности являются приемлемыми. Более экономичной является асимметричная схема, но при термостатировании бокового экрана на уровне  $T_{ЭК} = 0,5 \cdot (T_{НАГ} + T_{ХОЛ})$ , либо при использовании образцов с геометрическим параметром  $\gamma > 10$ ;

– при любом способе термостатирования боковой поверхности образца такие приборы позволяют исследовать образцы большей толщины, чем допускает стандарт [4.21], то есть такой толщины, при которой  $\gamma < 5$ ;

– при их проектировании целесообразно ориентироваться на наименьший радиус ЧЭ ПТП, а охранную зону выполнять с тепловым сопротивлением, одинаковым с тепловым сопротивлением ЧЭ.

В любом варианте исполнения теплотрического прибора необходимо обеспечивать изотермичность поверхностей нагревателя и холодильника, контактирующих с исследуемым образцом, боковое термостатирование с теплообменом в

боковом зазоре с тепловым сопротивлением теплообмену не менее  $1 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , отношение площади ЧЭ ПТП к площади образца из диапазона регламентированных в [4.21] значений от 0,1 до 0,4, отдавая предпочтение меньшим значениям, если позволяет структура исследуемого материала и самое главное – гарантировать согласно ДСТУ БВ.2.7–105 [4.21] допускаемую основную относительную погрешность измерения коэффициента теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов на уровне  $\pm 3\%$ .

К сожалению, такие пределы погрешности практически обеспечить весьма трудно по нескольким причинам. Основной вклад в погрешность приборов вносит такая ее составляющая, как уровень точности стандартных образцов теплопроводности, ранее называемых образцовыми мерами теплопроводности, пределы допускаемой относительной погрешности которых колеблются от  $\pm 3$  до  $\pm 5\%$ .

Чтобы удовлетворить требования стандарта [4.21], образец строительного материала допускается изготавливать в виде квадратной пластины (или диска) соответственно форме рабочих поверхностей нагревателя и холодильника, но при этом толщина образца должна быть не менее, чем в пять раз меньше ребра (или диаметра) контактирующих плоскостей нагревателя и холодильника. При наличии в материале образца включений (гранулы заполнителя, крупные поры и т.п.), отличных по ТФХ от основного материала, их средний размер должен быть не более 0,1 толщины образца. Исходя из того, что эффективный поперечный размер образца должен быть не менее 250 мм, а толщина, удовлетворять условию  $D/h \geq 5$ , габариты посадочного места в приборе должны быть: поперечный размер не менее 250 мм, а высота должна позволять размещать образец толщиной до 50 мм.

Изотермичность поверхностей нагревателя и холодильника обеспечивается их изготовлением из высокотеплопроводного металла. Защита боковой поверхности образца осуществляется организацией кольцевой газовой прослойки в

зазоре между боковой поверхностью образца и кожухом или защитным термостатированным экраном. Увеличить тепловое сопротивление теплообмену по боковой поверхности образца можно введением в зазор между образцом и экраном слоя теплоизоляционного материала, что обеспечит его повышение от 0,1 до 2 м<sup>2</sup>·К/Вт.

В качестве заливочного материала могут быть использованы: для ПТП, применяемых при умеренных и низких температурах – эпоксидные компаунды, для ПТП с термостойкостью до 500 К – украинский полимер УП-610, до 1000 К – цементы и эмали. Применение различных наполнителей эпоксидных смол при варьировании их концентраций позволяет обеспечить диапазон значений коэффициента теплопроводности ПТП от 0,3 до 1,2 Вт/(м·К).

ПТП, предназначенный для теплотрического прибора, удовлетворяющий требованиям ДСТУ [4.21], должен быть изготовлен по схеме *а* или *б* рисунка 4.19.

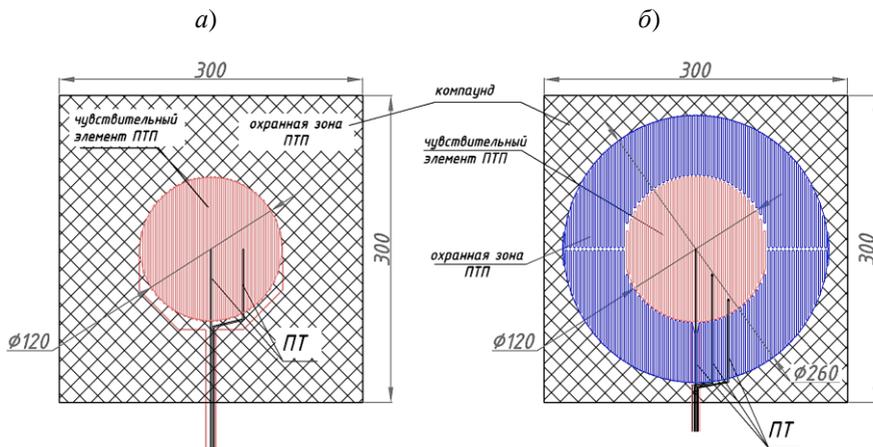


Рис. 4.19. Схемы конструкций ПТП для применения в теплотрическом приборе: *а* – специализированный ПТП; *б* – высокоточный ПТП

Как видно из рис. 4.19, ПТП может быть изготовлен с чувствительной зоной диаметром 120 мм в двух вариантах исполнения: с охранной зоной, роль которой выполняет заливочный компаунд (см. схему рис. 4.19а) или с охранной зоной, сформированной из той же спирали термоэлементов, что и ЧЭ (см. схему рис. 4.19б), для максимального сближения их ТФХ и, соответственно, повышения точности измерений.

Для корректного применения ПТП в теплометрическом приборе необходимо знать значение его коэффициента эффективной теплопроводности, которое рассчитывается согласно методике [2\*, 2.16] по формуле:

$$\chi_{\text{ПТП}} = \frac{\chi_{\text{ОХР}}}{2} \cdot \frac{2\Phi \cdot (\Phi + a - b) \cdot \left( a - \frac{h_{\text{ЧЭ}}}{h_{\text{ПТП}}} \cdot (a - b) \right) - \frac{h_{\text{ЧЭ}}}{h_{\text{ПТП}}} \cdot \frac{\Delta h}{h_{\text{ПТП}}} (a - b)^2 \cdot (\Phi - b)}{\Phi \cdot \left( \Phi + \frac{\Delta h}{h_{\text{ПТП}}} (a - b) \right) \cdot \left( a - \frac{\Delta h}{h_{\text{ПТП}}} (a - b) \right)}, \quad (4.69)$$

где  $\Phi = f_{\text{ТЭ}}/f_1 = (2f_1 + f_2 + f_3)/f_1 = 2 + f_{21} + f_{31}$  – формпараметр ПТП, где  $f_{\text{ТЭ}}$  – площадь сечения термоэлемента; индексы 1, 2, 3 относятся к свойствам, соответственно, основного термоэлектрода, материала гальванического покрытия и заливочного электроизоляционного компаунда;  $f_{i1} = f_i/f_1$  – приведенная площадь термоэлемента ( $i = 2, 3$ );

$$\Delta h = h_{\text{ПТП}} - h_{\text{ЧЭ}};$$

$$a = 2\chi_{13} + \chi_{23} \cdot f_{21}, \text{ где } \chi_{13} = \chi_1/\chi_3, \chi_{23} = \chi_2/\chi_3;$$

$$b = 2 + f_{21}.$$

Из анализа формулы (4.69) следует, что коэффициент эффективной теплопроводности ПТП зависит не только от ТФХ компонентов ПТП, но и от формпараметра ПТП  $\Phi$  и приведенной высоты  $h_{\text{ПТП}}/h_{\text{ЧЭ}}$ . На рисунке 4.20 представлены графики зависимости отношения  $\chi_{\text{ЧЭ}}/\chi_{\text{ОХР}}$  от отношения  $h_{\text{ПТП}}/h_{\text{ЧЭ}}$  (для случая  $\chi_{\text{ОХР}} = 1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ), что на практике обеспечивается использованием эпоксидного компаунда с напол-

нением из порошкообразного корунда), при вариации формпараметра  $\Phi$  в практически целесообразных диапазонах их значений.

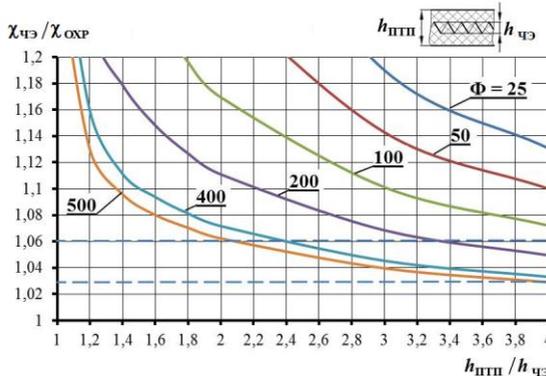


Рис. 4.20. Определение оптимального формпараметра ПТП

На рис. 4.20 видно, что для полученных ранее оптимальных значений отношения  $\chi_{чэ}/\chi_{охр}$  от 1,03 до 1,06 (зона, расположенная между двумя пунктирными линиями), формпараметр ПТП должен быть от 300 до 500.

Однако, формпараметр лишь частично характеризует ПТП как систему с включениями, определяя соотношение геометрических параметров в его сечении по толщине. Основными же техническими характеристиками ПТП является его чувствительность к плотности измеряемого теплового потока, а также электрическое и тепловое сопротивление и размеры. Для обеспечения требуемых значений этих характеристик необходимо предварительно выбрать исходные параметры батареи термоэлементов (диаметр основной проволоки  $d_1$ , оптимальную толщину гальванического покрытия  $\Delta_{opt}$ , плотность заполнения ПТП термоэлементами  $n$ ), ее свойства: коэффициенты теплопроводности  $\chi_1$  и  $\chi_2$ , удельное электрическое сопротивление  $\rho_1$  и  $\rho_2$  материалов термоэлемента, и теплопроводность заливочного компаунда  $\chi_3$ .

Все прогнозные расчеты параметров ПТП выполняются по соотношениям, связывающим чувствительность ПТП с геометрическими и теплофизическими параметрами всех входящих в ПТП элементов [1\*, 2\*, 2.16, 4.38]. Однако, на практике чаще пользуются величиной, обратно пропорциональной чувствительности  $S$  – коэффициентом преобразования измеряемого теплового потока в электрический сигнал  $K_{ПТП} = 1/S_{ПТП}$ .

В случае независимости исходных данных от температуры коэффициент  $K_{ПТП}$  является постоянной величиной, а расчетная формула для вычисления поверхностной плотности теплового потока имеет вид:  $q = K_{ПТП} \cdot E_{ПТП}$ , где  $E_{ПТП}$  – электрический сигнал ПТП. В общем случае при необходимости выполнить измерения в условиях изменения температуры в широком диапазоне значений надо учитывать, что коэффициент преобразования ПТП, оптимизированный относительно максимальной чувствительности, является функцией нескольких параметров, зависящих от температуры:  $K_{ПТП} = f(\rho_{21}(T); \alpha_{1-2}(T); \lambda_i(T); (f_{21})_{opt}(T))$ ,  $i = 1, 2, 3$ , [2\*].

В настоящее время наиболее перспективными термоэлектрическими материалами, применяемыми при изготовлении ПТП для современных теплотрических средств измерения коэффициента теплопроводности, являются пары константан-медь и константан-никель [4.38]. С использованием данных по температурным зависимостям различных параметров ПТП от температуры рассчитаны температурные зависимости коэффициента преобразования  $K_{ПТП}$  для этих ПТП в диапазоне рабочей температуры от 173 до 473 К при вариации отношения площадей сечений  $f_{21}$ , что представлено семействами графиков на рисунке 4.21.

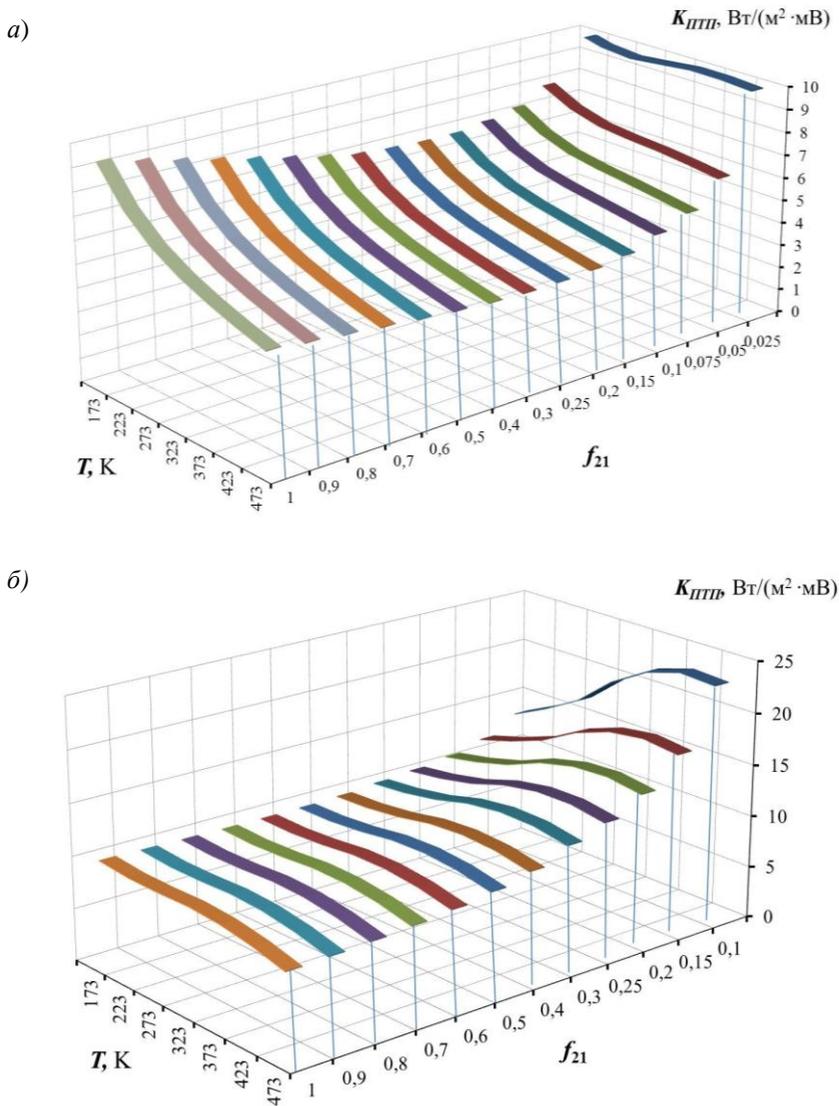


Рис.4.21. Температурная зависимость коэффициентов преобразования ПТП для термоэлектрических пар:  
 а) – константан-медь, б) – константан-никель

Анализ графиков рис. 4.21 показывает явное преимущество константан-никелевых ПТП, так как для них характерна незначительная температурная зависимость коэффициентов преобразования при бóльшей толщине гальванического покрытия, чем в паре константан-медь. При этом одновременно обеспечивается температурная и временная стабильность коэффициента преобразования. Вследствие этого отпадает необходимость проводить калибровку теплотрического прибора для измерения коэффициента теплопроводности по рабочим эталонам до и после каждого эксперимента, как рекомендуется в нормативных документах [4.21, 4.22].

#### **4.2 Теплотрический зондовый метод локального теплового воздействия на образец**

Необходимость экономного отношения к энергии и энергоресурсам вызвала рост спроса на теплоизоляционные материалы. Для определения и контроля их качества имеются, как правило, дорогостоящие стационарные лабораторные установки, цикл измерения в которых составляет от нескольких часов до нескольких суток.

Наряду с тепловыми испытаниями образцов материалов в лабораторных условиях возникает потребность в проведении экспрессного измерения коэффициента теплопроводности строительных материалов и изделий неразрушающим способом в производственных условиях: в цеху предприятия-изготовителя или на стройплощадке.

Такие измерения способствуют как повышению качества выпускаемой продукции, так и качества выполняемых строительных работ. При этом в первом случае появляется возможность контроля кондиционности изготавливаемых материалов и изделий перед их отправкой на строительный объект. Во втором – возможности предварительного экспресс-контроля по значению коэффициента теплопроводности строительных изделий, теплоизоляционных блоков и матери-

алов, поступивших от изготовителя с целью своевременной отбраковки некондиционных элементов.

В связи с этим появилась потребность в компактных переносных приборах-тестерах зондового типа, позволяющих определять неразрушающим способом коэффициент теплопроводности за 5 – 30 минут в лабораторных и производственных условиях. При этом зонд должен иметь пятно контакта с поверхностью исследуемого образца материала таких размеров, чтобы образец можно было считать полубесконечным массивом или плитой конечной толщины, а также позволять исследовать образцы произвольной формы или уже готового изделия.

Возможности совокупных измерений плотности теплового потока и температуры первичными термоэлектрическими преобразователями (ПТП и ПТ) позволили создать теплотрический *метод локального теплового воздействия* на образец, который лег в основу компактных переносных приборов для исследования широкой номенклатуры теплоизоляционных и строительных материалов: твердых пористых, волокнистых и сыпучих [4.39].

#### 4.2.1 Суть метода и его теоретическое обоснование

Суть метода локального теплового воздействия для определения коэффициента теплопроводности твердого тела заключается в подведении теплового потока постоянной плотности к поверхности исследуемого образца через ограниченное пятно контакта с зондом. Значение коэффициента теплопроводности находят по результатам измерения в стационарном тепловом состоянии плотности потока теплового воздействия  $q$  и разности значений температуры в центре пятна воздействия  $T_{\text{п}}$  и на периферии поверхности образца  $T_{\infty}$ , где тепловое влияние можно считать нулевым. Существенными особенностями метода являются возможность использования для измерения образца произвольной формы

(или готового изделия) с одной плоской поверхностью и сравнительно малое время измерений.

Для идеализированного случая, когда температура поверхности тела внутри пятна воздействия радиусом  $r_{\Pi}$  принята постоянной, на свободной поверхности образца теплообмен с ОС отсутствует, а контактное тепловое сопротивление между поверхностями зонда и образца не учитывается, расчетная формула имеет вид [4.40]:

$$\chi = 0,25\pi \cdot r_{\Pi} \cdot q / (T_{\Pi} - T_{\infty}). \quad (4.70)$$

Однако, поскольку на практике измерения проводят, как правило, при наличии теплообмена поверхности образца с ОС и контактного теплового сопротивления между зондом и образцом, применение формулы (4.70) приводит изначально к значительным погрешностям результатов измерения.

При измерении на поверхность тела (образца), температура которого принята равной температуре ОС, помещают зонд, содержащий малогабаритный источник теплоты. С его помощью через пятно контакта на поверхности образца воздействуют тепловым потоком постоянной плотности, в силу чего исходное температурное поле образца претерпевает локальное искажение и перестает быть одномерным. Кроме того, на поверхности за пределами пятна воздействия имеют место тепловые потери из-за конвективно-радиационного теплообмена с ОС, характеристикой которого является эффективный коэффициент теплообмена  $\alpha_{эф}$ .

Как правило, плотность потока теплового воздействия определяют по мощности подведенного к зонду электропитания и площади теплоотдающей поверхности зонда. Однако, можно обеспечить непосредственное определение плотности теплового потока с помощью первичного измерительного ПТП. В зондовых приборах ИТТФ применен плоский термоэлектрический ПТП вида вспомогательной стенки [1.4], который располагают таким образом, что при контакте зонда с образцом он оказывается между источником теплоты зонда и

поверхностью образца. При этом диаметр ПТП выполняют равным диаметру источника теплоты, что позволяет в теоретических выкладках принимать одинаковые размеры пятна воздействия и ПТП ( $r_{ПТП} = r_{П}$ ).

Работа зондового теплотеметрического прибора [4.39], реализующего метод локального теплового воздействия на поверхность полубесконечного массива, основана на закономерности теплообмена в системе «полубесконечный массив (образец) – зонд (ПТП)», физическая модель, которого представлена на рисунке 4.22.

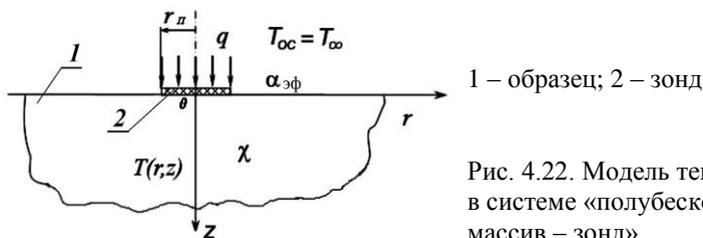


Рис. 4.22. Модель теплообмена в системе «полубесконечный массив – зонд»

Стационарному температурному полю массива при условии независимости ТФХ от температуры при наличии осевой симметрии соответствует уравнение (4.31) теплопроводности в цилиндрических координатах  $z$  и  $r$  [2.17; 4.34], в котором температуре  $T(z; r)$  соответствует переменная величина, в качестве которой взята избыточная температура образца, равная разности значений температуры в определенной точке образца, например, в центре зоны теплового воздействия, и в отдаленной точке поверхности, не подверженной его влиянию. Если температуру на периферии образца принять равной температуре окружающей среды  $T_{\infty} = T_{OC}$ , то избыточной температурой на поверхности полубесконечного массива будет функция  $\vartheta(0; r) = T(0; r) - T_{OC}$ .

Основная теоретическая зависимость метода получается из функции для избыточной температуры  $\vartheta(r, t)$ , взятой относительно температуры в центре пятна контакта ( $r = 0$  и

$z = 0$ ), которая определяется из решения уравнения (4.31) при таких граничных условиях:

$$\begin{cases} \frac{\partial T(z; r)}{\partial z} - \frac{\alpha_{\text{эф}}}{\chi} \cdot T(z; r) = \frac{q}{\chi} \cdot U(r_{II} - r) & \text{при } z = 0 \\ T(\infty; r) = 0; \quad T(z; \infty) = 0; \quad T(z; 0) < \infty, \end{cases} \quad (4.71)$$

где  $\alpha_{\text{эф}}$  – эффективный коэффициент теплообмена поверхности массива за пределами пятна контакта с ОС, равный сумме конвективной и радиационной составляющих теплообмена;

$q$  – плотность заданного потока теплового воздействия через пятно контакта радиусом  $r_{II}$ ;

$U(r_{II} - r)$  – единичная ступенчатая функция, равная

$$\begin{cases} 0 & \text{при } r > r_{II}, \\ 1 & \text{при } r \leq r_{II}. \end{cases} \quad (4.72)$$

Решение уравнения (4.31) в безразмерных цилиндрических координатах  $\xi = z/r_{II}$ ,  $\rho = r/r_{II}$  для функции избыточной температуры  $\vartheta(\rho, \xi)$  при граничных условиях (4.71) имеет вид [4.39]:

$$\vartheta(\rho; \xi) = r_{II} \cdot I(\rho; \xi) \cdot q/\chi, \quad (4.73)$$

$$\text{где } I(\rho; \xi) = \int_0^{\infty} \frac{\exp(-\xi \cdot x) \cdot J_1(x) \cdot J_0(\rho \cdot x)}{x + Bi} dx, \quad (4.74)$$

где  $J_0$  и  $J_1$  – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка [4.36],  $Bi = \alpha_{\text{эф}} \cdot r_{II} / \chi$  – число Био.

С учетом того, что плотность потока, рассеиваемого свободной поверхностью образца в ОС, равна:

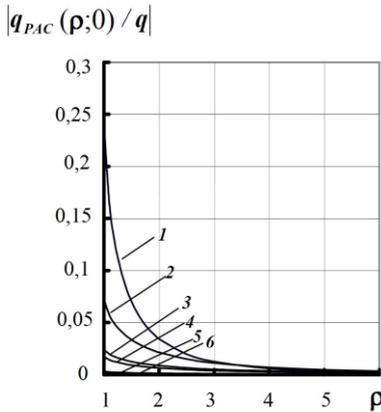
$$q_{\text{РАСС}}(\rho; 0) = \alpha_{\text{эф}} \cdot \vartheta(\rho; \xi) \quad \text{при } \rho > 1 \text{ и } \xi = 0, \quad (4.75)$$

и используя решение (4.73), для модуля отношения значений плотности теплового потока, рассеиваемого свободной поверхностью образца и заданного теплового воздействия, получено выражение:

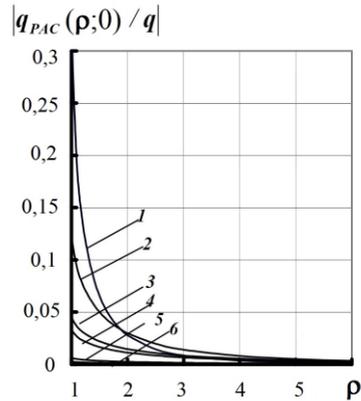
$$|q_{PAC}(\rho;0)/q| = \alpha_{\text{ЭФ}} \cdot \vartheta(\rho;0)/q \quad \text{при } \rho > 1. \quad (4.76)$$

Результаты счета по формуле (4.76) для двух фиксированных значений коэффициента теплообмена  $\alpha_{\text{ЭФ}} = 3$  и  $6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , систематизированные на рисунке 4.23 [4.39], показывают характер изменения модуля приведенной плотности рассеиваемого теплового потока (4.76).

а)



б)



а –  $\alpha_{\text{ЭФ}} = 3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; б –  $6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

1 –  $\chi = 0,03$ ; 2 –  $0,196$ ; 3 –  $0,690$ ; 4 –  $11,0$ ; 5 –  $6,0$ ; 6 –  $15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$

Рис. 4.23. Распределение приведенной плотности теплового потока на свободной поверхности образца для двух значений коэффициента теплообмена при вариации коэффициента теплопроводности

Из графиков рис. 4.23 следует, что зона поверхности образца, не испытывающая заданного теплового воздействия, практически расположена при значениях безразмерного радиуса  $\rho > 5$ .

Исходя из решения (4.73), расчетная формула метода локального теплового воздействия имеет вид:

$$\chi = r_{II} \cdot I(\rho; \xi) \cdot q / \vartheta(\rho; \xi), \quad (4.77)$$

вычисления по которой при  $\xi = 0$  дают значение коэффициента теплопроводности исследуемого материала по результатам измерения плотности заданного потока теплового воздействия и избыточной температуры.

Функция избыточной температуры (4.73) позволяет исследовать влияющие факторы, к которым относится динамический диапазон измерения коэффициента теплопроводности, размер пятна теплового воздействия, теплообмен поверхности образца с ОС, тепловое контактное сопротивление между соприкасающимися поверхностями зонда и образца, а также толщина плоского образца, если его нельзя считать полубесконечным массивом [4.41].

Исследование влияющих факторов выполнено путем вычислительных экспериментов по определению комплексной величины, равной отношению измеряемых значений плотности потока теплового воздействия и избыточной температуры  $q/\vartheta(\rho; \xi)$  при  $\xi = 0$ , исходя из формулы (4.77):

$$q/\vartheta(\rho; 0) = (\chi/r_{II}) \cdot I^{-1}(\rho; 0), \quad (4.78)$$

где  $I(\rho; 0)$  – по формуле (4.74).

Значения комплексной величины, получаемые по формуле (4.78), характеризуют результат измерений, так как именно эта величина представляет собой выходной сигнал зондового прибора. Результаты вычислений в диапазоне значений аргумента  $q/\vartheta$  от 10 до  $10^4$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) для двух фиксированных значений радиуса пятна контакта ( $r_{II} = 1$  и 10 мм) при вариации условий теплообмена на свободной поверхности образца ( $\alpha_{э\phi} = 0; 1; 2 \dots 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)) показали существенное влияние на результат измерения коэффициента теплопроводности наличия теплообмена поверхности образца с ОС.

Корректное измерение с помощью зонда, у которого  $r_{II} = 1$  мм, возможно без стабилизации или учета условий поверхностного теплообмена только при исследовании материала с коэффициентом теплопроводности  $\chi > 0,1$  Вт/(м·К).

С увеличением радиуса пятна воздействия до 10 мм допускается корректное измерение коэффициентов теплопроводности в диапазоне от 0,1 до 1,0 Вт/(м·К) только при условии учета теплообмена с ОС, а измерение коэффициента  $\chi > 1,0$  Вт/(м·К) возможно без учета влияния теплообмена.

Расчеты, выполненные по формуле (4.78) в диапазоне значений аргумента  $\chi/r_{\Pi} = 1 - 10^5$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) при вариации значений коэффициента теплопроводности от 0 до 10 Вт/(м·К) с шагом 1 Вт/(м·К) показали, что выходной сигнал прибора  $q/\vartheta$  существенно зависит от аргумента  $\chi/r_{\Pi}$  в области его значений, меньших 100. Этим условием продиктовано исполнение зонда с обязательным обеспечением максимально возможного значения отношения  $\chi/r_{\Pi}$ . Проще всего этого можно достичь уменьшением радиуса пятна теплового воздействия  $r_{\Pi}$ . Однако, уменьшение радиуса неизбежно приводит к ограничению применимости метода локального теплового воздействия лишь к гомогенным материалам.

При измерении коэффициентов теплопроводности таких материалов, как различные композиционные и строительные, для которых характерна существенная неоднородность структуры, при выборе радиуса пятна воздействия необходимо учитывать наличие включений, например, пор или частиц наполнителей. В связи с этим радиус должен быть значительно больше размеров включений, чтобы площадь контакта зонда с поверхностью исследуемого образца перекрывала их представительное количество. Например, зонд должен иметь диаметр пятна контакта более 20 мм, чтобы перекрыть поверхность участка, содержащего не менее 50 пор.

Взаимоисключающие требования к радиусу  $r_{\Pi}$  приводят к компромиссу между двумя альтернативными решениями: уменьшать радиус пятна контакта зонда с образцом, если это допустимо, и стабилизировать теплообмен на свободной поверхности образца.

В методе локального теплового воздействия, кроме наличия теплообмена с ОС, наиболее весомым является влияющий фактор, обусловленный контактным тепловым сопротивлением  $R_K$  между поверхностями исследуемого материала и зонда. Формула (4.70) может быть использована для определения коэффициента теплопроводности только при измерении в идеализированных условиях [4.40], когда отсутствуют теплообмен с ОС на поверхности образца и контактное тепловое сопротивление, которое вносит погрешность в значение измеряемой избыточной температуры. Однако, при массовых технических измерениях, особенно в производственных и полевых условиях, неизменно присутствуют оба фактора:  $\alpha_{\text{эф}}$  и  $R_K$ .

Практически в приборе, реализующем теплотрический метод локального теплового воздействия на образец через пятно контакта конечных размеров, измеряемой температурой является температура, средняя по площади пятна контакта. В связи с этим корректнее за избыточную температуру в зоне контакта с образцом ( $0 \leq \rho \leq 1$ ,  $\xi = 0$ ) брать среднеинтегральную температуру  $\vartheta_{CP}(1;0)$ , равную

$$\vartheta_{CP}(1;0) = \frac{q \cdot r_{II}}{\chi} \cdot I_{CP}(1;0), \quad (4.79)$$

где  $I_{CP}(1;0) = 2 \int_0^x \frac{\exp(-\xi \cdot x)}{x + Bi} \cdot \frac{J_1^2(x)}{x} \cdot dx$ . (4.80)

С учетом контактного теплового сопротивления выражение (4.79) принимает вид:

$$\vartheta_{CP}(1;0) = q \cdot r_{II} \cdot I_{CP}(1;0) / \chi + R_K \cdot q, \quad (4.81)$$

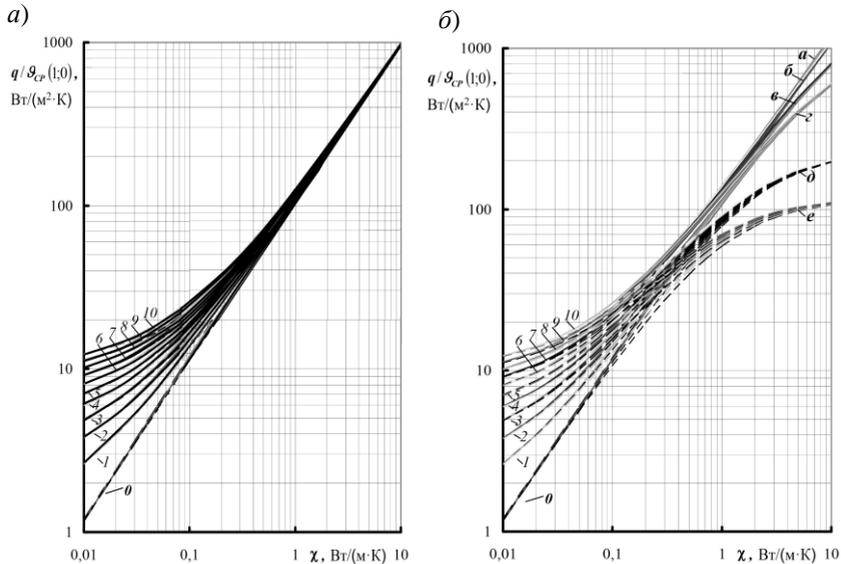
из которой получается формула для измеряемой комплексной величины:

$$q / \vartheta_{CP}(1;0) = (r_{II} \cdot I_{CP}(1;0) / \chi + R_K)^{-1}, \quad (4.82)$$

а также искомого коэффициента теплопроводности:

$$\chi = r_{II} \cdot I_{CP}(1;0) \cdot q / \vartheta_{CP}(1;0) \cdot (1 - R_K \cdot q / \vartheta_{CP}(1;0))^{-1}. \quad (4.83)$$

Характер изменения комплексной величины  $q/\vartheta_{CP}(1;0)$  исследован расчетным путем с использованием формулы (4.73) для зонда, выполненного с радиусом  $r_{II} = 10$  мм, при вариации эффективного коэффициента теплообмена на свободной поверхности полубесконечного массива  $\alpha_{\vartheta\phi}$  и контактного теплового сопротивления  $R_K$  в пределах пятна контакта с массивом. Результаты этого эксперимента представлены на рисунке 4.24 *а* и *б*, при этом графики на рис. 4.24*а* получены при условии  $R_K = 0$ , а на рис. 4.24*б* – при вариации контактного сопротивления.



Графики 0 –  $\alpha_{\vartheta\phi} = 0$ ; 1 – 1; 2 – 2; – ; 10 – 10 Вт/(м<sup>2</sup>·К)

Графики *a* –  $R_K = 0$ ; *б* –  $10^{-4}$ ; *в* –  $5 \cdot 10^{-4}$ ; *г* –  $10^{-3}$ ; *д* –  $5 \cdot 10^{-3}$ ; *е* –  $10^{-2}$  м<sup>2</sup>·К/Вт

Рис. 4.24. Зависимость комплексной величины  $q/\vartheta_{CP}(1;0)$  от коэффициента теплопроводности материала для зонда с радиусом пятна контакта  $r_{II} = 10$  мм при вариации  $\alpha_{\vartheta\phi}$  в отсутствие (*а*) и при вариации (*б*) контактного теплового сопротивления  $R_K$

Полученные результаты свидетельствуют о том, что влияние теплообмена с ОС особенно проявляется при исследовании материалов с низкой теплопроводностью  $\chi < 0,2$  Вт/(м·К). Поэтому целесообразно при работе с образцами теплоизоляционных материалов обеспечивать условия, при которых  $\alpha_{\text{эф}} \leq 2$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Влияние теплообмена на результат измерения можно снизить уменьшением радиуса пятна теплового воздействия. Если по состоянию структуры материала нельзя уменьшить пятно теплового воздействия (например, для пористых материалов), необходимо обеспечить пятно воздействия с радиусом  $r_{\text{п}}$  до 10 мм и принимать меры для уменьшения интенсивности теплообмена с ОС.

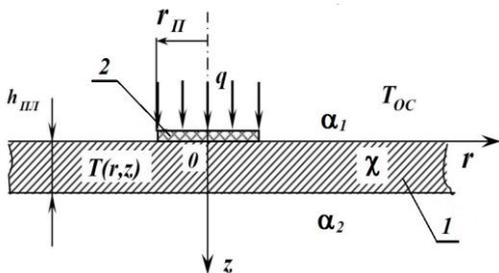
Влияние контактного теплового сопротивления весьма заметно проявляется при исследовании материалов с коэффициентом теплопроводности  $\chi > 0,2$  Вт/(м·К). Для его уменьшения требуется применение специальных мер, таких как шлифовка поверхности образца в пятне контакта до соответствующего класса обработки; применение высокотеплопроводных смазок, а также переход к измерению избыточной температуры за пределами пятна контакта выносной дифференциальной термопарой [4.42].

Аналогичные расчеты в зависимости от радиуса пятна воздействия показали, что при  $r_{\text{п}}=1$  мм корректное измерение теплопроводности возможно без стабилизации или учета теплообмена с ОС, но лишь для материалов с  $\chi > 0,1$  Вт/(м·К). С увеличением радиуса  $r_{\text{п}}$  до 10 мм допускается измерение теплопроводности в диапазоне от 0,1 до 1,0 Вт/(м·К) только при условии учета контактного сопротивления, а для материалов с  $\chi < 0,1$  Вт/(м·К) – обязательным является учет влияния интенсивности теплообмена.

Таким образом, при измерении теплопроводности пористых материалов, для которых характерным является

$\chi > 0,1$  Вт/(м·К), радиус пятна контакта зонда с образцом из-за наличия пор должен быть более 10 мм. В противном случае необходимы меры по стабилизации теплообмена на свободной поверхности образца либо учет его влияния поправками.

В реальных условиях измерения коэффициента теплопроводности строительных материалов и изделий часто образец не является полубесконечным массивом, а его толщина, если и достаточно большая по сравнению с размерами пятна воздействия, но, тем не менее, конечна. При этом по обе стороны плоского образца конечной толщины происходит радиационно-конвективный теплообмен с окружающей средой с эффективными коэффициентами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Модель теплообмена в системе «пластина конечной толщины – зонд» представлена на рисунке 4.25.



1 – образец в виде пластины конечной толщины,  
2 – зонд

Рис. 4.25. Модель теплообмена в системе «бесконечная пластина – зонд»

При воздействии локального теплового потока через зону контакта температурное поле пластины становится двумерным и также описывается стационарным уравнением теплопроводности (4.31) при таких граничных условиях [4.43]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T(z; r)}{\partial z} - \frac{\alpha_1}{\chi} \cdot T(z, r) = \frac{q}{\chi} \cdot U(r_{п} - r) \text{ при } z = 0, \\ \frac{\partial T(z; r)}{\partial z} + \frac{\alpha_2}{\chi} \cdot T(z; r) = 0 \text{ при } z = h_{пл}, \quad 0 < r < \infty, \\ T(z; \infty) = 0, \quad T(z; 0) < \infty. \end{array} \right. \quad (4.84)$$

Решение уравнения (4.31) при граничных условиях (4.84) с учетом (4.72) дает распределение локальной избыточной температуры в пластине конечной толщины  $h_{III}$  в безразмерных цилиндрических координатах в виде функции:

$$\vartheta_{ЛОК. III}(\rho; \xi) = \frac{q \cdot r_{II}}{\chi} \cdot S(\rho; \xi), \quad (4.85)$$

$$\text{где } S(\rho; \xi) = \int_0^{\infty} \frac{A(x; \xi) + B(x; \xi)}{C(x; \xi) - D(x; \xi)} \cdot J_1(x) \cdot J_0(\rho \cdot x) dx, \quad (4.86)$$

$$\text{где } A(x; \xi) = (x + Bi_2) \cdot \exp((k_h - \xi) \cdot x);$$

$$B(x; \xi) = (x - Bi_2) \cdot \exp(-(k_h - \xi) \cdot x);$$

$$C(x; \xi) = (x + Bi_1) \cdot (x + Bi_2) \cdot \exp(k_h \cdot x);$$

$$D(x; \xi) = (x - Bi_1) \cdot (x - Bi_2) \cdot \exp(-k_h \cdot x);$$

$$k_h = h_{III} / r_{II}; \quad Bi_1 = \alpha_1 \cdot r_{II} / \chi; \quad Bi_2 = \alpha_2 \cdot r_{II} / \chi.$$

Интегрированием функции  $\vartheta_{ЛОК. III}(\rho; 0)$  по площади пятна теплового воздействия получается функция среднеинтегральной избыточной температуры

$$\vartheta_{СР. III}(1; 0) = r_{II} \cdot S_{СР}(1; 0) \cdot q / \chi, \quad (4.87)$$

$$\text{где } S_{СР}(1; 0) = \int_0^{\infty} \frac{A(x; \xi) + B(x; \xi)}{C(x; \xi) - D(x; \xi)} \cdot \frac{2J_1^2(x)}{x} dx, \quad (4.88)$$

а коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  приведены выше.

Формула для вычисления коэффициента теплопроводности материала по результатам измерения на пластине, исходя из (4.87), имеет вид:

$$\chi = r_{II} \cdot S_{СР}(1; 0) \cdot q / \vartheta_{СР. III}(1; 0), \quad (4.89)$$

а комплексная величина  $q / \vartheta_{СР. III}(1; 0)$  в этом случае равна:

$$q / \vartheta_{СР. III}(1; 0) = \chi / (r_{II} \cdot S_{СР}(1; 0)). \quad (4.90)$$

По аналогии с нахождением выражения (4.85) для локальной избыточной температуры пластины  $\vartheta_{ЛОК. III}(\rho; \xi)$  найдено выражение для локальной избыточной температуры

образца из того же материала, но представляющего полубесконечный массив,  $\vartheta_{ЛОК.∞}(\rho; \xi)$  с таким же диаметром пятна теплового воздействия. Это выражение, исходя из решения (4.73) уравнения (4.31) при граничных условиях (4.71) для полубесконечного массива, имеет вид:

$$\vartheta_{ЛОК.∞}(\rho; \xi) = r_{II} \cdot I(1;0) \cdot q/\chi, \quad (4.91)$$

где функция  $I(\rho; \xi)$  рассчитана по формуле (4.74).

По аналогии с пластиной конечной толщины интегрированием функции (4.91) получено выражение для среднеинтегральной температуры по площади пятна теплового воздействия:

$$\vartheta_{СР.∞}(1;0) = r_{II} \cdot I_{СР}(1;0) \cdot q/\chi, \quad (4.92)$$

$$\text{где } I_{СР}(1;0) = \int_0^{\infty} \frac{1}{x + Bi_1} \cdot \frac{2J_1^2(x)}{x} dx, \quad (4.93)$$

а формула для вычисления коэффициента теплопроводности материала по измерениям на поверхности образца ( $\xi=0$ ), представляющего полубесконечный массив, исходя из (4.92), имеет вид:

$$\chi = r_{II} \cdot I_{СР}(1;0) \cdot q/\vartheta_{СР.∞}(1;0). \quad (4.94)$$

Поскольку оба образца – пластина и полубесконечный массив – изготовлены из одного и того же материала с коэффициентом теплопроводности  $\chi$ , то правые части равенств (4.89) и (4.94) – равны, то есть

$$r_{II} \cdot S_{СР}(1;0) \cdot q/\vartheta_{СР.ПЛ}(1;0) = r_{II} \cdot I_{СР}(1;0) \cdot q/\vartheta_{СР.∞}(1;0), \quad (4.95)$$

откуда выражение для сопоставления сигналов, получаемых при измерениях на поверхности полубесконечного массива и пластины конечной толщины, имеет вид:

$$\frac{q}{\vartheta_{СР.∞}(1;0)} = \frac{q}{\vartheta_{СР.ПЛ}(1;0)} \cdot \frac{S_{СР}(1;0)}{I_{СР}(1;0)} = \frac{q}{\vartheta_{СР.ПЛ}(1;0)} \cdot \gamma, \quad (4.96)$$

где  $\gamma$  – поправочный коэффициент, рассчитываемый с учетом формул (4.88) и (4.74) по формуле:

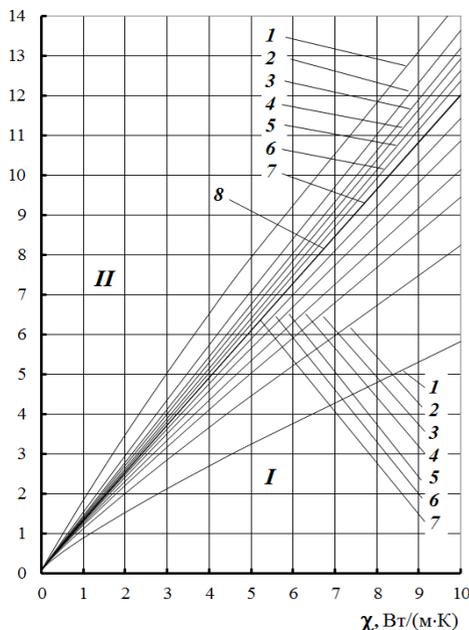
$$\gamma = S_{CP}(1;0) / I_{CP}(1;0). \quad (4.97)$$

С помощью поправочного коэффициента  $\gamma$  можно откорректировать данные, полученные измерением на пластине, к данным, соответствующим полубесконечному массиву, то есть которые дают результат, близкий истинному значению коэффициента теплопроводности:

$$\chi = \frac{r_{II} \cdot q}{\vartheta_{CP,II}(1;0)} \cdot \gamma. \quad (4.98)$$

Зависимость комплексной величины  $q/\vartheta_{CP,II}(1;0)$  (4.90) при вариации относительной толщины пластины  $h_{II}/r_{II}$  для зонда с радиусом  $r_{II} = 10$  мм и образца в виде бесконечной пластины исследована расчетным путем. Результаты вычислительного эксперимента представлены на рисунке 4.26.

$q_{II} \cdot r_{II} / \vartheta_{CP,II}(\rho; \xi)$



1 –  $h_{II}/r_{II} = 1$ ; 2 – 2; ...  
7 – 8, 9, 10; 8 –  $\infty$  (образец – полубесконечный массив);

**I** – теплообмен при  
 $\alpha_1 = 6$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  
 $\alpha_2 = 0$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)

**II** – теплообмен при  
 $\alpha_1 = 6$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  
 $\alpha_2 = 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)

Рис. 4.26. Результаты вычислительного эксперимента для образца в виде бесконечной пластины при наличии теплообмена на ее поверхностях

Вычисления выполнены по формуле (4.90) в диапазоне коэффициента теплопроводности  $0,01 - 10$  Вт/(м·К) при вариации относительной толщины пластины  $h_{III}/r_{II}$  от 1 до 10 с шагом 1 при наличии теплообмена на обеих поверхностях пластины в два этапа:

$$I - \alpha_1 = 6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \text{ и } \alpha_2 = 0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

$$II - \alpha_1 = 6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \text{ и } \alpha_2 = 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

На рис. 4.26 видно, что отклонения графиков 1 – 7 от графика 8 в области *I*, т. е. в условиях теплоизолированной поверхности ( $\alpha_2 = 0$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)), заметно больше по сравнению с их отклонениями в области *II*, имеющими место в условиях интенсивного теплообмена на второй поверхности ( $\alpha_2 = 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)).

Это значит, что в первом случае прибор показывает заниженные, а во втором завышенные значения коэффициентов теплопроводности по сравнению с истинными, которые представлены графиком 8. Чтобы уменьшить этот эффект, можно использовать линейную комбинацию решений с разнонаправленными отклонениями. Для этого надо выполнить два эксперимента (метод двух измерений) на образце из одной и той же пластины, но при двух предельных значениях коэффициента теплообмена на второй стороне пластины:  $\alpha_2 \rightarrow 0$  и  $\alpha_2 \rightarrow \infty$ . От полученных результатов следует взять среднее арифметическое, которое значительно ближе к истинному значению коэффициента теплопроводности.

Даже такой сравнительно простой прием допускает не применять поправки к результатам измерений, проводимых на пластине из материалов, коэффициент теплопроводности которых находится в диапазоне от 0,02 до 2,5 Вт/(м·К). Этот диапазон охватывает практически все основные материалы, используемые в строительстве.

Однако, проще всего пользоваться поправочным коэффициентом  $\gamma$ , рассчитываемым по формуле (4.97), поскольку

он позволяет от данных, полученных на пластине  $(q/\vartheta_{CP.ПЛ})_{ИЗМ}$ , перейти к результату, соответствующему полубесконечному массиву, дающему более близкое к истинному значение коэффициента теплопроводности:

$$\chi_{ОБР.\infty} = \chi_{ИЗМ.ПЛ} \cdot \gamma = (q/\vartheta_{CP.ПЛ})_{ИЗМ} \cdot r_{П} \cdot \gamma \quad (4.99)$$

Зависимости поправочного коэффициента  $\gamma$  от теплопроводности материала при вариации толщины образца в виде пластины приведены на рисунке 4.27.

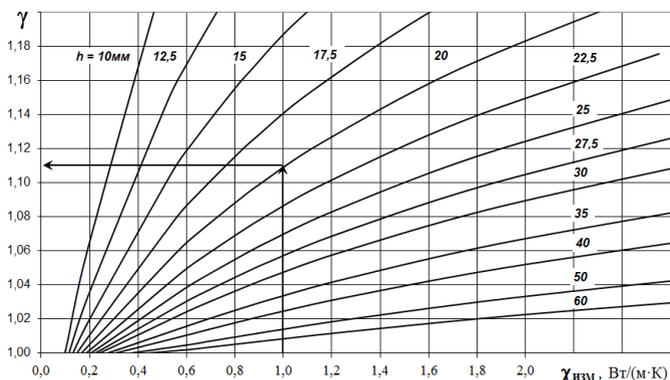
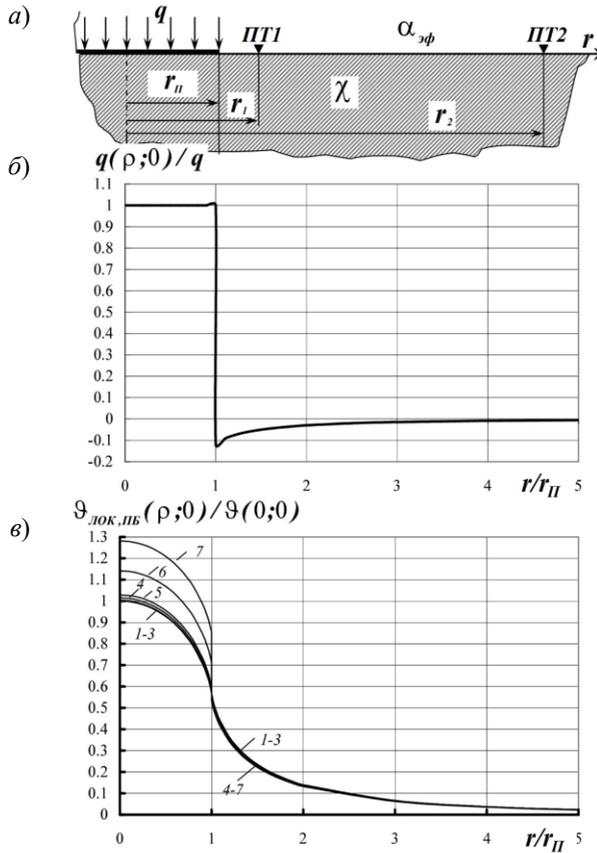


Рис. 4.27. Зависимость поправочного коэффициента от толщины пластины-образца и измеренного коэффициента теплопроводности

#### 4.2.2 Способы уменьшения влияния факторов, искажающих результаты измерения

Существенным источником погрешности определения коэффициента теплопроводности с применением накладного поверхностного зонда, оказывающего локальное тепловое воздействие на исследуемый образец, является контактное тепловое сопротивление между поверхностью образца и сечением зонда, в которое вмонтирован чувствительный элемент ПТ. Уменьшения влияния этого фактора на точность измерения избыточной температуры с применением термопары, спай которой размещен в центре зонда, можно достичь

измерением с применением ПТ, вынесенного за пределы зонда, что проиллюстрировано на рисунке 4.28 [4.42].



ПТ 1, ПТ 2 – выносные преобразователи температуры (термопары)

1 –  $R_K(R_{СЛ}) = 0$ ; 2 –  $10^{-5}$ ; 3 –  $10^{-4}$ ; 4 –  $5 \cdot 10^{-4}$ ; 5 –  $10^{-3}$ ; 6 –  $5 \cdot 10^{-3}$ ; 7 –  $10^{-2} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$

Рис. 4.28. Схема измерения (а) и графики распределения относительных плотностей теплового потока (б) и локальной избыточной температуры (в) в радиальном направлении по поверхности полубесконечного массива из материала с  $\chi = 0,196 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  при теплообмене на поверхности образца с ОС с  $\alpha_{эф} = 6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  и вариацией теплового сопротивления  $R_K(R_{СЛ})$

Преобразователь температуры ПТ1 вынесен из зонда на поверхность исследуемого образца, а ПТ2 расположен в зоне поверхности образца, не подверженной локальному тепловому воздействию.

Так как плотность  $q$  потока теплового воздействия – постоянная величина, то при  $\rho \leq 1$  отношение  $q(\rho;0)/q=1$ . За пределами пятна теплового воздействия, ( $\rho > 1$ ), из-за рассеивания теплоты поверхностью образца в ОС плотность теплового потока представляет собой функцию от радиальной координаты, зависящую от интенсивности теплообмена с ОС (см. формулу (4.75)).

Характер изменения относительной плотности теплового потока  $q(\rho;0)/q$  для образца в виде полубесконечного массива, показанный на рис. 4.28б, рассчитанной для образца с коэффициентом  $\chi=0,196$  Вт/(м·К) при наличии теплообмена на свободной от зонда поверхности образца с  $\alpha_{эф}=6$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), свидетельствует о том, что при распространении потока теплового воздействия в радиальном направлении по поверхности массива относительный тепловой поток  $q(\rho;0)/q=1$  при  $\rho < 1$ , а на границе зонда (то есть при  $\rho=1$ ) резко меняет направление и затем с удалением от зонда ( $\rho > 1$ ) плавно приближается к нулю.

Избыточная локальная температура поверхности образца – полубесконечного массива в пределах пятна теплового контакта  $\vartheta_{ЛОК}(\rho \leq 1;0)$  при наличии теплового сопротивления по аналогии с формулой (4.81) имеет вид:

$$\vartheta_{ЛОК}(\rho \leq 1;0) = q \cdot r_{П} \cdot I(\rho;0) / \chi + R_K \cdot q, \quad (4.100)$$

из которого получена формула для отношения локальной избыточной температуры при наличии контактного сопротивления,  $\vartheta_{ЛОК}(\rho \leq 1;0)|_{R_K \neq 0}$ , к ее значению в центре пятна воздействия, но при отсутствии контактного сопротивления:

$$\begin{aligned} & \vartheta_{ЛОК}(\rho \leq 1; 0) \Big|_{R_K \neq 0} / \vartheta_{ЛОК}(0; 0) \Big|_{R_K = 0} = \\ & = (r_{II} \cdot I(\rho \leq 1, 0) / \chi + R_K) / (r_{II} \cdot I(0; 0) / \chi). \end{aligned} \quad (4.101)$$

Результаты вычислений по формуле (4.101) представлены на рисунке 4.28*в* для  $\rho \leq 1$ . Расчеты выполнены для таких же условий, что и для графиков *б*), но при вариации контактного теплового сопротивления. При этом семейство полученных кривых 1 – 7 показывает, что контактное тепловое сопротивление приводит к существенным отклонениям значения температуры, измеренной установленным в зоне пятна воздействия ПТ, по сравнению с ее значением при отсутствии контактного теплового сопротивления. При этом с увеличением теплового сопротивления эти отклонения возрастают.

Однако, если основной преобразователь ПТ1 вынести, как показано на схеме рис. 4.28*а*, за пределы зонда на фиксированное расстояние от пятна воздействия, его ЧЭ при нахождении на поверхности образца практически оказывается помещённым в тонкий слой материала, покрывающего поверхность образца. Этот слой имеет тепловое сопротивление  $R_{СЛ}$ , аналогичное контактному сопротивлению в зоне  $\rho \leq 1$ , а теплообмен поверхности с ОС будет характеризоваться не эффективным, а эквивалентным коэффициентом теплообмена  $\alpha_{ЭКВ}$ , который с учетом теплового сопротивления слоя заделки чувствительного элемента ПТ1 равен:

$$\alpha_{ЭКВ} = (1/\alpha_{ЭФ} + R_{СЛ})^{-1} = \alpha_{ЭФ} / (1 + \alpha_{ЭФ} \cdot R_{СЛ}). \quad (4.102)$$

В этом случае измеряемая преобразователем ПТ1 локальная избыточная температура  $\tilde{\vartheta}_{ЛОК\infty}(\rho > 1; 0)$  с учетом теплового сопротивления слоя  $R_{СЛ}$  вычисляется при  $\rho > 1$  по формуле:

$$\tilde{\vartheta}_{ЛОК\infty}(\rho > 1; 0) = \vartheta_{ЛОК\infty}(\rho > 1; 0) - R_{СЛ} \cdot q_{ЛОК}, \quad (4.103)$$

где  $q_{ЛОК} = \alpha_{ЭКВ} \cdot \vartheta_{ЛОК\infty}(\rho > 1; 0)$ .

Таким образом, с учетом теплообмена на поверхности образца с эффективным коэффициентом  $\alpha_{\text{эф}}$  и теплового сопротивления слоя  $R_{\text{СЛ}}$ , в котором размещен ЧЭ ПТ1, исходя из формул (4.73) и (4.102), локальная избыточная температура записывается в виде:

$$\tilde{\vartheta}_{\text{ЛОК.}\infty}(\rho;0) = \frac{1}{1 + \alpha_{\text{эф}} \cdot R_{\text{СЛ}}} \cdot \frac{q \cdot r_{\text{П}}}{\chi} \cdot I(\rho;0) \quad \text{при } \rho > 1, \quad (4.104)$$

где функция  $I(\rho;0)$  рассчитывается по формуле (4.74), а входящее в нее число Био равно  $Bi = \alpha_{\text{эф}} \cdot r_{\text{П}} / \chi$ .

Для оценки результатов, получаемых с применением вынесенного из зонда основного преобразователя температуры в позицию ПТ1, рассмотрена аналогичная зависимости (4.101) функция относительной локальной избыточной температуры (4.104) в радиальном направлении по поверхности полубесконечного массива с учётом теплообмена с ОС и эквивалентного теплового сопротивления в месте установки ЧЭ ПТ1, которая при  $\rho > 1$  имеет вид:

$$\begin{aligned} \tilde{\vartheta}_{\text{ЛОК.}\infty}(\rho;0) \Big|_{R_{\text{СЛ}} \neq 0} / \vartheta_{\text{ЛОК.}\infty}(0;0) \Big|_{R_{\text{К}}=0} &= \\ &= \frac{r_{\text{П}} \cdot I(\rho;0)}{\chi \cdot (1 + \alpha_{\text{эф}} \cdot R_{\text{СЛ}})} \cdot \left( \frac{r_{\text{П}}}{\chi} \cdot I(0;0) \right)^{-1} \end{aligned} \quad (4.105)$$

Именно по формуле (4.105) выполнен расчет относительной избыточной температуры, результаты которого представлены на рис. 4.28в для области  $\rho > 1$ . Как следует из характера изменения кривых 1 – 7 за пределами пятна теплового воздействия кривые 2 – 7 практически совпадают с кривой 1 при  $\rho > 1$ . Это свидетельствует о том, что при размещении основного измерителя температуры ПТ1 за пределами пятна теплового воздействия варьируемое контактное тепловое сопротивление слоя практически не влияет на результаты измерения избыточной температуры в области  $\rho > 1$ . Это позволяет избежать сложностей, связанных с дополнительными ме-

рами по уменьшению контактного теплового сопротивления, когда ПТ установлен в зонде.

При вынесении основного ПТ за пределы зонда следует помнить, что максимальное расстояние от границы зонда до места заделки ЧЭ не должно превышать  $0,5r_{П}$ , а при измерении коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов целесообразно выбирать расстояние до места заделки ЧЭ при радиусе  $r_{П} = 10$  мм не более  $0,2 \cdot r_{П}$  и обеспечивать  $\alpha_{ЭФ} = 2$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Кроме того в качестве средства, стабилизирующего теплообмен с ОС, могут быть применены маска из пенофола или защитный колпак для зонда.

Для повышения точности измерения коэффициента теплопроводности зондовым теплотрическим методом с двумя выносными ПТ необходимо исключить конвективно-радиационный теплообмен на поверхности образца за пределами зонда. Это можно обеспечить принципиально иным исполнением зонда, схема которого приведена на рисунке 4.29.

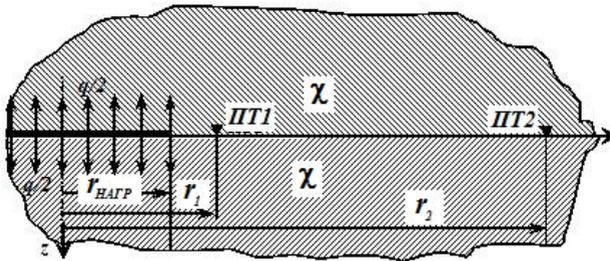


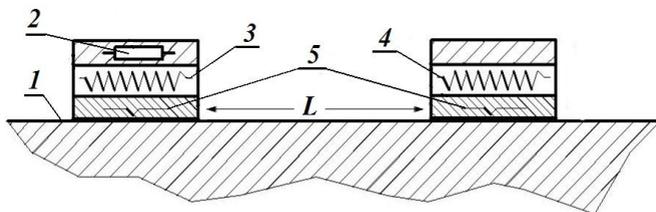
Рис. 4.29. Схема размещения нагревателя и выносных ПТ между плоскими поверхностями двух идентичных образцов исследуемого материала

Конструктивно зонд должен быть плоским и содержать нагревательный элемент и два ПТ, размещаемые за пределами пятна теплового воздействия. Нагревательный элемент зажимается между двумя плотно прилегающими к нему поверхностями плоских образцов одного и того же контролируемого материала. Это могут быть, например, срезы керны.

Кроме рассмотренных выше влияющих факторов следует еще учесть дрейф температуры образца. Ключевым моментом метода локального теплового воздействия является то, что избыточная температура взята по отношению к неискаженной температуре массива  $T_{\infty}$ , место замера которой неопределенно, что в реальных условиях измерений может быть одним из источников методической погрешности.

Вычислительными экспериментами установлено, что зона поверхности, не подверженная тепловому воздействию, находится от границы пятна на расстоянии не менее пяти радиусов, а в глубину искажения проникают на расстояние не менее семи радиусов. Однако, во время опытов из-за прогрева массива и распространения по нему подведенного от зонда теплового потока происходит трудно учитываемый дрейф температуры массива.

Для исключения этой неопределенности и обеспечения большей точности использован прием, широко распространенный в калориметрии [4.48] метод измерения, заключающийся в наличии элемента сравнения, в качестве которого взят ПТП – референт, идентичный измерительному преобразователю, как показано на рисунке 4.30.



1 – поверхность образца; 2 – электронагреватель; 3,4 – дифференциально включенные основной ПТП и ПТП-референт; 5 – дифференциальная термопара

Рис. 4.30. Дифференциальная схема измерения для метода локального теплового воздействия

По этой схеме в приборе должно быть два зонда, из которых основной зонд содержит рабочий источник теплового

воздействия 2. На поверхностях 1 контакта с исследуемым объектом установлены спаи дифференциальной термопары 5 и над ними – ПТП (3 и 4), включенные в электрической схеме дифференциально.

Для получения расчётной формулы определения коэффициента теплопроводности материала полубесконечного массива по результатам измерения избыточной температуры контактных поверхностей зондов рассмотрены выражения, которые, исходя из формул (4.80) и (4.81) при  $\rho = 1$  и  $\xi = 0$  имеют следующий вид:

- для среднеинтегральной поверхностной избыточной температуры основного зонда по площади пятна теплового воздействия:

$$\vartheta_1 = \vartheta_{CP,1}(1;0) = \frac{q_1 \cdot r_{II}}{\chi} \cdot I_{CP}(1;0); \quad (4.106)$$

- для среднеинтегральной поверхностной избыточной температуры зонда-референта по площади контакта с массивом:

$$\vartheta_2 = \vartheta_{CP,2}(1;0) = \frac{q_2 \cdot r_{II}}{\chi} \cdot I_{CP}(1;0). \quad (4.107)$$

Исходя из того, что разность показаний при дифференциальном включении ПТ обоих зондов  $\vartheta_1 - \vartheta_2 = (T_1 - T_\infty) - (T_2 - T_\infty)$ , их измеряемый дифференциальный сигнал  $\Delta T$  равен разности значений температуры контактных поверхностей зондов:  $\Delta T = T_1 - T_2$ . С учетом формул (4.106) и (4.107), получено выражение для измеряемого дифференциального сигнала прибора, состоящего из двух идентичных зондов:

$$\frac{\Delta T}{q_1 - q_2} = \frac{r_{II}}{\chi} \cdot I_{CP}(1;0), \quad (4.108)$$

из которого формула для определения коэффициента теплопроводности материала массива имеет вид:

$$\chi = \frac{q_1 - q_2}{\Delta T} \cdot r_{II} \cdot I_{CP}(1;0). \quad (4.109)$$

Таким образом, дифференциальная схема для метода локального теплового воздействия позволяет получать значения коэффициента теплопроводности с учётом искажений, вносимых зондом при его размещении на поверхности исследуемого образца и дрейфа температуры образца.

Существенный вклад в создание и разработку теплотметрического метода локального теплового воздействия и реализующих его приборов ИТ-8 и ИТ-8М внес О. Л. Декуша.

### 4.3 Теплотметрический дифференциально-мостовой метод определения комплекса ТФХ

В основу определения комплекса ТФХ (теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности) положено решение одномерной нестационарной задачи теплопроводности для бесконечной однородной пластины толщиной  $2h$  [2.17, 4.34, 4.45]. Краевые условия сформулированы, исходя из того, что скорость изменения температуры на поверхностях пластины задана одинаковой и постоянной: ( $b = const$ ) и разность значений температуры этих поверхностей тоже постоянна:

$$\begin{cases} T(x;0) = T_{0,2} + 0,5(T_{0,1} - T_{0,2}) \cdot (1 + \xi/h), \\ T(x = h; \tau) = T_{0,1} + b \cdot \tau, \\ T(x = -h; \tau) = T_{0,2} + b \cdot \tau, \end{cases} \quad (4.110)$$

где  $T_{0,1}$  и  $T_{0,2}$  – постоянные начальные значения температуры поверхностей пластины;

$h$  – полутолщина пластины;

$\xi = x/h$  – безразмерная координата сечения по толщине.

Для решения этой задачи использован метод суперпозиции [4.33] решений двух вспомогательных задач с такими крайевыми условиями:

– для первой задачи:

$$\begin{cases} T(x; \tau = 0) = T_{0,2}, \\ T(x = h; \tau) = T_{0,1} + b\tau, \\ T(x = -h; \tau) = T_{0,2} + b\tau; \end{cases}$$

– для второй задачи:

$$\begin{cases} T(x; \tau = 0) = -q \cdot h / \chi \cdot (1 + \xi), \\ -\chi \cdot \frac{\partial T(x = h; \tau)}{\partial x} = q_0 = const, \\ T(x = -h; \tau) = 0, \end{cases}$$

где  $q_0$  – начальная плотность теплового потока через поверхность пластины, координата которой  $x = h$ .

Решение каждой вспомогательной задачи по температуре и температурному градиенту известны [2.17; 4.34]. Их суперпозиция дает выражения искомым функций, соответственно, температуры и температурного градиента исходной задачи:

$$\begin{aligned} T(x, \tau) = & 0,5 \cdot (T_{0,1} + T_{0,2}) + 0,5 \cdot (T_{0,1} - T_{0,2}) \cdot \xi + \\ & + (b \cdot h^2 / a) \cdot (Fo - 0,5 + 0,5 \cdot \xi^2) + \\ & + (b \cdot h^2 / a) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\mu} \cdot \cos(\mu_n \cdot \xi) \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo), \end{aligned} \quad (4.111)$$

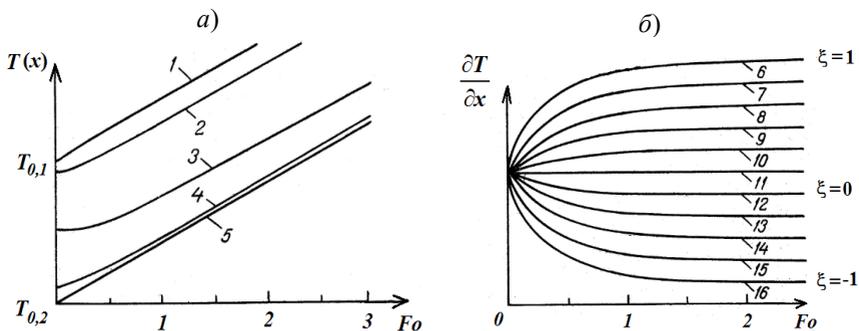
$$\begin{aligned} -\partial T(x, \tau) / \partial x = & q_0 / \chi + (b \cdot h / a) \times \\ & \times \left( \xi - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin(\mu_n \cdot \xi) \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo) \right), \end{aligned} \quad (4.112)$$

$$\text{при этом } A_n = (-1)^{n+1} \cdot 2 / \mu_n^2; \quad \mu = (2n - 1) \cdot \pi / 2, \quad (4.113)$$

$Fo = a \cdot \tau / x^2$  – число Фурье,

где  $a$  – температуропроводность (в  $\text{м}^2/\text{час}$ ).

Характер изменения функций (4.111) и (4.112) от времени для различных сечений по толщине пластины показан на рисунке 4.31. Из анализа полученных точных решений (4.111) и (4.112) исходной задачи следует, что с увеличением времени вклад членов, содержащих сумму ряда, уменьшается и для времен, которым соответствуют числа Фурье  $Fo \geq 2$ , ими можно пренебречь.



*a* – графики 1–5 функции  $T = f(Fo)$  вдоль толщины образца при вариации координаты сечения  $\xi = x/h = 1; 0,8; 0; -0,8; -1$ , соответственно;  
*б* – графики 6–16 функции  $\partial T/\partial x = f(Fo)$  вдоль толщины образца при вариации координаты сечения  $\xi = x/h = 1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2; 0; -0,2; -0,4; -0,6; -0,8; -1$ , соответственно.

Рис. 4.31. Характер изменения температуры (*a*) и температурного градиента (*б*) от времени для различных сечений по толщине пластины

К этому времени в образце устанавливается квазистационарный режим. Функции (4.111) и (4.112) для любого сечения пластины могут быть аппроксимированы с погрешностью, не превышающей 0,25%, выражениями:

$$T(x; \tau) = 0,5 \cdot (T_{0,1} + T_{0,2}) + (b \cdot h^2/a) \cdot (Fo - 0,5) + 0,5 \cdot (T_{0,1} - T_{0,2}) \cdot \xi + (0,5 \cdot b \cdot h^2/a) \cdot \xi^2, \quad (4.114)$$

$$-\partial T(x, \tau)/\partial x = q_0/\chi + (b \cdot h/a) \cdot \xi. \quad (4.115)$$

На рисунке 4.32 показан характер изменения при  $Fo = 2$  функций (4.114) и (4.115) в зависимости от сечения, скорости изменения температуры  $b$  и начальной заданной разности  $T_{0,1} - T_{0,2}$  между поверхностями пластины.

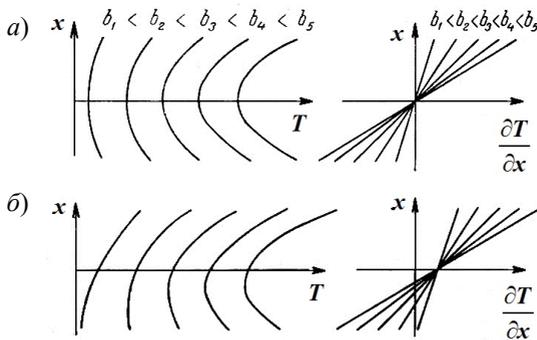


Рис. 4.32. Характер изменения температуры и температурного градиента при  $Fo = 2$  и разности  $T_{0,1} - T_{0,2} = 0$  К (а);  $T_{0,1} - T_{0,2} = 25$  К (б)

Из выражений (4.114) и (4.115) с учетом того, что  $q_0 = 0,5 \cdot \chi \cdot (T_{0,1} - T_{0,2}) / h$ , получено соотношение для разности значений температуры двух произвольных сечений  $x_1$  и  $x_2$  по толщине пластины:

$$T_1 - T_2 = T(x_1) - T(x_2) = 0,5 \cdot h \cdot (\xi_1 - \xi_2) \cdot (q_1 + q_2) / \chi, \quad (4.116)$$

которое дает расчетную формулу для определения коэффициента теплопроводности:

$$\chi = 0,5 \cdot h \cdot (\xi_1 - \xi_2) \cdot (q_1 + q_2) / (T_1 - T_2). \quad (4.117)$$

Формула для вычисления объемной теплоемкости  $c_p$  (в Дж/(к·м<sup>3</sup>)), полученная из выражения для разности значений плотности теплового потока через рассматриваемые сечения  $\xi_1$  и  $\xi_2$ , имеет вид:

$$c_p = (q_1 - q_2) / (b \cdot h \cdot (\xi_1 - \xi_2)). \quad (4.118)$$

Исходя из формул (4.116) и (4.117), с учетом того, что  $c_p = \chi / a$ , получается расчетная формула для температуропроводности:

$$a = \frac{0,5 \cdot h^2 \cdot b \cdot (\xi_1 - \xi_2)^2 \cdot (q_1 + q_2)}{(T_1 - T_2) \cdot (q_1 - q_2)}. \quad (4.119)$$

За температуру отнесения полученных значений ТФХ принимается среднеобъемная температура, определяемая интегралом:

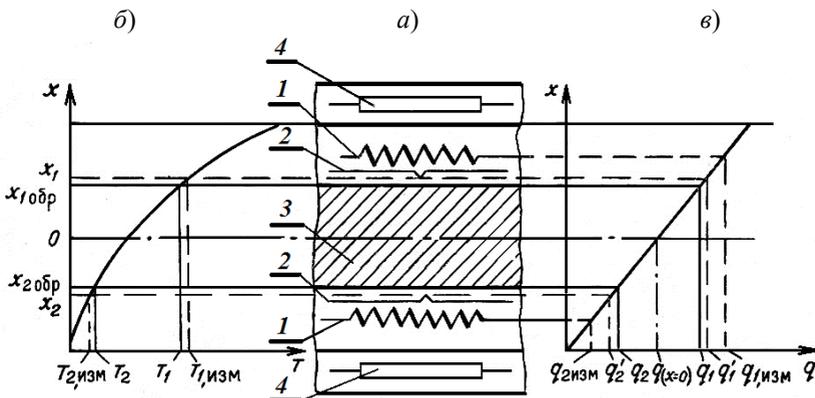
$$T_{отн} = T(x) = \frac{1}{h(\xi_1 - \xi_2)} \cdot \int_{\xi_2}^{\xi_1} T(x) dx,$$

в котором функция  $T(x)$  имеет вид (4.114). После ряда преобразований расчетная формула для  $T_{отн}$  принимает вид:

$$T_{отн} = T_2 + \frac{1}{3} \cdot (T_1 - T_2) (1 + q_2 / (q_1 + q_2)). \quad (4.120)$$

Результаты, полученные для однослойной пластины, могут быть применены к многослойной пластине путем учета разнородности ТФХ ее слоев через приведение к эквивалентной толщине, как рекомендовано в работе [4.35].

На рисунке 4.33а представлена схема измерительной ячейки прибора, реализующего рассмотренный метод измерения ТФХ в квазистационарном тепловом режиме, показан характер изменения температуры ( $\theta$ ) и плотности теплового потока ( $\varphi$ ) по толщине образца [4.45].



1 – ПТП1 и ПТП2; 2 – ПТ1 и ПТ2; 3 – образец; 4 – нагреватели

Рис. 4.33. Схема измерительной ячейки (а) и распределение температуры (б) и плотности теплового потока (в) по толщине образца

В измерительной ячейке между верхним и нижним блоками с расположенными в них нагревателями 4 с программируемым линейным изменением температуры при постоянной заданной разности температуры их поверхностей помещается образец исследуемого материала, а между блоками и образцом – преобразователи температуры ПТ1 и ПТ2 и теплового потока ПТП1 и ПТП2.

Из анализа точностных возможностей рассмотренного метода измерения ТФХ в квазистационарном режиме, следует, что:

1) сумма значений плотности теплового потока, входящая в формулу (4.117), определяется по показаниям двух ПТП, расположенных на одинаковом расстоянии от поверхностей образца, вполне корректно, что видно из рис. 4.33в, так как сумма плотностей теплового потока, проходящего через любую пару сечений, равноотстоящих от срединного сечения образца ( $x = 0$ ), является одинаковой:

$$q_1 + q_2 = q_{1,ИЗМ} + q_{2,ИЗМ} = idem ; \quad (4.121)$$

2) разность значений температуры поверхностей образца ( $T_1 - T_2$ ), входящая в формулу (4.117), не равна разности значений температуры, измеряемой термопарами ( $T_{1,ИЗМ} - T_{2,ИЗМ}$ ), в связи с тем, что координаты спаев термопар  $x_i$  ( $i = 1$  и  $2$ ) и соответствующих прилегающих поверхностей образца ( $x_{i,ОБР}$ ;  $i = 1$  и  $2$ ), как видно на рис. 4.33б, не совпадают. Это обусловлено наличием между ними прослоек, имеющих тепловое сопротивление, из-за которого измеренное термопарой значение температуры не равно истинной температуре поверхностей образца, то есть  $T_{i,ИЗМ} - T_{i,ОБР} \neq 0$  ( $i = 1$  и  $2$ ).

Таким образом, для обеспечения корректного определения коэффициента теплопроводности необходимо вносить температурную поправку  $\delta T$ , учитывающую тепловое со-

противление балластных прослоек. Расчетная формула (4.117) при этом принимает вид

$$\chi = \frac{0,5 \cdot h \cdot (\xi_{1,ОБР} - \xi_{2,ОБР}) \cdot (q_1 + q_2)}{(T_{1,ИЗМ} - T_{2,ИЗМ}) - \delta T}. \quad (4.122)$$

С учетом многослойности рассматриваемой системы путем введения эквивалентной толщины в формулу (4.116) получаем формулу для определения температурной поправки:

$$\delta T = \frac{h \cdot (\xi_1 - \xi_{1,ОБР})_{ЭКВ} \cdot (q'_1 + q_1)}{\chi} + \frac{h \cdot (\xi_{2,ОБР} - \xi_2)_{ЭКВ} \cdot (q_2 + q'_2)}{\chi}, \quad (4.123)$$

где  $q'_1$  и  $q'_2$  – значения плотности теплового потока в сечениях  $x_1$  и  $x_2$ ;  $q_1$  и  $q_2$  – соответственно в сечениях  $x_{1,ОБР}$  и  $x_{2,ОБР}$ . Если ввести обозначение  $R_i = h \cdot (\xi_i - \xi_{i,ОБР})_{ЭКВ} / \chi$  ( $i = 1$  и  $2$ ), каждое из которых учитывает тепловое сопротивление соответствующей прослойки между сечением заделки спая термопары и прилегающей поверхности образца, то температурная поправка записывается следующим образом:

$$\delta T = (R_1 \cdot (q'_1 + q_1) + R_2 \cdot (q_2 + q'_2)) / 2.$$

При условии идентичности заделки спаев термопар и расположении их на одинаковом расстоянии от соответствующей поверхности образца можно считать, что  $R_1 = R_2 = R$ , а также с учетом условия (4.121) о линейности изменения плотности теплового потока в квазистационарном режиме температурная поправка принимает вид:

$$\delta T = R \cdot (q'_1 + q'_2) = R \cdot (q_1 + q_2), \quad (4.124)$$

а формула (4.122) преобразуется к виду:

$$\chi = \frac{0,5h \cdot (\xi_{1,ОБР} - \xi_{2,ОБР}) \cdot (q_1 + q_2)}{(T_{1,ИЗМ} - T_{2,ИЗМ}) - R \cdot (q_1 + q_2)}; \quad (4.125)$$

3) разность значений плотности теплового потока через поверхности образца, входящая в формулу (4.118) не равна разности значений, измеренных посредством ПТП, имеющих конечную толщину, что хорошо видно на рис. 4.33в. Это

обусловлено тем, что тепловой поток, измеренный в нестационарном режиме с помощью ПТП, пропорционален среднеинтегральному потоку, проходящему через поверхности ПТП. В квазистационарном режиме плотность теплового потока пропорциональна среднему арифметическому значений входящего и выходящего из ПТП, то есть равна плотности теплового потока через срединное сечение ПТП.

Таким образом, для обеспечения корректного определения объемной теплоемкости образца необходимо в расчетную формулу (4.118) ввести теплоточную поправку, учитывающую теплоемкость балластных прослоек между средними сечениями ПТП и соответствующими поверхностями образца. В силу этого формула (4.118) преобразуется к виду:

$$c\rho = \frac{(q_{1,ИЗМ} - q_{2,ИЗМ}) - \delta q}{b \cdot h \cdot (\xi_{1,ОБП} - \xi_{2,ОБП})}, \quad (4.126)$$

где  $\delta q$  – теплоточная поправка, которую можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta q &= (q_{1,ИЗМ} - q_1) + (q_2 - q_{2,ИЗМ}) = \\ &= b \cdot c\rho \cdot h \cdot \left( (\xi_1 - \xi_{1,ОБП})_{ЭКВ} + (\xi_{2,ОБП} - \xi_2)_{ЭКВ} \right). \end{aligned}$$

Каждое произведение  $C_i = c\rho \cdot h \cdot \left( \xi_i - \xi_{i,ОБП} \right)_{ЭКВ}$  (в Дж/(К·м<sup>2</sup>)) учитывает объемную теплоемкость соответствующего ( $i = 1$  и  $2$ ) балластного слоя, приведенного к эквивалентной толщине. При условии изготовления ПТП идентичными и расположенными симметрично относительно срединного сечения образца можно принять, что значения объемной теплоемкости  $C_1 = C_2 = C$  в Дж/(К·м<sup>2</sup>). В связи с этим теплоточная поправка  $\delta q$  принимает вид:

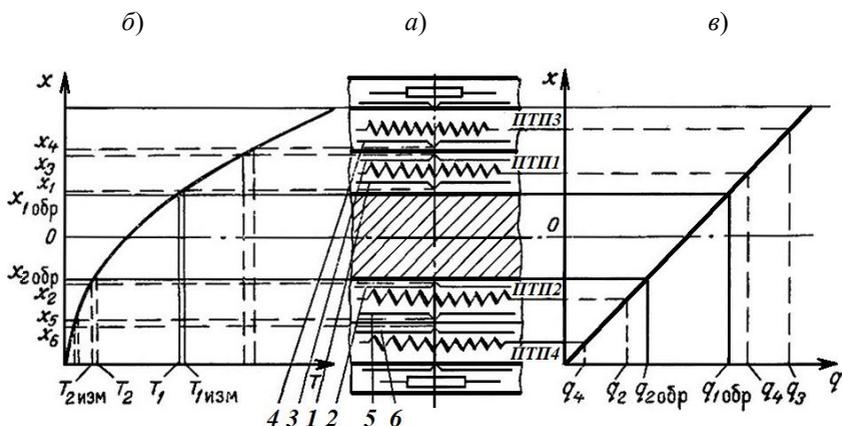
$$\delta q = b \cdot (C_1 + C_2) = b \cdot C_\Sigma, \quad (4.127)$$

а расчетная формула (4.125) приводится к виду:

$$c\rho = \frac{1}{h \cdot (\xi_{1,ОБП} - \xi_{2,ОБП})} \cdot \left( \frac{q_{1,ИЗМ} - q_{2,ИЗМ}}{b} - C_\Sigma \right). \quad (4.128)$$

Таким образом, корректность измерения ТФХ зависит от точности экспериментального определения поправок  $\delta T$  и  $\delta q$ . Однако, при работе в широком температурном диапазоне учет этих поправок затруднен из-за их зависимости от температуры.

В связи с этим для увеличения точности разработан дифференциальный метод коррекции измеряемых значений температуры и плотности теплового потока. Он заключается во введении в схему измерительной ячейки дополнительных измерительных элементов, показания которых пропорциональны изменениям температуры и плотности теплового потока. Схема измерительной ячейки с дополнительными ПТП и термопарами, а также характер изменения температуры и плотности теплового потока по толщине в квазистационарной стадии теплового режима приведены на рисунке 4.34 [4.45].



1–2; 3–4; 5–6 – дифференциально соединенные термопары

Рис. 4.34. Схема измерительной ячейки (а) с дополнительными ПТП и ПТ и графики распределения температуры (б) и плотности теплового потока (в) по толщине

Корректировка измеряемых значений температуры осуществляется с помощью двух пар дифференциально

соединенных термопар 3–4 и 5–6. Их спаи попарно расположены на одинаковом расстоянии от соответствующих поверхностей образца. В каждой дифференциальной термопаре спаи разделены имитационной прослойкой, обладающей тепловым сопротивлением, соответственно,  $R_{3-4}$  и  $R_{5-6}$ , при этом

$$\frac{R_1}{R_{3-4}} = \frac{R_2}{R_{5-6}} = \frac{\delta T}{\Delta T_{3-4} + \Delta T_{5-6}} = \gamma_T. \quad (4.129)$$

С учетом безразмерной температурной поправки  $\gamma_T$  расчетная формула (4.122) принимает вид:

$$\chi = \frac{0,5h \cdot (\xi_{1,ОБР} - \xi_{2,ОБР}) \cdot (q_{1,ИЗМ} + q_{2,ИЗМ})}{\Delta T_{1-2,ИЗМ} - \gamma_T \cdot (\Delta T_{3-4} + \Delta T_{5-6})}. \quad (4.130)$$

Количество теплоты, аккумулированное упомянутыми балластными прослойками (между срединным сечением ПТП и прилегающей поверхностью образца), может быть учтено дополнительными ПТП (3 и 4), которые совместно с ПТП основной пары (1 и 2) образуют элементы сравнения – прослойки между срединными сечениями контактирующих ПТП. В этом случае сумма разностей значений плотности теплового потока, измеренных парами ПТП<sub>1</sub> – ПТП<sub>3</sub> и ПТП<sub>2</sub> – ПТП<sub>4</sub>, пропорциональна количеству теплоты, аккумулированной элементами сравнения. Здесь также очевидно, что

$$\frac{\delta q}{\Delta q_{3-1} + \Delta q_{2-4}} = \frac{C_1}{C'_\Sigma} = \gamma_q,$$

$$\text{откуда } \delta q = \gamma_q \cdot (\Delta q_{3-1} + \Delta q_{2-4}), \quad (4.131)$$

$$\gamma_q = C_1 / C'_\Sigma \quad (4.132)$$

где  $C'_\Sigma$  – см. формулу (4.133).

С учетом безразмерной теплоточной поправки то есть соотношения (4.131) формула (4.126) для объемной теплоемкости принимает вид:

$$c_p = (b \cdot h \cdot (\xi_{1,ОБР} - \xi_{2,ОБР}))^{-1} \cdot [(q_{1,ИЗМ} - q_{2,ИЗМ}) - \gamma_q \cdot (\Delta q_{3-1} + \Delta q_{2-4})]. \quad (4.133)$$

При условии идентичности заделки спаев термопар и одинаковой толщины имитационных прослоек (то есть между спаями в обеих дифференциальных термопарах 3-4 и 5-6), а также симметричном расположении ПТП и выполнении измерений при условии  $T_{0,1} - T_{0,2} \leq 10\text{К}$  обе поправки  $\gamma_T$  и  $\gamma_q$  не зависят от температуры. Их значения могут быть определены экспериментально в опытах «холостого хода», то есть в отсутствие образца в измерительной ячейке (при этом  $\xi_{1,ОБР} - \xi_{2,ОБР} = 0$ ).

Введением безразмерных температурной и теплоточной поправок  $\gamma_T$  и  $\gamma_q$  разности значений температуры и плотности теплового потока, измеряемые на поверхностях образца, полностью корректируются.

Однако, остается такой существенный недостаток квазистационарного метода, как необходимость измерять скорость изменения температуры, что сопровождается большими погрешностями. Наличие двух пар ПТП позволяет не производить в течение опыта определения скорости изменения температуры, а воспользоваться результатами измерения изменений плотности теплового потока на элементах сравнения [4.46].

Для многослойной пластины (см. рис. 4.34) имеет место следующая система уравнений:

$$\begin{cases} q_3 - q_1 = C_{3-1} \cdot b, \\ q_1 - q_2 = (C_{1-2} + C_{ОБР}) \cdot b, \\ q_2 - q_4 = C_{2-4} \cdot b, \end{cases}$$

где  $C_{ОБР} = c\rho \cdot h(\xi_{1,ОБР} - \xi_{2,ОБР})$  – объемная теплоемкость образца;

$C_{1-2} = C_{\Sigma}$  – суммарная объемная теплоемкость балластных слоев, расположенных между серединными сечениями ПТП и прилегающими поверхностями образца;

$C_{3-1}$  и  $C_{2-4}$  – эффективная объемная теплоемкость слоев, расположенных между серединными сечениями ПТП<sub>1-3</sub> и ПТП<sub>2-4</sub>, контактирующих попарно между собой, то есть элементов сравнения.

Решение этой системы дает формулу для вычисления значения скорости изменения температуры:

$$b = \frac{(q_3 - q_1) + (q_2 - q_1)}{C_{3-1} + C_{2-4}} = \frac{\Delta q_{3-1} + \Delta q_{2-4}}{C'_\Sigma}, \quad (4.134)$$

подстановкой которой в формулу (4.133) получена формула для вычисления объемной теплоемкости образца без измерения скорости:

$$c\rho = \frac{C'_\Sigma}{h \cdot (\xi_{1,OBP} - \xi_{2,OBP})} \cdot \left( \frac{q_{1,ИЗМ} - q_{2,ИЗМ}}{\Delta q_{3-1} + \Delta q_{2-4}} - \gamma_q \right), \quad (4.135)$$

Принимая во внимание полученные после корректировки формулы (4.130) и (4.135), расчетная формула (4.119) для температуропроводности также преобразуется к виду:

$$a = \frac{0,5 \cdot h^2 \cdot (\xi_{1,OBP} - \xi_{2,OBP})^2}{\Delta T_{1-2,ИЗМ} - \gamma_T (\Delta T_{3-4} + \Delta T_{5-6})} \times \\ \times \frac{q_{1,ИЗМ} + q_{2,ИЗМ}}{C'_\Sigma \cdot ((q_{1,ИЗМ} - q_{2,ИЗМ}) / (\Delta q_{3-1} + \Delta q_{2-4}) - \gamma_q)}. \quad (4.136)$$

Данный метод определения ТФХ относится, с одной стороны, к дифференциальным, поскольку опирается на разностные показания ПТП. С другой стороны, искомые характеристики ( $a$  и  $c\rho$ ) находятся из отношения количеств теплоты аккумулированной образцом исследуемого материала и элементами сравнения, ТФХ которых известны, то есть мостовым методом [4.47, 4.48].

Таким образом, разработан новый метод [4.50] определение комплекса ТФХ, который можно классифицировать как дифференциально-мостовой теплотметрический метод, расчетными формулами которого являются соотношения (4.130), (4.135) и (4.136).

#### Литература к главе 4

4.1 *Fourier, Jean-Baptiste-Joseph* Théorie analytique de la chaleur / J. B. J. Fourier. – Paris : Firmin Didot Père et Fils, 1822.

4.2 *Голянд М. М.* Автоматизированные приборы для определения коэффициента теплопроводности изоляционных материалов / М. М. Голянд, Б. И. Карпов // Исследования в области холодильной техники и технологии : сб. науч. трудов. – М. : Пищепромиздат, 1953. – С. 102-107.

4.3 *Кауфман Б. И.* Теплопроводность строительных материалов / Б. И. Кауфман. – М. : ГИЗСиА, 1955. – 160 с.

4.4 *Чудновский А. Ф.* Теплофизические характеристики дисперсных материалов / А. Ф. Чудновский. – Москва : Физматгиз, 1962. – 456 с.

4.5 *Драбл Д.* Теплопроводность полупроводников / Дж. Драбл ; пер. с англ. М. И. Клингера. – М. : ИИЛ, 1963. – 266 с.

4.6 *Осипова В. А.* Экспериментальное исследование процессов теплообмена : учеб. пособие для вузов / В. А. Осипова. – М. : Энергия, 1979. – 320 с.

4.7 *Сергеев, О. А.* Метрологические основы теплофизических измерений / О. А. Сергеев. – М. : Изд-во стандартов, 1972. – 154 с.

4.8 *Tye R. P.* Thermal Conductivity : vols 1 and 2 / R. P. Tye. – New York-London : Academic Press, 1969. – Vol. 1. – 441 p.

4.9 *Харламов А. Г.* Измерение теплопроводности твердых тел / А. Г. Харламов. – М. : Атомиздат, 1973. – 152 с.

4.10 *Compendium of Thermophysical Property Measurement Method* / K. D. Maglic, A. A. Cezairliyan, V. E. Peletsky. – N.-Y. : Plenum Press, 1989.

4.11 *Васильев Л. Л.* Теплофизические свойства плоских проводников тепла / Л. Л. Васильев, Ю. Е. Фрайман. – Минск : Наука и техника, 1967. – 176 с.

4.12 Thermal insulation – Determination of steady-state resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus : ISO 8302:1991. – ISO TC 163/SC 1. – 47 p.

4.13 *Геращенко О. А.* Теплометрическое определение теплофизических характеристик / О. А. Геращенко, Т. Г. Грищенко, А. М. Пилипенко, В. Г. Федоров // Тепло- и массоперенос. – Минск : Наука и техника, 1968. – Том 7. – С. 261-273.

4.14 *Грищенко Т. Г.* Теплопроводность / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша // Энергетический менеджмент и энергосбережение : серия у, 12 метод. пособий для самостоятельной работы студентов. – Книга 5. – Киев : ИЭД НАН Украины, 1995. – 57 с.

4.15 *Попов В. В.* Экспериментальная установка для определения теплофизических характеристик сублимируемых продуктов / В. В. Попов, В. И. Карпов // Калининградский технол. институт рыбной промышленности и хозяйства : труды. – 1971. – Вып. 27. – С. 19-25.

4.16 *Лебедев Д. П.* Теплопроводность экранно-вакуумной теплоизоляции / Лебедев Д. П. [и др.] // Инж.- физ. журнал. – 1971. – № 5. – С. 789-796.

4.17 *Мищенко С. В.* Исследование теплофизических характеристик полимерных материалов, химически реагирующих в процессе их термической обработки (методы, приборы, эксперимент) : автореф. дис. – канд. техн. наук / С. В. Мищенко. – М., 1975. – 14 с.

4.18 *Грищенко Т. Г.* Теплометрический экспресс-метод и прибор для определения коэффициента теплопроводности : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14 / Татьяна Георгиевна Грищенко. – Киев, 1977. – 198 с.

4.19 *Грищенко Т. Г.* Теплофизические свойства / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев // Неорганическое материаловедение : энциклопед. изд. в 2-х томах. Т. 1. : Основы науки о материалах. – Под ред. В.В. Скорохода, Г.Г. Гнезина. – К. : Наук. думка, 2008. – С. 970-1018.

4.20 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме : ГОСТ 7076-99. – [Взамен ГОСТ 7076-54, ГОСТ 7076-66 ГОСТ 7076-78, ГОСТ 7076-87 ; введен в действие 2000-04-01]. – М. : ГУП ЦПП, 2000. – 22 с. – (Межгосударственный стандарт).

4.21 Будівельні матеріали. Матеріали і вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності і термічного опору при стандартному тепловому режимі (на заміну ГОСТ 7076-87) ДСТУ БВ.2.7-105-2000 (ГОСТ 7076-99). [Чинний від 2001-07-01]. – Київ : Держком України у справах містобудування і архітектури, 1997. – (Національний стандарт України, гармонізований з ГОСТ 7076-99).

4.22 Теплоізоляція. Визначення теплового опору та пов'язаних із ним характеристик в усталеному режимі приладом із перетворювачем теплового потоку (ISO 8301:1991, IDT) : ДСТУ ISO 8301:2007.- [Чинний від 2009-01-01]. – К. : Держспоживстандарт, 2009. – 33 с. – (Національний стандарт України).

4.23 Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus : ISO 8301:1991. – ISO TC 163/SC 1. – 38 p.

4.24 Теплоізоляція. Визначення теплового опору та пов'язаних з ним характеристик в усталеному режимі приладом із захищеною гарячою пластиною (ISO 8302:1991, IDT) : ДСТУ ISO 8302:2008. – [Чинний від 2010-01-01].

4.25 Породы горные. Метод определения коэффициента теплопроводности : ГОСТ 25499-82. – [Введен в действие 1984-01-01]. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 6 с.

4.26 Грунты. Метод лабораторного определения теплопроводности мерзлых грунтов : ГОСТ 26263-84. – [Введен в действие 1985-07-01]. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 9 с.

4.27 Основи та підвалини будинків і споруд. Грунти. Метод вимірювання теплопровідності мерзлих ґрунтів : ДСТУ Б В.2.1-18-2009. – [Замість ГОСТ 26263-84; Чинний від

2010-10-01]. – К. : Мінрегіонбуд, 2009. – 9 с. – (Національний стандарт України).

4.28 Огнеупоры. Стационарный метод измерения теплопроводности : ГОСТ 12170-85. – [Взамен ГОСТ 12170-76; введен в действие 1986-01-01]. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 9 с. – (Межгосударственный стандарт).

4.29 Древесина модифицированная. Метод определения теплопроводности : ГОСТ 21523.3.2-93. – [Взамен ГОСТ 21523.3-87 в части определения теплопроводности; введен в действие 1995-01-01]. – М. : Изд-во стандартов, 1995. – 7 с. – (Межгосударственный стандарт).

4.30 Будівельні матеріали. Матеріали і вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності циліндричним зондом : ДСТУ Б В.2.7-40-95 (ГОСТ 30256-94). – [Чинний від 1996-01-01]. – К. : Укрархбудінформ, 1997. – 10 с. – (Державний стандарт України).

4.31 Будівельні матеріали. Матеріали і вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності поверхневим перетворювачем : ДСТУ Б В.2.7-41-95 (ГОСТ 30290-94). – [Чинний від 1996-01-01]. – К. : Укрархбудінформ, 1997. – 14 с. – (Державний стандарт України).

4.32 *Бурова З. А.* Теплометрический метод и прибор для определения теплофизический свойств строительных и теплоизоляционных материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.04 / Бурова Зинаида Андреевна. – Киев : Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2014. – 286 с.

4.33 *Пехович А. И.* Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Л.: Энергия, 1976. – 352с.

4.34 *Карслоу Г.* Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер : перевод с англ. ; под ред. А. А. Померанцева. – М. : Наука, 1964. – 488 с.

4.35 *Кошляков Н. С.* Уравнения в частных производных математической физики / Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов. – М. : Высшая школа, 1970. – 712 с.

4.36 *Ватсон Г. Н.* Теория бесселевых функций : в 2 ч. Ч. 1 / Г. Н. Ватсон ; пер. с англ. В. С. Бермана ; Под ред. и с доп. Г. Шилова. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1949. – 798 с.

4.37 *Wesley D. A.* Thin disk on a convectively cooled plate – Application to heat flux measurement errors / D. A. Wesley // Trans. of the ASME. – Journ. of Heat Transfer. – 1979. – Vol. 101. – P. 346-352.

4.38 *Декуша Л. В.* Теплометрические измерительные преобразователи для исследования сложного теплообмена : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.04 / Леонид Васильевич Декуша. – Киев, 1990. – 278 с.

4.39 *Декуша О. Л.* Прибор для экспресс-измерения коэффициента теплопроводности твердых материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.04 / Декуша Олег Леонидович. – Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2013. – 254 с.

4.40 *Кулаков М. В.* Измерение температуры поверхности твердых тел / М. В. Кулаков, Б. И. Макаров // Библиотека по автоматике. – М. : Энергия, 1979. – Вып. 598. – 96 с.

4.41 *Декуша Л. В.* Влияние определяющих факторов на результаты измерения коэффициентов теплопроводности методом локального теплового воздействия / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Т. В. Менделеева [и др.] // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев. – 2005. – Т. 27, № 2. – С. 74-80. – ISSN 0204-3602.

4.42 *Декуша Л. В.* Метод локального теплового воздействия (зондовый метод) измерения теплопроводности материалов с выносными преобразователями температуры / Л. В. Декуша, Т. В. Менделеева, Л. И. Воробьев, О. Л. Декуша // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – 2005. – Т. 27, № 2. – С. 100-106. – ISSN 0204-3602.

4.43 *Декуша Л. В.* Особенности экспресс-измерения теплопроводности на образце конечной толщины прибором ИТ-8 / Л. В. Декуша, Т. В. Менделеева, Л. И. Воробьев, О. Л. Декуша // Промышленная теплотехника : Международный

научно-прикладной журнал. – 2005. – Т. 26, № 5. – С. 76-81. – ISSN 0204-3602.

4.44 *Кальве Э.* Микрокалориметрия / Э. Кальве, А. Прат. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1963. – 477 с.

4.45 *Геращенко О. А.* Определение комплекса теплофизических свойств дифференциально-мостовым теплометрическим методом / О. А. Геращенко, Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, В. П. Сало, А. В. Лапий // Инж.-физ. журнал. – Минск, 1988. – Т. 54, № 4. – С. 588-596.

4.46 А. с. 1165957 (СССР), МКИЗ G 01 N 25/18. Способ определения теплофизических характеристик плоских образцов материалов и устройство для его осуществления / Т. Г. Грищенко, О. А. Геращенко, Л. В. Декуша [и др.] – № 3959357/24-25 ; заявл. 27.09.1983 ; опубли. 07.07.1985, Бюл. № 25. – 8 с.

4.47 *Анатычук Л. И.* Термоэлементы и термоэлектрические устройства / Справочник. – Киев : Наукова думка, 1979. – 768 с.

4.48 *Грищенко Т. Г.* Теплометрические мосты для теплофизических исследований : дис. ... докт. техн. наук [в форме научного доклада] : 05.11.04 / Татьяна Георгиевна Грищенко. – Львов, 1992. – 60 с. : ил.

## **ГЛАВА 5 ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

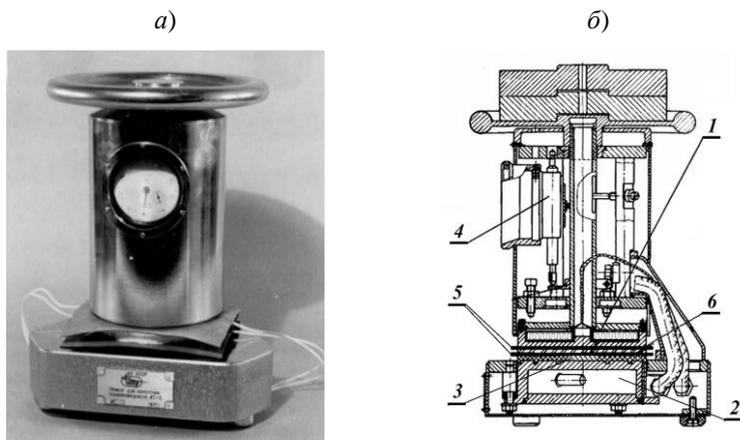
Существенный вклад в развитие отечественного парка приборов для измерения теплофизических характеристик (далее – ТФХ) внес ИТТФ НАН Украины. Развиваемые здесь методы, основанные на применении ПТП для прямых измерений плотности теплового потока при определении ТФХ неметаллических материалов (см. главу 4 и [1\*, 2\*, 2.26, 4.18, 4.32, 4.39]), были реализованы в ряде теплотрических приборов для измерения коэффициента теплопроводности, теплового сопротивления и других ТФХ широкой номенклатуры материалов и веществ, преимущественно теплоизоляционных и строительных.

### **5.1 Теплотрические приборы в асимметричном исполнении**

Первое предельно простое устройство с применением ПТП в асимметричном исполнении для определения теплопроводности различных неметаллических материалов было испытано еще в 1963 году [1\*]. После усовершенствования его конструкции и адаптации методики к массовым техническим измерениям появилась первая модель серийно производимого прибора ИТ-3 [5.1], положившего начало ряду теплотрических приборов, выпускавшихся в ИТТФ и получивших широкое распространение в практике теплофизических исследований в научно-исследовательских и испытательных лабораториях и для учебных целей в вузах Украины и стран бывшего СССР.

### 5.1.1 Приборы серии ИТ для массовых технических экспресс-измерений коэффициента теплопроводности неметаллических материалов (твердых, жидких, сыпучих)

Началом серии теплотметрических приборов плоского типа, выполненных с одним ПТП, то есть по асимметричной схеме, явился прибор модели ИТ-3, представленный на рисунке 5.1.



1 – нагреватель; 2 – холодильник; 3 – ПТП; 4 – индикатор толщины; 5 – термопары в эластичных резиновых прокладках; 6 – образец

Рис. 5.1. Внешний вид (а) и схема конструкции (б) теплотметрического плоского прибора, выполненного по асимметричной схеме

Прибор ИТ-3 состоял из электронагревателя 1, проточного холодильника 2, ПТП 3, индикатора толщины образца 4 и двух дифференциально соединенных термопар 5. Малогабаритный ПТП 3 вмонтирован по центру поверхности холодильника 2 заподлицо с ней. Это позволило отказаться от обычных охранных калориметров или компенсационных нагревателей.

Прибор предназначался для измерения коэффициента теплопроводности от 0,03 до 5 Вт/(м·К) в температурном диапазоне от 220 до 360 К с основной допускаемой относительной погрешностью 6%. Испытываемый образец 6 с

габаритами  $\varnothing(60 - 100) \times (0,2 - 10)$  мм помещали в зазор между холодильником 2 и нагревателем 1. Для жидкостей была предусмотрена специальная кювета, а для сыпучих материалов – пластиковое кольцо  $\varnothing 100 \times 8$  мм. В поверхности холодильника и нагревателя первой модели были вмонтированы спаи термопар, служащих для измерения температуры соответствующей поверхности и их разности.

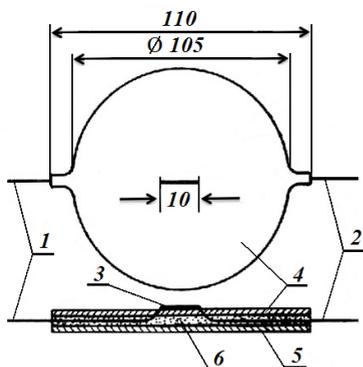
Однако, несмотря на тщательность обработки поверхностей, соприкасающихся с образцом, надежный тепловой контакт между ними не был обеспечен. Кроме того, различные ТФХ металла, из которого изготовлен холодильник, и материала ПТП приводили к искажениям теплового и температурного полей холодильника. Все это, к сожалению, не позволяло иметь погрешность измерения коэффициента теплопроводности менее 8%.

Время выхода прибора на стационарный режим составляло не менее 60 минут. Масса прибора ИТ-3 достигала 15 кг. В качестве прибора, регистрирующего сигналы ПТП и ПТ, применяли стандартный высокоомный потенциометр Р307.

Позже при дальнейшем усовершенствовании конструкции прибора и методики измерений было реализовано несколько методических решений [4.18, 5.2 ].

С целью уменьшения погрешности измерения из-за контактного теплового сопротивления спаи термопар были максимально приближены к контролируемым поверхностям образца, не будучи заделанными в них. Это достигнуто размещением термопары с развальцованным спаем 3 в эластичных плоских прокладках из тонколистовой вакуумной резины толщиной 0,4 мм, как показано на рисунке 5.2 [4.18].

Для изготовления спаи ленточной термопары концы термоэлектродной проволоки длиной 53 – 55 мм предварительно раскатывали на прокатных вальцах до толщины 0,05 мм, накладывали встречно друг на друга на длине 5 – 8 мм и сваривали тремя – четырьмя точками на сварочной машине.



- 1, 2 – термоэлектроды (константан-манганин);  
 3 – плоский спай термопары;  
 4 – эластичная прокладка верхняя с просечками;  
 5 – эластичная прокладка нижняя;  
 6 – слой клея

Рис. 5.2. Схема конструкции ленточной термопары в эластичных прокладках

После сварки операция прокатки повторялась с целью получения толщины ленточки в области спае не более 0,05 мм. Затем термопару помещали между эластичными прокладками и склеивали. Чтобы спай оказался на наружной поверхности, одну из обкладок выполняли с двумя просечками на расстоянии 4 – 5 мм от центра. Через просечки протягивали термопару таким образом, чтобы ее спай оказался по центру наружной поверхности. Концы термопары, выходящие из прокладок, изолировали кембриком.

Благодаря такому исполнению термопары ее тонко раскатанный спай в рабочем положении прижат к образцу, что способствовало хорошему тепловому контакту. При этом требования к качеству поверхности образца снизились, а разброс результатов измерений коэффициента теплопроводности на эталонных образцах из плавленого кварца и полиметилметакрилата не выходил за пределы 3%.

Перепад температуры на образце измеряли двумя ленточными термопарами, соединенными дифференциально. Температуру торцевых поверхностей образца измеряли теми же двумя термопарами, дифференциально соединенными с третьей, которая была изготовлена традиционным способом. Ее спай содержали при постоянной температуре в сосуде Дьюара, заполненном дистиллированной водой с измельченным льдом. При этом для предотвращения посторонних влия-

ний на спай его предварительно помещали в пробирку с трансформаторным маслом, которую погружали в сосуд Дьюара. Таким образом была обеспечена температура холодного спая, равная 273,15 °С. Согласно А. Н. Гордову [5.3] такая привязка по термодинамической шкале вполне удовлетворительна для самых точных измерений температуры контактным способом.

При соединении термоэлектродов с измерительным вторичным прибором имеет место контакт с материалом клемм или разъемов. Возмущение термоэлектрического происхождения на входе вторичного прибора оказывается минимальным, если использовать медную или манганиновую проволоку. В связи с этим, а также исходя из того, что манганиновая проволока по сравнению с медной хорошо раскатывается, была использована манганин-константановая дифференциальная термопара, промежуточный термоэлектрод которой выполнен из константана.

Кроме того, замена манганином медного термоэлектрода в стандартной паре медь-константан представляется целесообразной в силу того, что манганин обладает на порядок меньшим коэффициентом теплопроводности. Использование при этом манганиновой проволоки малого сечения практически полностью снимает систематическую погрешность измерения температуры из-за теплооттока по термоэлектродам. Равнозначность замены меди на манганин была подтверждена экспериментально градуировкой в температурном диапазоне от 0 до 100 °С.

Для устранения искажений теплового и температурного полей в ПТП, вмонтированном в поверхность металлического холодильника заподлицо с ней, обусловленных существенным неравенством теплового сопротивления ПТП и его металлического окружения, был изменен принцип монтажа ПТП. Поверхность холодильника, к которой приклеивали ПТП, заливали слоем электроизоляционного компаунда, толщина которого была равна толщине ПТП.

При этом влияние внешних факторов ОС было исключено. Однако, из-за неравенства значений теплового сопротивления ПТП и покрытия, окружающего его по периметру, искажение теплового потока в самом ПТП сохранилось, что не могло не отразиться на точности измерения плотности теплового потока. В связи с этим на всю поверхность холодильника стали устанавливать ПТП, диаметр которого совпадал с диаметром холодильника, а чувствительный элемент ПТП занимал не более 0,01 площади рабочей поверхности холодильника. Это гарантировало отсутствие искажений теплового поля в зоне ЧЭ ПТП при испытаниях различных по теплопроводности материалов [4.18].

На рисунке 5.3 представлена усовершенствованная схема измерительной ячейки, реализованная в последующих моделях прибора (ИТ-4, ИТ-5) [5.2].

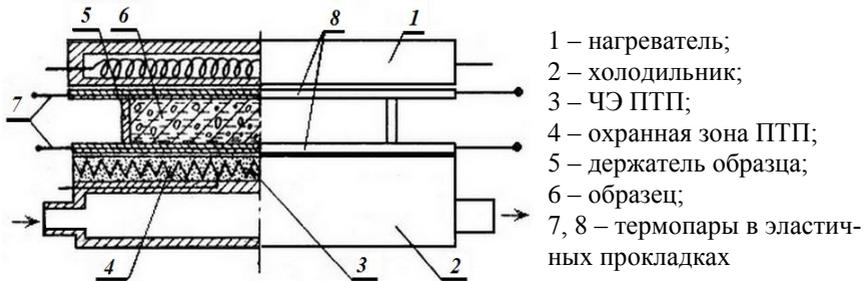
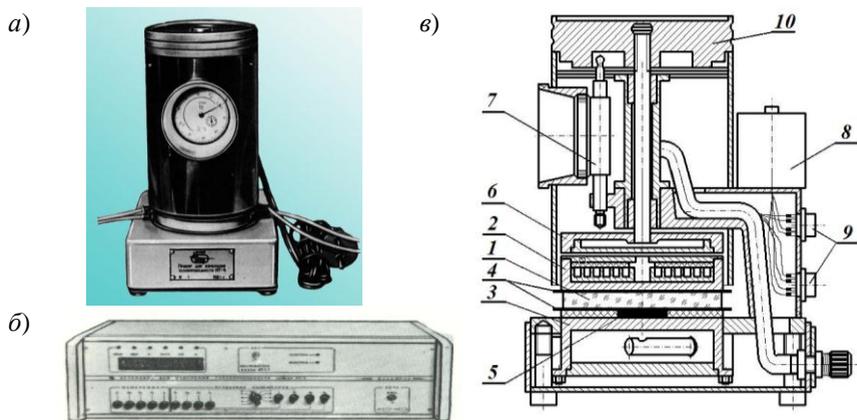


Рис. 5.3. Схема измерительной ячейки теплотрического плоского прибора в асимметричном исполнении (приборы ИТ-4, ИТ-5)

В этих моделях согласно [4.18] диаметр образца может не совпадать с диаметром холодильника, однако он должен быть выполнен размером более двух диаметров чувствительной зоны ПТП, а отношение толщины образца к его диаметру – не менее 0,2 с целью сохранения одномерности теплового потока, пронизывающего образец при различных режимах испытаний.

Приборы ИТ-4 и ИТ-5 применяли для технических измерений при комнатных значениях температуры и, при необ-

ходимости, в диапазоне значений температуры от 220 до 360 К на образцах с поперечным размером 60 – 120 мм и толщиной от 0,5 до 10 мм. Модель ИТ-4 после государственных испытаний была внесена в Государственный реестр мер и измерительных приборов СССР № 8440-86 [5.4]. Благодаря широкому применению приборов ИТ-4 в измерительной практике была получена обширная информация о его эксплуатационных и метрологических качествах, которая позволила создать цифровой автоматизированный измеритель теплопроводности модели ИТ-5 [5.5], представленный на рисунке 5.4, который также был внесен в Госреестр СССР под номером № 12085-89 [5.6].



1 – исследуемый образец; 2 – нагреватель; 3 – холодильник; 4 – ПТ (термопары в эластичных прокладках); 5 – ПТП; 6 – экран; 7 – измеритель толщины; 8 – устройство термостатирования опорных спаев термопар; 9 – разъемы; 10 – гиря (гири) для создания сжимающего усилия

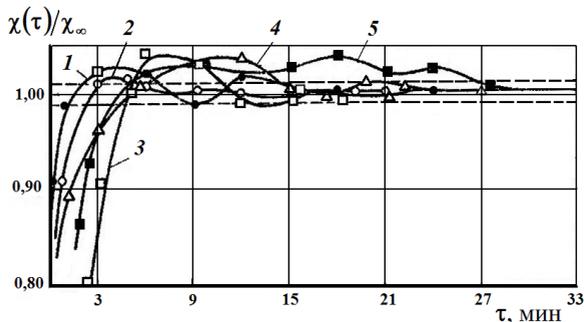
Рис.5.4. Внешний вид теплового (а) и электронного (б) блоков и схема конструкции теплового блока (в) теплотрического прибора модели ИТ-5

В комплект измерителя ИТ-5 входят два блока – тепловой (а) и электронный (б), с габаритами, соответственно, 235×200×140 мм и 180×485×300 мм и массой 9,5 кг и 11,5 кг.

В тепловом блоке, содержащем преобразователи ПТП и ПТ, имеется ячейка, в которую помещают образец. Электронный блок, принимающий сигналы ПТП и ПТ, представляет собой контрольно-измерительную и регулирующую систему, разработанную по методу агрегатирования [5.7].

Тепловой блок этой модели отличается от теплового блока модели ИТ-4 наличием устройства термостатирования 8, поддерживающего температуру опорных спаев дифференциальных термопар при значении  $(323 \pm 0,5)$  К.

Теплометрический метод в совокупности с достаточно простой конструкцией теплового блока без компенсационных нагревателей и специальных охранных приспособлений, а также наличие автоматизации регулирования параметров теплового режима, сбора и обработки измерительной информации способствовали значительному сокращению продолжительности измерений по сравнению с другими стационарными приборами (см. 4.1.3). Графики выхода показаний прибора ИТ-5 на установившиеся значения при исследовании теплопроводности различных материалов представлены на рисунке 5.5 (сравни с рис. 4.4 и табл. 4.1).



1 – плавный кварц (толщина 3,0 мм); 2 – стекло марки ТФ-1 (5,1 мм);  
3 – стекло марки ЛК-5 (5,1 мм); 4 – полиметилметакрилат (4,6 мм);  
5 – пенополиуретан (9,2 мм)

Рис. 5.5. Графики выхода относительных показателей  $\chi(\tau)/\chi_{\infty}$  прибора ИТ-5 в установившийся режим

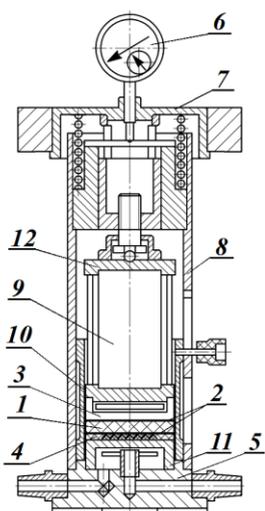
Для материалов с коэффициентом теплопроводности из диапазона от 0,2 до 1,5 Вт/(м·К) при толщине образца порядка 5 мм текущие показания  $\chi(\tau)$ , отнесенные к установившимся значениям  $\chi_\infty$ , достигают уровня  $(100\pm 1)\%$  через 15 – 20 мин. Лишь для образца пенополиуретана толщиной 9,2 мм с  $\chi < 0,05$  Вт/(м·К) показания стабилизируются через 30 мин.

При исследовании метрологических характеристик приборов модели ИТ-5 в диапазоне значений коэффициента теплопроводности от 0,2 до 1,5 Вт/(м·К) при температуре отнесения от 220 до 360 К установлено, что предел основной допускаемой относительной погрешности не превышает 6%, что и было принято для данной модели по результатам государственных приемочных испытаний [5.6]. Анализ вклада отдельных составляющих погрешности в общую погрешность измерения теплопроводности показал, что значение СКО случайной составляющей почти на порядок меньше СКО систематической погрешности, главный вклад в которую вносит СКО погрешности эталонной меры теплопроводности. Предел допускаемой погрешности эталонных мер равен 3% при доверительной вероятности 0,95, согласно паспортным данным [5.8].

Теплометрические приборы ИТТФ серии ИТ, которых было изготовлено и передано в эксплуатацию более 300 шт., явились, начиная с середины 70-ых годов прошлого столетия, самыми востребованными приборами плоского типа теплометрического направления, широко применяемыми для измерения коэффициента теплопроводности в лабораторных условиях образцов различных неметаллических материалов. Ими фактически было обеспечено единство технических измерений коэффициента теплопроводности большой номенклатуры неметаллических материалов на территории Украины и бывшего СССР.

### 5.1.2 Прибор для исследования теплопроводности образцов химикатов-добавок к полимерным материалам

Теплометрический метод и асимметрическая измерительная схема были использованы при создании ряда приборов для исследования теплопроводности различных неметаллических материалов. В результате сотрудничества специалистов ИТТФ, Института «НИИХИМ-ПОЛИМЕР» (г.Москва) и Тамбовского Института химического машиностроения был создан лабораторный прибор для исследования теплопроводности химикатов-добавок к полимерным материалам [5.9], схема конструкции которого показана на рисунке 5.6



- 1 – исследуемый образец;
- 2 – термопары;
- 3 – нагреватель;
- 4 – ПТП; 5 – теплоприемник;
- 6 – индикатор толщины образца;
- 7 – верхняя крышка прибора;
- 8 – корпус прибора;
- 9 – теплоизолятор;
- 10 – защитный подвижный экран;
- 11 – нижняя крышка теплоприемника;
- 12 – ступица

Рис. 5.6. Схема конструкции прибора для исследования теплопроводности химикатов-добавок к полимерным материалам

В рабочем состоянии исследуемый образец 1, помещенный между термопарами 2 в резиновых прокладках, зажат между нагревателем 3 и ПТП 4, приклеенным к теплоприемнику 5. Толщина образца 1 (твердого или сыпучего) регистрируется индикатором часового типа 6. Теплоприемник представляет собой металлический сосуд, через внутреннюю полость которого прокачивается термостатированная в циркуляционном термостате жидкость. На нижнюю крышку 11 теплоприемника 5 эпоксидным компаундом приклеен ПТП 4

диаметром 60 мм, ЧЭ которого (10 мм) расположен в центре ПТП. Между нагревателем 3 и ступицей 12 размещен теплоизолятор 9, предохраняющий верхнюю часть прибора от перегрева при работающем нагревателе. В нижней части корпуса 8 прибора имеются окна для введения в ячейку образца, термопар и вспомогательных устройств при испытании жидких, сыпучих или пастообразных материалов. На уровне этих окон внутри корпуса установлен подвижный экран 10 для уменьшения внешних условий во время эксперимента.

Описанный прибор является основным элементом установки, в которую также входят узел коммуникации, стабилизирующий источник питания Б5-21, измеритель сигналов ПТП 4 и термопар 2 – цифровой вольтметр Щ68000, и ультра-термостат УТ-15М. В узел коммуникации входят многопозиционный переключатель, сосуд Дьюара, входные клеммы нагревателя и индикатор тока. К переключателю подведены выводы ПТП и термопар, которыми измеряют плотность теплового потока через образец и температуру поверхностей образца, нагревателя и теплоприемника. Все температурные измерения производятся по дифференциальной схеме.

Коэффициент теплопроводности образцов твердых материалов вычисляют по результатам измерений по формуле (4.4). За температуру отнесения принимается среднее арифметическое значение показаний ленточных термопар  $E_1$  и  $E_2$ , измеряющих температуру поверхностей образца, чувствительность которых  $S^T$ :

$$T_{отн} = 0,5 \cdot (E_1 + E_2) / S^T. \quad (5.1)$$

При отработке методики измерений теплопроводности твердых материалов были выполнены измерения коэффициента теплопроводности образцов нескольких хорошо изученных материалов (полиметилметакрилат, стекло, стеклотекстолит, текстолит, резина, линолеум, целлулоид). Полученные результаты совпадают со справочными данными в пределах погрешности измерений  $\pm 4\%$  [5.8].

Для измерения теплопроводности жидкостей изготовлена специальная кювета из двух одинаковых по толщине круглых стеклянных пластин диаметром 70 мм и прокладки из текстолитового кольца. Стеклянные пластины приклеены жидким стеклом с обеих сторон этого кольца так, что между ними создана плоская полость, которая через специальные отверстия с помощью медицинского шприца и иглы заполняется исследуемой жидкостью. Благодаря такой конструкции и малой теплопроводности материала прокладки в центральной зоне кюветы тепловое поле с достаточной точностью можно считать одномерным. Тогда из соотношения для трехслойной плоской стенки с учетом того, что кювета изготовлена из одинаковых стеклянных дисков, получена следующая расчетная формула для определения коэффициента теплопроводности слоя жидкости толщиной  $h$ :

$$\chi = \chi_{СТ} \cdot h \cdot \left( \frac{\chi_{СТ}}{K^q \cdot S^T} \cdot \frac{\Delta E}{E} - 2h_{СТ} \right)^{-1}, \quad (5.2)$$

где  $\chi_{СТ}$ ,  $h_{СТ}$  – коэффициент теплопроводности стекла и высота зазора, равная высоте текстолитового кольца;  $K^q$  – коэффициент преобразования ПТП;  $S^T$  – чувствительность термопар;  $\Delta E$  и  $E$  – сигналы дифференциальной ленточной термопары и ПТП, соответственно.

Было изготовлено несколько таких кювет с толщиной зазора от 0,5 мм до 1,5 мм. Предварительные испытания для отработки методики измерений показали, что при таких размерах и конструкции кюветы теплопроводность жидкостей определяется с высокой точностью. В качестве изученных жидкостей использованы касторовое масло и глицерин. Полученные результаты хорошо согласуются со справочными данными [5.10, 5.11].

Несложное приспособление в виде тонкостенного кольца из полиметилметакрилата, которое плотно надевается на нижнюю крышку 11 позволяет измерять теплопроводность химикатов в сыпучем состоянии. Расчетная формула имеет вид:

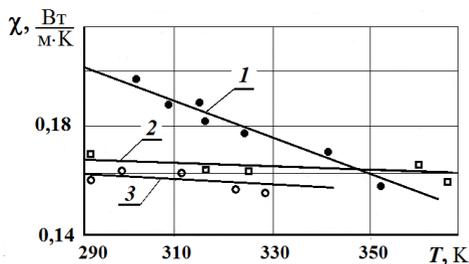
$$\chi = h \cdot \left( \frac{1}{K^q \cdot S^T} \cdot \frac{\Delta E'}{E} - R \right)^{-1}, \quad (5.3)$$

где  $\Delta E'$  – показание дифференциальной термопары, спаи которой вмонтированы в поверхность нагревателя и ПТП, а  $R$  – тепловое сопротивление изоляционного слоя, внутри которого расположен спай термопары, вмонтированный в поверхность тепломера. Значение  $R$  определяется специальными опытами при градуировке прибора; для описываемого прибора  $R = 6,18 \cdot 10^{-3} \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}$ .

Для проверки методики измерений был исследован порошкообразный бензол плотностью  $767,9 \text{ кг/м}^3$  при температуре  $351 \text{ К}$ . Значение теплопроводности получено равным  $0,129 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ .

Для измерения теплопроводности пастообразных химикатов используется цилиндрическая кювета, дно которой изготовлено из меди, а боковая стенка – из теплоизолятора. Заполненная доверху исследуемым веществом кювета устанавливается в прибор между термопарами в резиновых прокладках и зажимается аналогично твердому образцу.

Таким образом, описанный прибор позволяет оперативно и с достаточной точностью для инженерной практики измерять коэффициент теплопроводности различных по агрегатному состоянию химикатов-добавок к полимерным материалам в диапазоне температуры от  $239$  до  $373 \text{ К}$ . Например, на рисунке 5.7 представлены зависимости теплопроводности от температуры для некоторых химикатов в жидком состоянии, построенные по экспериментальным данным.



- 1 – морфолин (●);
- 2 – раствор морфолиновой соли (□);
- 3 – продукт С 789 (○)

Рис. 5.7. Температурные зависимости теплопроводности жидких химикатов-добавок

### 5.1.3 Прибор для исследования теплопроводности талых и мерзлых грунтов

Для исследования теплопроводности теплоизоляционных и дисперсных материалов, в частности, талых и мерзлых грунтов в Калининском политехническом институте (теперь – г. Тверь, Россия) разработан совместно с ИТТФ теплотрический прибор также в асимметричном исполнении, принципиальная схема которого приведена на рисунке 5.8 [5.12]



Рис. 5.8. Принципиальная схема прибора для измерения коэффициента теплопроводности талых и мерзлых грунтов

Исследуемый образец 1 размерами  $\text{Ø}27,5 \times 10$  мм, находящийся в кювете 2, помещен в измерительную ячейку между медными пластинами 3 и 4 и массивными латунными блоками 5 и 6. Для обеспечения одномерного температурного поля служат теплоизоляционные стаканы 7, 8, выполненные из пенопласта.

Режим нагрева (или охлаждения) задается путем установки на верхний блок 5 сосуда с горячей водой (или сухого льда). Плотность теплового потока измеряется ПТП 9, представленным ИТТФ. Перепад температуры поверхностей образца 1 – дифференциальной термопарой 10, спаи которой смонтированы в пластины 3 и 4. Средняя температура образ-

ца измеряется дифференциальной термопарой 11, горячий спай которой вмонтирован в верхний блок 5, а холодный – помещен в сосуд Дьюара, где также находится стеклянный ртутный термометр для измерения температуры водно-ледяной смеси.

В приборе измерения осуществляются в диапазоне значений температуры образца от 250 до 300 К с относительной погрешностью 8%. Прибор имеет габариты  $\varnothing 100 \times 250$  мм и массу 4 кг. Прибор был применен для исследования теплопроводности талых и мерзлых грунтов при нестационарном течении процесса до установления квазистационарного состояния в образце.

#### **5.1.4 Теплометрические приборы для определения теплопроводности и других геотермических параметров горных пород в лабораторных и натуральных условиях**

Для определения коэффициента теплопроводности горных пород в лабораторных условиях успешно применяются описанные в 5.1.1 приборы модели ИТ [4.18, 5.4, 5.6], на которых была получена впервые информация о теплопроводности большого количества различных горных пород в лабораторных условиях.

Для изготовления опытных образцов использовались извлеченные из скважин керны горных пород, из которых вырезали плоские диски диаметром 45 – 60 мм, толщиной 5 – 10 мм. Реже диски, изготовленные из монолитных кусков породы, имели диаметр до 100 мм. Однако, при отборе керна большую роль играет элемент случайности. Даже самый детальный отбор образцов не позволяет полностью охарактеризовать средние ТФХ литолого-стратиграфических толщ. При этом отобранные образцы отличаются по физическим параметрам от массива пород в естественном залегании. Кроме того, при подготовке образцы подвергаются механической обработке для придания им определенной формы и размеров, что нередко приводит к нарушению структуры породы, ее

частичному разрушению, изменению влажности и прочее. И, наконец, не во всех скважинах и не со всех глубин оказывается возможным отбор керна.

Поэтому возникла необходимость в методике определения коэффициента теплопроводности горных пород по результатам измерения непосредственно в скважине. Попытки создания средства измерения ТФХ горных пород в условиях их естественного залегания предпринимались неоднократно [5.13 – 5.16]. Все они основаны на изучении нестационарных тепловых полей в скважине, возникающих при бурении или создающихся искусственно после окончания бурения.

Например, по методу А. Е. Бека [5.13] в скважину вводили цилиндрический зонд, содержащий электронагреватель и преобразователь температуры (ПТ). При помощи зонда, плотно прижатого к стенкам скважины, производили нагрев в течение некоторого времени околоскважинного пространства. Коэффициент теплопроводности породы определяли по времени восстановления температурного режима в скважине после отключения источника нагрева. Недостатками устройства и метода измерения были необходимость мощного источника электроэнергии, набора зондов различных габаритов для выполнения измерений в скважинах различных диаметров и большая продолжительность эксперимента (от нескольких десятков до нескольких сотен минут).

Наиболее существенными недостатками оказались невозможность обеспечить и контролировать надежный тепловой контакт между зондом и стенками скважины вследствие их неровности, трещин, каверн, а также нарушения термодинамического состояния массива из-за длительного прогревания мощным электронагревателем. Кроме того, это устройство позволяло определять кроме коэффициента теплопроводности еще только температуру разреза до момента включения электронагрева.

Похожее устройство было предложено в работе [5.14], в котором исключена забота о контакте между опускаемым в

скважину зондом и стенками скважины за счет того, что электронагреватель завулканизирован в резиновый надувной баллон. Зонд вместо измерителя температуры был снабжен теплочувствительным элементом, в качестве которого использована термоэлектрическая батарея медь-константановых термоэлементов. Рабочие спаи термоэлементов были равномерно распределены по поверхности зонда (резинового баллона), а холодные спаи, играющие роль реперных, соединены вместе и вынесены за пределы его корпуса на расстояние 0,5 м и ниже в скважинный наполнитель, являющийся для опорных спаев природным термостатом.

Баллонный зонд опускали на заданную глубину в скважину, но только обязательно необсаженную, то есть в которую не введена колонна металлических труб. Для обеспечения прилегания баллона к стенкам скважины в него насосом нагнетали воздух, далее включали электронагреватель и одновременно начинали регистрировать показания термобатареи. Этим фиксируется ход изменения разности значений температуры поверхности зонда, контактирующей с поверхностью горного массива и скважинного наполнителя в сечении скважины на расстоянии 0,5 или ниже зонда. По результатам измерения строился график, при помощи которого определялся тип нагрева (или охлаждения) горного массива, по которому находили коэффициент теплопроводности с погрешностью не менее 12% [5.14].

Кроме недостатков, присущих устройству, описанному в [5.13], относится еще потребность не только мощного источника электроэнергии для питания нагревателя, но и компрессора с системой соединительных вакуумных шлангов для нагнетания воздуха в резиновый баллон, а также неприменимость устройства для работы в обсаженных скважинах и в скважинах, глубина которых превышает 20 м, и для определения каких-либо иных геотермических параметров горного массива.

В связи с этим в ИТТФ совместно с Институтом геофизики им. С. И. Субботина АН УССР были разработаны способ и теплотметрические устройства для определения геотермических параметров непосредственно в скважине: температуры разреза, геотермического градиента, плотности теплового потока Земли и коэффициента теплопроводности горных пород в околоскважинном пространстве (массиве) [5.17 – 5.20]. Эта информация имеет важное значение для решения многих теоретических и практических задач геофизики, геологии и гидрогеологии, а также при решении задач по расчету условий теплообмена в эксплуатирующихся нефтегазовых и водных скважинах вентилирующихся шахтах и прочее.

Как известно, согласно закону Фурье (см. (4.1)) для определения коэффициента теплопроводности нужно знать градиент температуры и плотность теплового потока. В случае работы с горными породами в условиях естественного залегания необходимо измерениями в скважине получить информацию о геотермическом градиенте ( $\gamma_{г.т}$ ) и плотности теплового потока Земли ( $q$ ). Но если для измерения температуры имеются стандартные измерители температуры в скважинах, то измерение плотности потока Земли сопровождается существенными трудностями.

Как, правило, определение теплового потока в скважине выполняют ниже уровня сезонных колебаний температуры на основе раздельного измерения геотермического градиента и теплопроводности горных пород в одном и том же интервале значений глубины, с какой взяты керны для лабораторного изучения их теплопроводности.

Методика определение теплового потока из недр Земли, основанная на применении ПТП, значительно проще [5.20, 5.21]. Однако, ПТП для измерения в естественных условиях теплового потока должны иметь высокую чувствительность, минимально возможные габариты и теплопроводность, соизмеримую с теплопроводностью горных пород. Более всего этим требованиям соответствуют ПТП ИТТФ [1\*, 2\*].

На базе этих ПТП в результате совместных работ ИТТФ и Института геофизики АН УССР было создано и испытано в нескольких скважинах Украины устройство для измерения теплового потока Земли и температуры разреза. Конструкция измерительной головки скважинного прибора для измерения теплового потока Земли приведена на рисунке 5.9 [5.22].

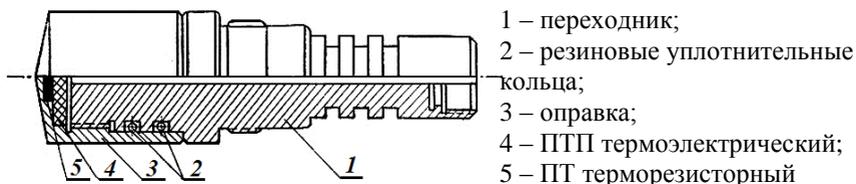


Рис. 5.9. Схема конструкции измерительной головки скважинного прибора для измерения плотности теплового потока Земли

Конструкция прибора выполнена с учетом условий измерения в скважинах. ПТП 4 во избежание повреждений помещен в тонкостенную оправку 3 из нержавеющей стали и проградуирован вместе с ней. Из сравнения результатов градуировки ПТП до и после установки в оправку видно, что оправка не изменяет функцию преобразования ПТП. В ту же оправку помещен терморезисторный элемент 5 для одновременного измерения температуры. Измерительная головка с ПТП и ПТ подсоединяется к стандартному кабельному накопечнику при помощи переходника 1, изготовленному из фторопласта-2, ТФХ которого близки ТФХ ПТП. Для герметизации измерительной головки предусмотрены две резиновые кольцевые прокладки 2.

Для регистрации сигнала ПТП применялась компенсационная схема измерения ТЭДС. Сопротивление терморезистора измерялось при помощи моста постоянного тока. Длительной выдержкой снаряда на забое (до суток и более) убедились, что показания ПТП весьма устойчивы.

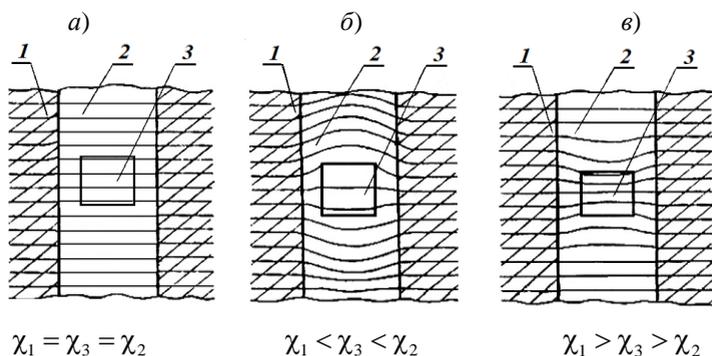
Проведенные исследования показали принципиальную возможность применения ПТП ИТТФ для непосредственных

измерений потока теплоты из недр земли. По результатам совместных измерений плотности теплового потока и температуры определяли коэффициент теплопроводности горных пород в условиях их естественного залегания.

Накопленный опыт был использован в разработке нового теплотрического способа определения коэффициента теплопроводности горных пород [5.17, 5.18] и скважинного устройства для его реализации [5.19]. Это было первое в Украине и бывшем СССР устройство, предназначенное для измерения плотности теплового потока Земли и коэффициента теплопроводности горных пород непосредственно в различных скважинах с возможной глубиной до 5 км без нарушения термодинамических условий массива пород в околоскважинном пространстве.

Этот способ основан на изучении естественного теплового поля Земли и его возмущений, вызванных внедрением в скважину тела конечных размеров с известным коэффициентом теплопроводности (эталонного образца). Сущность способа заключается в том, что, если в скважину, в которой установлен стационарный тепловой режим, вводится тело конечных размеров, поле изотерм перестраивается в зависимости от соотношения коэффициентов теплопроводности горной породы околоскважинного массива, наполнителя скважины и введенного в скважину тела. Если допустить, что теплопроводность этих трех составляющих одинакова, то естественное температурное поле скважины не изменится после внедрения в нее образца и температурный градиент образца будет равен геотермическому градиенту, что проиллюстрировано на рисунке 5.10*а* [5.18].

Если коэффициент теплопроводности образца больше или меньше коэффициентов теплопроводности скважинного наполнителя и горной породы околоскважинного массива, то градиент температуры в образце уменьшается или увеличивается (см. рис 5.10, *б* и *в*) по сравнению с геотермическим градиентом.



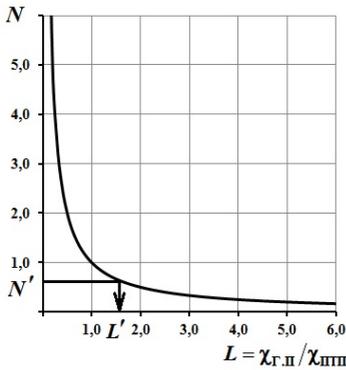
1 – зона массива горных пород; 2 – зона скважинного наполнителя;  
3 – зона введенного в скважину образца (тела конечных размеров)

Рис. 5.10. Характер распределения изотерм при различных соотношениях коэффициентов теплопроводности горных пород  $\chi_1$ , скважинного наполнителя  $\chi_2$  и введенного тела конечных размеров  $\chi_3$

При этом отношение этих градиентов обратно пропорционально отношению коэффициентов теплопроводности этих зон. Таким образом, результаты измерения этих градиентов при известной теплопроводности введенного тела (эталонного образца) позволяют определить коэффициент теплопроводности горных пород без извлечения их образца из скважины. Однако, при реализации описанного способа возникают трудности, связанные с необходимостью регистрировать очень слабые изменения температуры в эталонном образце. Так при геотермическом градиенте  $\gamma_{ГТ} = 0,03$  К/м, в образце высотой 0,1 м разность температуры составляет 0,003 К. Эта задача решается применением в качестве эталонного образца ПТП ИТТФ, который может быть изготовлен с чувствительностью, позволяющей измерять очень слабый тепловой поток Земли [1\*, 2\*] и его вариации, обусловленные внедрением ПТП в скважину.

Особенности теплового поля при внедрении в скважину ПТП (исполняющего функции эталонного образца) изучались методом электро моделирования [5.16]. Было получено наглядное изображение изотерм (см. рис. 5.10) и построена

представленная на рисунке 5.11 зависимость отношения этих температурных градиентов  $N = \gamma_{г.п} / \gamma_{ППП}$  от отношения коэффициентов теплопроводности  $L = \chi_{г.п} / \chi_{ППП}$  [4\*, 5.18]



$N'$  – значение отношения измеренных градиентов  $\gamma_{г.п} / \gamma_{ППП}$  ;

$L'$  – соответствующее значение отношения коэффициентов теплопроводности горной породы и ПТП (эталонного образца)  $\chi_{г.п} / \chi_{ППП}$

Рис. 5.11 – Зависимость отношения градиентов  $N = \gamma_{г.п} / \gamma_{ППП}$  от отношения коэффициентов теплопроводности  $L = \chi_{г.п} / \chi_{ППП}$

Геометрический градиент горной породы  $\gamma_{г.п}$  измеряется посредством скважинного термометра, а градиент вдоль ПТП  $\gamma_{ППП}$  определяют по плотности теплового потока, измеренной этим ПТП, теплопроводность которого  $\chi_{ППП}$  известна:

$$\gamma_{ППП} = q / \chi_{ППП} , \quad (5.4)$$

где  $\chi_{ППП}$  – коэффициент теплопроводности ПТП (паспортное значение или предварительно найденное экспериментально). Полученные результаты дают значение отношения измерительных градиентов  $N' = \gamma_{г.п} / \gamma_{ППП}$  , по которому из графика находится соответствующее значение отношения коэффициентов теплопроводности  $L'$  . Расчетная формула для вычисления коэффициента теплопроводности изучаемой горной породы имеет вид:

$$\chi_{г.п} = \chi_{ППП} \cdot L' . \quad (5.5)$$

Таким способом были найдены коэффициенты теплопроводности горных пород в нескольких скважинах Украины и параллельно в лабораторных условиях, что приведено в таблице 5.1 [5.22].

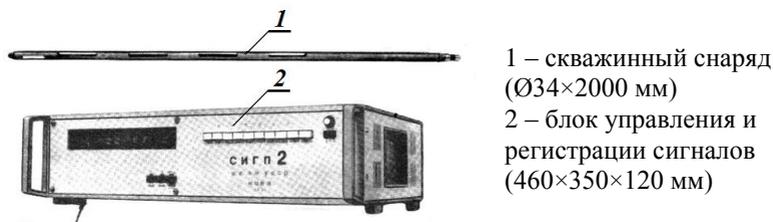
Таблица 5.1

Горная порода	№ сква- сква- жины	Глубина, м	Измеренные значения $\chi_{\text{ГП}}$ , Вт/(м·К)		Расхож- дение %
			в сква- жине	в лабора- тории	
Гранит	1493	275	2,52	2,46	1,20
Гранит	1501	825	2,64	2,73	3,35
Гранит	1499	564	3,12	3,20	2,53
Пироксен- амфиболовая порода	122	305	2,12	1,99	1,46
Кристалло- сланцы	15030	173	1,92	1,96	2,04
Доломиты	Луцк-1	453	2,10	2,46	1,58

Длительность эксперимента по нахождению коэффициента теплопроводности горной породы, определяемая временем восстановления стационарного теплового режима в скважине после внедрения скважинного снаряда, несущего скважинный термометр и ПТП в соответствующей оснастке, составляла от 1,5 до 2 часов.

Относительная погрешность определения коэффициента теплопроводности горной породы в скважине, состоящая из погрешностей измерения геотермического градиента  $\delta_{\gamma}=6\%$ , плотности теплового потока  $\delta_q=4\%$  и коэффициента теплопроводности ПТП  $\delta_{\chi}=5\%$ , составила  $\delta_{\chi_{\text{ГП}}}=8,7\%$ .

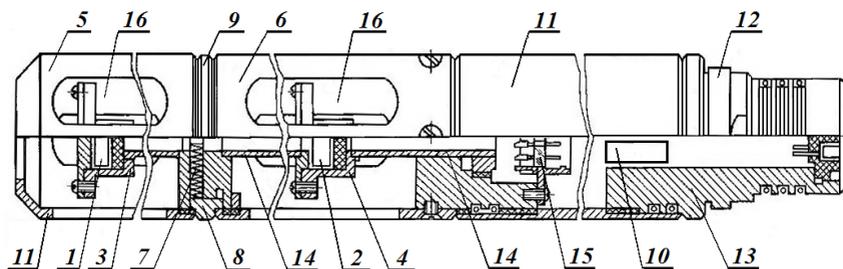
На рисунке 5.12 показан внешний вид скважинного прибора СИГП-2, реализующего описанный способ определения коэффициента теплопроводности и других геотермических параметров горных пород в естественном состоянии [5.17 – 5.19]. Прибор СИГП-2 состоит из скважинного снаряда (1) и блока управления и регистрации (2). Скважинный снаряд – устройство цилиндрической формы, подсоединяемое стандартным кабельным наконечником к кабелю кабельного подъемника.



1 – скважинный снаряд  
( $\text{Ø}34 \times 2000$  мм)  
2 – блок управления и  
регистрации сигналов  
( $460 \times 350 \times 120$  мм)

Рис. 5.12. Теплометрический скважинный измеритель коэффициента теплопроводности и геотермических параметров горных пород модели СИПИ-2

Его устройство, схема конструкции которого показана на рисунке 5.13, состоит из трех основных узлов: термоградиентомера, ПТП и электронного блока, размещенных в корпусе устройства. Для удобства монтажа корпус выполнен разборным из пяти кожухов, последовательно сочлененных посредством резьбовых соединений и герметизирующих резиновых колец.



1, 2 – первичные ПТ термоградиентомера; 3, 4 – металлические контейнеры под ПТ 1 и 2; 5, 6, 9, 11, 12 – охранные кожухи; 7 – ПТП; 8 – стакан; 10 – электронный блок; 13 – стандартный кабельный наконечник; 14 – тонкие соединительные трубки; 15 – разъем; 16 – окна в кожухах 5 и 6

Рис. 5.13. Схема конструкции скважинного снаряда для измерения геотермических параметров СИПИ-2

Термоградиентомер, предназначенный для измерения геотермического градиента, включает в себя нижний ПТ 1 и верхний ПТ 2, в качестве которых использованы малогаба-

ритные термозависимые кварцевые резонаторы (ТРК) с рабочей частотой 28 МГц и температурным коэффициентом частоты 1000 Гц/К. Оба ТРК помещены в выфрезерованные под их размер металлические контейнеры 3 и 4, первый из которых расположен в охранным кожухе 5, а второй – в охранным кожухе 6.

ПТП 7, укрепленный в стакане 8 с охранным кожухом 9, к которому с двух торцов герметично пристыкованы кожухи 5 и 6, представляет собой термоэлектрическую батарею, выполненную в виде диска со сквозным отверстием по центру. Кроме предварительного определения функции преобразования ПТП, устанавливают его коэффициент теплопроводности.

В герметичном кожухе 11 находится электронный блок 10 для коммутации и обработки сигналов измерительных преобразователей ПТП, ТРК1 и ТРК2. Один торец кожуха 11 сочленен с кожухом 6, а второй с кожухом 12 стандартного кабельного наконечника 13.

Контейнеры 3 и 4 с ТРК 1 и 2, стакан 8 с ПТП 7 и электронный блок 10 размещены по оси корпуса и закреплены каждый в своем кожухе при помощи тонких трубок 14, через полость которых выведены провода от ТРК и ПТП к вилке разъема 15, предназначенного для соединения их с электронным блоком. Электронный блок кабелем подсоединен к вторичной аппаратуре, установленной около устья скважины. В охранных кожухах 5 и 6 выфрезерованы окна 16 для свободного доступа скважинного наполнителя к металлическим контейнерам 3 и 4 с ТРК 1 и 2. С этой же целью свободный торец кожуха 5 выполнен в виде полого конусного наконечника с отверстием.

Оба ТРК (1 и 2) расположены симметрично относительно ПТП на расстоянии 1 м друг от друга, при этом отношение расстояния между ТРК к высоте (длине) ПТП может составлять от 20 до 200. Именно при таких условиях, как показали теоретические расчеты и моделирование, исключается

взаимное влияние ТРК и ПТП. Электронный блок также отдален от верхнего ТРК 2 так, что и его влияние на показания измерительных преобразователей не сказывается.

После опускания на заданную глубину снаряда на кабеле (тросе) в скважину с наполнителем через некоторый промежуток времени, соответствующий восстановлению стационарного теплового состояния, производят регистрацию сигналов, поступающих по кабелю, и определяют геотермические параметры горных пород. Прибор работает в дискретном режиме.

Измерив на одной и той же глубине скважины естественный геотермический градиент  $\gamma_{ГТ}$  на базе длиной 1 м и плотность теплового потока  $q$ , пронизывающего ПТП с известной теплопроводностью  $\chi_{ПТП}$ , сначала вычислением по формуле (5.4) находят температурный градиент вдоль ПТП  $\gamma_{ПТП}$ , вычисляют значение отношения этих градиентов  $N' = \gamma_{Г.П} / \gamma_{ПТП}$  и по графику (см. рис. 5.10) находят значение  $L'$ , соответствующее данному значению  $N'$ , а искомый коэффициент теплопроводности горной породы  $\chi_{Г.П}$  рассчитывают по формуле (5.5).

Измерения геотермического градиента и плотности теплового потока Земли выполняются с большой точностью, что позволяет определять коэффициенты теплопроводности горных пород в скважине с погрешностью не хуже 6%.

Прибор СИПГ-2 прошел испытания в скважинах на территории Украины в разных геологических условиях и внедрен в практику полевых работ. Результатом испытаний явилось повышение точности и достоверности получаемой информации о геотермических параметрах за счет проведения измерений в скважинах без нарушения термодинамических условий. Основные технические характеристики прибора СИПГ-2 приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2

Характеристика	Размерность	Числовое значение
Диапазон измерения плотности теплового потока Земли	мВт/м <sup>2</sup>	10 – 100
Диапазон измерения температуры разреза	К	260 – 340
Диапазон измерения геотермического градиента	К/км	0 – 30
Диапазон измерения коэффициента теплопроводности горных пород	Вт/(м·К)	0,2 – 6,0
Допускаемая глубина опускания скважинного снаряда	м	4000
Скорость спуска скважинного снаряда, не более	м/с	0,5
Параметры электрического тока		
– напряжение	В	220±10
– частота	Гц	50±1
Потребляемая мощность, не более	В·А	15
Время непрерывной работы	ч	12

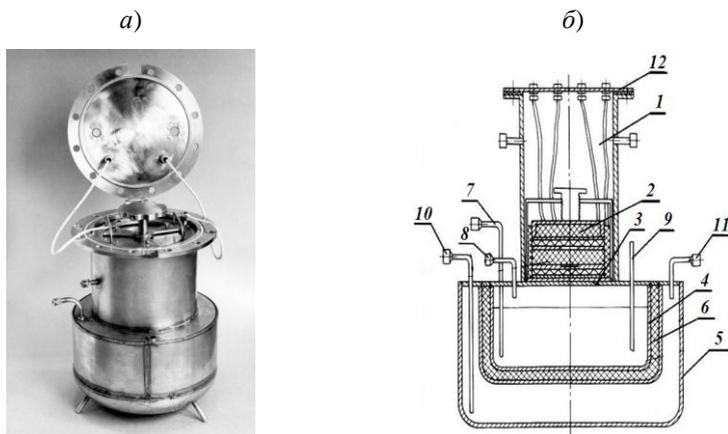
## 5.2 Теплометрические приборы в симметричном исполнении

### 5.2.1 Вакуумно-криогенная установка для исследования теплопроводности и теплового сопротивления

Описанные в 5.1 теплометрические плоские приборы в асимметричном исполнении не могут быть применены для исследований теплопроводности и теплового сопротивления в области низких и очень низких (криогенных) значений температуры, а также для определения теплоемкости. Для этих целей была разработана специальная вакуумно-криогенная установка модели ВКУ [3\*, 5.23] для исследования характера изменения теплового сопротивления и теплопроводности низкотеплопроводных материалов в зависимости от температуры в диапазоне 80 – 300 К и давления окружающей среды от 10<sup>-3</sup> до 10<sup>5</sup> Па. При размещении теплового блока установки

в стандартной барокамере нижний предел рабочей температуры был обеспечен на уровне 20 К.

Установка ВКУ состоит из теплового блока и системы автоматического задания и поддержания температурных режимов измерения, контроля и индикации уровня хладагентов и питания электронагревателей. Тепловой блок, внешний вид (а) и структурная схема (б) которого представлены на рисунке 5.14, состоит из рабочей камеры 1, в которой размещена извлекаемая измерительная ячейка 2 для установки в ней образца исследуемого материала.



1 – рабочая камера; 2 – измерительная ячейка; 3 – теплосток; 4 – камера жидкого хладагента (гелиевая емкость); 5 – азотная рубашка; 6 – экранно-вакуумная изоляция; 7, 8 – штуцеры для подачи жидкого гелия и эвакуации его паров; 9 – уровнемер; 10, 11 – штуцеры подачи жидкого азота и эвакуации его паров; 12 – крышка рабочей камеры

Рис. 5.14. Внешний вид (а) и структурная схема (б) теплового блока установки ВКУ

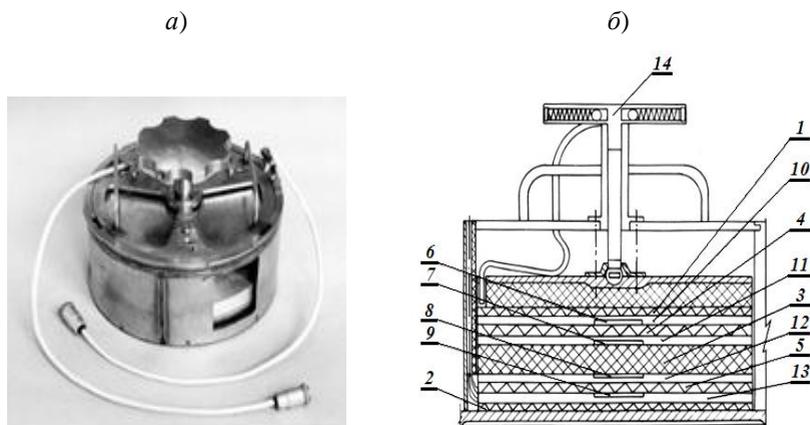
Днище рабочей камеры совмещенно с теплостоком 3, предназначенным для отведения теплоты от измерительной ячейки на уровне температуры насыщения жидкого хладагента. Он выполнен из нержавеющей стали в виде крышки камеры 4. Отведение теплоты от теплостока 3 осуществляется

теплопроводностью через его стенки к жидкому хладагенту и за счет конвективного теплообмена с парами хладагента.

Камера 4 предназначена для заливки и хранения жидкого гелия. Она изготовлена в виде сосуда Дьюара с охранной азотной рубашкой 5, отделенной от гелиевой емкости 4 слоем 6 экранно-вакуумной изоляции. Через крышку камеры 4 выведены штуцеры 7, 8 и 9 для заливки жидкого гелия, эвакуации его паров и уровнемер, а также штуцеры 10, 11 для заливки жидкого азота и отведения его паров.

Для рабочей камеры 1 предусмотрена возможность вакуумирования ее объема или создания газовой среды с определенным давлением. Для этого предусмотрены штуцеры от качки воздуха и натекания, а также герморазъемы для подключения силовых и сигнальных кабелей.

Извлекаемая измерительная ячейка является центральным узлом теплового блока. Ее внешний вид (а) и схема конструкции (б) показаны на рисунке 5.15.



1, 2 – верхний и нижний нагреватели; 3 – исследуемый образец;  
4, 5 – верхний и нижний ПТП; 6, 7, 8, 9 – ПТ; 10, 11, 12, 13 – температуровыравнивающие пластины; 14 – прижимное устройство

Рис. 5.15. Внешний вид (а) и схема (б) измерительной ячейки теплового блока установки ВКУ

Измерительная теплотметрическая ячейка представляет собой термостолбик, набранный из:

- двух электронагревателей 1 и 2;
- двух термоэлектрических ПТП вида вспомогательной стенки 4 и 5 [1.4];
- четырех ПТ 6, 7, 8 и 9 [1.5];
- четырех температуровыравнивающих металлических пластин 10, 11, 12 и 13.

Верхний нагреватель 1 предназначен для задания одномерного теплового потока через образец 3, который установлен между пластинами 11 и 12, выравнивающими температуру поверхностей. Совместная работа обоих нагревателей (1 и 2) обеспечивает требуемый уровень средней температуры образца и заданную разность значений температуры его поверхностей.

Температуровыравнивающие металлические пластины выполнены в виде дисков диаметром, равным диаметру ПТП. Пластины 10 и 13 служат для выравнивания температуры поверхностей ПТП, предназначенных для измерения плотности теплового потока на входе и выходе из образца. На всех четырех пластинах (10 – 13) размещено по одному ПТ, в качестве которых взяты хорошо зарекомендовавшие себя при низких и особенно очень низких значениях температуры термометры сопротивления типа ИС. ПТ 7 и 8 служат для измерения температуры поверхностей образца и их разности, а 6 и 9 – верхнего и нижнего нагревателей.

Собранный термостолбик с помощью прижимного устройства 14 сжимают с обеспечением хорошего теплового контакта между соприкасающимися поверхностями элементов термостолбика. Усилие сжатия регулируется в диапазоне 0 – 50 Н, при этом регулирование осуществляется с помощью четырех подпружиненных винтов, находящихся в штурвале прижимного устройства 14. Теплотметрическую ячейку устанавливают в рабочую камеру (см. рис. 5.14,б), днище которой

совмещено с тепловоспринимающей поверхностью теплостока. В рабочей камере создают требуемые условия измерений: температурный режим, вакуум или газовую среду с определенным давлением.

Для автоматического задания и поддержания температурных режимов, контроля и индикации уровня хладагентов, а также питания электронагревателей термостолбика, установка снабжена системой автоматического управления и регулирования. Значения электрического сопротивления термометров ИС и ТЭДС ПТП измеряют при помощи стандартного универсального цифрового вольтметра, например, ВФ-23 или Ц68000.

Учитывая специфику таких исследуемых теплозащитных материалов, как пенополиуретан, пенопласт, поролон, и другие, для которых характерно наличие пор, образцы выполняют больших размеров, при этом толщина должна превосходить характерный размер пор примерно на порядок, а диаметр превышать толщину в 5 – 8 раз. Таким образом, на установке проводят исследования на плоских образцах с размерами  $\varnothing (200 - 300) \times (10 - 30)$  мм.

Контроль толщины образца при температуре ниже комнатной является весьма сложной задачей, решение которой при разработке прибора не предусматривалось. В таких условиях более корректным является измерение не коэффициента теплопроводности, а теплового сопротивления, расчетной формулой для которого является соотношение:  $R = \Delta T / q$ , где  $\Delta T = T_1 - T_2$  – разность температуры поверхностей образца,  $q = 0,5(q_1 + q_2)$  – полусумма показаний двух ПТП на входе и выходе из образца. При этом коэффициент теплопроводности вычисляют по формуле:  $\chi = h / R$ , где  $h$  – толщина образца.

Основные характеристики установки ВКУ приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3

Характеристика	Размерность	Числовое значение
Диапазон измерения теплового сопротивления	$\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$	0,01 – 0,999
Диапазон определения коэффициента эффективной теплопроводности	$\text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$	0,03 – 1,0
Диапазоны рабочей температуры	К	20 – 300; 80 – 300
Предел допустимой относительной основной погрешности измерения коэффициента эффективной теплопроводности	%	$\pm 10$
Потребляемая мощность, не более,	В · А	250
Продолжительность измерения при фиксированной средней температуре	час	0,5 – 1,0
Габаритные и весовые данные установки:		
– блок тепловых режимов	мм/кг	$\text{Ø}500 \times 580 / 25$
– объем гелиевой емкости	л	25
– объем азотной емкости	л	40
– пульт управления	мм/кг	$480 \times 260 \times 120 / 10$

### 5.2.2 Установка ИТ-7С для измерения коэффициента теплопроводности и теплового сопротивления теплоизоляционных строительных материалов

Опыт создания и эксплуатации стационарных теплометрических приборов плоского типа в асимметричном исполнении и анализ возможных причин искажений тепловых полей (см. 4.2.1 и 4.1.4) позволил разработать теплометрическое средство измерения коэффициента теплопроводности и теплового сопротивления указанных материалов, удовлетворяющее требованиям стандартов ДСТУ БВ.2.7-105, ДСТУ ISO 8301 и ISO 8301 [4.21 – 4.23]. Именно этими нормативными документами установлено, что конструкция тепловой ячейки прибора должна быть основана либо на методе защищенной

горячей плиты, либо на теплотрической симметричной схеме (см. 4.1).

Установка ИТ-7С, предназначенная для массовых технических измерений коэффициента теплопроводности и теплового сопротивления с повышенной точностью по сравнению с приборами моделей ИТ-4 и ИТ-5, характеризуется допускаемой основной относительной погрешностью, удовлетворяющей установленным нормативным значениям согласно ДСТУ БВ.2.7-105 и ДСТУ ISO 8301 [4.21, 4.22]. Разработанные по симметричной измерительной схеме с применением термоэлектрических преобразователей (двух ПТП и группы термопар), изготовленные с учетом особенностей теплотрического метода (см. 4.1.1) и рекомендаций, полученных в результате аналитического исследования точностных возможностей (см. 4.1.4, Б), установки ИТ-7С явились приборной базой для реального внедрения указанных стандартов [5.24].

Внешний вид и состав установки ИТ-7С представлены на рисунке 5.16 [2.26, 4.32, 5.24, 5.25].



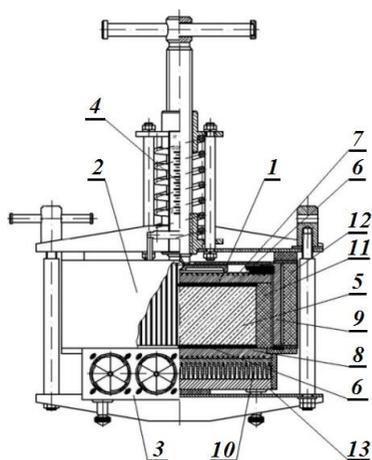
- 1 – тепловой блок;
- 2 – электронный блок;
- 3 – блок термостатирования опорных спаев термопар;
- 4 – подъемно-опускная платформа;
- 5 – стандартная климатическая камера

Рис. 5.16. Внешний вид установки ИТ-7С

Установка ИТ-7С составлена из таких блоков: теплового 1, электронного 2 и опорных спаев 3. Тепловой блок устанавливают на подъемно-опускную платформу 4, посредством которой его помещают в климатическую камеру 5 при необходимости испытаний в температурном диапазоне.

Тепловой блок 1 является блоком первичных преобразователей (ППП и ПТ). Он имеет измерительную ячейку, в которую помещают образец исследуемого материала, а требуемые параметры температурного и теплового режимов устанавливают при помощи электронного блока 2. Электронный блок содержит средства регулирования параметров тепловых режимов, приема и обработки первичной измерительной информации и передачи ее в ПК для дальнейшей обработки по соответствующей программе.

Согласно схеме конструкции теплового блока, приведенной на рисунке 5.17, он содержит измерительную ячейку 1, блок боковой активной теплоизоляции 2, блок охлаждения 3 и прижимное устройство 4.



- 1 – измерительная ячейка;
- 2 – блок боковой активной теплоизоляции;
- 3 – блок охлаждения с вентиляторами;
- 4 – прижимное устройство;
- 5 – исследуемый образец;
- 6 – ПТП1 и ПТП2 (верхний и нижний);
- 7, 8, 9 – электрические нагреватели (верхний, нижний и боковые);
- 10 – радиатор;
- 11, 12 – тепловая изоляция;
- 13 – станина

Рис. 5.17. Схема конструкции теплового блока установки ИТ-7С

Образец 5 помещают в измерительную ячейку 1, при этом посадочное место для образца удовлетворяет требованиям стандартов [4.20, 4.21] и позволяет использовать образцы, размеры которых могут быть до 300×300×120 мм.

Тепловой поток через образец задается верхним нагревателем 7, металлический корпус которого обеспечивает изотермические условия на воспринимающей поверхности об-

разца. Теплоотвод осуществлен кондуктивно-конвективным способом посредством теплоприемника, который с целью исключения жидкого хладагента выполнен из нагревателя 8 (нижнего) и радиатора 10, представляющего собой набор плит с профильным оребрением, смонтированных на общем основании – станине 12. Съем теплоты производится за счет обдува воздухом с помощью блока охлаждения 3, который содержит четыре вентилятора, установленных в общем корпусе. Блок охлаждения 3 соединен силовым кабелем с электронным блоком. Интенсификация съема теплоты, осуществляемая с помощью блока вентиляторов, используется только при значениях температуры, близких к комнатным, вернее в диапазоне от 10 до 60 °С. Поэтому конструкцией предусмотрена возможность демонтажа блока вентилятора для работы при значениях температуры за пределами указанного диапазона с целью предотвращения порчи вентиляторов.

В приборе предусмотрено непосредственное измерение толщины образца, находящегося в ячейке, с помощью штангенциркуля, снабженного измерителем глубины.

Для исключения влияния внешних факторов на тепловое поле образца по боковой поверхности измерительной ячейки 1 смонтирована боковая активная теплоизоляция 2, состоящая из четырех охранных нагревателей 9, снабженных изоляцией 11 и закрытых общим кожухом. Работой охранных нагревателей обеспечивается температура боковой теплоизоляции, равная полусумме значений температуры нагревателей 7 и 8.

С учетом результатов, полученных в 4.1.4, для уменьшения влияния бокового теплообмена на результаты измерений температура боковой теплоизоляции задается и поддерживается равной полусумме значений температуры верхнего нагревательного блока 7 и блока охлаждения 8. Все нагреватели 7, 8 и 9 идентичны конструктивно и изготовлены из высокотеплопроводного металла в виде плит прямоугольной формы размером 360×360×20 мм с фрезерованными пазами, в

которых размещен нагревательный элемент – нихромовый провод в трубке из стекловолокна, залитый высокотемпературным силиконовым герметиком.

Ячейка 1, блок боковой активной изоляции 2 и блок охлаждения вентиляторами 13 смонтированы на общей станине 13 и помещены в прижимное устройство 4, представляющее собой рамную конструкцию на направляющих стойках. Усилие задается с помощью винтового механизма с силовой пружиной и контролируется визуально по шкале, которой оснащен прижимной механизм. Максимальное усилие – до 1000 Н для минимизации контактного сопротивления между теплотреническими блоками и исследуемым образцом в ячейке.

В комплект основных средств измерения входят первичные термоэлектрические ПТП вида вспомогательной стенки со встроенными преобразователями температуры модели ПТП–1Б.28.2.1.11.П.00.1.56.12.0 согласно ДСТУ 3756 [1.4]. В этих ПТП реализованы специальные требования стандартов ДСТУ БВ.2.7-105 и ДСТУ ISO 8301 [4.21, 4.22], а также термоэлектрические преобразователи температуры типа ТХК согласно [1.5] для измерения и контроля температуры различных элементов установки [5.26].

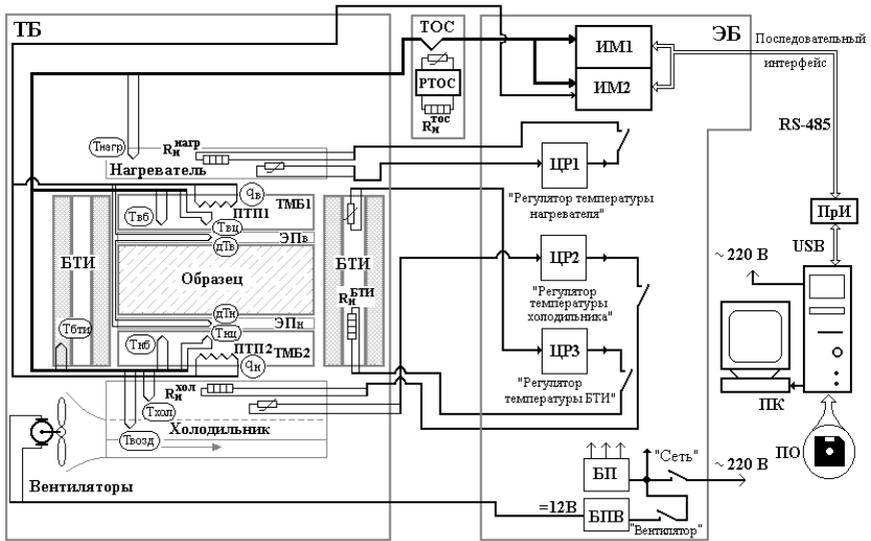
В качестве дополнительных средств измерения температуры в состав установки входит комплект прокладок, выполненных из высокоэластичного силикона в виде пластин толщиной 2 мм, в поверхность которых вмонтированы хромель-копелевые термопары ленточного типа, спай которых раскатан в ленточку толщиной 50 – 60 мкм [4.19]. Термопары в этом исполнении используют при исследовании твердых материалов для уменьшения влияния суммарного контактного сопротивления между рабочими поверхностями образца и теплотреническими блоками измерительной ячейки. Такая конструкция термопар позволяет обеспечить хороший контакт с поверхностью исследуемого образца. Термопары соединены по дифференциальной схеме.

Температуру опорных спаев термопар стабилизируют в термостате опорных спаев (ТОС). Он представляет собой настольную конструкцию, в корпусе которой установлен массивный металлический цилиндр из высокотеплопроводного материала с вертикальными цилиндрическими гнездами под термостатируемые опорные спаи термопар и под образцовый ртутный термометр для контроля температуры цилиндра. На боковой поверхности цилиндра размещен электрический нагреватель, а в теле – платиновый термометр сопротивления типа Pt1000 [1.6], которые являются элементами системы автоматического регулирования температуры ТОС. Стабилизация температуры на заданном уровне ( $50\pm 2$ ) °С осуществляется с помощью электронного регулятора, размещенного в корпусе ТОС.

Функциональная связь теплового блока и ТОС с электронным блоком согласно функционально-структурной схеме, приведенной на рисунке 5.18, осуществлена посредством соединительных кабелей, подключаемых к соответствующим разъемам на задней панели электронного блока.

Задание условий эксперимента и режимов работы установки, регулирование и контроль режимных параметров, а также получение первичной измерительной информации обеспечиваются работой ЭБ установки, выполненного в стандартном конструктиве настольного типа.

Программное обеспечение (ПО) установки ИТ-7С для ПК предназначено для приема информации от ЭБ во всех режимах работы, индикации значений измеряемых величин и визуального контроля наступления стационарного теплового режима; усреднения результатов измерений плотности теплового потока и температуры и расчет коэффициента теплопроводности исследуемого образца, а также записи данных для документирования в файл на диске. ПО функционирует в среде операционной системы Windows и поставляется в виде инсталляционного пакета на CD-диске.



**ТБ** – тепловой блок: ТМБ1, ТМБ2 – верхний и нижний теплотемрические блоки; ПТП1, ПТП2 – преобразователи теплового потока; БТИ – боковая теплоизоляция; ЭПв и ЭПн – верхняя и нижняя эластичные прокладки;  $R_{Н}^{нагр}$ ,  $R_{Н}^{хол}$ ,  $R_{Н}^{БТИ}$  – нагревательные элементы; Т – термопары; дТв, дТн – спаи дифференциальной термопары;

**ТОС** – термостат опорных спаев: РТОС – регулятор температуры опорных спаев;  $R_{Н}^{ТОС}$  – нагревательный элемент;

**ЭБ** – электронный блок: ИМ1, ИМ2 – измерительные микроконтроллерные устройства; ЦР1, ЦР2, ЦР3 – цифровые регуляторы температуры; БП – блок питания ЭБ; БПВ – блок питания вентиляторов;

**При** – преобразователь интерфейсов RS-485 в USB;

**ПК** – персональный компьютер; **ПО** – программное обеспечение

Рис.5.18. Функционально-структурная схема установки ИТ-7С

Расчетные формулы для вычисления коэффициента теплопроводности и эффективного теплового сопротивления образца имеют вид:

$$\chi_{ОБР} = h \cdot (2 \cdot (T_1 - T_2) / (q_1 + q_2) - R_K)^{-1} \quad (5.6)$$

$$R_{ОБР} = h/\chi_{ОБР} = 2 \cdot (T_1 - T_2)/(q_1 + q_2) - R_K \quad (5.7)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – значения температуры поверхностей образца;  $q_1$  и  $q_2$  – значения плотности теплового потока, измеренные преобразователями (ППП1 на входе и ППП2 на выходе из образца);  $h$  – толщина образца,  $R_K$  – контактное тепловое сопротивление, определяемое экспериментальным путем.

При аттестации установки ИТ-7С определяют индивидуальные статические функции преобразования обоих ППП  $K_i(T)$  ( $i = 1; 2$ ) в температурном диапазоне и контактное тепловое сопротивление  $R_K$ . Для определения функции  $K_i(T)$  использован метод двух измерений [4.32, 5.27] при постоянной разности температуры теплоотдающей поверхности верхнего и тепловоспринимающей поверхности нижнего ППП. Аттестацию установки проводят в диапазоне значений температуры от минус 25 до 135 °С, проходя его с шагом 10 – 20 К.

Определение контактного теплового сопротивления выполняют по результатам серии измерений сигналов обоих ППП, сведенных друг с другом. Для случая твердых материалов предусмотрено использование эластичных прокладок смонтированными на их поверхности ПТ ленточного типа, что при наличии дополнительной высокотеплопроводной смазки минимизирует значение  $R_K$  до порядка  $10^{-5}$ , которым можно пренебречь.

Определение метрологических характеристик (далее – МХ) первых образцов установки ИТ-7С (№ 1 и № 2) было выполнено методом сличения измеренного коэффициента теплопроводности рабочего эталона с его нормированным значением [5.28, 5.29]. Определение допускаемой основной относительной погрешности измерения и установление ее пределов выполнено при средней температуре 17°С с применением пяти различных рабочих эталонов теплопроводности, а именно: пенополистирола ПС-150, органического стекла

(ГОСТ 17622) и оптических стекол ЛК5 (ГОСТ 13659), КВ (ГОСТ 15130) и ТФ1 (ГОСТ 13659).

Определение температурной зависимости коэффициента преобразования ПТП выполнено в трех точках, соответствующих началу, середине и концу температурного диапазона с применением одного рабочего эталона – оптического стекла ЛК5, значение коэффициента теплопроводности которого лежит в середине динамического диапазона измерений установки. По результатам метрологической аттестации по стандартной методике [5.28] с применением рабочих эталонов установки ИТ-7С № 1 и № 2 допущены к применению для измерения коэффициента теплопроводности материалов в диапазоне от 0,02 до 1,5 Вт/(м·К) в интервале температуры от минус 40 до 140 °С с пределами допускаемой основной относительной погрешности измерения не более 6%, включая погрешность рабочих эталонов теплопроводности 3%.

Так как в настоящее время такой уровень погрешности не удовлетворяет современным требованиям, разработана и аттестована в УкрЦСМ Украины методика ПМА-081/24.408-2009 аттестации установок ИТ-7С косвенным методом с применением калибровочного нагревателя, которая позволяет достичь требуемой стандартами [4.20, 4.21] точности без использования рабочих эталонов теплопроводности. Согласно предложенной методике, определение МХ осуществляется методом косвенных измерений величин, присутствующих в формуле (5.6) [5.30]. При этом погрешности определения плотности среднего теплового потока оценивают экспериментально путем задания с помощью калибровочного нагревателя нормированных значений плотности теплового потока из диапазона возможных при измерениях: задаются последовательно десять тепловых режимов. Первые пять режимов проводят при температуре нагревателя, холодильника и боковой теплоизоляции на уровне средней температуры рабочего температурного диапазона (70 °С) путем задания пяти значений суммарного теплового потока из установленного диапа-

зона измерений. Последующие пять – при плотности теплового потока, соответствующей середине диапазона ее изменения, при этом температура нагревателя, холодильника и теплоизоляции должна соответствовать последовательно пяти точкам рабочего диапазона температуры.

Для каждого  $i$ -го режима частные значения относительной погрешности измерения плотности теплового потока определены по формуле:

$$\delta_{q,i} = \frac{(q_{1,i} - q_{2,i})}{q_{0,i}} \times 100, \%, \quad (5.8)$$

где  $q_{0,i}$  – заданная в  $i$ -м режиме плотность теплового потока с помощью электрического калибровочного нагревателя, равная  $U \cdot I / A_{К.Н}$ ,  $A_{К.Н}$  – площадь пластины калибровочного нагревателя.

Разброс значений погрешности измерения плотности теплового потока установки ИТ-7С №2 в диапазоне значений температуры от минус 25 до 135 °С не превысил  $\pm 1\%$ , что проиллюстрировано на рисунке 5.19.

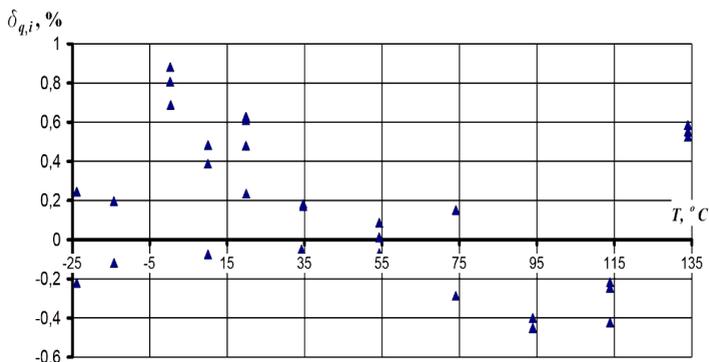


Рис. 5.19. Разброс погрешности измерения плотности теплового потока  $\delta_{q,i}$  установки ИТ-7С №2

Погрешность измерения разности температуры также оценена экспериментально сличением показаний термоэлектрических ПТ, размещенных в эластичных прокладках уста-

новки ИТ-7С, с показаниями ТХА, индивидуальная градуировка которых выполнена с абсолютной погрешностью 0,1 К. Относительная погрешность измерения разности температуры по результатам экспериментов на семи участках из диапазона рабочих значений температуры от минус 40 до 180 °С не превысила 1%.

Для определения контактного теплового сопротивления  $R_K$  проведена серия опытов при сведенных друг с другом верхнего и нижнего ПТП, по результатам которых вычислено значение контактного сопротивления, введенное в компьютерную программу расчета коэффициента теплопроводности в качестве поправки.

По новой методике [5.27] аттестованы последующие экземпляры установки ИТ-7С. При этом пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения коэффициента теплопроводности не превысили 3%. Основные технические характеристики установок ИТ-7С, эксплуатируемых в настоящее время в Украине, приведены в таблице 5.4.

С введением новых строительных норм на тепловую изоляцию [3.1] сопротивление теплопередаче ОК увеличено в 2 – 3 раза по сравнению с нормами, действовавшими ранее. Для достижения необходимого сопротивления теплопередаче ОК новых или термомодернизованных сооружений используют разнообразные теплоизоляционные материалы – минеральную вату, пеностекло, пенополистирол, пенополиуретан и другие. Технология изготовления теплоизоляционных материалов и их нанесения на ОК постоянно совершенствуется, на рынке строительных материалов Украины появляются новые производители и поставщики с разнообразными модификациями новых материалов. Среди поставщиков, к сожалению, встречаются фирмы, которые необоснованно декларируют высокое качество своего продукта, в том числе и с точки зрения теплозащитных свойств. Поэтому необходимо проводить разносторонние испытания материалов на этапе их внедрения и мониторинг качества во время их использования.

Таблица 5.4

Заводской номер, год выпуска, внедрение	№01 2004, НИИСК, г. Киев	№02 2004, ИГТФ, г. Киев	№03 2009, Укрметргест- стандарт, г. Киев	№04 2011, НИИСК, г. Киев	№05 2011, Будлаборатория, г. Николаев
Диапазон измерения коэффициента теплопроводности, Вт/(м·К)	0,02÷1,5				
Пределы допускаемой основной относительной погрешности, % – до модернизации – после модернизации	0,02÷3,0				
Диапазон значений рабочей температуры, °С	±6 ±3	±5 ±3		±3	
Время выхода на стационарный режим, час	-40...130	-30...150	-40...180	от 1 до 8,0 (в зависимости от толщины и теплопроводности образца)	
Размеры, мм: – образца – теплового блока – электронного блока – термостага опорных спаев	Ø300(300×300)×(10...120) 560×560×800 480×450×155 Ø120×250				
Масса установок, кг	не более 125				
Площадь размещения установки, кв. м	не менее 15				

На установке ИТ-7С, эксплуатируемой в ИТТФ, регулярно проводятся исследования теплопроводности широкого ассортимента теплоизоляционных материалов. К средствам измерения, которыми укомплектована установка ИТ-7С, относятся рабочий эталон теплопроводности (органическое стекло марки СОЛ); штангенциркуль электронный «Горех» с разрешающей способностью 0,01 мм для измерения толщины и прецизионная металлическая линейка – линейных габаритных размеров образцов; весы AXIS A500 с разрешающей способностью 0,01 г для измерения массы образцов до 500 г и весы Certus Balance 4 класса с разрешающей способностью 0,1 г для измерения массы образцов до 6 кг, а также морозильный ларь Gorenje FH9411W для проведения опытов при температуре ниже комнатной.

Измерения проводят минимум на трех образцах одного материала, обычно, в сухом состоянии при средних значениях температуры 10 °С и 25 °С, или во всем диапазоне рабочей температуры по заданию Заказчика. Перед началом испытаний выполняют контроль погрешности измерений установки с применением рабочего эталона теплопроводности.

При подготовке к испытаниям образцу исследуемого материала придают форму квадратной пластины. Твердые образцы шлифуют до придания рабочим поверхностям плоскопараллельной формы, а для мягких изготавливают дополнительную оснастку – дистанционеры или ограничительную рамку в случае сыпучих материалов. Перед размещением в измерительной ячейке образцы обмеряют и взвешивают для расчета их плотности.

Если толщину образца твердого материала измеряют перед размещением в измерительной ячейке, то толщину образца мягкого материала определяют после размещения в деформированном состоянии под нормированной нагрузкой. Для этого измеряют глубину погружения нутромерной планки электронного штангенциркуля в четыре специальные отверстия, расположенные в углах верхнего теплотемпературного

блока ТБ, и рассчитывают толщину образца как разность среднего значения измеренных глубин и базового размера, определенного заранее для каждой установки и указанного в ее Руководстве по эксплуатации. В случае применения дистанционеров измеряют штангенциркулем их высоту.

Толщина образца сыпучего материала обусловлена размерами технологической оснастки (например, рамки), поэтому штангенциркулем измеряют толщину (высоту) примененной оснастки. В каждом случае измерение толщины проводят не менее, чем в четырех точках и рассчитывают ее среднее значение.

Подготовленный к испытаниям образец исследуемого материала устанавливают на нижний теплотметрический блок (ТМБ2). В случае испытаний твердых образцов с нешлифуемыми поверхностями между нижним теплотметрическим блоком и образцом устанавливают первую ленточную термопару в эластичных прокладках, ориентируя ее спаем термопары в сторону образца, а на верхнюю поверхность образца устанавливают вторую эластичную прокладку также спаем в сторону образца, что показано на рисунке 5.20. При этом для улучшения теплового контакта спаев термопар с образцом наносят высокотеплопроводную смазку на место спая.

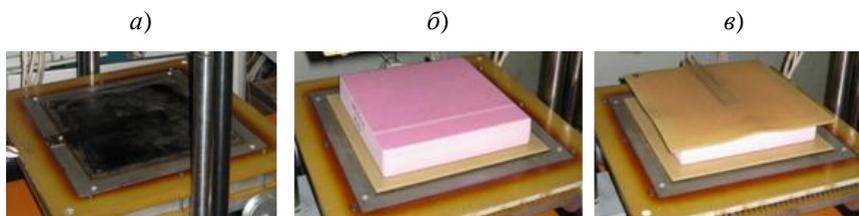


Рис. 5.20. Этапы размещения образца в измерительной ячейке установки:

- а)* измерительная ячейка открыта;
- б)* установлены нижняя эластичная прокладка с термопарой и образец;
- в)* установлена верхняя эластичная прокладка с термопарой

После размещения образца в ячейке рычагом прижимного устройства задают усилие прижатия в соответствии с

требованиями документации на исследуемый материал, контролируя по шкале, которой снабжено устройство, или устанавливая дополнительную нагрузку на верхний нагревательный блок с помощью гирь. Если нормативными документами не указано другое, для твердых образцов рекомендуется задавать усилие  $(1,0 \pm 0,1)$  кН. Для сыпучих и мягких волокнистых материалов, для которых значение давления при испытаниях регламентировано нормативными документами, необходимо вычислить нагрузку на поверхность и установить на нагревательный блок необходимое количество гирь с учетом массы самого блока, которая составляет приблизительно 15 кг.

Обычно давление устанавливают в пределах от 0,5 до 2,5 кПа. Если исследуемый материал необходимо испытать под давлением, меньшим того, что создает вес верхнего нагревательного блока, то перед установкой образца в ячейку определяют его толщину при требуемой нагрузке, изготавливают дистанционеры соответствующего размера и устанавливают образец в ячейку с этими дистанционерами. При испытаниях образцов с использованием дистанционеров нагрузку задают или весом верхнего нагревательного блока, или с помощью прижимного устройства так, чтобы толщина образца между поверхностями теплотметрических блоков определялась дистанционерами.

Результаты экспериментального определения плотности и коэффициента теплопроводности представляют таблично и графически в протоколе измерений. Согласно рекомендациям приложения Л ДБН В.2.6-31 [3.1], значение коэффициента теплопроводности определяют как среднее значение для исследованных образцов с учетом абсолютной погрешности измерений по формуле:

$$\bar{\chi}_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \chi_{T,i} + \Delta, \quad (5.9)$$

где  $\bar{\chi}_T$  – среднее значение коэффициента теплопроводности при значении температуры  $T$ ;  $\chi_{T,i}$  – значение коэффициента

теплопроводности  $i$ -того образца при температуре  $T$ ;  $N$  – количество образцов;  $\Delta$  – абсолютная погрешность измерения.

Из твердых теплоизоляторов на установке ИТ-7С исследованы образцы пенополистирола [5.31], пенополиуретана [5.32, 5.33], пенофола [5.34] и ISOVER [5.35], а также образцы сыпучих материалов, текстильных материалов и тканей [4.34].

Исследования пенополиуретанов проведены как на образцах, специально изготовленных для этих испытаний, так и на образцах, изъятых из кровель домов, где они эксплуатировались несколько лет. При механической обработке образцов поверхностные плотные прослойки были сняты, образцы выполнены в форме дисков диаметром  $(300 \pm 25)$  мм и толщиной  $(50 \pm 5)$  мм и при разных условиях эксперимента в диапазоне значений средней температуры от минус 20 до 35 °С, а три образца – при средней температуре 60 °С.

По результатам измерений на образцах в сухом состоянии, увлажненных и искусственно состаренных вакуумированием, определен коэффициент теплопроводности ППУ «ELASTOPOR Н», значение которого не превышало 0,030 Вт/(м·К) при температуре 25 °С, что соответствует данным, декларируемым фирмой-производителем, и значительно меньше значения 0,040 Вт/(м·К), установленного нормативными документами для изделий из жесткого пенополиуретана с кажущейся плотностью 40 кг/м<sup>3</sup>.

Следует отметить, что некоторые производители теплоизоляционных материалов приписывают им необоснованные значения коэффициента теплопроводности, вероятно, в рекламных целях. Так, например, на установке ИТ-7С №02 были исследованы образцы **пенополистирольных** плит марок «Zwykly», «Platinum» и «Gold» производства Польши плотностью 13 – 14 кг/м<sup>3</sup>, с заявленным производителем коэффициентом теплопроводности 0,040 Вт/(м·К). По результатам проведенных измерений коэффициент теплопроводности образцов марки «Platinum» составляет 0,0345 Вт/(м·К) при темпе-

ратуре 25°C, что меньше заявленного значения, а значения коэффициента теплопроводности образцов марок «Zwikly» и «Gold» превышали его.

**Пенофол** [5.34] – пенофольгированный материал на основе вспененного полиэтилена, одна сторона которого закрыта полированной алюминиевой фольгой, а другая покрыта клеевой защитной пленкой. Используется для утепления различных элементов ОК внутри помещений зданий всех типов при строительстве и реконструкции. Самоклеющийся пенофол используют также для утепления и шумоизоляции металлических поверхностей: воздуховодов, трубопроводов, емкостей, технологического оборудования, а также салонов автомобилей и фургон.

Исследования теплопроводности выполнены на образцах самоклеющегося пенофола размером  $(300 \times 300 \times 20) \pm 2$  мм при средней плотности образцов в сухом состоянии  $40,34 \text{ кг/м}^3$ . Эксперимент проведен в температурном диапазоне от минус 20 до 55 °C в два этапа: непосредственное измерение коэффициента теплопроводности собственно образцов и эффективной теплопроводности образцов с имитацией рабочих условий эксплуатации путем организации со стороны отражающей (фольгированной) поверхности воздушного зазора в 20 мм с помощью соответствующих дистанционеров. Результаты исследований представлены на рисунке 5.21.

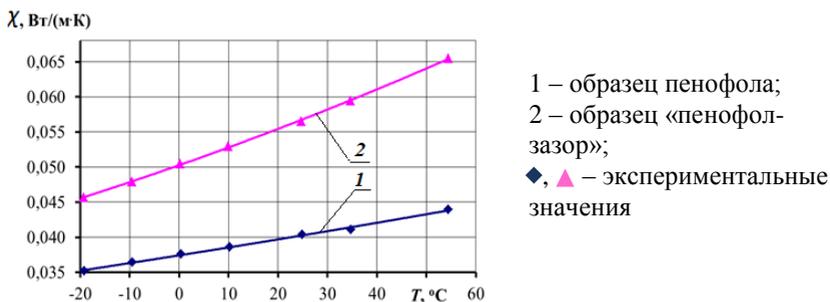


Рис. 5.21. Температурная зависимость эффективной теплопроводности образцов пенофола

Концерн "Сен-Гобен" производит и поставляет тепло- и звукоизоляцию под брендом **ISOVER** (Изовер) с 1937 г. и считается основоположником мировой теплоизоляционной отрасли. ISOVER – теплоизоляционный материал из минеральной ваты на основе стекловолокна, изготавливаемый из натурального сырья – песка, соды и известняка, а также из переработанного стекла [5.35]. Продукция ISOVER, поставляемая в плитах и рулонах, используется в строительстве для изоляции наружных стен, чердаков, кровель, полов и вентиляционных каналов, а также для звукоизоляции внутренних перегородок; в промышленности для теплоизоляции труб разного диаметра при высокой температуре на теплотрассах, нефтебазах, в котельных, терминалах, вентиляционных и дымовых каналах и прочее; на транспорте (автомобили, железнодорожные цистерны и вагоны, речные и морские суда).

На установке ИТ-7С (№02) проведены исследования эффективной теплопроводности образцов теплоизоляционных материалов ISOVER с размером в плане  $(300 \times 300) \pm 5$  мм. Учитывая, что образцы изготовлены из мягких материалов и имеют низкую прочность на сжатие, их толщину задавали с помощью специально изготовленных дистанционеров равной 50 мм. Подготовка к измерениям заключалась в выдерживании образцов в лабораторных условиях в течение недели для стабилизации влажности. Результаты проведенных измерений коэффициента теплопроводности при значениях средней температуры образца 10 и 25 °С, систематизированные в таблице 5.5, показали хорошую сходимость со справочными данными [5.35].

При исследовании **сыпучих материалов** для уменьшения влияния на погрешность измерений наличия воздуха, который занимает некоторый объем образца и изменяет свои свойства от температуры, была изготовлена специальная оснастка – рамка с подпружиненными стенками, помещенная в измерительную ячейку. Исследуемый материал насыпают в

Таблица 5.5. Результаты исследований теплоизоляторов ISOVER

Название материала ISOVER	Коэффициент теплопроводности, $\chi$ , Вт/(м·К)				Средняя плотность образца в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>
	$\chi_{10}$ ( $T = 10$ °С)		$\chi_{25}$ ( $T = 25$ °С)		
	ИТ-7С №2	Справ. [5.35]	ИТ-7С №2	Справ. [5.35]	
«Master standart»	0,0373	0,042	0,0412	0,045	11,7
Каркас М40	0,0371	0,040	0,0405	0,043	11,4
Каркас П34	0,0312	0,034	0,0346	0,037	20,0
Скатная кровля	0,0357	0,037	0,0389	0,040	13,1
«Special», плита	0,0345	0,037	0,0375	0,039	14,4
«Special», мат	0,0367	0,037	0,0402	0,040	12,3

рамку с небольшим излишком (с «горкой») и устанавливают верхний нагревательный блок. При этом сыпучий материал равномерно распределяется по объему рамки, что обеспечивает хороший тепловой контакт с поверхностями теплотехнических блоков. На рисунке 5.22 приведены результаты испытаний образцов гранулированного пенополистирола (шарики диаметром 3 – 4 мм) в диапазоне средней температуры 25 – 75 °С и цеолита СТЮ-10 – опытного материала (композиция окислов кремния, алюминия, кальция, калия, натрия и магния в смеси с азотнокислым кобальтом) для высокотемпературной изоляции в сухом состоянии в диапазоне температуры 20 – 160 °С.

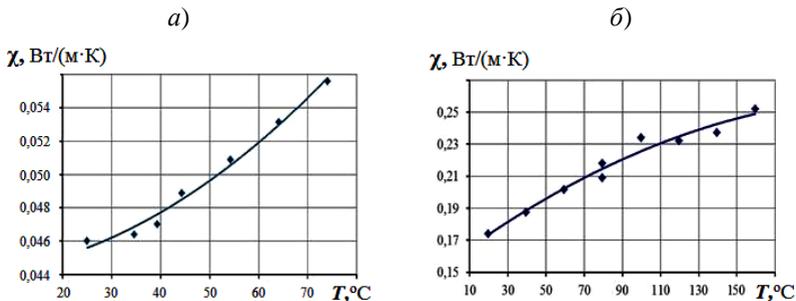
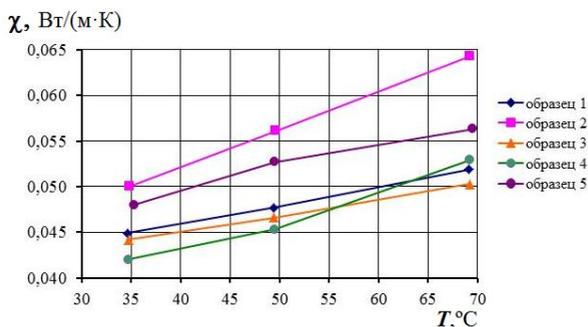


Рис. 5.22. Температурная зависимость теплопроводности гранулированного пенополистирола (а) и цеолита (б)

Основной особенностью **текстильных материалов и тканей** является их малая толщина. Для исследования тонких материалов (тканей или пленок) на установке ИТ-7С разработана специальная методика измерений, согласно которой образец выполняют в виде пакета из определенного количества слоев ткани (то есть многослойного образца толщиной не менее 10 мм) и определяют его толщину под давлением 5 кПа согласно методике, регламентированной в [5.36]. Готовый пакет помещают в ячейку, дистанционерами обеспечивая предварительно заданную толщину. По результатам измерений вычисляют тепловое сопротивление и коэффициент эффективной теплопроводности пакета, а с учетом количества слоев определяют искомую величину для одного слоя исследуемого материала. На рисунке 5.23 представлены результаты исследования многослойных образцов, изготовленных сочетанием различных текстильных материалов и тканей.



- 1 –ткань для палаток + ватин хлопковый холстопршивный (2 слоя) + бязь хлопковая;
- 2 –ткань термостойкая «Пировитекс» + ткань болонья + ватин войлокопршивный + бязь хлопковая;
- 3 –ткань диагональ + ватин полушерстяной непрошивный (2 слоя) + бязь хлопковая;
- 4 –ткань плащевая + ватин полушерстяной прошивный (3 слоя) + бязь хлопковая;
- 5 – сукно серошинельное (12 слоев)

Рис. 5.23. Температурная зависимость эффективной теплопроводности многослойных образцов комбинированных текстильных материалов

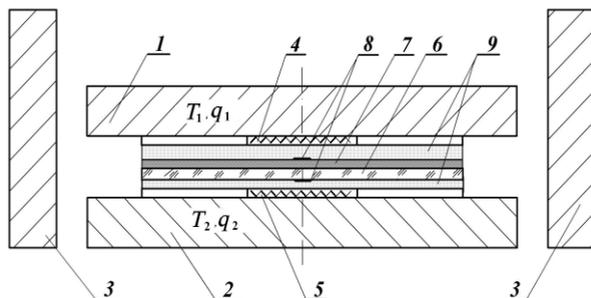
Особое место среди современных теплоизоляторов занимают материалы, применяемые в виде тонкого слоя, наносимого на конструкционный материал при его производстве, либо непосредственно на готовое изделие или конструкцию. Наиболее распространены два вида таких материалов: так называемые «теплоизоляционные» краски и мастики на основе акриловой смолы и керамических связующих, содержащие полые керамические или стеклянные микросферы, и стекла с энергоэффективными покрытиями для светопрозрачных конструкций.

«Теплоизоляционные» краски и мастики, как правило, наносят слоем толщиной 1 – 2 мм, который после высыхания образует твердое или относительно эластичное покрытие. Для оценки теплозащитных свойств таких материалов в разных условиях эксплуатации необходимы данные о коэффициенте теплопроводности. К сожалению, многие зарубежные и отечественные фирмы-производители указанных красок в рекламных целях используют не объективные значения, а, например, некий «эффективный» или «эквивалентный» коэффициент теплопроводности, либо значение показателя «R-value», определяемые в специально придуманных экспериментах, условия проведения которых существенно отличаются от реальных условий теплообмена при эксплуатации теплоизолированных тонкими покрытиями конструкций, хотя методы расчета теплообмена, необходимой теплоизоляции и теплотеря хорошо известны [5.37, 5.38], а для некоторых технических объектов нормированы соответствующими стандартами [5.39 – 5.40].

Для исследования в установке ИТ-7С теплопроводности тонких покрытий из «теплоизоляционных» красок и мастик [5.41] изготавливают подложку для образца из жесткого листового диэлектрического материала, например, из ровного листового стекла толщиной 3 – 4 мм с размерами в плане 300×300 мм и измеряют ее тепловое сопротивление на установке ИТ-7С по стандартной методике. Затем на подложку

наносят равномерный слой исследуемой краски толщиной 1 – 2 мм, соблюдая технологию нанесения, и выдерживают образец необходимое время до полного высыхания краски. Штангенциркулем измеряют толщину подготовленного образца и вычисляют толщину покрытия как разность значений толщины окрашенного образца и подложки.

Окрашенный образец помещают в измерительную ячейку, как показано на рисунке 5.24, причем в центре рабочих поверхностей образца размещают спаи ленточной дифференциальной термопары 8.



1 – нагреватель; 2 – холодильник; 3 – боковая теплоизоляция; 4 – верхний ПТП; 5 – нижний ПТП; 6 – стеклянная подложка; 7 – исследуемое покрытие; 8 – спаи ленточной дифференциальной термопары; 9 – слой поролона

Рис. 5.24. Схема размещения образца в измерительной ячейке установки ИТ-7С при исследованиях теплопроводности тонкого покрытия

Между рабочими поверхностями образца и соответствующим ПТП располагают слой мягкого пористого материала 9 – поролона, который обеспечивает прижатие спаев термопар к поверхности образца и нивелирует возможные микронеровности поверхности покрытия.

В тепловом блоке установки ИТ-7С задают такие значения температуры нагревателя и холодильника, чтобы перепад температуры лицевых граней исследуемого образца составлял 5 – 7 К, а средняя температура образца соответствовала необходимой температуре измерения.

После установления стационарного теплового режима регистрируют значения разности температуры  $\Delta T$ , плотности теплового потока через образец  $q_1$  и  $q_2$  и вычисляют значение коэффициента теплопроводности исследуемого покрытия по формуле:

$$\chi_{\text{пок}} = h_{\text{пок}} \cdot (\Delta T / q_{\text{CP}} - R_{\text{CT}})^{-1}, \quad (5.10)$$

где  $h_{\text{пок}}$  – толщина слоя покрытия;  $q_{\text{CP}} = 0,5(q_1 + q_2)$ ;  $R_{\text{CT}} = h_{\text{CT}} / \chi_{\text{CT}}$  – тепловое сопротивление стеклянной подложки.

По данной методике на установке ИТ-7С проведены экспериментальные исследования теплопроводности нескольких типов красок и мастик. Полученные значения для исследованных покрытий лежат в диапазоне от 0,05 до 0,13 Вт/(м·К), то есть соответствуют теплопроводности обычных теплоизоляционных материалов и не противоречат расчетным данным для пористой акриловой смолы. Однако, возможности установки ИТ-7С не ограничиваются только лишь измерением коэффициента теплопроводности. Эта установка позволяет также измерять и терморadiационные характеристики: степень излучения, поглощательную способность поверхностей покрытий (см. главу 6).

### **5.2.3 Универсальный прибор ИТ-7У для исследования теплофизических характеристик и тепловых эффектов**

Хотя установка ИТ-7С, представленная в 5.2.2, позволяет проводить измерения ТФХ образцов сыпучих материалов или калориметрический анализ в реальном времени образцов, в которых протекает процесс, сопровождающийся тепловыделением или теплопоглощением, но при таких измерениях не учитывается специфика исследуемых материалов.

Во-первых, в образцах, например, сыпучего материала, из-за попадания в него воздуха на этапе подготовки к испытаниям, возможно ухудшение или даже нарушение надежного

теплового контакта между частичками образца, приводящее к увеличению погрешности измерения на вторые и третьи сутки испытаний. Во-вторых, на погрешность измерения ТФХ таких образцов также влияет фактор изменения ТФХ воздуха из-за изменения температуры в течение опыта.

Для исключения таких причин уменьшения точности измерения ТФХ сыпучих материалов или материалов, которые при испытании могут поглощать или выделять теплоту, на базе теплового блока установки ИТ-7С разработан универсальный прибор (ИТ-7У), внешний вид которого представлен на рисунке 5.25 [4.32].



- 1 – тепловой блок;
- 2 – электронный блок;
- 3 – компьютер с ПО

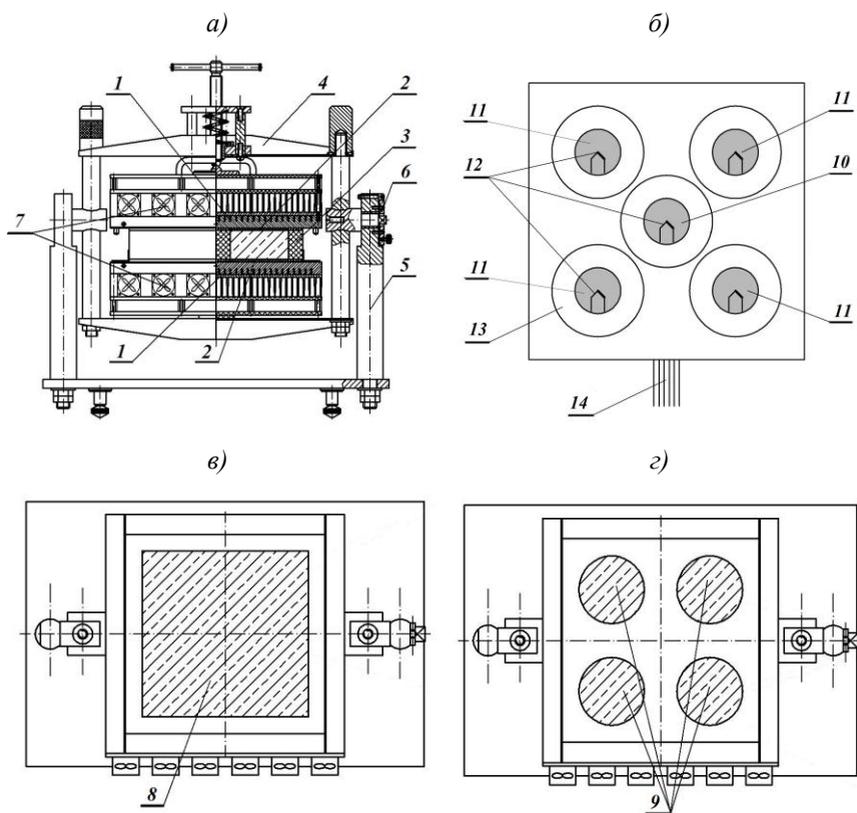
Рис. 5.25. Внешний вид универсального прибора ИТ-7У (на базе ИТ-7С)

Тепловой блок 1 универсального прибора содержит два блока термостатирования, в которых размещены теплотрические пластины с вмонтированными дополнительными ПТП и ПТ, а между ними устанавливают теплоизоляционную вкладку с ячейками для образцов исследуемого материала.

Блоки термостатирования оснащены поворотным устройством, позволяющим поворачивать их вместе с теплотрическими пластинами и размещенным(-и) между ними образцом(-ами) исследуемого материала на  $90^\circ$ . Это дает возможность добиться однородности исследуемого образца в средней части, например, за счет выжимания в верхнюю часть измерительных ячеек воздуха, попавшего в образец сыпучего материала или образец бетонной смеси в процессе подготовки. Это обеспечивает необходимую точность измерения теплового потока и температуры в течение всего процесса испытания без увеличения погрешности на вторые и

третьи сутки. Новизна разработанного прибора для определения ТФХ материалов и тепловых эффектов подтверждена патентом Украины 99061 UA [5.42].

На рисунке 5.26 приведены схемы конструкции теплового блока (а) и схемы теплотметрической пластины (б) измерительных блоков и вкладышей (в, г) универсального прибора.



1 – блоки термостатирования; 2 – теплотметрические пластины; 3 – вкладыш; 4 – прижимное устройство; 5 – стойки; 6 – фиксатор; 7 – вентиляторы; 8, 9 – исследуемые образцы; 10, 11 – центральный и угловые ПТП; 12 – ПТ; 13 – охранные зоны ПТП; 14 – выводы ПТП и ПТ

Рис. 5.26. Схемы теплового блока универсального прибора ИТ-7У

Основными элементами теплового блока являются верхний и нижний блоки термостатирования 1, идентичные по конструкции и состоящие из электронагревателя и радиатора в виде набора плит с профильным оребрением. Отведение теплоты выполняется конвективно за счет обдува воздухом с помощью вентиляторов 7, установленных в общем корпусе. Блоки термостатирования 1 оснащены теплометрическими пластинами 2, каждая из которых размером в плане 300×300 мм, содержит пять ПТП Ø100 мм с вмонтированными ПТ (см. рис. 5.26, б). Температура опорных спаев термопар стабилизируется в термостате опорных спаев, размещенном в электронном блоке.

Между пластинами 2 устанавливается теплоизоляционный вкладыш 3, предназначенный для размещения в нем исследуемых образцов. Вкладыш, изготовленный из теплоизоляционного материала для исключения влияния внешних факторов на тепловое поле образцов, по форме и размерам повторяет теплометрические пластины 2 и содержит одно квадратное отверстие 250×250 мм или четыре круглых отверстия Ø 100 мм (см. рис. 5.26 в, г).

В собранном состоянии между верхним и нижним блоками термостатирования образуются четыре (или одна) измерительные ячейки, предназначенные для размещения образцов исследуемого материала и обеспечения необходимых тепловых и температурных режимов. Использование четырех измерительных ячеек позволяет проводить синхронный сравнительный анализ исходной смеси и смеси с тремя различными примесями. Проведение исследования конечного состава бетона, то есть бетонной смеси с твердыми наполнителями (гравием и песком), осуществляют в одной измерительной ячейке высотой 100 – 120 мм, чтобы испытуемый образец был репрезентативным.

Блоки термостатирования 1 с установленным между ними вкладышем 3 с исследуемыми образцами размещены в прижимном устройстве 4. Оно представляет собой рамную

конструкцию на направляющих стойках 5 и предназначено для фиксации образцов и минимизации контактного сопротивления между их поверхностями и теплотрическими пластинами в измерительных ячейках. Усилие задается с помощью винтового механизма с силовой пружиной. Конструкцию поворачивают на  $90^\circ$  и устанавливают в рабочее вертикальное положение (см. рис. 5.25), закрепляя фиксатором 6.

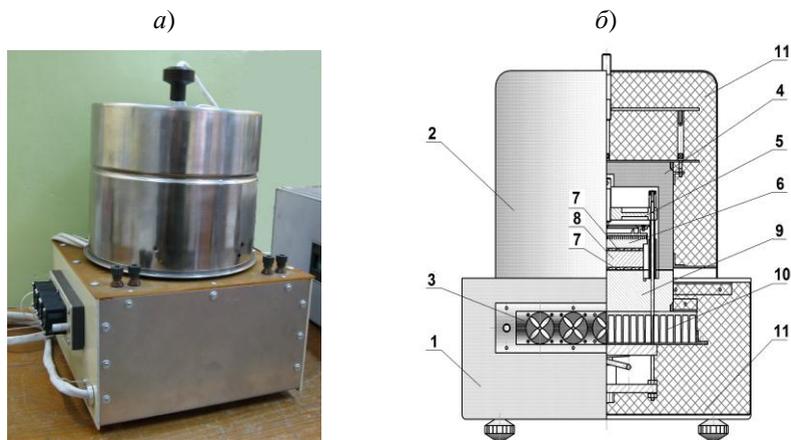
Проведение исследований процесса гидратации бетонов на данном приборе начинают с изготовления бетонной смеси исследуемого состава в количестве на 10% больше необходимого. При одновременном исследовании четырех видов материала, изготовление и заливка всех образцов в ячейки теплоизоляционного вкладыша 3 должна занимать не более 10 минут, после чего выполняют виброуплотнение всех образцов в ячейках поочередно в последовательности их изготовления.

Теплоизоляционный вкладыш с образцами в ячейках накрывают верхним блоком термостатирования и зажимают всю конструкцию прижимным устройством. Снимают фиксатор, поворачивают всю конструкцию на  $90^\circ$  в рабочее положение, после чего ее опять зажимают фиксатором. При температурных режимах исследований, близких к комнатным, теплоотвод активизируют с помощью вентиляторов. Измерения при температуре ниже комнатной проводят при размещении теплового блока в климатической камере или холодильном ларе. Климатическую камеру включают и выводят на режим, при котором температура воздуха в камере на 15 – 20 К ниже необходимой средней температуры образца.

Кроме сравнительного анализа нескольких вариантов образцов исследуемого материала на новом приборе были исследованы коэффициенты теплопроводности сыпучих пищевых материалов [4.32, 4.35]. Проведение испытания одновременно на четырех образцах с использованием всех ячеек позволяет значительно сократить время эксперимента и получить репрезентативные данные по ТФХ исследуемых материалов.

### 5.2.4 Прибор ИТ-7-60 для исследования теплопроводности на малогабаритных образцах

На установке ИТ-7С получен большой объем информации о теплопроводности теплоизоляционных материалов. Однако, помимо строительных теплоизоляционных материалов, из которых опытный образец выполняется согласно стандартам [4.20, 4.21] больших размеров, часто возникает потребность в измерении коэффициента теплопроводности таких материалов, из которых нецелесообразно или затруднительно изготавливать крупногабаритные образцы. Для таких случаев в ИТТФ разработан прибор модели ИТ-7-60, представленный рисунком 5.27, предназначенный для измерения коэффициента теплопроводности и теплового сопротивления широкой гаммы веществ и материалов: твердых, жидких и сыпучих – на плоских образцах диаметром 60 мм и высотой от 2 до 12 мм.



1 – корпус; 2 – кожух; 3 – блок вентиляторов; 4 – экран активный; 5 – прижимное устройство; 6 – нагреватель; 7 – теплотметрические пластины; 8 – образец; 9 – теллосток; 10 – радиатор; 11 – теплоизоляция

Рис. 5.27. Внешний вид (а) и конструкция теплового блока (б) прибора ИТ-7-60

Прибор ИТ-7-60 выполнен с использованием конструктивных решений, реализованных в тепловом блоке установки ИТ-7С. Основные технические характеристики прибора приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6

Технические характеристики	Размерность	Числовое значение
Диапазон измерения коэффициента теплопроводности	Вт/(м·К)	0,03 – 3,0
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений	%	±3
Диапазон средней температуры образца	°С	– 40 – 170
Продолжительность измерения при одном фиксированном значении средней температуры образца	час	1
Продолжительность измерения во всем температурном диапазоне	час	10
Габаритные размеры – образца – прибора	мм	Ø60×(2 – 12) 390×390×440
Масса прибора	кг	7

Существенный вклад в разработку и создание установки ИТ-7 и её модификаций внесли Л.В. Декуша, З.А. Бутова [2.26, 4.32].

### 5.3 Теплотрическая установка ВКУ-2 для определения комплекса теплофизических характеристик

Описанный в 4.3 теплотрический дифференциально-мостовой метод определения коэффициента теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности в течение одного опыта в широком температурном диапазоне реализован в вакуумно-криогенной установке ВКУ-2 внешний вид которой представлен на рисунке 5.28 [4\*, 5.44].

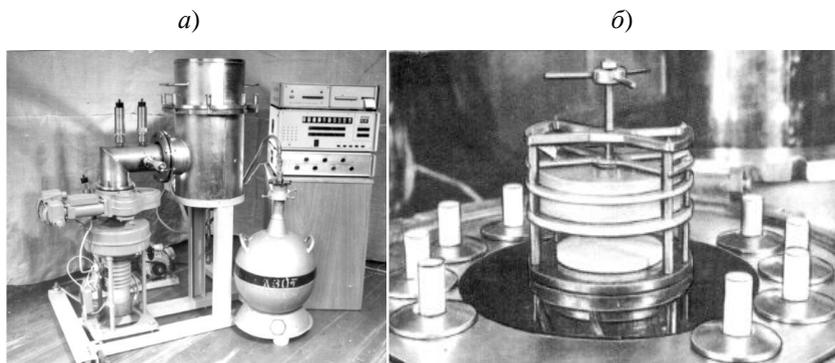


Рис. 5.28. Внешний вид установки ВКУ-2 (а) и теплотрической ячейки, установленной в рабочей камере (б)

Установка ВКУ-2 [5.44] предназначена для исследования ТФХ твердых неметаллических материалов на плоских образцах с габаритными размерами  $\varnothing(70\pm 0,5)\times(5 - 15)$  мм в широком температурном диапазоне. В состав установки входят рабочая камера, системы вакуумирования и захлаживания до температуры жидкого азота, устройство подпитки хладагентом и пульт управления. Блок-схема установки приведена на рисунке 5.29.

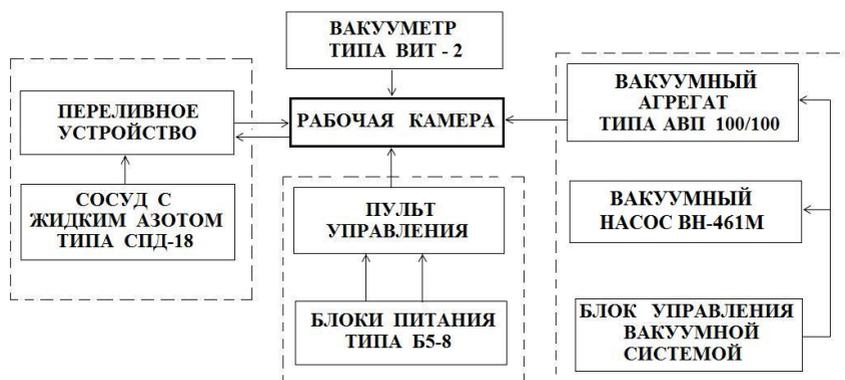
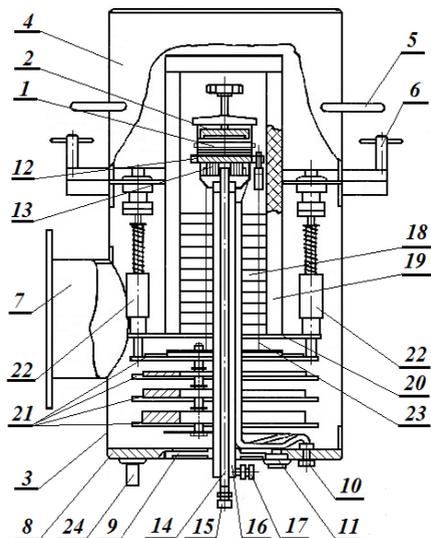


Рис. 5.29. Блок-схема установки ВКУ-2

Рабочая камера предназначена для размещения в ней образца исследуемого материала, устанавливаемого предварительно внутри теплотметрической ячейки, а также для обеспечения требуемых параметров режима измерений и условий эксперимента. Схема конструкции рабочей камеры приведена на рисунке 5.30.



1 – образец; 2 – теплотметрическая ячейка; 3 – корпус рабочей камеры; 4 – крышка корпуса; 5 – рукоятки; 6 – болты; 7 – патрубок для соединения с системой вакуумирования; 8 – основание корпуса; 9 – охранный нагреватель; 10 – разъемы подключения элементов ячейки 2 (нагревателей, ПТП и термопар) и блока термостатирования 24 к пульту управления; 11 – разъем силовой цепи охранный нагревателя; 12 – теплосток; 13 – камера хладагента; 14, 15 – трубопровод и штуцер для подвода хладагента; 16, 17 – трубопровод и штуцер для эвакуации паров хладагента; 18 – экраны; 19 – теплозащитный колпак; 20 – опорное кольцо; 21 – гири; 22 – держатели гирь; 23 – стальная струна; 24 – блок термостатирования опорных спаев термопар

Рис. 5.30. Схема конструкции рабочей камеры установки ВКУ-2

Корпус рабочей камеры 3 представляет собой металлическую вакуумплотную конструкцию цилиндрической формы, на боковой поверхности которой имеется патрубок 7 для соединения камеры с системой вакуумирования. К основанию корпуса с внешней стороны крепится охранный нагреватель 9, предназначенный для защиты от обмерзания при работе с жидким азотом. Мощность питания нагревателя регулируется таким образом, что температура основания рабочей камеры поддерживается на уровне  $(10 \pm 5)$  °С.

В основании 8 в заготовленных отверстиях закреплены на герметичных прокладках блок 24 термостатирования опорных спаев термопар и стойка, на которой смонтированы два разъема 10.

Внутри корпуса рабочей камеры размещена теплотметрическая ячейка 2, снабженная теплостокком 12 в виде медного диска, контактирующего с камерой хладагента (жидкого азота) 13, с которой теплосток 12 герметично спаян. Камера хладагента 13 – это полость, в которую по трубопроводу 14 через штуцер 15 подводится хладагент для захлаживания теплостока, образца и элементов теплотметрической ячейки. Образующиеся пары хладагента эвакуируются по трубопроводу 16, к которому посредством штуцера 17 подсоединяется линия отвода паров азота из помещения.

По длине трубопровода 16 установлены экраны 18, служащие для подавления конвекции при работе с газовой средой внутри рабочей камеры. Для уменьшения радиационных теплопритоков к теплотметрической ячейке она накрывается теплозащитным колпаком 19, устанавливаемым на опорное кольцо 20. Колпак выполнен в виде двустенного перфорированного стакана, между стенками которого вложена экранно-вакуумная изоляция марки ЭВТИ-7.

Теплотметрическая ячейка, реализованная по схеме, приведенной на рис. 4.34, предназначенная для размещения образца исследуемого материала, состоит из элементов, обеспечивающих требуемый тепловой режим и измерение необ-

ходимых величин (плотности теплового потока и температуры). Ячейка содержит, согласно изложенному в 4.3, два нагревателя (верхний и нижний), четыре ПТП и, кроме упомянутых в 4.3 восьми медь-копелевых термопар, еще две термопары для контроля разности температуры на гранях собранного термостолбика, которая не должна превышать 10 К.

Каждый ПТП выполнен в виде тонкого диска диаметром 80 мм из эпоксидного компаунда с равномерно распределенными в нем гальваническими копель-медными термоэлементами. Зона ПТП с размерами 28×28 мм, расположенная в центре, является теплочувствительной, а остальное поле играет роль охранной зоны.

В рабочем состоянии исследуемый образец находится между двумя идентичными теплотрическими блоками, каждый из которых состоит из последовательно склеенных между собой нагревателя, двух ПТП и пяти термопар. При этом нижний блок припаян к теплостоку, а верхний крепится к механизму фиксации и прижима образца. Посредством механизма прижима образец сжимают: нормированная минимальная нагрузка составляет  $1,516 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$ , а последующие нагрузки за счет подключения нагрузочных гирь составляют  $2,9555 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$  (при 1 гире),  $5,962 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$  (при 2-х гирях),  $8,8025 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$  (при 3-х гирях) и максимальная нагрузка (при 4-х гирях) –  $11,72 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$ .

Совместной работой обоих нагревателей теплотрической ячейки задается одномерный тепловой поток через образец и требуемый температурный уровень при фиксированной разности температуры его поверхностей. Регулирование мощности нагревателей производится с помощью функциональных регуляторов, входящих в систему управления. Определение ТФХ осуществляется в автоматизированном квазистационарном режиме разогрева образца, при этом обеспечивается постоянная скорость изменения температуры образца.

Определение ТФХ с автоматическим сбором всех измеряемых величин выполняется на стадии квазистационарного

теплового режима, при этом обработка измерительной информации выполняется в вычислительном блоке по формулам (4.128), (4.131) и (4.132) с отображением значений искомым характеристикам на цифровом табло с возможностью вывода информации на цифрорпечатающее устройство.

Основные технические характеристики установки ВКУ-2 приведены в таблице 5.7.

Таблица 5.7

Технические характеристики	Размерность	Числовые значения
Диапазон измерения коэффициента теплопроводности	Вт/(м·К)	0,01 – 1,999
Диапазон измерения объемной теплоемкости	Дж/(м <sup>3</sup> ·К)	10 <sup>5</sup> – 2·10 <sup>6</sup>
Диапазон рабочей температуры	°С	-170 – 100
Пределы погрешности определения: – коэффициента теплопроводности – объемной теплоемкости	%	±10 ±5
Диапазон задания удельной нагрузки на образец	Н/м <sup>2</sup>	4·10 <sup>2</sup> – 2,6·10 <sup>4</sup>
Скорость нагрева образца	К/мин	1; 2
Потребляемая мощность, не более	В·А	1000
Габаритные размеры: – рабочей камеры – пульта управления – исследуемого образца	мм	Ø460×670 480×480×200 Ø(70±0,5)×(5 – 15)
Масса: – установки – рабочей камеры – пульта управления	кг	500 40 10
Площадь помещения под установку	м <sup>2</sup>	20

Экспериментальный образец установки модели ВКУ-2 прошел аттестацию как нестандартизированное рабочее средство измерения комплекса ТФХ неметаллических теплоизоляционных и композиционных материалов.

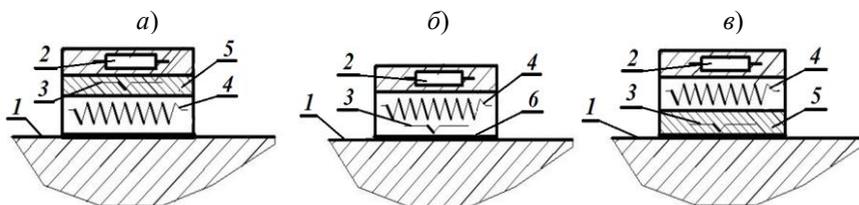
#### 5.4 Зондовые теплотрические приборы для экспресс-измерений коэффициента теплопроводности (модели ИТ-8, ИТ-8М)

При теоретических исследованиях метода (см. 4.2) зонд локального теплового воздействия рассматривался как тонкий диск, расположенный на поверхности образца – полубесконечного массива. При практической реализации метода зонд представляет собой термостолбик, состоящий из трех обязательных элементов: источника теплоты, преобразователя температуры ПТ и теплового потока ПТП.

При разработке зондовых теплотрических приборов [4.39, 5.45] в качестве источника теплоты использован электронагреватель, выполненный в виде тонкого диска (толщина порядка 2 мм) диаметром 20 мм, изготовленный из константановой проволоки, уложенной в плоскости и залитой термостойким компаундом. В качестве ПТ применена хромель-алюмелевая термопара стандартной градуировки [1.5], применяемая для получения измерительной информации, необходимой для определения среднеинтегрального значения температуры по площади пятна теплового воздействия. Измерителем поверхностной плотности потока теплового воздействия от электронагревателя в исследуемый образец через пятно контакта взят стандартный термоэлектрический многоэлементный ПТП по ДСТУ 3756 [1.4].

Электронагреватель, ПТ и ПТП неразъемно смонтированы в термостолбик. При этом возможно три варианта расположения ПТ и ПТП друг относительно друга, что проиллюстрировано на рисунке 5.31.

При исполнении зонда по схеме *a* ПТП 4 находится в непосредственном контакте с поверхностью 1 образца. Это способствует высокой точности измерения плотности теплового потока и практически исключает теплотери боковой поверхностью зонда.



1 – поверхность исследуемого образца; 2 – электронагреватель; 3 – ПТ (термопара); 4 – ПТП; 5 – температуровыравнивающая пластина; 6 – приповерхностный слой компаунда ПТП

Рис. 5.31. Конструкции теплотрического зонда с расположением ПТ над ПТП (а), и под ПТП (б и в)

Посредством тонкой металлической пластинки 5, в которую вмонтирован спай термопары 3, выравнивается температурное поле, что позволяет измерять среднеинтегральное значение температуры поверхности зонда. Этот зонд оптимален для измерения теплопроводности с коэффициентом  $\chi \leq 0,2$  Вт/(м·К). Однако, при значениях  $\chi > 0,2$  Вт/(м·К) суммарное тепловое сопротивление между спаем термопары и образцом  $R_{\Sigma} = R_{ПТП} + R_K$  существенно снижает точность измерения температуры поверхности образца и искомого коэффициента теплопроводности. Кроме того, зонд в таком исполнении имеет низкую устойчивость поверхности зонда к механическому разрушению из-за шероховатостей поверхности образца. В связи с этим предпринято исполнение зонда с расположением термопары 3 под ПТП 4 (см. схемы б и в). На схеме б ПТП и ПТ совмещены в одном элементе. Это способствовало тому, что термостолбик состоял только из двух конструктивных элементов: электронагревателя 2 и ПТП 4 с вмонтированным спаем термопары 3 в электроизоляционный слой 6 под батареей термоэлементов по центру приповерхностного компаундного слоя ПТП.

В таком исполнении ПТ находится в контакте с поверхностью образца, за счет чего увеличивается точность опреде-

ления температуры поверхности образца в зоне пятна теплового воздействия. Однако, при этом остается низкая устойчивость зонда к механическому воздействию шероховатостей поверхности исследуемого материала. Кроме того, измеренным является локальное значение температуры, что приводит к увеличению методической погрешности измерения коэффициента теплопроводности.

Более технологичным является исполнение зонда по схеме *в*), предполагающей изготовление термостолбика из трех конструктивных элементов, неразъемно последовательно соединенных между собой. К достоинству такого зонда относится то, что измеряется среднеинтегральное значение температуры. Однако, ему присущ такой недостаток, как наличие теплообмена боковой поверхности температуровыравнивающей пластины с ОС, что снижает точность измерения. Однако, этот фактор при измерении на образцах материала с  $\chi > 0,2$  Вт/(м·К) влияния теплообмена свободной от зонда поверхности образца с ОС незначительно. Поэтому зонд по схеме *в* целесообразно применять для измерений на образцах с  $\chi > 0,2$  Вт/(м·К), но для уменьшения теплообмена по боковой поверхности пластинки 5 она должно быть как можно тоньше. Для исследования твердых гомогенных материалов, для которых  $\chi$  значительно больше 0,2 Вт/(м·К), зонд целесообразно выполнять с профилированной температуровыравнивающей пластинкой с уменьшенной площадью поверхности контакта с образцом.

С использованием описанных зондов разработаны теплометрические зондовые приборы с учетом диапазона измерения коэффициента теплопроводности до 0,2 Вт/(м·К) или более 0,2 Вт/(м·К). Однако, при их применении проявляются такие недостатки, как теплообмен свободной от зонда поверхности образца с ОС и контактное тепловое сопротивление, но они могут быть учтены при градуировании готового прибора.

Наиболее совершенными являются зондовые приборы, выполненные по дифференциальной схеме (см. рис. 4.30), но с выносными термопарами. При их конструировании учтены результаты аналитического исследования влияющих факторов (см.4.2.2). На рисунке 5.32 приведена схема зондового теплотметрического прибора, реализующего дифференциальную схему.



- 1 – образец исследуемого материала;
- 2 – основной зонд;
- 3 – зонд-референт;
- 4, 5 – спаи дифференциальной термопары;
- 6 – клейкая лента

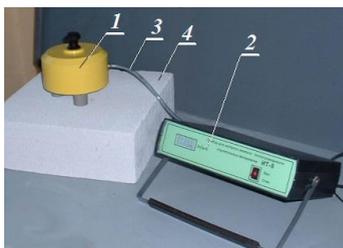
Рис. 5.32. Принципиальная схема зондового теплотметрического прибора ИТ-8

Прибор состоит из двух дифференциально включенных зондов. Один из них является основным, с помощью которого производят локальное тепловое воздействие, а другой является элементом сравнения. Каждый из зондов (2 и 3) снабжен выносным спаем (4 и 5) дифференциальной термопары, уложенной таким образом, как показано на рис. 5.32, и прикрепленной к поверхности образца клейкой лентой 6.

Термостолбик каждого зонда состоит из двух конструктивных элементов: источника теплоты и ПТП, причем при необходимости они могут быть снабжены с внешней стороны защитной металлической пластинкой для усиления механической прочности и выравнивания температуры в пятне контакта с образцами.

Зондовый теплотметрический прибор модели ИТ-8, выполненный по дифференциальной схеме показан на рисунке 5.33. Он является малогабаритным, переносным и предназначен для проведения технических экспресс-измерений коэф-

фициента теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов в производственных условиях.



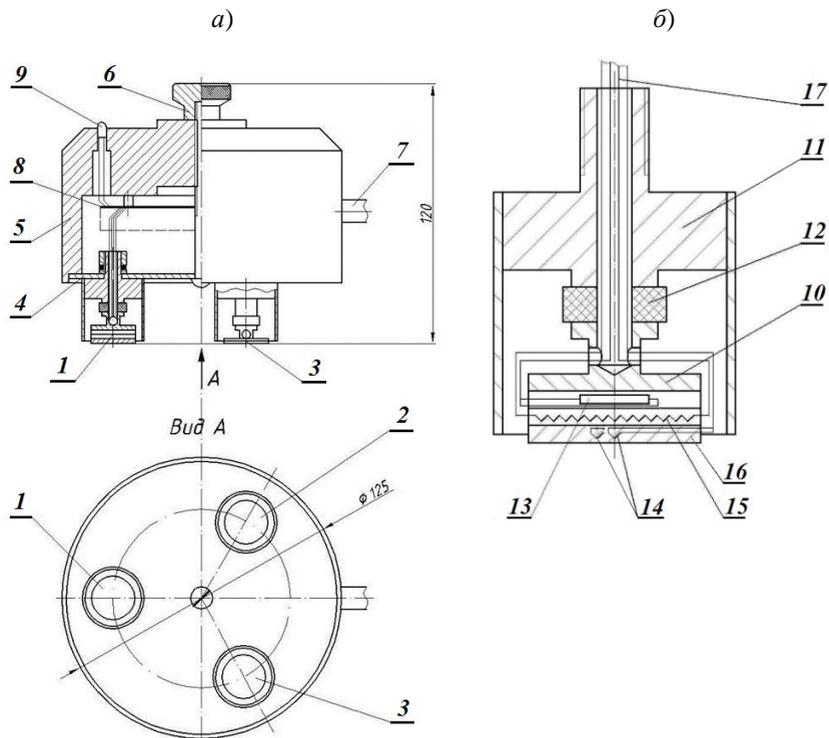
- 1 – тепловой блок;
- 2 – электронный блок;
- 3 – кабель связи;
- 4 – исследуемый образец

Рис. 5.33 – Внешний вид зондового прибора модели ИТ-8

Тепловой блок 1 (ТБ) представляет собой настольную малогабаритную конструкцию цилиндрической формы. Основными элементами являются три зонда, совмещенные конструктивно с ножками-опорами ТБ, прикрепленными к основанию корпуса, снабженного рукояткой для удобства переноса ТБ и переустановки его с одного участка поверхности контролируемого объекта на другой. В боковой поверхности корпуса предусмотрено отверстие, через которое выходит кабель связи 3 с электронным блоком 2 (ЭБ), а на верхней поверхности – отверстие для светового индикатора, свидетельствующего о рабочем режиме прибора.

На рисунке 5.34 приведена схема конструкции теплового блока и теплотрического зонда. Зонд 1 является основным (рабочим) зондом прибора, посредством которого задается локальное тепловое воздействие на поверхность образца. Зонд 2 является референтом, а зонд 3 служит для измерения температуры отнесения, при которой определяется коэффициент теплопроводности.

Основной зонд 1 и зонд-референт 2 выполнены идентичными, их схема конструкции приведена на рис. 5.34, б. Центральным узлом является теплотрическая головка, приклеенная к держателю 10, соединенному с корпусом 11 зонда посредством гибкого шарнира 12. Теплотрические головки зондов 1 и 2 являются идентичными и содержат электрический нагреватель 13, две хромель-алюмелевые термопары 14



1 – зонд рабочий; 2 – зонд-референт; 3 – зонд-измеритель температуры отнесения; 4 – основание; 5 – корпус ТБ; 6 – рукоятка; 7 – кабель связи с ЭБ; 8 – плата ЭБ; 9 – светодиод; 10 – держатель теплотметрической головки; 11 – корпус зонда; 12 – гибкий шарнир; 13 – нагреватель; 14 – термопары; 15 – ПТП; 16 – температуровыравнивающая пластинка; 17 – кабель зонда

Рис. 5.34. Схемы конструкции теплового блока (а) и зондов (б)

(ТХА), преобразователь ПТП 15 и температуровыравнивающую пластинку 16, в которую вмонтированы спай ТХА 14. При этом спай, вмонтированные в пластинку 16 основного зонда 1, являются рабочими, а зонда-референта 2 – опорными. Показания одной из этих дифференциальных ТХА 14 используют для регулирования подаваемой на нагреватель 13

электрической мощности, а показания другой ТХА – для измерения разности значений температуры в центре пятна теплового воздействия и на периферии, то есть избыточной температуры  $\vartheta(0;1)$ .

В качестве измерителя плотности потока теплового воздействия на образец применен дискообразный ПТП 15 диаметром 20 мм, выполненный на базе медь-константановой гальванической термобатареи высотой 1,2 мм, залитой термостойким компаундом. Толщина гальванического покрытия согласно методике конструирования многоэлементных гальванических ПТП [2.16] взята такой, чтобы обеспечить постоянную в диапазоне температуры от комнатных значений до 100 °С функцию преобразования ПТП.

Теплометрическая головка зонда 3 содержит только одну дифференциальную ТХА для измерения температуры отнесения получаемых результатов измерения. Кабель 17 из силовых проводов нагревателя 13 и сигнальных выводов ТХА и ПТП каждого зонда. Они выведены в общую полость корпуса 5 ТБ, где объединены в единый кабель связи 7 с ЭБ. В полости также смонтирована плата с такими элементами ЭБ, как регулятор температуры и мостовая схема устройства компенсации температуры опорного спая ТХА зонда 3, измеряющей температуру отнесения получаемых результатов. Задание и поддержание необходимого режима локального теплового воздействия и обработка сигналов первичных преобразователей ТХА и ПТП осуществляются с помощью электронных узлов, размещенных частично в тепловом блоке (поз. 8 на рис. 5.34) и в ЭБ.

При конструировании прибора ИТ-8, исходя из рекомендаций, сформулированных ранее по результатам аналитического исследования влияющих факторов (см. 4.2.2), рабочий зонд и зонд-референт разнесены на расстояние не менее пяти радиусов пятна контакта с поверхностью образца. Нагреватель и ПТП выполнены с одинаковыми диаметрами, соответствующими радиусу пятна теплового воздействия.

Пятно теплового воздействия радиусом 10 мм позволяет исследовать пористые материалы с диаметром пор и сыпучие материалы с диаметром частиц до 3 мм. Выбранный размер пятна теплового воздействия обеспечивает корректное измерение коэффициента теплопроводности в диапазоне значений от 0,02 до 1,5 Вт/(м·К).

Нестабильность теплообмена при выполнении измерений в производственных условиях на поверхности образца, влияние которого обязательно надо исключить при исследовании материалов с  $\chi > 0,1$  Вт/(м·К), обеспечивается посредством специального экрана с малой степенью черноты.

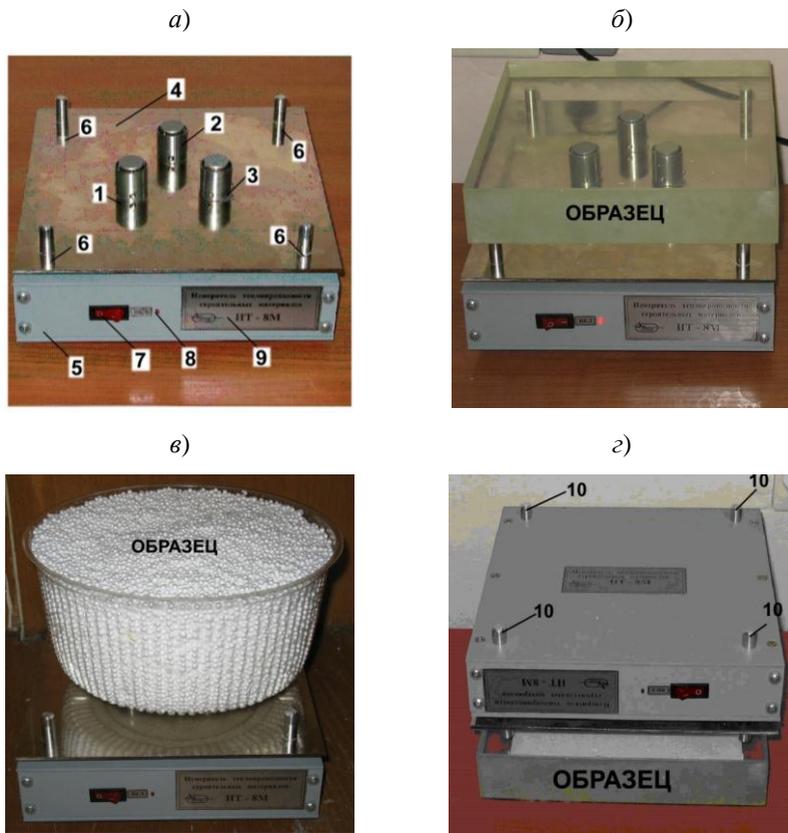
ЭБ состоит из трехканального входного устройства, индикатора микроконтроллерного устройства и вторичного источника питания. На лицевой панели расположены цифровое табло для индикации результатов измерения и тумблер включения – выключения прибора.

При выполнении измерений коэффициента теплопроводности прибором ИТ-8 в установившемся тепловом режиме регистрируют не менее 10 текущих показаний цифрового табло ЭБ, повторяя записи через 20 – 30 с. С целью повышения достоверности результатов наблюдений и определения искомого коэффициента теплопроводности, усредненного по всей контролируемой поверхности образца, производят не менее трех переустановок ТБ в новую точку поверхности, повторяя там полный регламент измерений.

Прибор усовершенствованной модели **ИТ-8М** укомплектован персональным компьютером (ПК), что позволило автоматизировать процессы измерения сигналов ТХА и ПТП, их обработку и документирование. Текущие значения коэффициента теплопроводности и температуры отнесения отображаются в компьютерной программе «ИТ-8М» и могут быть сохранены, что уменьшает влияние субъективного фактора при проведении испытаний и ручной обработке показаний.

В приборе ИТ-8М, представленном на рисунке 5.35, использованы зонды в принципе такие же, как и в приборе ИТ-

8, однако конструкция прибора в целом существенно изменена. Основное изменение состоит в том, что ТБ и ЭБ размещены в общем корпусе 5. Кроме того, в прибор добавлен отражающий экран 4 со степенью черноты, равной 0,04 для уменьшения влияния радиационной составляющей теплообмена с ОС.



1, 2 – зонд рабочий и референт; 3 – зонд-измеритель температуры; 4 – отражающий экран; 5 – корпус; 6 – дистанционеры; 7 – выключатель; 8 – светодиод; 9 – пластинка с названием прибора; 10 – ножки прибора

Рис. 5.35. Внешний вид прибора ИТ-8М (а) и варианты взаимного положения прибора и исследуемого образца: под образцом твердым (б), сыпучим (в) и на образце (г)

На этой же поверхности закреплены три измерительных зонда (1, 2, 3), на которые устанавливают образец в виде пластины или кювету с сыпучими материалом (см. рис. 5.35, б и в), а также четыре одинаковой высоты дистанционера 6, обеспечивающие устойчивое положение образца.

На передней панели корпуса 5 расположены тумблер 7 включения-выключения прибора и светодиод 8, а на задней панели – разъем для подключения блока питания и порт для связи с ПК. Силовые провода от нагревателя и сигнальные выводы ТХА и ПТП выходят из корпуса каждого зонда внутрь полости корпуса 5 прибора.

Регулятор температуры по-прежнему предназначен для обеспечения требуемого теплового воздействия путем поддержания заданной разности температуры основного зонда и зонда-референта, который находится на расстоянии, соответствующем невозмущенной поверхности образца.

При работе с прибором ИТ-8М стабильность теплообмена свободной поверхности образца с ОС обеспечена посредством специального отражающего экрана 4 и размещением прибора снизу образца (см. рис. 5.35, з). Положение прибора под образцом позволяет получать коэффициент эффективной теплопроводности сыпучих материалов (см. рис. 5.35, в) в состоянии свободной (естественной) засыпки. Положение прибора под образцом используют при исследовании пористых, волокнистых и других мягких материалов, которые нежелательно подвергать усилию сжатия от массы прибора. Положение прибора сверху целесообразно при исследовании габаритных готовых изделий, а также образцов, имеющих большую массу.

Для уменьшения контактного теплового сопротивления, которое существенно при измерении теплопроводности с коэффициентом  $\chi > 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , используют теплопроводные смазки (кремнийорганический каучук, технический вазелин и

др.), наносимые на рабочие поверхности зондов. Однако, в случае пористых материалов смазывание не практикуют.

В приборах ИТ-8 и ИТ-8М искомым коэффициент теплопроводности является функцией отношения измеренных значений плотности теплового потока и избыточной температуры:

$$\chi_{OBR} = f(\Delta q / \Delta T), \quad (5.11)$$

где  $\Delta q = K_{1-2} \cdot \Delta E_q$  и  $\Delta T = \Delta E_T / S_{1-2}$ , где  $K_{1-2}$  и  $\Delta E_q$  – коэффициент преобразования дифференциально включенных ПТП зондов 1 и 2 и их разностный сигнал;  $S_{1-2}$  и  $\Delta E_T$  – чувствительность дифференциальной термопары ТХА и ее сигнал.

Поскольку определение  $K_{1-2}$  и  $S_{1-2}$  путем индивидуальной аттестации ПТП и ТХА приводит к дополнительным погрешностям измерения коэффициента теплопроводности, целесообразно аттестацию каждого прибора проводить по образцам, изготовленным из материалов, зарегистрированных в качестве рабочих эталонов единицы теплопроводности [5.28, 5.29] или с хорошо изученной теплопроводностью [5.8]. При этом материалы для контрольных образцов отбираются с учетом рабочего диапазона измерения коэффициента теплопроводности от 0,02 до 1,5 Вт/(м·К).

Таковыми материалами являются органическое (полиметилметакрилат) и оптические стекла для обеспечения поддиапазона 0,2 – 1,4 Вт/(м·К). Для значений  $\chi < 0,2$  Вт/м·К берутся низкотеплопроводные материалы, например, пенополиуретан, пенополистирол и пенопласт, которые предварительно аттестуются в качестве контрольных образцов на метрологически аттестованной установке ИТ-7С, пределы погрешности которой составляют  $\pm 3\%$  [5.30].

По результатам измерений коэффициента теплопроводности контрольных образцов с помощью компьютерного математического обеспечения для каждого аттестуемого

прибора в качестве градуировочной характеристики определяют функцию вида:

$$f(\bar{E}) = (a + b \cdot \bar{E}^2 + c \cdot \bar{E}^4) / (1 + d \cdot \bar{E}^2 + e \cdot \bar{E}^4), \quad (5.12)$$

где  $\bar{E} = \Delta \bar{E}_q / \Delta \bar{E}_T$  – отношение усредненных значений  $\Delta \bar{E}_q$  и  $\Delta \bar{E}_T$  полученных на аттестуемом приборе в 10 опытах;

$a, b, c, d, e$  – аппроксимационные коэффициенты.

Основные технические характеристики зондовых приборов ИТ-8 и ИТ-8М приведены в таблице 5.8.

Таблица 5.8

Техническая характеристика	Размерность	ИТ-8	ИТ-8М
Диапазон измерения коэффициента теплопроводности	Вт/(м·К)	0,03 – 1,5	0,02 – 1,5
Пределы допускаемой основной относительности погрешности измерения	%	±8	±5
Продолжительность измерения в одной точке поверхности	мин	20	20
Диапазон температуры эксплуатации	°С	25±5	
Потребляемая электрическая мощность	В·А	500	
Параметры электрического тока питания: – напряжение – частота	В Гц	220±22 50±0,5	
Габаритные размеры – теплового блока – электронного блока	мм	Ø125×120 275×225×95	260×260×125 –
Масса прибора	кг	5	4

Существенный вклад в создание и разработку приборов ИТ-8 и ИТ-8М внес Декуша О.Л. [4.43].

### **5.5 Экспериментальная установка ИТС-3 для измерения теплового сопротивления теплопередаче стеклопакетов**

Одна из важнейших характеристик стеклопакета – его тепловое сопротивление теплопередаче. Этот параметр экспериментально определяют по стандартным методикам [1.10 – 1.12], как правило, с использованием универсальной климатической камеры, позволяющей испытывать и другие виды строительных конструкций. Такие камеры энергоемки, крупногабаритны и оснащены дорогим и сложным холодильным и другими видами оборудования. Поэтому они рентабельны лишь при эксплуатации в крупных центрах, специализирующихся на испытаниях и сертификации разнообразных строительных изделий и конструкций. Кроме того, испытание стеклопакета в климатической камере довольно длительно и дорого. Поэтому предприятия-изготовители стеклопакетов обычно производят контроль их сопротивления теплопередаче только лишь при первичной сертификации продукции, а затем – при периодических испытаниях один раз в два года.

Сопротивление теплопередаче стеклопакета зависит не только от конструкции, но и от качества выполнения основных технологических операций при его изготовлении: нанесения энергоэффективных покрытий на стекла, герметизации и заполнения сухим газом с малым коэффициентом теплопроводности. Поэтому контроль сопротивления теплопередаче может быть использован как интегральный способ контроля качества всего технологического процесса производства стеклопакетов. Такой подход к контролю качества вызвал необходимость создания для предприятий-изготовителей стеклопакетов специализированной установки, которая бы обеспечивала условия испытаний, нормированные межгосударственными стандартами [1.11, 1.12, 5.39, 5.40], занимала относительно небольшую площадь и обслуживалась одним

оператором, с механизированными и автоматизированными процессами подготовки и измерений. Именно такой является экспериментальная измерительно-испытательная установка ИТС-3 [5.46, 5.47].

Метод определения сопротивления теплопередаче стеклопакетов, являющихся ОК, который реализован в установке ИТС-3, соответствует требованиям нормативного документа [1.13] и заключается в создании перепада температуры по обеим сторонам стеклопакета и измерении температуры поверхностей его определенных зон и воздуха, а также плотности теплового потока через него в стационарном режиме и вычислении значений теплового сопротивления и сопротивления теплопередаче. Для измерения плотности теплового потока и температуры применены термоэлектрические преобразователи, ПТП и ПТ, устанавливаемые в зонах образца, однородных по тепловому сопротивлению: центральной и краевых (верхней, нижней и боковых).

Для расчета теплового сопротивления самого стеклопакета и сопротивления теплопередаче через него в стандарте ДСТУ Б.В.2.6–101 [1.14] регламентированы следующие формулы алгоритма вычислений:

– для теплового сопротивления ОК

$$R_{OK} = (T_{П.1} - T_{П.2})/q, \quad (5.13)$$

где  $R_{OK}$  – тепловое сопротивление ОК (или зоны ОК),  $T_{П.1}$  и  $T_{П.2}$  – температура поверхностей ОК (1 – теплой; 2 – холодной),  $q$  – плотность теплового потока через ОК. При известной теплопроводности стеклопакета и его толщины оно равно  $R_{OK} = (h/\chi)$ ;

– для суммарного сопротивления теплопередаче однослойной термично однородной ОК (или зоны ОК):

$$R_{OK\Sigma} = (T_{OC.1} - T_{OC.2})/q, \quad (5.14)$$

где  $T_{OC.1}$  и  $T_{OC.2}$  – значение температуры воздуха ОС вблизи тепловой и холодной стенок. При известных значениях коэф-

фициента конвективного теплообмена по обе стороны ОК ( $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ) вблизи ее поверхностей оно равно

$$R_{OK,\Sigma} = 1/\alpha_1 + R_{OK} + 1/\alpha_2 ; \quad (5.15)$$

– для теплового сопротивления многослойной однородной ОК, содержащей  $J$  слоев:

$$R_{OK.MC} = \sum_{j=1}^J R_{OKj} , \quad (5.16)$$

которое при известных значениях теплопроводности слоев  $\chi_j$

и толщине  $h_j$  равно  $R_{OK.MC} = \sum_{j=1}^J h_j/\chi_j$  ;

– для приведенного теплового сопротивления термично неоднородной однослойной ОК, состоящей из  $N$  типов термично однородных зон, с площадью  $n$ -ой зоны  $A_n$ :

$$R_{IP,OK} = \sum_{n=1}^N A_n / \sum_{n=1}^N (A_n/R_{OK.n}) , \quad (5.17)$$

– для приведенного суммарного сопротивления теплопередаче через ОК:

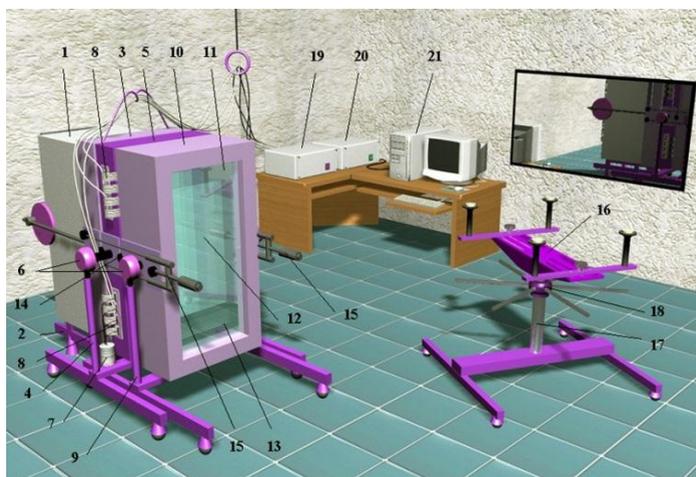
$$R_{IP.OK\Sigma} = 1/\alpha_1 + R_{IP,OK} + 1/\alpha_2 , \quad (5.18)$$

где  $R_{IP,OK}$  – по формуле (5.17).

Установка, представленная на рисунке 5.36, состоит из малогабаритной передвижной климатической камеры, блока электронных регуляторов 19 (БЭР), информационно-измерительного устройства 20 (ИИУ), ПК 21 и сервисного стола 16 (СС) [5\*].

Малогабаритная передвижная климатическая камера служит для создания требуемых климатических условий по обе стороны от испытываемого стеклопакета и составлена из трех последовательно стыкуемых модулей холодного отсека (МХО), держателя исследуемого стеклопакета (МДС) и теплого отсека (МТО), при этом:

**МХО**, выполненный на базе морозильной камеры 1 фирмы Whirlpool, предназначен для задания температуры и



1 – морозильная камера; 2 – подставка холодного отсека; 3 – рамка; 4 – стойка МДС; 5 – рама; 6 – замки-защелки; 7 – тепловой блок УТОС; 8 – разъемы; 9 – стойка теплого отсека; 10 – рама теплого отсека; 11 – стеклопакет задней стенки теплого отсека; 12 – экран из стеклопакета, установленный в теплом отсеке; 13 – нагреватель; 14 – стыковочный замок; 15 – тяги; 16 – СС; 17 – механизм подъема СС; 18 – поворотное устройство; 19 – БЭР; 20 – ИИУ; 21 – ПК

Рис. 5.36. Внешний вид и состав установки для тепловых испытаний стеклопакетов модели ИТС-3

условий теплообмена, соответствующих зимним погодным условиям. Морозильная камера жестко закреплена на подставке 2, выполненной с позволяющими ее перемещать колесиками и опорными винтами для жесткого фиксирования на полу в требуемом месте рабочего помещения. Дверь морозильной камеры заменена деревянной рамкой 3, плотно присоединенной по периметру проема камеры. Внутри рамки закреплён стеклопакет так, чтобы снизу и сверху от него образовались циркуляционные каналы, через которые при испытаниях с помощью вентилятора осуществляется обдув холодным воздухом обращенной к морозильной камере поверхности испытываемого стеклопакета, установленного в МДС. В каналах размещены специальные жалюзи для снижения гид-

равлического сопротивления на повороте воздушного потока. Кроме того, предусмотрено регулирование скорости обдува с помощью специального электронного регулятора, что позволяет организовать теплообмен на холодной поверхности испытываемого стеклопакета с требуемым нормативным значением коэффициента теплообмена при сравнительно равномерном тепловом поле вдоль поверхности по высоте стеклопакета.

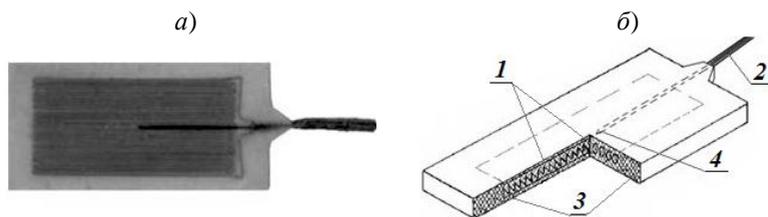
**МДС** представляет собой сварную передвижную конструкцию в виде стойки 4 с деревянной рамой 5, в которую устанавливают испытываемый стеклопакет. С наружной стороны деревянной рамы закреплен тепловой блок устройства термостатирования опорных спаев термопар (УТОС) традиционной конструкции с медным ядром, выполненным с вертикальными гнездами: по центру – под образцовый ртутный термометр, а по периферии – под термостатируемые опорные спаи термопар. Температура УТОС поддерживается электронным регулятором на уровне  $(50 \pm 0,1) ^\circ\text{C}$ . Стойка снабжена механическими замками-защелками 6 для обеспечения возможности поворота рамы со стеклопакетом из вертикального положения в горизонтальное. В горизонтальном положении стеклопакета, помещенного на сервисный стол 16, на его поверхностях размещают измерительные преобразователи (ПТП и ПТ), после чего посредством подъемного механизма 17 и поворотного устройства 18 сервисного стола подготовленный стеклопакет переводят в вертикальное положение и собранный узел плотно пристыковывают к МХО.

**МТО**, предназначенный для задания температурно-влажностных условий, соответствующих отапливаемому помещению, выполнен также в виде передвижной стойки 9, на которой жестко закреплена деревянная прямоугольная рама 10. Одна из стенок рамы выполнена из двухкамерного стеклопакета 11 с энергоэффективным покрытием стекол, который предназначен для теплоизоляции внутреннего объема теплового отсека. В среднем сечении по вертикали теплового от-

сека установлен экран 12 из однокамерного стеклопакета. Вокруг экрана происходит свободная циркуляция воздуха, нагретого посредством электронагревателя 13, размещенного между экраном и задней стенкой рамы. С его помощью обеспечивается требуемая температура воздуха. Влажность воздуха контролируется стандартным измерителем влажности модели ИВТМ-7МК.

В качестве ПТ для измерения и контроля температуры различных элементов установки применены термопары типа ТХК, выполненные из аттестованной термоэлектродной проволоки. Всего в установке размещено 14 термопар: по семь термопар в МХО и МТО, при этом термопары ТХК2, ТХК3 и ТХК4 служат для измерения температуры воздуха вблизи холодной поверхности стеклопакета ( $T_{OC,2}$ ), а ТХК8, ТХК9, ТХК10 – его теплой поверхности ( $T_{OC,1}$ ). Остальные термопары применяют для текущего и периодического контроля температуры воздуха в холодильнике, поверхности охлаждающих трубок морозильного агрегата, поверхности установленного в МТО экрана и воздуха в отделении МТО.

В качестве измерителей теплового потока применены 13 идентичных термоэлектрических ПТП модели ПТП-1Б.11.2.11.П.00.1.13.12 [1.4; 1.5] с габаритными размерами 40×80×2 мм. Внешний вид ПТП и схема его конструкции показаны на рисунке 5.37.



1 – термобатарея; 2 – выводы; 3 – охранный зона; 4 – встроенный ПТ (ТХК)

Рис. 5.37 – Внешний вид (а) и схема конструкции (б) преобразователя теплового потока модели ПТП-1Б.11.2.11.П.00.1.13.12

Схемы размещения ПТП на поверхностях испытываемого стеклопакета показаны на рисунке 5.38.

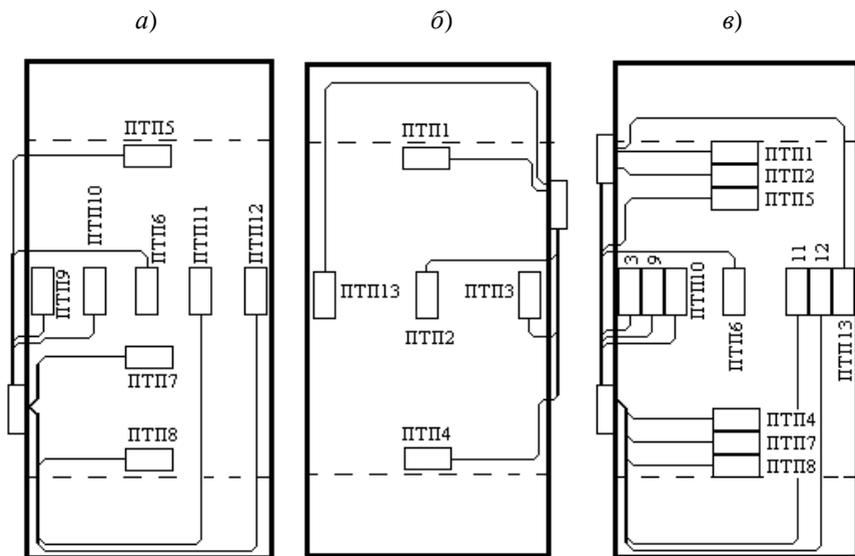


Рис. 5.38. Схемы размещения ПТП на теплой (а) и холодной (б) сторонах испытываемого стеклопакета и на теплой стороне при контроле краевых зон (в)

Выводы всех измерительных преобразователей сформированы в жгуты с разъемами на концах. Связь с информационно-измерительным устройством (ИИУ) 20 осуществляется посредством измерительного кабеля, который раздвоен соответственно принадлежности ПТП к холодному или теплому отсеку на две ветви, подключаемые к разъемам 18, установленным на рамах 3 и 5 (см. рис. 5.36). Для последовательного опроса всех ПТП и ПТ, преобразования их сигналов в цифровую форму и передачи в ПК для дальнейшей обработки по заданному алгоритму определения теплового сопротивления испытываемого стеклопакета предназначено ИИУ 20, которое выполнено в стандартном конструктиве настольного исполнения.

Для задания и регулирования скорости обдува холодной поверхности испытываемого стеклопакета, задания и стабилизации температуры воздуха в теплом отсеке и стабилизации температуры ядра УТОС на заданном уровне предназначен блок электронных регуляторов (БЭР) 19, который состоит из трех регуляторов для выполнения перечисленных функций и вторичного источника питания его электронных схем.

Программное обеспечение (ПО) установки ИТС-3 предназначено для приема информации от ИИУ во всех режимах работы, вычисления и индикации значений измеряемых величин и записи данных для документирования в файл на диске. ПО функционирует в среде Windows.

Кроме основной программы, имеется демонстрационная версия, позволяющая обучаться и демонстрировать работу программы при работе только с ПК, без включения других блоков комплекса ИТС-3.

ПО предоставляет оператору возможность выбрать различные варианты режимов работы комплекса: «Измерения», «Контроль краевых зон», «Поверка». В режиме «Измерения» осуществляется циклический опрос всех измерительных преобразователей, обработка текущих результатов измерений и представление их на экране монитора. При этом результаты измерения выходных напряжений опрашиваемых преобразователей и соответствующие расчетные значения поверхностной плотности теплового потока и температуры представляются в табличном виде, а временные функции измеряемых параметров и значений теплового сопротивления в центральной зоне, позволяющие оператору судить о степени стационарности теплообмена в климатической камере, представляются в виде графиков. По выбору оператора результаты измерения могут быть представлены в виде графиков, отражающих текущее пространственное распределение коэффициентов теплообмена и плотности теплового потока на поверхности стеклопакета.

ПО комплекса ИТС-3 самостоятельно контролирует процесс выхода на стационарный тепловой режим и равномерность теплового потока в однородной рабочей зоне стеклопакета, выдавая данные на экран монитора в виде таблицы результатов контроля по трем параметрам с учетом того, что изменение температуры теплой поверхности испытываемого стеклопакета за 0,5 часа не должно превышать 0,3 К, теплового сопротивления за 0,5 часа – 5%, при этом разность температуры воздуха в отсеках должна быть не менее 30 К.

При достижении необходимого стационарного режима в ПО начинают накапливаться данные для окончательного расчета теплового сопротивления по усредненным значениям измеренных величин. Вычисления выполняются автоматически по расчетным формулам, учитывающим расположение преобразователей и позволяющим компенсировать некоторые систематические составляющие инструментальных погрешностей. Результаты расчетов текущих значений теплового сопротивления и сопротивления теплопередаче в центре стеклопакета выводятся в виде таблицы на экран монитора, а по окончании измерений усредняются. Результаты измерений запоминаются в ПК и могут быть сохранены для последующей обработки и документирования.

Испытываемый образец стеклопакета может быть изготовлен с размерами  $(518 \pm 2) \times (600 - 1375) \times 45$  мм. Однако, для обеспечения корректности измерений теплового сопротивления стеклопакета в верхней и нижней краевых зонах, стеклопакет желательно изготавливать длиной от 600 мм до 1000 мм и устанавливать в средней части рамы. При этом свободные проемы над и под стеклопакетом необходимо полностью закрыть проставками, изготовленными в виде стеклопакетов по той же технологии, что и контролируемый стеклопакет, или из плитного утеплителя. Ширина и толщина проставок и стеклопакета должны быть одинаковы, а их общая длина равна 1375 мм.

Допускается изготовление опытного стеклопакета и проставок в виде единого стеклопакета 518×1375 мм, в котором контролируемая зона и зоны проставок разделены дистанционерами той же конструкции, что и у всего стеклопакета.

Результаты испытаний могут быть распространены на типоразмерный ряд стеклопакетов, одинаковых по технологии изготовления и толщине, но отличающихся по площади. Для контроля качества изготовления стеклопакета наиболее важным является значение теплового сопротивления в центральной зоне, так как сопротивление краевых зон в основном определяются типом используемых дистанционеров и рамой.

По результатам проведенных измерений ПО формирует протокол, в котором сохраняются данные о конструкции и размерах испытанного стеклопакета, тепловом сопротивлении и размерах всех однородных зон, а также расчетные значения приведенного теплового сопротивления, сопротивления теплопередаче стеклопакета и приведенного сопротивления теплопередаче соответствующего по конструкции стеклопакета с размерами 1,0×1,0 м. Последний параметр удобно использовать для сравнения между собой теплозащитных свойств стеклопакетов различных типоразмеров.

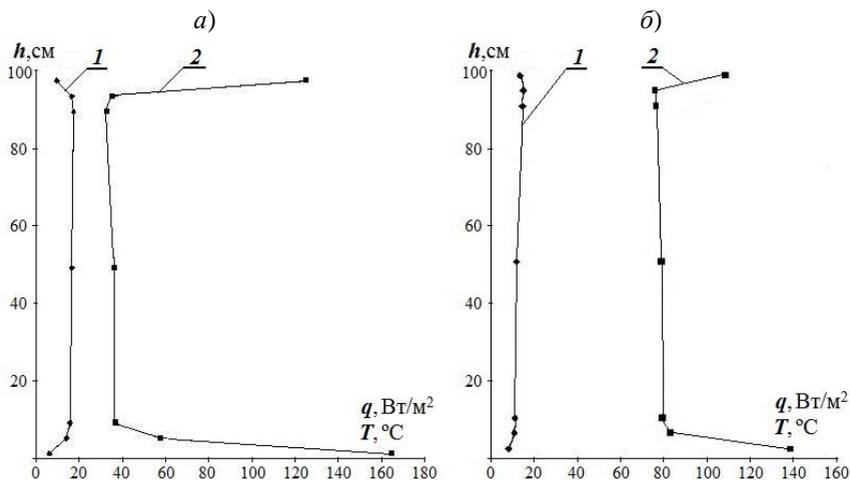
Метрологические характеристики установки ИТС-3 определены при аттестации путем измерения теплового сопротивления рабочего эталона, представляющего собой плоскопараллельную пластину из полиметилметакрилата, устанавливаемую в проеме держателя стеклопакета, и сличения измеренного значения теплового сопротивления пластины со значением, учитывающим нормированное значение коэффициента теплопроводности полиметилметакрилата [5.8; 5.29].

Основные технические характеристики установки ИТС-3 приведены в таблице 5.9.

Таблица 5.9

Характеристики	Размерность	Числовые значения
Диапазон измерения теплового сопротивления	(м <sup>2</sup> ·К)/Вт	0,1 – 1,4
Пределы основной относительной погрешности измерения теплового сопротивления	%	±8,5
Количество точек одновременного измерения поверхностной плотности теплового потока		13
Диапазон измерения плотности теплового потока	Вт/м <sup>2</sup>	100 – 400
Пределы основной относительной погрешности измерения плотности теплового потока	%	±4
Количество точек измерения температуры		28
Диапазон измерения температуры	°С	-30 ... 50
Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерения температуры	К	±0,3
Диапазон значений измерения коэффициентов теплообмена		
– со стороны теплового отсека	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	4 – 8
– со стороны холодного отсека		15 – 30
Диапазон задания относительной влажности воздуха в теплом отсеке	%	10 – 99
Основная абсолютная погрешность контроля относительной влажности воздуха при температуре (20±5) °С, не более	%	±2
Диапазон задания температуры воздуха в холодном отсеке климатической камеры	°С	-25 ... -5
Диапазон задания температуры воздуха в теплом отсеке климатической камеры	°С	18 ... 35
Температура термостатирования опорных спаев термопар	°С	50 ± 0,2
Основная абсолютная погрешность термостатирования опорных спаев термопар, не более	К	±0,1
Время непрерывной работы установки		
– при включенных морозильной камере и БЭР	час	не ограничено
– при включенных вентиляторах		
– при работающих ИИУ и ПК, не более		12
Потребляемая мощность не более	В·А	1500
Длина измерительных кабелей, не менее	м	5
Длина кабеля связи с ПК, не менее	м	3
Габаритные размеры не более		
– климатической камеры	м	1,9×1,9×1,25
– блока электронных регуляторов	мм	500×420×220
– информационно измерительное устройство	мм	500×420×210
– сервисного стола	м	0,88×0,8×2,0
Площадь рабочего помещения, не более	м <sup>2</sup>	20

На установке ИТС-3 испытаны однокамерные и двухкамерные стеклопакеты с сопротивлением теплопередаче от 0,3 до 1,1 Вт/(м<sup>2</sup>·К) и исследованы различные типы стеклопакетов. На рисунке 5.39 представлены графики распределения плотности теплового потока через стеклопакет и температуры его поверхности со стороны МТО вдоль высоты для двух типов стеклопакетов: двухкамерного с энергоэффективными стеклами и камерами, заполненными аргоном (*а*), и однокамерного с простыми стеклами и воздушным заполнением прослойки (*б*). Разделительные рамки выполнены из алюминия. Результаты получены для стеклопакетов без рам.



*а* – двухкамерный стеклопакет с энергоэффективными стеклами и камерами, заполненными аргоном (4Е 12Аг 4М 12Аг 4Е);  
*б* – однокамерный стеклопакет с простыми стеклами и воздушным заполнением камер (4М1-12-4М1)

Рис. 5.39. Распределение плотности теплового потока через стеклопакет (графики 1) и температуры его теплой поверхности (графики 2) вдоль высоты стеклопакета

Как известно, в краевых зонах стеклопакетов тепловое сопротивление конструкции значительно уменьшается из-за наличия металлических рамок, которые являются тепловыми

шунтами («мостиками холода»). В этих условиях важнейшее значение приобретает конструкция и качество оконной рамы, закрывающей мостики холода. Представленные графики подтверждают эти положения, причем влияние краевых эффектов относительно больше сказывается на энергоэффективных стеклопакетах.

При испытаниях по стандартам [5.39; 5.40] для оконных конструкций и стеклопакетов определяют приведенное сопротивление теплопередаче, учитывающее пропорционально соответствующим площадям тепловое сопротивление центральной и краевых зон. Регламентировано проведение испытаний стеклопакетов с использованием деревянных рам, однако, конструкция рамы определена нечетко, что может приводить к неоднозначности результатов испытаний. Стеклопакет является полуфабрикатом, так как не применяется без рамы и этим существенно отличается от таких готовых ОК, как оконный и дверной блоки, для которых приведенное тепловое сопротивление нормировано. В связи с этим стеклопакеты целесообразно сравнивать по тепловому сопротивлению центральной зоны. В случае однозначно определенного типа используемой рамы можно определять и тепловое сопротивление краевых зон, и размеры этих зон. Набор таких данных для определенной конструкции позволяет рассчитывать приведенное тепловое сопротивление стеклопакетов этого типа ряда с различными размерами.

Как следует из графиков, показанных на рис. 5.39, в краевых зонах распределение теплового потока существенно неравномерно, а ширина этих зон может изменяться в зависимости от конструкции стеклопакетов и рам. В стандарте [1.13] указано, что ПТП должны устанавливаться в центрах зон и перед проведением измерений ширина краевых зон должна уточняться путем моделирования или предварительных измерений. Однако, на практике обычно используют значения ширины этих зон, указанные на иллюстративном рисунке в этом стандарте – 200 мм в верхней и нижней и

150 мм в боковых краевых зонах. В проведенных нами исследованиях ширина краевых зон была значительно меньше, поэтому ПТП, установленные на расстояниях 100 мм и 75 мм от краев стеклопакета, оказывались у границы фактической краевой зоны и измеряли тепловой поток существенно меньший, чем средний по зоне.

Опыт исследования краевых зон и других термических неоднородностей ОК показывает, что для таких испытаний целесообразно применять многосекционные ПТП со встроенными термопарами. Такие ПТП содержат линейку последовательно соединенных секций ПТП с выводами от каждой секции (обычно 5 – 6 секций) и независимые термопары, размещенные по центру каждой секции (см. кн. 1 раздел 4.5, [2\*]). Многосекционные ПТП позволяют исследовать распределения плотности теплового потока и температуры в зонах неравномерности и определять их средние значения.

Результаты экспериментального определения сопротивления теплопередаче через центральную зону стеклопакетов девяти типов, выпускаемых ООО «Технолуч» (г. Киев), в сравнении с расчетными значениями, полученными по методике, регламентированной в стандарте ISO 10292 [5.48] и методике авторов статьи [5.49], приведены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Тепловое сопротивление теплопередаче через центральную зону стеклопакетов (в  $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ )

№	Тип стеклопакета	Эксперимент	Расчет по ISO 10292, [5.48]	Расчет по [5.49]
1	2	3	4	5
1	Двухкамерный K-glass, Air 4E-10-4M-10-4E	0,694	0,7792	0,7573
2	Двухкамерный Low, Air 4M-11.5-4E-11.5-4E	0,811	0,9566	0,8449
3	Однокамерный K-glass, Air 4M1-24-4E	0,505	0,5047	0,4549
4	Однокамерный, Air 4M1-12-4M (0,9)	0,335	0,3641	0,3429

1	2	3	4	5
5	Двухкамерный Low-E, Argon 4M-12-4M-12-4E (0,1)	0,742	0,9251	0,8021
6	Двухкамерный Low-E, Argon 4M-12-4E-12-4E (0,1)	1,028	1,2721	1,0867
7	Двухкамерный Low-E, Air 4M-12-4M-12-4E (0,1)	0,688	0,7605	0,6690
8	Однокамерный Low-E, Argon 4M-12-4E (0,1)	0,620	0,6905	0,5788
9	Двухкамерный с вставками, Argon 4E-12-4M-12-4E (0,1)	1,081	1,2721	1,0867

Как видно из таблицы, результаты экспериментов достаточно хорошо совпадают с расчетами для однокамерных стеклопакетов, а для двухкамерных расхождения достигают 20%, что в два раза превышает допускаемую погрешность измерения. Это можно объяснить некачественным изготовлением стеклопакетов, однако при изготовлении опытных образцов проводился весьма тщательный пооперационный технологический контроль, исключивший возможность брака.

Аналогичные расхождения (до 20 – 30%) между экспериментальными данными и расчетами по программам Window-4 и другим методикам, основанным на рекомендациях ISO 10292 [5.48], отмечены в публикациях специализированных изданий [5.50, 5.51]. Статья [5.49] вызвала бурную дискуссию по поводу расчетных и экспериментальных методов, в ходе которой был выявлен широкий спектр мнений – от крайних утверждений об общей некорректности экспериментальных методов и призывов доверять только расчетам [5.50] до взвешенного анализа источников погрешностей при измерении, обусловленных несоответствием задаваемых при расчетах температурных условий условиям при испытаниях, которые должны соответствовать условиям эксплуатации [5.52]. Кроме того, следует учитывать, что в стандарте ISO 10292 указано, что предложенная в нем методика не является точной и предназначена, в основном, для сравнения различных вариантов оконных конструкций [5.49]. Поэтому,

не прибегая к существенному усложнению, методику ISO 10292 [5.48] следует уточнять.

По сравнению с известными универсальными испытательными стендами для измерения теплового сопротивления разработанная установка ИТС-3 обладает такими преимуществами, как автоматизация измерений; возможность проведения цикла измерений сопротивления теплопередаче стеклопакета за одну смену; проведение измерений не только при нормированных значениях коэффициентов теплообмена по обе стороны стеклопакета, но и в относительно широком диапазоне их значений. Для эксплуатации установки ИТС-3 требуется лабораторное помещение площадью не более 20 м<sup>2</sup> и достаточно одного оператора для обслуживания (требуется помощник только для установки стеклопакета в раму).

В создание, разработку и внедрение установки ИТС-3 существенный вклад внесли Л.В. Декуша, Л.И. Воробьев, А.В. Гайдучек.

### Литература к главе 5

5.1 *Геращенко О. А.* Новый прибор для определения коэффициента теплопроводности / О. А. Геращенко, Н. Н. Ионова // Теплофизические свойства веществ. – Киев : Наук. думка, 1966. – С. 38-43.

5.2 А.с. № 783664 СССР, М.кл.<sup>3</sup> G01N 25/18. Устройство для определения коэффициента теплопроводности / О.А. Геращенко [и др.] (СССР). – № 2713943; заявл. 17.01.1979; опубл. 30.11.1980. – Бюл. № 44.

5.3 *Гордов, А. Н.* Точность контактных методов измерения температуры / А. Н. Гордов, Я. В. Малков, Н. Н. Эргардт. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 232 с.

5.4 Прибор для измерения теплопроводности ИТ-4, ГР № 8440-86 // Средства измерений, допущенные к выпуску в обращение в СССР : описание утвержденных образцов. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – Вып. 88. – С. 111-113.

5.5 *Грищенко Т. Г.* Автоматизированная установка ИТ-5 для определения теплопроводности материалов / Т. Г. Грищенко, П. В. Кацурин, Л. В. Серегина // Измерительная техника. – 1991. – № 6. – С. 43- 45.

5.6 Установка для измерения теплопроводности ИТ-5, ГР № 12085-89 // Средства измерений, допущенные к выпуску в обращение в СССР: описание утвержденных образцов. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – Вып. 94. – С. 145-147.

5.7 *Туз Ю. М.* Автоматизация проектирования устройств измерительной техники / Ю. М. Туз, А. И. Забарный, Б. Н. Белоусов [и др.]. – К. : Высшая школа, 1988. – 288 с.

5.8 *Платунов Е. С.* Теплофизические измерения : учебное пособие / Е. С. Платунов, И. В. Баранов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин ; под. общ. ред. Е. С. Платунова. – СПб. : СПбГУНиПТ, 2010. – 738 с.

5.9 *Грищенко Т. Г.* Прибор для измерения теплопроводности химикатов-добавок к полимерным материалам / Т. Г. Грищенко, В. И. Ляшков, В. И. Парамонов // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 1979. – Т. 1, № 2. – С. 83-87. – ISSN 0204-3602.

5.10 Справочник машиностроителя : в шести томах / Под ред. Н. С. Ачеркана. – Изд. 3-е испр. и доп. – Том 2. – М. : Машгиз, 1960. – 740 с.

5.11 Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. – М. : Наука, 1972. – 721 с.

5.12 *Испирян Р. И.* Прибор для определения коэффициента теплопроводности изоляционных и дисперсных материалов Информационный листок № 39-77 / Р. И. Испирян, Л. И. Алексеева, Т. Г. Грищенко, В. А. Журавлев // Межотраслевой центр научно-технической информации и пропаганды. – Калинин, 1977. – 3 с.

5.13 *Beck A. E.* Analysis of Heat Flow Data – in situ Thermal Conductivity Measurements / A. E. Beck, F. M. Anglin, J. H. Sass // Canadian Journal of Earth Sciences, 1971. – V. № 8 (1). – P. 1-19.

5.14 *Филиппов П. И.* К методике определения теплофизических свойств горных пород в буровых скважинах / П. И. Филиппов // Тепловые процессы в мерзлых горных породах. – М. : Наука, 1966. – С. 135-149.

5.15 *Любимова Е. А.* Лабораторные и теоретические исследования тепловых свойств горных пород / Е. А. Любимова, Г. Н. Старикова // Труды второго совещания по геотермическим исследованиям в СССР. – М. : Наука, 1966. – С. 135-149.

5.16 *Мартиросян В. Б.* Определение теплофизических свойств горных пород ствола скважин / В. Б. Мартиросян, И. В. Журин // Нефтяное хозяйство, 1968. – № 4. – С. 12-14.

5.17 А. с. 771520 (СССР), МКИЗ G 01 N 25/18. Способ определения теплопроводности горных пород / Р. И. Кутас, М. И. Бевзюк, О. А. Геращенко, Т. Г. Грищенко. – № 2758851/24-25 ; заявл. 16.05.1979 ; опубл. 15.10.1980, Бюл. № 38. – 3 с.

5.18 *Бевзюк М. И.* Новый способ определения коэффициента теплопроводности горных пород в скважинах / М. И. Бевзюк, О. А., Геращенко Т. Г., Грищенко Р. И. Кутас // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 1980. – Т. 2, № 4. – С. 99-102. – ISSN 0204-3602.

5.19 А. с. 922605 (СССР) Устройство для определения тепловых параметров горных пород в скважинах / М. И. Бевзюк, О. А. Геращенко, Т. Г. Грищенко [и др.] – № 2946445/18-25 ; заявл. 25.06.1980 ; опубл. 23.04.1982, Бюл. № 15. – 6 с.

5.20 *Геращенко О. А.* Теплометрические методы измерения тепловых характеристик горных пород / О. А. Геращенко, Т. Г. Грищенко, Р. И. Кутас [и др.] // Материалы 3-го пленарного заседания международного бюро по горной теплофизике. – Болгария, Пловдив, 1983. – С. 56-57.

5.21 *Каганов М. А.* Об измерении тепловых потоков с помощью тепломеров / М. А. Каганов, Ю. Л. Розеншток // Из-

вестия АН СССР, серия геофизическая. – 1961. – С. 1174-1178.

5.22 *Кутас Р. И.* Непосредственное измерение тепловых потоков из недр Земли в скважинах / Р. И. Кутас, М. И. Бевзюк, О. А. Геращенко, Т. Г. Грищенко // Геофизический сборник АН УССР. – Киев, Наукова думка, 1977. – Вып. 76. – С. 79-81.

5.23 *Геращенко О. А.* Вакуумно-криогенная установка для измерения термического сопротивления и теплопроводности теплоизоляционных материалов / О. А. Геращенко, Т. Г. Грищенко, В. И. Шаповалов [и др.] // Труды IV Всес. научно-техн. конф. «Метрологическое обеспечение теплофизических измерений при низких температурах». – Хабаровск, 1985. – С. 72.

5.24 *Декуша Л. В.* Измерение теплопроводности теплоизоляционных и строительных материалов (в развитие ГОСТ 7076-99 и ISO 8301:1991) / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Т. В. Менделеева // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2003. – Т. 25, № 3. – С. 79-87. – ISSN 0204-3602.

5.25 *Бурова З.* Установка для вимірювання коефіцієнта теплопровідності будівельних матеріалів ИТ-7С / З. Бурова, Л. Воробйов, Л. Декуша, О. Декуша // Метрологія та прилади : Науково-виробничий журнал. – Харків, 2009. – № 6 – С. 9-15. – ISSN 2307-2180.

5.26 *Бурова З. А.* Особенности конструирования преобразователей теплового потока для приборов для определения теплопроводности по ДСТУ ISO 8301:2007 / З. А. Бурова, Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко [та ін.] // Будівельні конструкції: Міжвідомчий наук.-техн. збірник наукових праць (будівництво). – Вип. 77. – К. : ДП НДІБК, 2013. – С. 349-354. – ISBN 978-966-97183-8-9.

5.27 *Бурова З. А.* Использование метода двух измерений для исследования метрологических характеристик приборов по ГОСТ 7076-99 / З. А. Бурова, А. В. Гайдучек, О. Л.

Декуша, Л. И. Воробьев, А. Г. Мазуренко // Проблемы промышленной теплотехники : тезисы докладов V Межд. конференции. – Киев, 2007. – С. 328-330.

5.28 Государственный первичный эталон и Государственная поверочная схема для средств измерений теплопроводности твердых тел в диапазоне от 0,02 до 20 Вт/(м·К) при температуре от 90 до 1100 К : ГОСТ 8.140-2009, IDT. – М. : Стандартинформ, 2010. – 3 с. – [Введен в действие 2011-01-01]

5.29 Государственная система обеспечения единства измерений. Эталонные материалы : Каталог 2008 – 2009 : МИ 2590–2008 [Электронный ресурс] / ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. – СПб.: ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», 2008. – С. 10. – Режим доступа : <http://catalog.vniim.ru/files/raz01-12.pdf>.

5.30 *Воробьев Л. И.* Метрологическая аттестация установки для определения коэффициента теплопроводности строительных материалов методом косвенных измерений / Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша [и др.] // «Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2010)» : наукові праці VII Міжнародної науч.-техн. конф., 12-14 жовтня 2010 р., м. Харків : у 2-х тт. – Харьков, 2010. – Т. 1. – С. 265-268.

5.31 *Грищенко Т. Г.* Измерение теплопроводности современных теплоизоляционных материалов в Украине / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, З. А. Бурова // Забезпечення єдності вимірювань фізико-хімічних та оптико-фізичних величин: ХІММЕТ-3-2008 : матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф., 11-13 лист. 2011 р., м. Київ – К. : ТОВ “АВЕГА”, 2008. – С. 161–65.

5.32 *Бурова З. А.* Дослідження теплопровідності пінополіуретану / З. А. Бурова, Л. Й. Воробйов, Л. В. Декуша [и др.] // Промышленная теплотехника: Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2012. – Т. 34, № 1. – С. 108-112. – ISSN 0204-3602.

5.33 Полиуретаны [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.basf.ua/esp3/Ukraine/ru\\_RU/content/Products\\_Industries/Business\\_Segments/polyurethanes/Poliuretani?mid=1](http://www.basf.ua/esp3/Ukraine/ru_RU/content/Products_Industries/Business_Segments/polyurethanes/Poliuretani?mid=1). – Название с экрана.

5.34 Пенофольгированные материалы [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.penofol.com.ua>. – Название с экрана.

5.35 Продукты ISOVER : Каталог [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.isover.ua/produktu-isover/catalogue>. – Название с экрана.

5.36 Ткани технические. Метод определения толщины : ГОСТ 29104.2-91. – [Введен в действие 1993-01-01]. – М. : Изд-во стандартов, 2004. – 3 с. – (Межгосударственный стандарт).

5.37 *Исаченко, В. П.* Теплопередача : учебник для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с. с ил. – ISBN 5-283-01483-5.

5.38 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов : СНиП 2.04.14-88 / Госстрой России. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1998. – 28 с.

5.39 Скло будівельне. Методика визначення коефіцієнта теплопередавання багат шарових конструкції (EN 673:1997, IDT) : ДСТУ EN 673:2009 – [Чинний від 2012-01-01]. – К. : Держспоживстандарт, 2012. – (Національний стандарт України).

5.40 Glass in building – Calculation of steady-state U values (thermal transmittance) of multiple glazing : ISO 10292:1994 / ISO / TK160 / SC2. – 8 p.

5.41 *Мазуренко, А. Г.* Исследование теплофизических свойств тонких энергоэффективных покрытий теплометрическими методами / А. Г. Мазуренко, З. А. Бурова, Л. И. Воробьев, Л. В. Декуша // Наукові праці НУХТ. – К. , 2014 – Т. 20, № 4. – С. 174-185.

5.42 Патент 99061 UA МПК G01K 17/18 (2006.01) G01N 25/20 (2006.01) Прилад для визначення теплофізичних

характеристик матеріалів та теплових ефектів / Декуша Л. В., Воробйов Л. Й., Бутова З. А., Мендрул Г. О. ; власник Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України. – № а 201107509 ; заявл. 14.06.2011 ; опубл. 10.07.2012. – Бюл. № 13, 2012.

5.43 *Mazurenko O. G.* Universal TPC-Installation with Thermoelectric Converters [Електронний ресурс] / O. G. Mazurenko, T. O. Roman, Z. A. Burova, L. V. Dekusha // Ukrainian Food Journal – Kyiv, 2012. – V. 1, Is. 3. – P. 64-67. – Режим доступу: <http://www.ufj.ho.ua/Archiv/UKRAINIAN%20FOOD%20JOURNAL%202012%20V.1%20Is.3.pdf>.

5.44 Создать и освоить в производстве прибор для определения теплофизических свойств неметаллических материалов с диапазоном измерения коэффициента теплопроводности от 0,05 до 5,0 Вт/(м·К) и диапазоном рабочих температур от -196 до 100 С [Рукопись] : отчет о НИР, шифр ОЦ.020.13.02 (Заключительный) / Институт технической теплофизики АН УССР ; рук. Грищенко Т. Г., исполнит. Декуша Л. В., Сало В. П., Лапий А. В., Кацурин П. В. – Киев, 1985. – 98 с. – ГР. № 81056113.

5.45 *Декуша О.* Прибор для экспресс-измерения коэффициента теплопроводности строительных материалов / О. Декуша // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2004. – Т. 26, № 6 – С. 212-216. – ISSN 0204-3602.

5.46 *Декуша Л. В.* Компьютеризированный испытательно-измерительный комплекс для определения термического сопротивления стеклопакетов / Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, А. И. Бутенко, А. В. Гайдучек // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2003. – Т. 25, № 2. – С. 67-73. – ISSN 0204-3602.

5.47 *Декуша Л. В.* Измерение сопротивления теплопередаче стеклопакетов с использованием установки ИТС-3 / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Л. И. Воробьев [и др.] // Оконные технологии, 2005. – № 22. – С. 44-49.

5.48 Стекло строительное. Расчет коэффициента теплопередачи  $U$  в стационарном режиме при многослойном остеклении : ISO 10292:1994 / ISO/TC 160/SC 2. – 8 с.

5.49 *Могутов В. А.* Сравнительные теплотехнические характеристики стеклопакетов / В. А. Могутов. – Светопрозрачные конструкции. – 2002. – № 2. – С. 52-53.

5.50 *Спиридонов А.* Считать или не считать? / А. Спиридонов, Л. Ким, А. Фомичев, А. Верховский. – Светопрозрачные конструкции. – 2002. – № 3. – С. 46-49.

5.51 *Чесноков А. Г.* Так что, можно не считать? / А. Г. Чесноков, С. А. Чесноков. – Светопрозрачные конструкции. – 2002. – № 3. – С. 49-50.

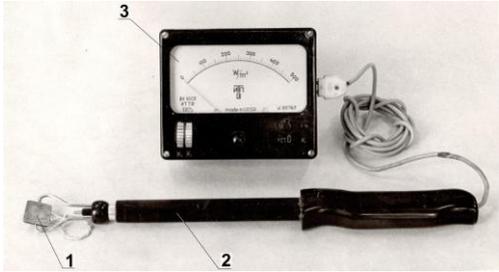
5.52 *Соколов Н. А.* Метрологическое обеспечение теплофизических свойств светопрозрачных ограждающих конструкций / Н. А. Соколов. – Светопрозрачные конструкции. – 2002. – № 3. – С. 51-54.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

### ПЕРЕНОСНЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА И ТЕМПЕРАТУРЫ (ИТП)

**Таблица А.1** – Аналоговые приборы типа ИТП разработки Института технической теплофизики НАН Украины

№ п/п	Модель прибора, назначение, внешний вид, технические характеристики
1	2
1.1	<p>Прибор ИТП-3 для непосредственных измерений тепловых потерь через теплоизоляцию энергетических установок, технологических устройств и аппаратов, трубопроводов и пр.</p>  <p>1 – ПТП; 2 – несущий жезл; 3 – измерительно-показывающее устройство</p> <p>Предел измерения, Вт/м<sup>2</sup> ..... 500                  Цена деления шкалы, Вт/м<sup>2</sup> ..... 5                  Основная погрешность не более ..... ±(5% + 5 Вт/м<sup>2</sup>)                  Время единичного измерения, мин ..... 2                  Длительность непрерывной работы, час ..... 10                  Габаритные размеры, мм:                  – ПТП ..... 20×20×2                  – измерительного устройства ..... 125×110×50                  – жезла ..... 300 – 900                  Масса прибора в комплекте, кг ..... 0,8                  Источник питания – миниатюрная аккумуляторная батарея</p>

## Продолжение таблицы А.1

1	2
1.2	<p>Прибор <b>ИТП-4 и ИТП-4А</b>. Назначение – см. п. А.1.1</p> <p>Предел измерения, Вт/м<sup>2</sup>.....500</p> <p>Цена деления шкалы, Вт/м<sup>2</sup>..... 10</p> <p>Основная погрешность не превышает..... <math>\pm(7\% + 10 \text{ Вт/м}^2)</math></p> <p>Время единичного измерения, мин..... 2</p> <p>Время непрерывной работы, час ..... 8</p> <p>Чувствительность ПТП, мВ м<sup>2</sup>/Вт..... более 15</p> <p>Тепловое сопротивление ПТП, м<sup>2</sup>·К/Вт..... менее <math>5 \cdot 10^{-3}</math></p> <p>Постоянная времени ПТП, с ..... менее 15</p> <p>Габаритные размеры, мм:</p> <p>– ПТП ..... <math>\text{Ø}27 \times 2</math></p> <p>– измерительного устройства..... <math>127 \times 107 \times 55</math></p> <p>– жезла..... <math>\text{Ø}25 \times 300</math></p> <p>Масса прибора в комплекте, кг ..... 1,0</p> <p>Источник питания – аккумуляторная батарея.</p>
1.3	<p>Прибор <b>ИТП-5</b> – трехдиапазонный. Назначение – см. п. А.1.1</p>  <p>Пределы измерения, Вт/м<sup>2</sup> ..... 1000; 2000; 5000</p> <p>Основная погрешность, %..... 4</p> <p>Чувствительность ПТП, мВ м<sup>2</sup>/Вт..... более 20</p> <p>Тепловое сопротивление ПТП, м<sup>2</sup>·К/Вт ..... менее <math>4 \cdot 10^{-3}</math></p> <p>Термостойкость ПТП, °С ..... 100</p> <p>Постоянная времени ПТП, с ..... менее 10</p> <p>Время единичного измерения, мин ..... 2</p> <p>Время успокоения подвижной части прибора, мин..... 5</p> <p>Габаритные размеры, мм:</p> <p>– ПТП ..... <math>\text{Ø}27 \times 1,85</math></p> <p>– измерительного устройства..... <math>120 \times 120 \times 60</math></p> <p>– жезла..... <math>\text{Ø}30 \times 300</math></p>

Продолжение таблицы А.1

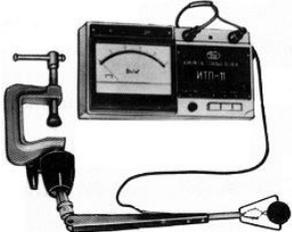
1	2
<p><b>1.4</b></p>	<p>Прибор ИТП-6 – трехдиапазонный. Назначение – см. п. А.1.1                      Пределы измерения, Вт/м<sup>2</sup> ..... 1000; 2000; 5000                      Цена деления шкалы, Вт/м<sup>2</sup> ..... 20; 40; 100                      Основная погрешность прибора, % ..... <math>\delta_{ОСН} = \pm(3,5 + q_{ПР} / q_{ИЗМ})</math>  <i>Примечание.</i>                      Здесь и далее: <math>q_{ПР}</math> – предел измерения <math>q_{ИЗМ}</math> – измеренное значение</p> <div style="display: flex; align-items: center;">  <div> <p>Габаритные размеры, мм:                          – ПТП..... Ø27×1,8                          – измерительного                          устройства ..... 120×110×6                          – жезла ..... Ø30×(260 – 860)                          – футляра ..... 340×180×10                          Масса прибора в комплекте, кг ..... 2,2</p> </div> </div> <p>Источник питания..... элементы «316»                      Дополнительная погрешность от изменения температуры                      окружающего воздуха <math>\leq 0,5 \cdot \delta_{ОСН}</math> на каждые 10 К</p>
<p><b>1.5</b></p>	<p>Прибор ИТП-7 – двухдиапазонный, для измерения теплового                      потока малой плотности в условиях существенно неоднород-                      ного температурного поля.                      Пределы измерения, Вт/м<sup>2</sup> ..... 50; 250                      Цена деления шкалы, Вт/м<sup>2</sup> ..... 1; 5                      Основная погрешность, % ..... <math>\delta_{ОСН} = \pm(3,5 + 1,5 \cdot q_{ПР} / q_{ИЗМ})</math>                      Коэффициент преобразования ПТП, Вт/(м<sup>2</sup>·мВ) ..... 25 – 30                      Электрическое сопротивление ПТП, Ом..... 300 – 600                      Тепловое сопротивление, м<sup>2</sup>·К/Вт..... <math>2,7 \cdot 10^{-3}</math>                      Габаритные размеры, мм:                      – ПТП..... Ø27×1,85                      – измерительного устройства ..... 190×110×65                      – жезла ..... Ø30×300                      – футляра ..... 290×175×100                      Источник питания..... 6 элементов «316»                      Длина соединительного кабеля, м..... 10</p>

## Продолжение таблицы А.1

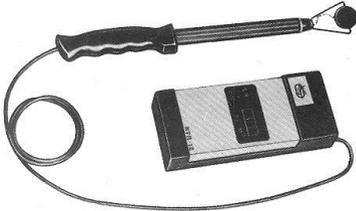
1	2
<p><b>1.6</b></p>	<p>Прибор <b>ИТП-9</b> – двухдиапазонный, для измерения утечек теплоты через изоляцию тепловых сетей, энергетических установок, печей, технологических устройств и аппаратов в действующих цехах. Предусмотрено подавление флуктуаций сигнала ПТП, сопровождающих конвективный теплообмен</p> <p>Пределы измерения, Вт/м<sup>2</sup> ..... 0,000; 1,000</p> <p>Основная погрешность, % ..... <math>\delta_{ОСН} = \pm(3,5 + q_{ПР}/q_{ИЗМ})</math></p> <p>Дополнительная погрешность от измерения температуры окружающего воздуха на каждые 10 К, % ..... не более 1</p> <p>Цена деления шкалы, Вт/м<sup>2</sup> ..... 6; 20</p> <p>Коэффициент преобразования, Вт/(м<sup>2</sup>·мВ) ..... 50</p> <p>Электрическое сопротивление ПТП, Ом ..... менее 600</p> <p>Термостойкость ПТП, °С ..... до 120</p> <p>Время установления показаний, мин ..... 3,5</p> <p>Габаритные размеры, мм:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– ПТП ..... 33×10×1,5</li> <li>– измерительного устройства ..... 215×115×85</li> <li>– жезла ..... Ø30×300</li> <li>– футляра ..... 260×175×105</li> </ul> <p>Длина соединительного кабеля, м ..... 10</p> <p>Источник питания ..... 3 элемента «316»</p>
<p><b>1.7</b></p>	<p>Прибор <b>ИТП-11</b> – двухдиапазонный. Назначение – см. п. Г.1.1 и Г.1.5.</p> <p>Пределы измерения, Вт/м<sup>2</sup> ..... 5; 250</p> <p>Цена деления шкалы, Вт/м<sup>2</sup> ..... 1; 5</p> <p>Основная погрешность, % ..... <math>\delta_{ОСН} = \pm(3,5 + q_{ПР}/q_{ИЗМ})</math></p> <p>Дополнительная погрешность от изменения температуры окружающего воздуха на каждые 10 К, % ..... не более 1</p>



Окончание таблицы А.1

1	2
	<p>Дополнительная погрешность от изменения температуры преобразователя на 10 К в диапазоне от 0 °С до минус 30 °С .....не более 0,85                      Время установления показаний, мин .....3,5                      Температурный диапазон прибора, К ..... 243 – 323</p>  <p>Габаритные размеры, мм:                      – ПТП.....Ø27×1,8                      – электронного блока ..... 215×115×85                      – футляра ..... 290×175×105                      Масса прибора без футляра, кг ..... не более 2                      Источник питания.. 3 элемента «316»</p>
<p><b>1.8</b></p>	<p>Прибор ИТП-13 – двухдиапазонный, для измерения теплового потока большой плотности</p>  <p>Пределы измерения, Вт/м<sup>2</sup> ..... 5000; 15000                      Цена деления шкалы, Вт/м<sup>2</sup> ..... 100; 300                      Основная погрешность, % ..... <math>\delta_{ОСН} = \pm(3,5 + q_{ПР} / q_{ИЗМ})</math>                      Дополнительная погрешность от изменения температуры окружающего воздуха на каждые 10 К, % ..... не более 1                      Время установления показаний, мин ..... 3,5                      Температура поверхности объекта, °С ..... до 300                      Габаритные размеры, мм:                      – ПТП ..... Ø10×1,65                      – измерительного устройства ..... 125×115×85                      Источник питания ..... 3 элемента «316»</p>

**Таблица А.2** – Цифровые приборы типа ИТП разработки Института технической теплофизики НАН Украины

№ п/п	Модель прибора, назначение, внешний вид, технические характеристики
1	2
2.1	<p>Прибор <b>ИТП-12</b>. Назначение – см. п. Г.1.6</p>  <p>1 – ПТП; 2 – электронный блок; 3 – жезл (держатель ПТП); 4 – соединительный кабель</p> <p>Предел измерения, Вт/м<sup>2</sup> ..... 999  Дискретность отсчета, Вт/м<sup>2</sup> ..... 1  Основная погрешность, % ..... <math>\delta_{ОСН} = \pm(3 + 0,1 \cdot q_{ПР} / q_{ИЗМ})</math>  Дополнительная погрешность от изменения температуры окружающего воздуха на каждые 10 К, % ..... не более 1  Время установления показаний, мин ..... 3,5  Термостойкость ПТП, °С ..... до 120  Температура поверхности, °С ..... до 100  Габаритные размеры, мм:  – ПТП ..... Ø27×1,85  – электронного блока ..... 150×75×35  Источник питания ..... 4 элемента «316»</p>
2.2	<p>Прибор <b>ИТП-20</b> – двухпараметрический, для измерения плотности теплового потока и температуры. ПТП снабжен встроенной термопарой.</p>  <p>Диапазоны измерения:  – плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup> ..... 20 – 1999  – температуры, °С ..... -50 – 150</p>

Продолжение таблицы А.2

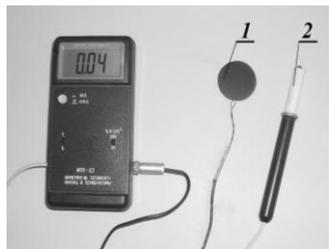
1	2
	<p>Основные погрешности измерения:                      – плотности теплового потока, %:  <math>\delta_{осн} = \pm(4 + 0,8 \cdot (q_{ПР}/q_{ИЗМ} - 1))</math>, где <math>q_{ПР} = 2000 \text{ Вт/м}^2</math>;                      – температуры: <math>\Delta_T = \pm 1 \text{ К}</math>                      Габаритные размеры, мм:                      – ПТП ..... Ø27×1,85                      – электронного блока ..... 150×75×35                      Источник питания ..... 4 элемента «316»</p>
<p><b>2.3</b></p>	<p>Прибор ИТП-20М – двухдиапазонный, для измерения плотности теплового потока через ограждающие конструкции зданий и сооружений</p>  <p>Диапазоны измерения плотности теплового потока, <math>\text{Вт/м}^2</math> ..... 10 – 199,9; 200 – 1999,9                      Основная погрешность измерения, %:  <math>\delta_{осн} = \pm(4 + 0,8 \cdot (q_{ПР}/q_{ИЗМ} - 1))</math>, где <math>q_{ПР} = 200</math> и <math>2000 \text{ Вт/м}^2</math>                      Габаритные размеры, мм:                      – ПТП ..... (см. рисунок)                      – электронного блока ..... 150×75×35                      Источник питания ..... 4 элемента «316»</p>
<p><b>2.4</b></p>	<p>Прибор ИТП-22 – трехпозиционный, для измерения теплотерь через ограждающие конструкции различных типов. Комплектуется ПТП различных модификаций и размеров</p> 

## Продолжение таблицы А.2

1	2
	<p>Диапазоны измерения плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup> ..... 2,0 – 19,9; 20,0 – 199,9; 200,0 – 1999,9</p> <p>Дискретность отсчета, Вт/м<sup>2</sup> ..... 1</p> <p>Основная погрешность, %:</p> $\delta_{ОСН} = \pm(8 + 0,8 \cdot (q_{ПР} / q_{ИЗМ} - 1))$ для $q_{ПР} = 20$ Вт/м <sup>2</sup> $\delta_{ОСН} = \pm(4 + 0,8 \cdot (q_{ПР} / q_{ИЗМ} - 1))$ для $q_{ПР} = 200$ и $2000$ Вт/м <sup>2</sup> <p>Габаритные размеры, мм:</p> <p>– ПТП ..... (20 – 100) × (50 – 120) × 1,85</p> <p>..... Ø(10 – 27) × 1,85</p> <p>– электронного блока ..... 150 × 75 × 35</p> <p>Длина соединительных проводов, м ..... до 3</p> <p>Источник питания ..... 4 элемента «316»</p>
2.5	<p>Прибор ИТП-22 К – двухдиапазонный с возможностью подключения к ноутбуку, для измерения теплотерь на трубопроводах. Комплектуется гибким ПТП</p>  <p>Диапазоны измерения плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup> ..... 50,0 – 399,9; 400,0 – 1999,9</p> <p>Дискретность отсчета, Вт/м<sup>2</sup> ..... 1</p> <p>Основная погрешность, %:</p> $\delta_{ОСН} = \pm(4 + 0,8 \cdot (q_{ПР} / q_{ИЗМ} - 1))$ <p>для <math>q_{ПР} = 400</math> Вт/м<sup>2</sup>, <math>q_{ПР} = 2000</math> Вт/м<sup>2</sup></p>

Продолжение таблицы А.2

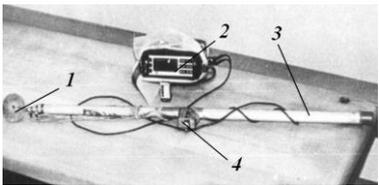
1	2
<p><b>2.6</b></p>	<p>Прибор <b>ИТП-23</b> – двухпараметрический и двухдиапазонный по тепловому потоку</p> <p>Диапазоны измерения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup> ..... 10 – 199,9; 200 – 1999,9</li> <li>– температуры, °С ..... -50 – 150</li> </ul> <p>Дискретность отсчета, Вт/м<sup>2</sup> ..... 1</p> <p>Основные погрешности измерения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– плотности теплового потока, %:</li> </ul> $\delta_{\text{осн}} = \pm(4 + 0,8 \cdot (q_{\text{ПР}}/q_{\text{ИЗМ}} - 1))$ <p>для <math>q_{\text{ПР}} = 200 \text{ Вт/м}^2</math> и <math>q_{\text{ПР}} = 2000 \text{ Вт/м}^2</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– температуры, К:</li> </ul> <p><math>\Delta_T \leq \pm 0,3</math> в поддиапазоне от -30 до 30 °С</p> <p><math>\Delta_T \leq \pm 1,0</math> в поддиапазонах от -50 до -30 °С, от 30 до 150 °С</p>
<p><b>2.7</b></p>	<p>Прибор <b>ИТП-23М</b> – двухпараметрический и двух-диапазонный, для измерения плотности теплового потока и температуры поверхности объекта и окружающего воздуха. Комплектуется различными моделями ПТП и ПТ (ПТП<sub>пов</sub>, ПТ<sub>воз</sub>).</p> <p>Диапазоны измерения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup> ..... 10 – 199,9; 200 – 1999,9</li> <li>– температуры поверхности, °С ..... 0 – 150</li> <li>воздуха, °С ..... 0 – 60</li> </ul> <p>Основные погрешности измерения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– плотности теплового потока, %</li> </ul> $\delta_{\text{осн}} = \pm(4 + 0,8 \cdot (q_{\text{ПР}}/q_{\text{ИЗМ}} - 1))$ <p>для <math>q_{\text{ПР}} = 200 \text{ Вт/м}^2</math> и <math>q_{\text{ПР}} = 2000 \text{ Вт/м}^2</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– температуры, К ..... <math>\Delta_T \leq \pm 1</math></li> </ul>



1 – ПТП, 2 – ПТ



## Окончание таблицы А.2

1	2
<p><b>2.8</b></p>	<p>Прибор <b>ИТП-24</b> – трехпараметрический и двухдиапазонный, для определения теплового сопротивления ОК по результатам измерения плотности теплового потока через ОК, разности температуры обеих поверхностей ОК и температуры воздуха по обе стороны от нее</p>  <p>Диапазоны измерения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup> .... 2,0 – 19,9; 10,0 – 199,9</li> <li>– температуры воздуха, °С.....-40 – 60</li> <li>– разности температуры поверхности, К..... 10 – 20</li> </ul> <p>Основные погрешности измерения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– плотности теплового потока, %</li> </ul> $\delta_{ОСН} = \pm(8 + 0,8 \cdot (q_{ПР} / q_{ИЗМ} - 1)) \text{ для } q_{ПР} = 20 \text{ Вт/м}^2$ $\delta_{ОСН} = \pm(4 + 0,8 \cdot (q_{ПР} / q_{ИЗМ} - 1)) \text{ для } q_{ПР} = 200 \text{ Вт/м}^2$ <ul style="list-style-type: none"> <li>– температуры, К ..... <math>\Delta_T \leq \pm 0,3</math>; <math>\Delta_T \leq \pm 1</math></li> </ul>
<p><b>2.9</b></p>	<p>Прибор <b>ИТП-Г</b> – двухпараметрический для измерения плотности теплового потока и температуры поверхности в условиях повышенной радиации</p>  <p>1 – ПТП с ПТ, 2 – вольтметр В7-35, 3 – жезл, 4 – потенциометр</p> <p>Диапазоны измерения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup> ..... 10,0 – 1000</li> <li>– температуры воздуха, °С..... 20 – 100</li> </ul> <p>Основные погрешности измерения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– плотности теплового потока, % ..... <math>\delta_{ОСН} = \pm 5</math></li> <li>– температуры, К ..... <math>\Delta_T \leq \pm 1</math></li> </ul> <p>Время реакции ПТП, с:..... 25</p> <p>ТС, с: ..... 40</p> <p>Длительность пребывания оператора в зоне повышенной радиации, мин ..... 1,5 – 2</p>

**Таблица А.3** – Зарубежные цифровые приборы типа ИТП

№ п/п	Страна, фирма-производитель, модель прибора, назначение, внешний вид, технические характеристики		
1	2		
3.1	<p><b>Россия</b>, АООТ «ПРАКТИК-НЦ», (г. Зеленоград, Московской обл.)                      Модель <b>ИПП-2, ИПП-2М</b>(укомплектованы ПТП ИТТФ, Украина)</p> 		
Модель	<b>ИПП-2</b>	<b>ИПП-2М</b>	
Пределы измерения плотности теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>	200; 500	2000	
Диапазон индикации температуры, °С	-50 – 100	-20 – 250	
Основная погрешность измерения, %	$\delta_{осн} = \pm(9 + 0,02 \cdot (q_{ИП} / q_{ИЗМ} - 1))$ где $q_{ИП} = 2000 \text{ Вт/м}^2$		
Габаритные размеры, мм: – ПТП – температурного зонда – блока индикации	Ø27×2 Ø4×55	Ø36×2 Ø4×196	
	165×80×40		
Время реакции, мин	$\mu_q = 3,5; \mu_T = 1$		
3.2	<p><b>Россия</b>, СКБ «Стройприбор», (г. Челябинск)                      Модели <b>ИТП-МГ 4.01 «Поток», ИТП-МГ 4.03 «Поток»</b> –                      двухпараметрические, предназначены для измерения плотности теплового потока через однослойные и многослойные ОК зданий и сооружений по ГОСТ 25380, через облицовку и теплоизоляцию энергообъектов при экспериментальном исследовании и в условиях эксплуатации, температуры воздуха внутри и снаружи помещений, сопротивления теплопередаче и термического сопротивления ОК и изделий по ГОСТ 26254 и 26602.1. Имеют функцию передачи данных в ПК с автоматическим архивированием информации в режиме реального времени</p>		

## Продолжение таблицы А.3

1	2	
		
Модель	ИТП-МГ4.01	ИТП-МГ4.03/Х
Диапазон измерения плотности теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>	10 – 500	10 – 999
Диапазон измерения температуры, °С	-30 – 70	-50 – 100
Основная погрешность измерения: – плотности теплового потока, % – температуры, К	±6 ±0,2	
Количество каналов измерения: – теплового потока – температуры	1 – 3 2	X = 3;5;10–100 2
Габаритные размеры, мм: – ПТП – контактного ПТ – температурного зонда – электронного блока	Ø27×2;10×52 Ø12×4 Ø4×300 175×90×30	
<b>3.3</b> <b>Россия</b> , НПП «Интерприбор», (г. Челябинск) Модель «ТЕМП-3.32» – двухпараметрический, предназначен для определения теплозащитных качеств стен, дверей, перегородок и реального расхода теплоты через ОК		

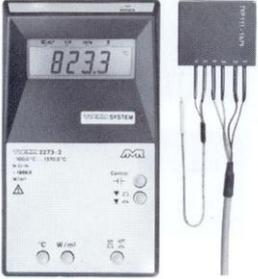
Продолжение таблицы А.3

1	2
	<p>Диапазоны измерения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– плотности теплового потока Вт/м<sup>2</sup>.....1 – 500</li> <li>– температуры, °С ..... -30 – 100</li> </ul> <p>Основные погрешности измерения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– плотности теплового потока,% ..... ±5</li> <li>– температуры, К ..... ±0,5</li> </ul> <p>Количество каналов измерения ..... 2</p> <p>Габаритные размеры электронного блока, мм ..... 145×70×25</p> <p>Масса, кг ..... 0,2</p>
<p><b>3.4</b></p>	<p><b>Россия</b>, НПП «Интерприбор», (г. Челябинск) «Теплограф» (универсальный регистратор) – многоканальная система для теплового мониторинга, предназначен для измерения плотности теплового потока через ОК, теплоизоляцию и облицовку различных объектов согласно ГОСТ 25380, для определения теплового сопротивления и сопротивления теплопередаче согласно ГОСТ 26254 и ГОСТ 26602.1. Комплектуется преобразователями ПТП, ПТ и влажности</p> <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;">  </div> <p>Диапазон измерения плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>..... 1 – 500</p> <p>Диапазоны измерения температуры, °С:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– поверхности.....-55 – 100</li> <li>– воздуха .....-30 – 50</li> </ul> <p>Диапазон измерения влажности, %.....0–100</p> <p>Основные погрешности измерения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– плотности теплового потока,% ..... ±5</li> <li>– температуры повехности, К..... ±0,3 – 0,5</li> <li>– температуры воздуха, К ..... 0,2</li> <li>– влажности ..... 2</li> </ul> <p>Габаритные размеры, мм:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– центрального блока ..... 150×76×27</li> <li>– адаптеров ..... 127×85×21 и 130×120×21</li> </ul>

## Продолжение таблицы А 3

1	2
<p><b>3.5</b></p>	<p><b>Россия, ОАО «Эталон», (г. Омск)</b>            Модель <b>ИТП-11</b> с энергонезависимой памятью для хранения измерительной информации с возможностью ее передачи в ПК через интерфейс RS-232</p>  <p>Предел измерения плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup> ..... 500, 1000            Диапазоны измерения температуры, °С:            – преобразователем ТХА ..... 50 – 1300            – преобразователем ТХК ..... -50 – 800            Основные погрешности измерений:            – плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup> ..... 0,4 – 4            – температуры, К ..... ±1,5            Габаритные размеры, мм:            – ПТП 110×30×4            – электронного блока 129×75×30</p>
<p><b>3.6</b></p>	<p><b>Россия, ОАО «Эталон», (г. Омск)</b>            Модель <b>ИТ-2</b> многоканальный измеритель напряжения (мкВ), плотности теплового потока (Вт/м<sup>2</sup>) и температуры (°С). Комплектуется первичными ПТП и ПТ, электронным блоком и набором устройств компенсации УК-4 (клеммных коробок)</p> 

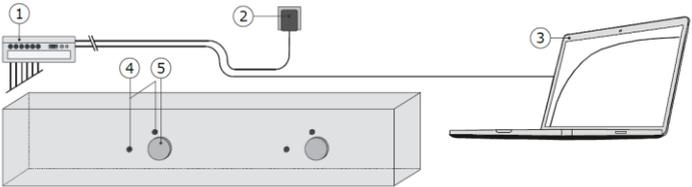
Продолжение таблицы А.3

1	2
	<p>Количество измерительных каналов.....16, 32, 48, 64, 80, 96                      Диапазон измерения напряжения с выходов                      ПТП и ПТ, мВ ..... ±99,999                      Дискретность индикации:                      – напряжения, мВ.....0,001                      – плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>.....0,01                      – температуры, °С .....0,01                      Габаритные размеры, мм:                      – электронного блока ..... 250×110×355                      – устройства УК-4..... 100×40×80</p>
<p><b>3.7</b></p>	<p><b>Россия</b>, ООО «Техноцентрприбор», (г. Москва)                      Модель <b>ИПП-ЗМК</b> – установка для контроля плотности теплового потока с передачей информации на ПК</p> <p>Предел измерения плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>..... 9999                      Дискретность отсчета, Вт/м<sup>2</sup>..... 1                      Предел измерения температуры, °С. 200                      Дискретность отсчета, К ..... 1                      Основная погрешность измерения плотности теплового потока, %.....±5</p> 
<p><b>3.8</b></p>	<p><b>Германия</b>, «Ahlborn MeB-und Regelungstecnik», Holzkirchen                      Модель <b>THERM 2273</b> – цифровой измеритель плотности теплового потока, температуры и разности температуры для обнаружения дефектов теплоизоляции ОК</p> 

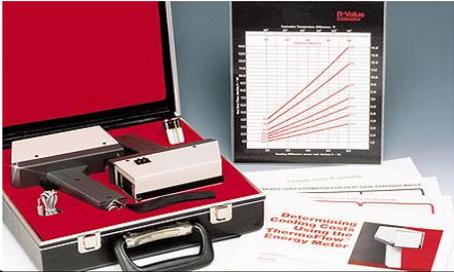
## Продолжение таблицы А.3

1	2
	Предел измерения плотности теплового потока, Вт/м <sup>2</sup> : – тип А ..... 1999,9 – тип В ..... 19999 Диапазон измерения значений температуры, °С ..... -100 – 1370 Дискретность отсчета: – по плотности теплового потока, Вт/м <sup>2</sup> : тип А ..... 0,1 тип В ..... 1 – по температуре, К ..... 0,1 Габаритные размеры, мм: – электронного блока ..... 100×170×60 – ПТП ..... 30×25×1,5
3.9	<p><b>Германия, «Ahlborn MeB-und Regelungstechnik», Holzkirchen</b>  <b>Модель THERM 7320-1</b> – микропроцессорный универсальный прибор для теплотехнических измерений. Укомплектован ПТП различных моделей</p>  <p style="text-align: center;"><i>Электронный блок</i></p> <p>Максимальная рабочая температура, °С ..... 250            Коэффициент преобразования, Вт/(м<sup>2</sup>·мВ) ..... от 5            Размеры ПТП, мм ..... от 24×18 до 500×500</p>

Продолжение таблицы А.3

1	2
<p><b>3.10</b></p>	<p><b>Нидерланды, «Hukseflux»</b>                      Модель <b>TRSYS 01</b> – прибор для измерения локальных значений плотности теплового потока и температуры для определения теплового сопротивления ОК и сопротивления теплопередаче через ОК с двумя зонами измерения. Методика измерения согласно ISO 9869 и ASTM C1155</p>  <p>1 – электронный измерительный блок; 2 – блок питания; 3 – ПК;                      4 – термопары (на противоположных поверхностях ОК); 5 – ПТП модели HFP01 (см. Книгу 1, табл. А5)</p>  <p>Диапазон измерения плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup> .....±2000                      Диапазоны измерения температуры, °С .....-30 – 70                      Основные погрешности измерений:                      – плотности теплового потока, %.....± 3                      – температуры, К ..... ± 0,1</p>
<p><b>3.11</b></p>	<p><b>США, «Omega»</b>                      Модель <b>OS-650</b> – измерительный комплекс, оснащенный бесконтактным измерителем температуры – модель <b>OS-651</b> или инфракрасным радиометром – модель <b>OS-652</b></p>

Продолжение таблицы А.3

1	2		
			
	Модель	OS-651	OS-652
	Диапазон измерения: – температуры, °С – теплового потока, кДж: • методом сканирования • дифференциальным методом	-29 – 1093	0 – 2100 0 – 210
	Дискретность отсчета: – температуры, °С – теплового потока, кДж: • методом сканирования • дифференциальным методом	1	1 0,1
	Погрешность измерения, %	±1	
	Воспроизводимость, %	±0,5	
	Спектральный диапазон, мкм	8 – 14	
	Время реакции, с • метод сканирования • дифференциальный метод	1	1 3
	Габаритные размеры, мм	150×230×60	
	Масса, кг	0,9	
3.12	США, «International Thermal Instrument Company» (ITI), Калифорния Модель <b>НВ-100</b> – система измерения плотности теплового потока и температуры, предназначен для энергетического аудита с целью выявления дефектов теплоизоляции, тепловых потерь через плоские ОК с возможностью передачи информации на ПК		

Продолжение таблицы А.3

1	2
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="188 226 490 566"> <p style="text-align: center;">Heat Flux Probe [Q/A]</p> <p style="text-align: center;">Thermal Barrier</p> <p style="text-align: center;">Heat Flow [Bi-directional]</p> <p style="text-align: center;">"K" Factor attachment (For temperature difference, Δ T)</p> <p style="text-align: center;">Digital Meter</p> <p style="text-align: center;">FORMULA  <math display="block">K = Q/A \Delta T \left[ \frac{\text{WATTS}}{\text{CM}^2} \right]</math> </p> </div> <div data-bbox="573 226 954 571"> </div> </div> <p>Пределы измерения плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup> ±1999  Дискретность отсчета, Вт/м<sup>2</sup> ..... 1  Термостойкость ПТП, °С .....  ..... до 300  Основная погрешность, %..... ±1  Диапазон измерения температуры, °С ..... -80 – 300  Дискретность отсчета, К ..... 1  Основная погрешность, К ..... ±1  Погрешность системы, % ..... ±5  Габаритные размеры, мм:  – ПТП ..... 101×101×15  – электронного блока ..... 180×95×65  Масса комплекта, кг ..... 1,5  Длина соединительного кабеля, м ..... до 7,5</p>
<p><b>3.13</b></p>	<p><b>Япония, «Kyoto electronics manufacturing» (КЕМ), (г. Киото)</b>  Модель <b>HFM-201</b> – портативный измеритель плотности теплового потока и температуры. Комплектуется ПТП модели TR-2В (см. Книгу 1, табл. А5) и термопарами ТХА и ТХК, может быть укомплектован сенсорами моделей TR-B5, ТМ1-В, Т5000, Т5000-8, ТN-В</p> <div data-bbox="714 1141 954 1436"> </div>

## Окончание таблицы А.3

1	2
	<p>Диапазоны измерения плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup> ..... ±9999</p> <p>Диапазоны измерения температуры, °С:</p> <p>– с применением ТХА ..... -99,9 – 9999</p> <p>– с применением ТМК..... -199,9 – 400</p> <p>Интервалы регистрации сигналов, с ..... 1, 2, 5, 10</p> <p>Габаритные размеры, мм:</p> <p>– ПТП..... 120×40×1</p> <p>– электронного блока ..... 238×82×22</p> <p>Масса, кг ..... 0,220</p>
3.14	<p><b>Япония, «КЕМ», г. Киото</b></p> <p>Модель <b>HFM-215</b> – многоканальный измеритель плотности теплового потока и температуры для мобильного обследования энергетических объектов. Может быть укомплектован в зависимости от задачи измерения объекта контроля сенсорами различных моделей: ER2,6; EM1; E500B,S; E500B-S-20;EW; E750; E750S; EG; ET;EF-T,S; EV; EC; ER2/HS</p> <div data-bbox="505 815 721 1107" data-label="Image"> </div> <p>Диапазон измерения плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup> ..... ±99999</p> <p>Диапазоны измерения температуры, °С:</p> <p>– с применением ТХА ..... -200 – 1200</p> <p>– с применением ТМК..... -200 – 400</p> <p>Интервал регистрации сигналов, с ..... 1, 2, 5, 10</p> <p>Габаритные размеры, мм..... 152×240×225</p> <p>Масса, кг ..... 4,0</p>

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ КОНТАКТНЫХ СМАЗОК

На тепловой режим системы «ОК – ПТП» значительное влияние оказывает так называемое контактное тепловое сопротивление, обусловленное несовершенством механического соединения контактирующих поверхностей. Контактное тепловое сопротивление является следствием процесса стягивания линий теплового потока к пятнам (точкам) непосредственного контакта и наличия низкотеплопроводной межконтактной среды [Б.1].

Это сопротивление может быть уменьшено путем увеличения нагрузки на соприкасающиеся поверхности, улучшения качества обработки поверхностей, введения в контактную зону вещества с более высоким коэффициентом теплопроводности, чем воздух, и большим коэффициентом смачивания [Б.2].

Тепловая проводимость в зоне контакта плоских поверхностей определяется таким соотношением [Б.2]

$$\frac{1}{R_K} = \frac{2\chi_{CM}}{h_{CP,1} + h_{CP,2}} + 2,1 \cdot \frac{N \cdot \bar{\chi}_{ПТП}}{3\sigma_{BP} \cdot A_H} \cdot 10^4, \quad (\text{Б.1})$$

где  $\chi_{CM}$  – коэффициент теплопроводности контактной смазки, (в Вт/(м·К));

$$\bar{\chi}_{ПТП} = \frac{2\chi_{OK} \cdot \chi_{ПТП}}{\chi_{OK} + \chi_{ПТП}} \text{ – приведенный коэффициент теплопро-}$$

водности контактирующих материалов;

$h_{CP,1}, h_{CP,2}$  – средняя высота микронеровностей контактирующих поверхностей, (в м);

$\sigma_{BP}$  – временное сопротивление разрыву или предел прочности, (в Н/м<sup>2</sup>);

$A_H$  – номинальная (геометрическая) площадь контакта (равная площади ПТП), (в  $m^2$ );

$N$  – нормальная нагрузка, (в Н).

В случае обследования ОК с применением ПТП нагрузка  $N = 0$ , что значительно упрощает формулу (Б.1). В связи с этим тепловое сопротивление в зоне контакта ПТП с ОК может быть оценено по формуле:

$$R_K = \frac{h_{CP.1} + h_{CP.2}}{2\chi_{CM}} . \quad (Б.2)$$

При обследовании ОК с применением ПТП уменьшение контактного теплового сопротивления в зоне их разъемного соединения (контакта) может быть достигнуто

– путем увеличения чистоты поверхности ОК в месте установки ПТП, так как при этом уменьшается числитель в формуле (Б.2),

– путем введения контактной смазки.

Коэффициенты теплопроводности некоторых веществ, применяемых для уменьшения контактного теплового сопротивления, приведены в таблицах Б.1 и Б.2.

Таблица Б.1. Коэффициенты теплопроводности контактных паст [Б.3]

Марка пасты	Интервал температуры, Т, °С	Коэффициент теплопроводности, $\chi$ , Вт/(м·К)
КПТ-8-1 (69,3% ZnO, 29,7% ПМС, 1% SiO <sub>2</sub> )	20 – 120	$0,496 - 1,611 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 273)$
КТП-8-8	20 – 135	$0,658 - 2,774 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 273)$
КТП-8-11 (25% ZnO, 67,5% ПМС, 7,5% SiO <sub>2</sub> )	50 – 127	$0,213 - 0,441 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 273)$
Z-200	35 – 102	$0,613 - 0,914 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 273)$
Z-300	16 – 135	$0,752 - 1,262 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 273)$
Z-200ф	27 – 130	$0,534 - 0,714 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 273)$
П-439	12 – 59	$0,621 - 1,831 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 273)$
T-310ф	27 – 71	$0,678 - 2,023 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 273)$

Таблица Б.2. Коэффициенты теплопроводности масел и некоторых продуктов перегонки нефти [Б.4]

Вещество	$T, ^\circ\text{C}$	$\chi, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})^{*)}$
Бензин Б-70 (жидкий)	-50 – 50 – 200	0,13 – 0,11 – 0,080
Вазелин	25	0,18
Газолин	30	0,14
Керосин Т-1 (жидкий)	-50 – 50 – 300	0,13 – 0,11 – 0,074
Масло:		
касторовое	20	0,18
оливковое	20	0,17
парафиновое	30	0,12
трансформаторное	-50 – 50 – 100	0,12 – 0,11 – 0,10
(ГОСТ 982-80)	20 – 100	0,12 – 0,11
АМГ-10	-30 – 100	0,13 – 0,12
ВМ-4	0 – 150	0,14 – 0,12
МС-20		
ТМ-1	-50 – 100	0,125 – 0,11
ХФ-22	-50 – 100	0,17 – 0,14
Парафин	30	0,12
Топливо дизельное	20 – 100	0,12 – 0,11
Примечание*) – Значения коэффициентов теплопроводности соответствуют указанным значениям температуры		

### Литература к приложению Б

Б.1 Шлыков Ю. П. Контактный теплообмен / Ю. П. Шлыков, Е. А. Ганин. – М. : Госэнергоиздат, 1963. – 144 с.

Б.2 Попов В. М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений / В. М. Попов. – М. : Энергия, 1971. – 216 с.

Б.3 Котырло Г. К. Расчет и конструирование термоэлектрических генераторов и тепловых насосов : Справочник / Г. К. Котырло, Ю. Н. Лобунец. – Киев : Наукова думка, 1980. – 328 с.

Б.4 Физические величины : Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина [и др.] ; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мелихова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

### АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЯ

#### КРИТЕРИЯ $K^q$

При вычислении действительного значения поверхностной плотности теплового потока по формуле (1.15) необходимо предварительно определить значение критерия степени искажения теплового потока  $K^q$  применяемым ПТП при конкретных условиях теплообмена. В качестве примера рассмотрен случай обследования ОК – полуограниченного массива при теплообмене с ОС с граничными условиями 3-го рода [2\*]. В основу определения значения критерия  $K^q$  взято выражение [В.1, В.2]:

$$K^q = 1 + \delta = 1 + \left( \frac{R_{OK}}{R_{OK,ПТП}} - 1 \right) \cdot \left( 1 + \frac{R_{OK}}{R_{OK,ПТП}} \cdot Bi_{OK} \cdot I(\rho, Bi_{OK}) \right)^{-1}, \quad (B.1)$$

где  $\delta$  – корректирующая поправка;

$R_{OK}$  и  $R_{OK,ПТП}$  – значения теплового сопротивления, определяемые формулами (1.11) и (1.12);

$Bi_{OK}$  – критерий Био для участка поверхности ОК в отсутствие ПТП; линейный размер участка равен эквивалентному линейному размеру ПТП; расчетная формула имеет вид:

$$Bi_{OK} = r_{ПТП} / (R_{OK} \cdot \chi_{OK}), \quad (B.2)$$

где  $r_{ПТП}$  – эквивалентный линейный размер ПТП (в частности, радиус);

$\chi_{OK}$  – коэффициент теплопроводности материала ОК;

$I(\rho, Bi_{OK})$  – безразмерная функция, равная:

$$I(\rho, Bi_{OK}) = \frac{\int_0^{\infty} x^{-1} \cdot (x + Bi_{OK})^{-1} \cdot J_1(x) \cdot J_1(\rho \cdot x) dx}{\int_0^{\infty} (x + Bi_{OK})^{-1} \cdot J_1(x) \cdot J_1(\rho \cdot x) dx}, \quad (B.3)$$

где  $J_1(x), J_1(\rho \cdot x)$  – функции Бесселя первого рода 1-го порядка, [B3, B4],  $x$  – переменная интегрирования,  $\rho$  – безразмерный конструктивный параметр ПТП, равный

$$\rho = r_{чЭ} / r_{ПТП}, \quad (B.4)$$

где  $r_{чЭ}$  – эквивалентный линейный размер чувствительного элемента ПТП;

$\delta$  – корректирующая поправка.

Значения критерия  $K^q$ , вычисленные по формуле (B.1), для практического удобства представлены номограммой на рисунке B.1 в зависимости от критерия  $Bi_{OK}$  в диапазоне значений параметра  $\rho$  от 0 до 1 с шагом 0,05 и в актуальном диапазоне отношения значений теплового сопротивления  $R_{OK} / R_{OK,ПТП}$  от 0,90 до 1,10 с шагом 0,02.

Для определения значения  $K^q$  необходима следующая исходная информация:

а) по применяемому ПТП: о значениях  $r_{чЭ}$ ,  $r_{ПТП}$ ,  $\chi_{ПТП}$  (или  $R_{ПТП}$ ),  $\epsilon_{ПТП}$  (паспортные данные);

б) по ОК при измерениях внутри помещения: о виде контролируемой поверхности (пол, стена или потолок), о коэффициенте эффективной теплопроводности  $\chi_{OK}$  и излучательной способности  $\epsilon_{OK}$  (справочные данные, приведенные в Приложении Г);

в) по ОК при измерениях снаружи ОК: о виде контролируемой поверхности (стена или крыша), о температуре ОС  $T_{OC}$  и скорости ветра  $v$ , о коэффициенте эффективной теплопроводности  $\chi_{OK}$  и излучательной способности  $\epsilon_{OK}$  (справочные данные, Приложение Г);

Для определения значения  $K^q$  выполнить следующие операции:

А – вычислить значения теплового сопротивления ПТП  $R_{ПТП}$  по формуле (1.10) и относительный размер чувствительного элемента ПТП  $\rho$  по формуле (B.4).

Б – при измерениях внутри помещения:

Б.1 – найти соответственно виду контролируемой поверхности (пол, стена или потолок) значение теплового сопротивления конвективно-радиационному теплообмену ОК с ОС  $R'_{OK} = 1/\alpha'_\Sigma$  по графику 1, 2 или 3 рисунка В.2 ([В.5]) при  $\varepsilon = \varepsilon_{OK}$ ;

Б.2 – найти значение теплового сопротивления конвективно-радиационному теплообмену ОК с ОС в месте установки ПТП  $R'_{OK,ПТП}$  по формуле (1.12), в которую подставить значение  $R'_{OK}$ , найденное по соответствующему графику рисунка В.2 при  $\varepsilon_{OK} = \varepsilon_{ПТП}$ .

В – при измерениях снаружи ОК:

В.1 – найти значение теплового сопротивления конвективно-радиационному теплообмену ОК с ОС  $R''_{OK} = 1/\alpha''_\Sigma$  по графику рисунка В.3 ([В.5]), соответствующему виду контролируемой поверхности (стена или крыша), температуре ОС  $T_{OC}$  и значению  $\varepsilon = \varepsilon_{OK}$ , в зависимости от скорости ветра;

В.2 – найти значение теплового сопротивления конвективно-радиационному теплообмену ОК с ОС в месте установки ПТП  $R''_{OK,ПТП}$  по формуле (1.12), в которую подставить значение  $R''_{OK} = 1/\alpha''_\Sigma$ , найденное по соответствующему графику рисунка В.3 при  $\varepsilon = \varepsilon_{ПТП}$  (0,05 или 0,9) или корреляцией между графиками, соответствующими  $\varepsilon = 0,05$  и  $\varepsilon = 0,9$ .

Г – найти значение отношения тепловых сопротивлений  $R'_{OK}/R'_{OK,ПТП}$  либо  $R''_{OK}/R''_{OK,ПТП}$ .

Д – найти значение критерия Био  $Bi_{OK}$  по формуле (В.2), подставляя в нее  $R_{OK} = R'_{OK}$  при измерениях внутри помещения или  $R_{OK} = R''_{OK}$  при измерениях снаружи.

Е – для найденных значений  $\rho_\Sigma, Bi_{OK}, R_{OK}/R_{OK,ПТП}$  по номограмме, приведенной на рисунке В.1, определить значение критерия  $K^q$ , используя следующий ключ: найти точку А – пересечение горизонтали, соответствующей заданному

значению  $\rho$ , с кривой, соответствующей заданному числу  $Bi_{OK}$ ; через т. А провести вертикаль до пересечения в т. В с кривой, соответствующей заданному значению  $R_{OK}/R_{OK,III}$ ; из т. В провести вертикаль до пересечения с осью  $K^q$  в т. С – искомое значение  $K^q$ .

### Литература к приложению В

В.1 *Ярышев Н. А.* Погрешность измерения стационарного теплового потока на поверхности тела / Н. А. Ярышев, Т. В. Смирнова, Н. Н. Заровная // ИФЖ. – 1989. – Т. 57, № 4. – С. 667- 674.

В.2 *Ярышев Н. А.* Влияние теплопроводности и размеров тепломера на точность измерения теплового потока / Н. А. Ярышев, Н. Н. Заровная, Т. В. Смирнова // ИФЖ. – 1988. – Т. 55, № 5. – С. 847-853.

В.3 *Лыков А. В.* Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 392 с.

В.4 *Ватсон Г. Н.* Теория бесселевых функций / Г. Н. Ватсон. – М. : Иностранная литература, 1949. – 193 с.

В.5 *Уонг Х.* Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров : Справочник / Х. Уонг. – М. : Атомиздат, 1979. – 216 с.

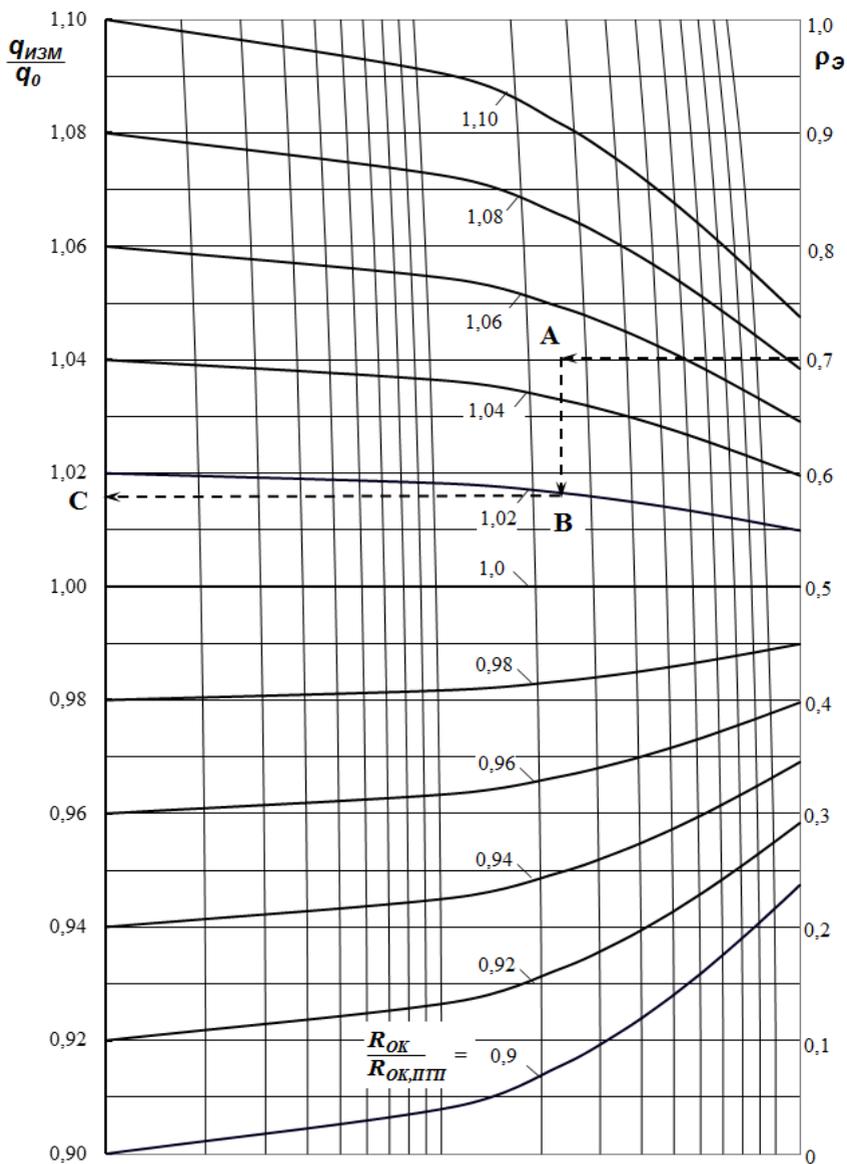


Рис. В.1. Номограмма для определения среднеинтегрального критерия  $K_{CP}^q$  в диапазоне  $0,9 < R_{OK}/R_{OK,ППИ} < 1,1$

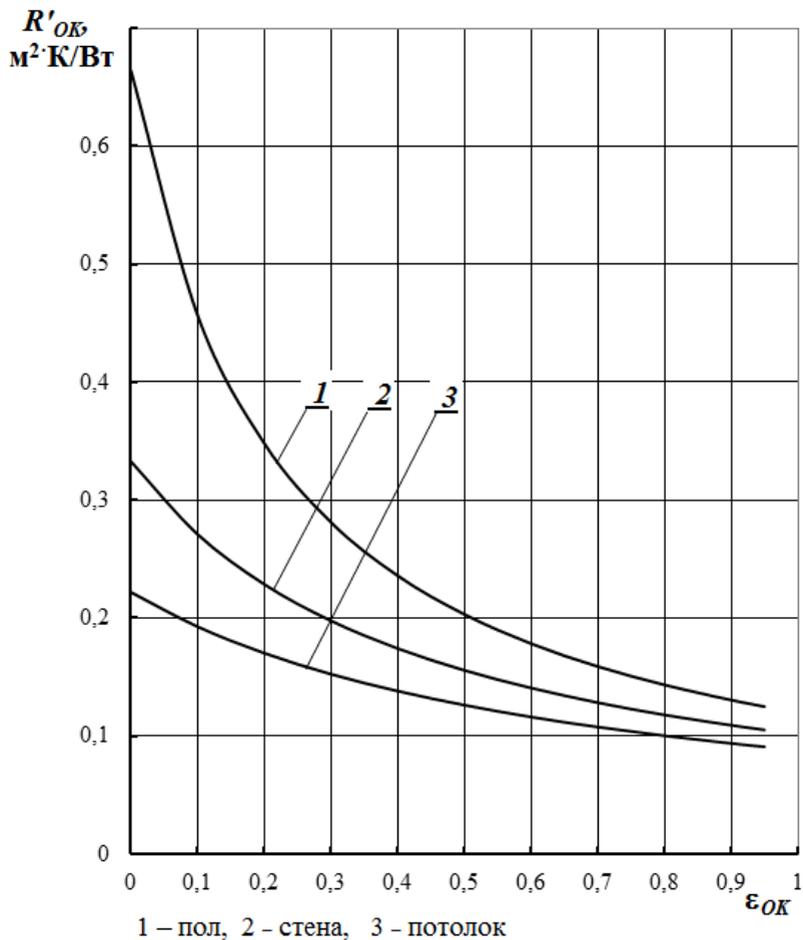


Рис. В.2. Тепловое сопротивление теплообмену ОК с ОС на внутренней поверхности при средней температуре поверхности 20 °С

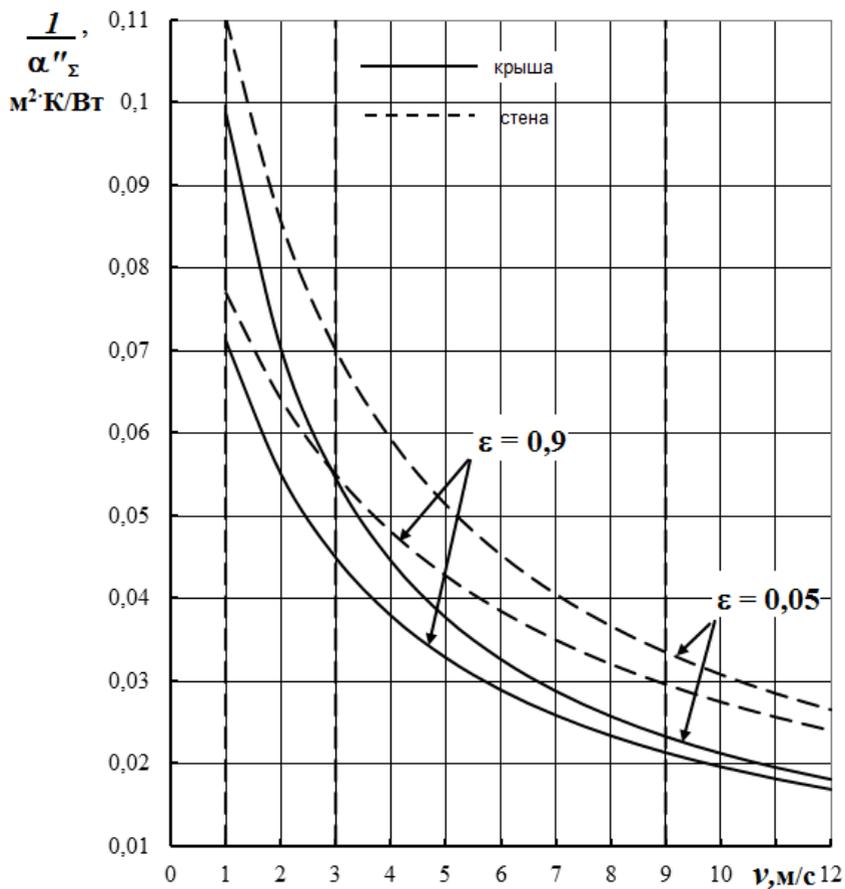


Рис. В.3. Тепловое сопротивление конвективно-радиационному теплообмену ОК с ОС на наружной поверхности при средней температуре поверхности  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  в зависимости от скорости ветра ( $v$ ), излучательной способности ( $\epsilon$ ) поверхности и ее вида: стена или крыша

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

#### Г.1 Терморрадиационные характеристики материалов и покрытий [Г.1, Г.2]

Таблица Г.1.1. Интегральная нормальная степень черноты ( $\varepsilon_{t,n}$ )

Материал	Температура, °С	$\varepsilon_{t,n}$
Алюминиевая бронза	20	0,6
Алюминий сильно окисленный	50 – 500	0,2 – 0,3
Алюминиевая окраска	50	0,5
Алюминиевый лак по шероховатой поверхности	20	0,4
Алюминий с шероховатой поверхностью	20 – 50	0,06 – 0,07
Алюминий полированный	50 – 500	0,04 – 0,06
Бронза полированная	50	0,1
Бронза пористая, шероховатая	50 – 150	0,55
Железо листовое оцинкованное, блестящее	30	0,23
Железо листовое оцинкованное, окисленное	20	0,28
Жесть белая старая	20	0,28
Золото, тщательно полированное	200 – 600	0,02 – 0,03
Латунь полированная	200	0,03

Материал	Температура, °С	$\varepsilon_{t,n}$
Латунь матовая, тусклая	20 – 350	0,22
Латунь листовая, прокатанная	20	0,06
Латунь листовая, обработанная наждаком	20	0,2
Латунь, окисленная при 600 °С	200 – 600	0,59 – 0,61
Медь полированная	50 – 100	0,02
Медь торговая, шабренная до блеска	20	0,07
Медь окисленная	50	0,6
	500	0,88
Никель технически чистый, полированный	200 – 400	0,07 – 0,09
Никель, нанесенный на чугунную поверхность	50	0,05
Серебро чистое полированное	200 – 600	0,02 – 0,03
Сталь листовая, шлифованная	950 – 1100	0,55 – 0,61
Стальное литье, полированное	750 – 1050	0,52 – 0,56
Сталь, листовой, прокат	50	0,56
Сталь с шероховатой плоской поверхностью	50	0,95 – 0,98
Сталь ржавая красная	20	0,69
Сталь окисленная	200 – 600	0,8
Сталь листовая с блестящим слоем окиси	20	0,82
Сталь сильно окисленная	50	0,88
	500	0,98
Сталь алитированная	50-500	0,79

Материал	Температура, °С	$\varepsilon_{t,n}$
Сталь никелированная, матовая	20	0,11
Сталь свежепрокатанная	20	0,24
Сталь оцинкованная	20	0,28
Сталь легированная (8% Ni, 18% Cr)	500	0,35
Цинк полированный	200-300	0,04 – 0,05
Цинк окисленный при 400 °С	400	0,11
Цинк листовой	50	0,2
Чугун обточенный	800-1000	0,6 – 0,7
Чугун, окисленный при 600 °С	200-600	0,64 – 0,78
Чугунное литье	50	0,81
Асбестовая бумага	40 – 400	0,93 – 0,94
Асбестовый картон	20	0,96
Асбошифер	20	0,96
Бумага	20	0,8 – 0,9
Вода (слой толщиной 0,1 мм и более)	50	0,95
Смоченная металлическая поверхность	20	0,98
Гипс	20	0,8 – 0,9
Дерево строганое	20	0,8 – 0,9
Кварц плавленный, шероховатый	20	0,93
Кирпич огнеупорный, слабо излучающий	500 – 1000	0,65 – 0,75
Кирпич огнеупорный, сильно излучающий	500 – 1000	0,8 – 0,9

Материал	Температура, °С	$\varepsilon_{t,n}$
Кирпич шамотный	20	0,85
	1000	0,75
Кирпич шамотный	1200	0,59
Кирпич огнеупорный, диносовый	1000	0,66
Кирпич диносовый, неглазурованный, шероховатый	1000	0,8
Кирпич диносовый, глазурованный, шероховатый	1100	0,85
Кирпич огнеупорный, корундовый	1000	0,46
Кирпич огнеупорный, магнезитовый	1000 – 1300	0,38
Кирпич красный, шероховатый	20	0,88 – 0,93
Кирпичная кладка оштукатуренная	20	0,94
Лак черный матовый	40 – 100	0,96 – 0,98
Лак черный блестящий, распыленный на железе	20	0,87
Лак белый	40 – 100	0,8 – 0,95
Масляные краски различных цветов	100	0,92 – 0,96
Мрамор сероватый полированный	20	0,93
Резина твердая	20	0,95
Резина мягкая серая, шероховатая	20	0,86
Сажа ламповая	20 – 400	0,95
Сажа с жидким стеклом	20 – 200	0,96
Сажа, нанесенная на твердую поверхность	50 – 1000	0,96
Снег	–	0,96

Материал	Температура, °С	$\varepsilon_{t,n}$
Стекло	20 – 100	0,94 – 0,91
	250 – 1000	0,87 – 0,72
	1100 – 1500	0,7 – 0,67
Толь	20	0,91 – 0,93
Уголь	100 – 600	0,81 – 0,79
Фарфор глазурованный	20	0,92
Шеллак черный, блестящий на железе	20	0,82
Шеллак черно-матовый	75 – 150	0,91
Шлаки котельные	0 – 100	0,97 – 0,93
	200 – 500	0,89 – 0,78
	600 – 1200	0,76 – 0,70
	1400 – 1800	0,69 – 0,67
Эмаль белая	20	0,9

Таблица Г.1.2. Интегральная полусферическая степень черноты различных материалов ( $\varepsilon_{t,h}$ )

Материал	Температура, К	$\varepsilon_{t,h}$
Алюминий	303	0,03
Алюминий полированный очищенный	375 – 875	0,03 – 0,07
Алюминий слегка окисленный	375 – 875	0,12 – 0,19
Алюминий сильно окисленный	375 – 875	0,215 – 0,32
Железо	200 – 1100	0,08 – 0,25
	1500	0,11
Золото	314	0,03
	50 – 1150	0,01 – 0,06
Магнезиально-шпинельная керамика	600 – 1200	0,4 – 0,5
Медь	50 – 1100	0,02 – 0,6
Никель	300 – 1500	0,06 – 0,2
Оксид железа	1500	0,89
Оксид меди	1400	0,54
Свинец	302	0,05
Серебро	100 – 1300	0,02 – 0,1
Сталь	301	0,12
Сталь нержавеющая 12Х18Н9Т	500 – 1250	0,17 – 0,31
Титан	900 – 1900	0,22 – 0,32
Титан технический	1100 – 1750	0,25 – 0,32

Таблица Г.2. Теплофизические характеристики различных материалов [Г.3 – Г.5]  
 $\rho$  – плотность;  $c$  – теплоемкость;  $\chi$  – теплопроводность;  $a$  – температуропроводность

Материал	$T$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , кДж/(кг·K)	$\chi$ , Вт/(м·K)	$a \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
$\chi < 0,40$ Вт/(м·K)					
Альфоль с воздушными прослойками	–	3	0,293	0,046	52,3
Антрацит	–	1440	0,946	0,328	0,241
Асбест листовой	300	770	0,818	0,116	0,184
Асбозурит	37	560	0,837	0,161	0,343
	90	560	0,795	0,187	0,420
Асбестоцементные плитки и листы (в сухом состоянии)	–	1800	0,837	0,349	0,232
Бемит (плиты из сечки соломы и камыша)	–	250	1,465	0,070	0,191
Битумоперлит (в сухом состоянии)	–	400	1,674	0,110	0,164
Битумы нефтяные (строительные и кровельные) в сухом состоянии	–	1300	1,674	0,244	0,112
Борулин	–	700	1,465	0,291	0,284
Битумно-литая изоляция	–	180	1,465	0,058	0,220
Вата-минеральная	50	200	0,940	0,056	0,303
То же	175	300	0,837	0,079	0,315
То же (с битумной эмульсией)	25	390	1,047	0,063	0,154

Материал	$T$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , кДж/(кг·К)	$\chi$ , Вт/(м·К)	$a \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
То же, стеклянная	0	200	0,670	0,037	0,276
	30	200	0,837	0,045	0,269
	65	200	0,837	0,054	0,322
	100	200	0,754	0,065	0,431
То же, хлопковая	-30	50	1,557	0,048	0,616
	0	50	1,679	0,054	0,637
	50	50	1,830	0,064	0,699
То же, хлопчатобумажная	–	100	0,837	0,046	0,550
Водоросли	25	110	2,386	0,052	0,198
Воздух сухой в тонких прослойках	–	1,2	1,005	0,070	58,043
	–	1,4	1,005	0,326	231
Войлок стеклянный	-30	50	0,803	0,037	0,922
	0	50	0,862	0,041	0,974
	50	50	0,929	0,048	1,025
То же, минераловатный	–	250	0,754	0,075	0,400
То же, шерстяной	–	150	1,968	0,058	0,196
Волокно асбестовое	–	100	0,837	0,052	0,624
	–	250	0,837	0,081	0,387
	–	450	0,837	0,151	0,401
Газобетон	–	450	0,837	0,151	0,401
Газошлакобетон	–	450	0,837	0,151	0,401

Материал	$T$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , кДж/(кг·K)	$\chi$ , Вт/(м·K)	$a \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
Газостекло	30	280	0,837	0,100	0,427
Гидроизол	–	700	1,465	0,291	0,284
Дерево-береза (стружка)	25	154	2,762	0,090	0,212
То же, бук	60	700	2,345	0,249	0,152
То же, дуб (вдоль волокон)	12	819	2,386	0,349	0,178
То же (поперек волокон)	0	825	2,386	0,198	0,100
	15	825	2,386	0,209	0,106
То же, ель (вдоль волокон)	–	550	2,512	0,291	0,211
	–	600	2,512	0,349	0,232
То же (поперек волокон)	–	550	2,512	0,174	0,126
	–	600	2,512	0,232	0,154
То же, сосна (вдоль волокон)	–	550	2,512	0,291	0,211
	–	620	2,512	0,349	0,224
То же (поперек волокон)	–	550	2,512	0,174	0,126
	–	620	2,512	0,232	0,149
То же, ясень	60	770	2,219	0,291	0,170
Диатомит	5	400	0,955	0,062	0,162
Древесные опилки прессованные	–	300	2,303	0,128	0,185
Древесно-волокнистые плиты	–	150	2,512	0,058	0,154
	–	250	2,512	0,075	0,120

Материал	$T$ , °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , кДж/(кг·К)	$\chi$ , Вт/(м·К)	$a \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
Древесно-волокнистые плиты	–	600	2,512	0,163	0,108
Зола древесная	–	400	0,837	0,093	0,278
Зонолит	–	125	0,837	0,093	0,889
Камышит	–	400	1,465	0,140	0,239
Картон бумажный волокнистый	–	150	1,465	0,064	0,291
То же, гофрированный	–	200	1,46	0,070	0,239
То же, обыкновенный	–	700	1,46	0,175	0,170
То же, плотный	–	1000	1,46	0,290	0,198
Каучук синтетический	–	1600	1,62	0,214	0,086
Клинкер	30	1400	1,420	0,163	0,082
Кожа (подошва)	30	1000	1,424	0,163	0,114
Костра льняная	–	150	1,465	0,058	0,264
Лигнолитиз	–	200	2,600	0,058	0,112
Линолеум	–	1100	1,884	0,186	0,090
	–	1200	1,465	0,233	0,132
То же, поливинилхлоридный, многослойный	–	1600	1,465	0,326	0,139
(в сухом состоянии)	–	1800	1,465	0,384	0,146
То же на тканевой основе	–	1500	1,465	0,256	0,116
	–	1700	1,465	0,314	0,126

Материал	$T$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , кДж/(кг·К)	$\chi$ , Вт/(м·К)	$a \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
Мипора	-80	20	1,090	0,029	1,330
	-30	20	1,264	0,035	1,380
	0	20	1,348	0,038	1,410
	20	20	1,415	0,041	1,450
Опилки древесные	–	250	2,510	0,093	0,148
Пемза в зернах	–	300	0,837	0,140	0,558
Пемзобетон	–	650	0,837	0,290	0,533
Пенобетон	-18	420	0,879	0,109	0,295
	25	360	0,795	0,096	0,335
	90	400	0,837	0,125	0,373
Пенопласт (в сухом состоянии) ПВ-1	–	125	1,340	0,046	0,277
То же, ПХВ-1	–	100	1,340	0,046	0,346
	–	125	1,340	0,058	0,346
	–	100	1,340	0,041	0,304
То же, ПС-1	–	100	1,340	0,041	0,304
То же, ПС-4	–	75	1,340	0,041	0,405
Пенополиуретан	–	75	1,340	0,041	0,405
Пеносиликат	–	600	0,837	0,209	0,416
	–	500	0,837	0,163	0,389
Пергамин	–	600	1,507	0,140	0,155
Песок речной мелкий	20	1500	0,795	0,326	0,273

Материал	$T$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , кДж/(кг·К)	$\chi$ , Вт/(м·К)	$a \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
Плиты асбоцементные теплоизоляционные	–	300	0,837	0,093	0,370
То же, минераловатные, жесткие	–	400	0,754	0,116	0,385
То же, пробковые	80	198	1,757	0,053	0,152
Портланд-цемент	30	1900	1,130	0,302	0,141
Пробка-крупа (в зернах)	–	120	2,093	0,046	0,183
То же, натуральная	20	315	1,842	0,063	0,108
Резина твердая (обыкновенная)	0	1200	1,382	0,157	0,095
	100	1200	1,382	0,160	0,096
То же, пористая	20	160	1,382	0,050	0,226
Рогозит	–	160	1,465	0,051	0,248
Рубероид	–	600	1,465	0,174	0,198
Снег свежесвыпавший	–	180	2,093	0,116	0,308
	–	200	2,093	0,140	0,334
То же, слежавшийся	–	350	2,093	0,349	0,476
Солома в матах-полотнищах	–	150	1,465	0,116	0,528
	–	200	1,465	0,232	0,792
То же, в снопах	–	120	1,465	0,093	0,529
	–	150	1,465	0,140	0,637
Соломенная резка набивная	–	120	1,465	0,047	0,267
Соломит в плитах	–	250	1,465	0,093	0,254
	–	350	1,465	0,116	0,226

Материал	$T$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , кДж/(кг·К)	$\chi$ , Вт/(м·К)	$a \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
Текстолит	20	1300	1,507	0,233	0,119
Ткань шерстяная	20	240	1,340	0,052	0,162
Толь	–	600	1,465	0,174	0,198
	–	800	1,507	0,232	0,192
Торф измельченный	20	200	1,507	0,058	0,192
То же, кусковой	20	245	1,758	0,070	0,583
То же, сфагнум	–	200	1,675	0,070	0,208
	–	300	1,675	0,093	0,185
То же, фрезерный	25	700	2,931	0,302	0,147
Уголь бурый	–	1210	1,130	0,254	0,186
То же, древесный	–	180	2,512	0,058	0,128
	–	220	2,512	0,070	0,127
То же, каменный	20	1400	1,310	0,186	0,101
Фанера клееная	0	600	2,512	0,151	0,100
Фибролит в плитах	–	400	2,303	0,174	0,189
	–	600	2,303	0,232	0,168
Шерсть минеральная	50	200	0,920	0,046	0,250
Шивелин из льняных очесов	–	130	1,675	0,058	0,266
Шлак доменный гранулированный	–	450	0,754	0,140	0,413
	–	600	0,754	0,186	0,411

Материал	$T$ , °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , кДж/(кг·К)	$\chi$ , Вт/(м·К)	$a \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
То же, котельной	–	800	0,754	0,232	0,385
	–	1000	0,754	0,291	0,385
	–	1100	1,005	0,233	0,211
Штукатурка гипсовая	–	1100	1,005	0,233	0,211
Эбонит	20	1200	1,424	0,163	0,095
Ячеистый бетон (газобетон, пенобетон, газосиликат)	–	300	0,837	0,081	0,322
	–	600	0,837	0,140	0,279
	–	1000	0,837	0,280	0,334
$0,40 < \chi < 6,00$ Вт/(м·К)					
Апатит	–	3210	1,005	1,770	0,549
Асфальт	20	2100	2,093	0,700	0,159
Асфальтобетон	–	2100	1,675	1,050	0,298
Базальт	–	2800	0,921	2,910	1,130
Бетон с каменным щебнем или гравием (в сухом состоянии)	–	2400	0,837	1,512	0,753
То же, с кирпичным щебнем	20	1900	0,837	1,163	0,731
Вода	10	999,7	4,193	0,586	0,140
Гипс в плитах	–	1100	0,921	0,407	0,402
То же, литой	20	1100	0,963	0,349	0,330
То же, с органическими наполнителями	–	700	1,047	0,303	0,413
То же, строительный	25	1100	1,122	0,396	0,321

Материал	$T$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , кДж/(кг·К)	$\chi$ , Вт/(м·К)	$a \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
То же, формовочный Гипсобетон	20	1250	0,837	0,430	0,411
То же, с доменным шлаком	–	1300	0,795	0,558	0,540
То же, с котельным шлаком	–	1100	0,795	0,407	0,465
Глина	–	1300	0,795	0,523	0,506
То же, каолиновая	20	2000	0,837	0,930	0,556
То же, огнеупорная	45	1790	0,795	0,734	0,516
Гранит	450	1845	1,047	1,040	0,538
Грунты глинистые (талые)	–	2800	0,921	2,907	1,130
То же, мерзлые	–	1700	1,231	1,128	0,539
То же, песчаные (талые)	–	1700	0,959	1,384	0,849
То же, мерзлые	–	1700	1,281	1,558	0,715
То же, талые	–	1700	0,909	2,233	1,444
То же, мерзлые	–	2000	1,486	2,384	0,802
То же, суглинистые	–	2000	1,005	3,663	1,821
Доломит	20	1960	1,156	1,490	0,658
Железобетон	–	2675	0,929	1,730	0,696
Земля в засыпке	20	2200	0,837	1,547	0,840
Известняк в камнях	–	1800	0,837	0,814	0,540
То же ракушечник	–	2000	0,921	1,163	0,631
	–	1400	0,921	0,640	0,496

Материал	$T$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , кДж/(кг·К)	$\chi$ , Вт/(м·К)	$a \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
Керамзит в засыпке	–	1400	0,837	0,523	0,446
Керамзитобетон (в сухом состоянии)	–	600	0,837	0,140	0,279
	–	1000	0,837	0,232	0,277
	–	1600	0,837	0,520	0,388
	–	1700	0,879	0,755	0,505
Кирпич красный	0	1700	0,879	0,755	0,505
То же, пористый	0	1200	0,879	0,442	0,419
То же, огнеупорный	1000	2350	1,424	3,500	1,046
То же, огнеупорный (магнезитовый)	100	2350	1,047	5,800	2,361
То же, огнеупорный шамотный	100	1750	0,837	0,895	0,611
То же, саманный	0	1550	1,047	0,581	0,358
То же, силикатный	0	1900	0,837	0,815	0,512
Кладка бутовая	0	2000	0,879	1,280	0,728
То же, из красного кирпича	0	1700	0,879	0,815	0,545
То же, из силикатного кирпича	0	1900	0,837	0,872	0,548
То же, из пористого кирпича	–	1350	0,879	0,580	0,489
То же, из естественного камня	–	2680	0,921	3,200	1,296
Колчедан медный	–	4716	0,862	4,210	1,036
То же, серный	–	4660	0,896	4,180	1,001
Лед	0	920	2,120	2,210	1,133
	-20	920	1,960	2,440	1,353

Материал	$T$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , кДж/(кг·К)	$\chi$ , Вт/(м·К)	$a \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
Лед	-40	920	1,800	2,675	1,615
Мел	50	2000	0,879	0,930	0,529
Мрамор	0	2800	0,921	1,303	0,505
Песок кварцевый	45	1520	0,921	0,814	0,581
То же, крупный речной	–	1500	1,022	0,512	0,334
То же, сахарный	0	1600	1,260	0,582	0,289
Песчаник	–	2400	0,921	2,090	0,947
Ракушечник	–	1000	0,921	0,465	0,505
Раствор известково-песчаный	–	1600	0,837	0,815	0,608
То же, сложный (цемент, песок, известь)	–	1700	0,837	0,870	0,611
То же, теплый	–	1400	0,837	0,581	0,496
То же, цементно-песчаный	–	1800	0,837	0,930	0,617
Сланцы глинистые	–	2433	0,992	0,931	0,386
Слюда	–	2900	0,879	0,581	0,228
Смазка глинопесчаная	–	1800	0,837	0,697	0,463
То же, глиношлаковая	–	1300	0,795	0,523	0,506
Стекло зеркальное	0	2550	0,778	0,780	0,393
	100	2550	0,778	0,880	0,444
То же, листовое боросиликатное	–	2442	0,837	0,879	0,430
То же, листовое ВВС	–	2498	0,858	0,879	0,410

Материал	$T$ , °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , кДж/(кг·К)	$\chi$ , Вт/(м·К)	$a \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
То же, листовое кварцевое	–	2209	0,892	1,340	0,680
То же, листовое прокатное	–	2500	0,837	0,921	0,440
То же, листовое свинцовое	–	3933	0,393	0,712	0,461
То же, листовое циркониевое	–	2353	0,829	1,130	0,579
Торф брикетированный	15	890	3,349	0,407	0,136
Торфоплиты	-6	390	1,968	0,453	0,590
Туф арктический	–	1200	0,921	0,465	0,421
То же, известковый	–	1300	0,921	0,523	0,437
Фарфор	0	2000	0,913	0,837	0,458
	100	2000	0,946	0,930	0,492
Фаянс	200	2170	0,963	1,163	0,556
Шамот (порошок)	370	1290	0,377	0,465	0,956
Шлакобетон на топливных шлаках	–	800	0,837	0,232	0,346
	–	1400	0,837	0,523	0,446
	–	1800	0,837	0,698	0,463
Шлакобетон на доменных шлаках	–	1800	0,837	0,581	0,386
Штукатурка известковая	0	1600	0,837	0,698	0,521
То же, известково-шлаковая	–	1200	0,795	0,465	0,487
То же, цементная	–	1700	0,837	0,814	0,572

Материал	$T$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , кДж/(кг·К)	$\chi$ , Вт/(м·К)	$a \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
$\chi > 6,00$					
Алюминий (99%)	0	2680	0,894	209	87,20
	100	2740	0,913	213	85,10
	300	2810	0,953	225	84,10
	500	2840	0,996	235	83,10
Бериллий (99,5%)	0	1840	1,674	157	51,00
	100	1990	1,888	187,5	49,9
Бронза	–	8000	0,389	64,0	20,60
Ванадий	–	5900	0,496	34,9	11,90
Висмут (99,995%)	0	9650	0,126	9,4	7,77
	100	9940	0,126	7,7	6,15
Вольфрам	0	19400	0,134	163,0	62,70
	200	19600	0,134	141,0	53,70
	400	19800	0,138	128,0	46,80
	600	20000	0,142	114,0	40,10
Галлий	–	5970	0,343	32,5	15,90
Железо (99,9%)	0	7900	0,440	74,5	21,42
	400	9100	0,523	48,8	10,26
	800	10900	0,645	30,8	4,38
Золото чистое	0	19300	0,130	313	124,80

Материал	$T$ , °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , кДж/(кг·К)	$\chi$ , Вт/(м·К)	$a \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
Золото чистое	500	19450	0,134	313	120,10
Иридий	0	22200	0,130	59,2	20,58
	300	23200	0,134	55	17,57
Кадмий	0	8700	0,230	93	46,5
	300	8800	0,239	90	42,80
Калий	–	8700	0,737	100	15,62
Кварц кристаллический перпендикулярно оси кристаллов	0	2500	0,836	7,21	3,45
Кобальт (97%)	0	8830	0,448	70	17,70
	200	9370	0,460	118	27,40
Литий	0	5100	3,310	68	4,03
	100	5850	3,560	71,0	34,09
Магний (99,6%)	0	3030	0,976	145	49,0
	500	3380	1,135	131	34,10
Марганец (99,6%)	0	7400	0,431	157	49,20
	500	7150	0,569	139,5	34,3
Медь (99,9%)	0	8950	0,389	393	112,9
	400	9000	0,406	365	100,10
	1000	9150	0,431	320	81,10
Молибден (99,84%)	0	10250	0,251	141	54,80

Материал	$T$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , кДж/(кг·К)	$\chi$ , Вт/(м·К)	$a \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
Молибден (99,84%)	400	10650	0,264	129	45,90
	1000	10750	0,281	104	34,40
Натрий	–	975	1,197	109,3	93,60
Никель	0	8100	0,427	61,6	17,81
Ниобий	–	8500	0,268	47,7	20,94
Олово	0	7250	0,222	66	41,10
	200	7800	0,239	57,9	31,16
Палладий	–	12000	0,239	70,9	27,70
Платина (99,99%)	0	21600	0,130	70,0	24,90
	400	22250	0,138	77,5	25,20
	1000	22800	0,146	89,3	26,78
Родий	–	12440	0,244	89,5	29,50
Ртуть	20	13546	0,138	7,9	4,23
	500	12480	0,134	13,2	7,86
Рубидий	–	1540	0,335	46,5	90,10
Свинец (99,9%)	0	11400	0,126	35	24,40
	300	10800	0,138	30,2	20,30
Серебро (99,9 %)	0	10400	0,234	410	168,50
	300	10500	0,243	361	141,80
	500	10550	0,247	366	140,00

Материал	$T$ , °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , кДж/(кг·К)	$\chi$ , Вт/(м·К)	$a \times 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
Сталь марки 15 (закаленная)	0	7841	0,456	50,2	14,04
		7682	0,682	42,8	8,16
То же, марки 35	500	7803	0,444	40,0	11,54
		0	7667	0,666	40,6
То же, марки 45	500	7794	0,561	32,0	7,32
		0	7767	0,662	38,0
То же, марки У8	500	7769	0,444	23,3	6,75
		0	7677	0,661	37,6
Сурьма	500	6690	0,205	18,84	13,70
Титан	–	4500	0,528	15,1	6,36
		200	4500	0,544	15,7
Титан	300	4500	0,586	16,9	6,41
		500	4500	0,616	18,0
Углерод (графит)	–	1700	0,670	174	153,00
		2300	0,670	116,3	75,50
Уран	–	19100	0,117	19,19	8,58
Хром	–	7150	0,448	69,8	21,80
Чугун	500	7200	0,586	29,0	6,87
Цинк (99,993%)	0	7150	0,385	112,8	41,00
		400	8650	0,419	95,2

Литература к приложению Г

- Г.1 *Брамсон М. А.* Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел / М. А. Брамсон. – М. : Наука, 1964. – 318 с.
- Г.2 *Блох А. Г.* Теплообмен излучением : Справочник / А. Г. Блох, Ю. А. Журавлев, Л. Н. Рыжков. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
- Г.3 *Пехович А. И.* Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Д. : Энергия, 1976. – 352 с.
- Г.4 *Лыков А. В.* Теоретические основы строительной теплофизики / А. В. Лыков. – Минск : Изд-во АН БССР, 1961. – 519 с.
- Г.5 *Каганер М. Г.* Теплообмен в низкотемпературных конструкциях / М. Г. Каганер. – М. : Энергия. 1979. – 256 с.

**Научное издание**

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ**

**Грищенко** Татьяна Георгиевна, **Декуша** Леонид Васильевич,  
**Воробьев** Леонид Иосифович, **Бурова** Зинаида Андреевна,  
**Ковтун** Светлана Ивановна, **Декуша** Олег Леонидович

**ТЕПЛОМЕТРИЯ: теория, метрология, практика**  
(монография в трех книгах)

**КНИГА 3. Теплометрическая аппаратура  
для решения прикладных задач. Том 1**

*Под редакцией д.т.н. Т. Г. Грищенко*

Подп. к печати 23.10.2018.

Формат 60x80/16. Бумага офс. № 1.

Услов. печатн. лист. 24,6. Уч. – изд. лист. 26,5

Тираж 300 экз.

---

Отпечатано в ТОВ «Наш формат»  
01042, г. Киев, пр. Мира, 7, оф.45