

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ**

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

Под редакцией д.т.н. Т.Г. Грищенко

**КНИГА 1
Методы и средства измерения
теплового потока**

Киев 2017

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.,
Национальный научный центр «Институт метрологии»

*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-р техн. наук Т.Г. Грищенко.

ISBN 978-966-02-8199-8

Кн. 1: Методы и средства измерения теплового потока - К.: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2017. – 438 с.

ISBN 978-966-02-8201-8

В книге 1 монографии дан краткий обзор методов получения информации о тепловом потоке и различных типов первичных преобразователей теплового потока; рассмотрены методические погрешности измерения теплового потока для различных условий теплообмена с окружающей средой и случаев взаимного расположения преобразователя и объекта контроля при вариации их теплофизических характеристик и геометрических параметров; представлены конструктивные особенности и характеристики термоэлектрических преобразователей теплового потока вида вспомогательной стенки, предназначенных для измерения стационарного и нестационарного теплового потока в широких динамических диапазонах температуры и теплового потока.

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

© Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша, Л.И. Воробьев,
З.А. Бурова, С.И. Ковтун, О.Л. Декуша, 2017

ISBN 978-966-02-8199-8

ISBN 978-966-02-8201-8

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данная монография посвящается памяти выдающегося ученого в области теплофизики и теплофизического приборостроения чл.-корр. АН УССР Геращенко Олега Аркадиевича (1925 – 1992 гг.), с именем которого связано начало нового направления в науке – теплотрии [1*].

До 1955 г. в Украине не проводили комплексные научные исследования, направленные на определение тепловых величин. Заслуга О.А. Геращенко состоит в организации таких исследований, которые стали базой создания в Украине и бывшем СССР научной школы теплотрии и теплофизического приборостроения. Отправной точкой научных исследований О.А. Геращенко было твердое убеждение, что тепловые процессы характеризуются значениями и распределением не только температуры, но и теплового потока, который также является неотъемлемым параметром теплообмена. Занимаясь в 1949 – 1958 гг. вопросами теплопереноса в элементах силовых установок и разрабатывая оригинальные методики моделирования тепловых процессов, он пришел к выводу о необходимости кардинальных решений в области измерения теплового потока. При этом первые теоретические решения и экспериментальные результаты были получены к 1956 г. В 1957 г. его приоритет в области локальных тепловых измерений был подтвержден Комитетом СССР по делам изобретений выдачей удостоверения о регистрации преобразователя теплового потока вида вспомогательной стенки [2*]. Результаты, полученные в 50-е – 60-е годы, систематизированы в трудах О.А. Геращенко по теплоточным и температурным измерениям [3*–6*], ставших к настоящему времени библиографической редкостью.

По сравнению с ними в предлагаемой монографии обновлена обзорная часть по методам и средствам измерения

теплового потока и его поверхностной плотности, существенно дополнена информация о первичных преобразователях теплового потока, главным образом, термоэлектрических вида вспомогательной стенки; расширена информация о методах и средствах метрологического обеспечения теплоточных измерений, а также систематизированы результаты теоретических исследований и разработок прикладного характера, выполненных в отделе теплотрии Института технической теплофизики НАН Украины (далее – ИТТФ) за период с 1970 г. по настоящее время.

Монография, согласно трем основополагающим составляющим измерений физических величин: теории, метрологии и практике, – представлена тремя книгами:

– **Книга 1** «Методы и средства измерения теплового потока»;

– **Книга 2** «Метрологическое обеспечение теплоточных измерений»;

– **Книга 3** «Теплотрическая аппаратура для решения прикладных задач».

Литература к предисловию

1* *О. А. Геращенко* – засновник школи теплотрії (до 80-річчя з дня народження) : Матеріали наукових читань з циклу «Видатні конструктори України» / Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». Держ. політехн. музей. – К. : «ЕКМО», 2005. – 103 с.

2* Создание датчика теплового потока : Удостоверение о регистрации с приоритетом № 5552 от 5 февраля 1957 / *О. А. Геращенко*. – Комитет по делам изобретений при СМ СССР. – 1957.

3* *Геращенко О. А.* Техника теплотехнического эксперимента / *О. А. Геращенко, В. Г. Федоров*. – К. : Наукова думка, 1964. – 164 с.

4* *Геращенко О. А.* Тепловые и температурные измерения: справочник / О. А. Геращенко, В. Г. Федоров. – К. : Наукова думка, 1965. – 304 с.

5* *Геращенко О. А.* Основы теплотметрии / Олег Аркадьевич Геращенко. – К. : Наукова думка, 1971. – 192 с.

6* *Геращенко О. А.* Температурные измерения : справочник / О. А. Геращенко, А. Н. Гордов, А. К. Еремина, В. И. Лах [и др.]. – Киев : Наукова думка, 1989. – 704 с.

Выражаем глубокую благодарность уважаемым рецензентам, профессорам Б.И. Стадныку и Л.А. Назаренко за конструктивную критику и ценные советы при обсуждении и редактировании рукописи 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.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
Условные обозначения и размерность физических величин, индексы и основные сокращения.....	10
ВВЕДЕНИЕ	13
ГЛАВА 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	17
1.1 Основные понятия и определения в теплотрии	17
1.2 Основные виды теплообмена и теплового потока.....	19
Литература к главе 1.....	30
ГЛАВА 2 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ТЕПЛОВОМ ПОТОКЕ (краткая история развития).....	31
2.1 Аналитические методы	31
2.2 Экспериментальные методы и устройства для измерения теплового потока.....	42
2.2.1 Энтальпийный метод	44
2.2.2 Термографические методы: эвапорография и тепловидение.....	47
2.2.3 Дилатометрический метод	55
2.2.4 Пневматические методы.....	57
2.2.5 Оптические методы.....	61
2.2.6 Фото- и радиометрические методы	62
2.2.7 Электротермический метод	64
2.2.8 Электрометрические методы	67
2.3 Первичные преобразователи теплового потока (ПТП).....	78
2.3.1 ПТП с поперечным растеканием теплового потока.....	79

2.3.2	ПТП вида вспомогательной стенки	81	
2.3.3	Серийно выпускаемые ПТП	106	
	Литература к главе 2	112	
ГЛАВА 3 МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОвого ПОТОКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ВИДА ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ СТЕНКИ.....			127
3.1	Оценка искажений при измерении теплового потока с применением ПТП вида вспомогательной стенки	127	
3.2	ПТП на поверхности изотермической металлической пластины	138	
3.3	ПТП в изотермической металлической пластине заподлицо с ее поверхностью	148	
3.4	ПТП в полуограниченном массиве из высокотеплопроводного материала заподлицо с его поверхностью.....	151	
3.5	ПТП внутри неограниченного массива	155	
3.6	ПТП на поверхности полуограниченного массива.....	161	
3.7	ПТП на конвективно охлаждаемой поверхности неограниченной пластины	169	
3.8	ПТП на поверхности неограниченной пластины, конвективно охлаждаемой с двух сторон	183	
	Литература к главе 3.....	206	
ГЛАВА 4 ПТП ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ В УСЛОВИЯХ СТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОвого СОСТОЯНИЯ			210
4.1	Характеристики и параметры стандартного биметаллического ПТП и расчетные методики.....	210	
4.1.1	Методика расчета оптимизированной статической функции преобразования стандартного ПТП	214	

4.1.2	Температурные зависимости характеристик компонентов и функции преобразования ПТП	224
4.1.3	Временная стабильность ПТП	238
4.1.4	Теплопроводность и тепловое сопротивление стандартного ПТП	246
4.1.5	Теплоемкость стандартного батарейного биметаллического ПТП	256
4.2	ПТП с тепловыми шунтами и температуро-выравнивающими наружными покрытиями	261
4.2.1	Варианты конструкций ПТП с тепловыми шунтами	262
4.2.2	Тепловое сопротивление ПТП с шунтами и покрытиями	266
4.2.3	Чувствительность ПТП с тепловыми шунтами	272
4.3	Полиметаллические термоэлектрические ПТП ...	277
4.4	Биспиральные термоэлектрические ПТП	285
4.5	Стандартные ПТП специального исполнения	293
	Литература к главе 4	300
ГЛАВА 5 ПТП ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССАХ		305
5.1	Временные характеристики ПТП и приемников теплового излучения	306
5.2	Малоинерционные ПТП вида вспомогательной стенки	311
5.3	Измерение нестационарного теплового потока с применением специальных измерительных устройств и методик обработки экспериментальных данных	330
5.4	Особенности измерения нестационарного теплового потока преобразователями с корректирующими термобатареями (ПТП _{КБ})	339

5.5 Общие требования к структуре и программному обеспечению многоканальной измерительной системы на базе ПТП _{КБ}	355
5.6 Преобразователи ПТП _{КБ} для измерительной системы ракеты-носителя «ДНЕПР»	361
Литература к главе 5	373
ПРИЛОЖЕНИЕ А Термоэлектрические преобразователи теплового потока вида вспомогательной стенки	381
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Номограммы для определения оптимальных параметров ПТП	422
ПРИЛОЖЕНИЕ В Обобщенные номограммы для проектирования различных типов ПТП	431

Условные обозначения и размерность физических величин, индексы и основные сокращения

Условные обозначения:

- a* – поглощательная способность;
– коэффициент температуропроводности ($\text{м}^2/\text{с}$)
- A* – площадь (м^2)
- C* – теплоемкость (Дж/К)
- c, c_p* – удельная теплоемкость (Дж/(К·кг) при постоянном объеме и Дж/(К·м³) – постоянном давлении)
- d* – пропускательная способность
- d, D* – диаметр (м; мм)
- E* – сигнал электрический (мВ; мкВ)
- f* – площадь сечения (м^2)
- h* – высота, толщина (м)
- I* – сила тока (А)
- K* – коэффициент преобразования (градуировочный коэффициент);
- K^{*}* – безразмерный критерий степени искажения температуры и теплового потока (* – верхний индекс «*T*» или «*q*»)
- k* – геометрический параметр ПТП
- L* – длина (м)
- m* – масса (кг)
- q* – поверхностная плотность теплового потока ($\text{Вт}/\text{м}^2$)
- Q* – количество теплоты (Дж)
- R* – сопротивление тепловое ($\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$)
- R_Э* – сопротивление электрическое (Ом)
- r* – радиус (м); отражательная способность
- r, z* – цилиндрические координаты (м)
- S* – чувствительность ПТП
- T* – температура (К или °С)
- U* – напряжение электрического тока (В)
- V* – скорость (м/с; м/час); объем (м^3)
- W* – количество энергии (Дж)
- x, y, z* – декартовы координаты (м)

α	– коэффициент теплообмена (Вт/(м ² ·К); – термоэлектрический коэффициент Зеебека (мВ/К)
Δ	– разность (приращение); погрешность абсолютная
δ	– погрешность относительная
ε	– степень черноты (коэффициент эмиссии)
λ	– длина волны (мкм)
Λ	– тепловая проводимость (Вт/(м ² ·К)
μ	– постоянная времени
ρ	– удельное электрическое сопротивление (Ом·м)
ρ, ζ	– безразмерные радиальная и продольная координаты
ϑ	– текущая температура в безразмерной форме
χ	– коэффициент теплопроводности, Вт/(К·м)
τ	– время (с; мин; час)
τ^*	– инерционность (с) (на уровне 0,63)
φ	– формпараметр ПТП
Φ	– тепловой поток (Вт; Дж/с)
ψ	– угол (в градусах или радианах); – угловой коэффициент

Индексы нижние:

<i>БОК</i>	– боковой	<i>ПРОШ</i>	– прошедший
<i>ВЕРХ</i>	– верхний	<i>ПТП</i>	– преобразователь теплового потока
<i>Ж</i>	– жидкость	<i>РАСС</i>	– рассеянный
<i>ИЗМ</i>	– измеренный	<i>РЕЗ</i>	– результирующий
<i>ИСХ</i>	– исходящий	<i>СОБ</i>	– собственный
<i>ЛОК</i>	– локальный	<i>СР</i>	– среднеинтегральный, средний
<i>О</i>	– начальный (неис- каженный, дей- ствительный)	<i>ТЭ</i>	– термоэлемент
<i>ОК</i>	– объект контроля	<i>УСТ</i>	– установившийся
<i>ОС</i>	– окружающая среда	α	– конвективный
<i>ОСЛ</i>	– ослабленный	q	– плотность теплового потока
<i>ОТР</i>	– отраженный	Φ	– тепловой поток
<i>ПАД</i>	– падающий	Σ	– суммарный
<i>ПОВ</i>	– поверхность	t	– интегральный
<i>ПОГЛ</i>	– поглощенный	h	– полусферический
<i>ПРОД</i>	– продольный		

Индексы верхние:

<i>АД</i>	– адиабатный	<i>Ш</i>	– шунт
<i>АП</i>	– аппроксимационный	<i>q</i>	– плотность теплового потока
<i>И</i>	– изотетрмический	<i>Φ</i>	– тепловой поток
<i>T</i>	– температура		

Сокращения:

АЧТ	– абсолютно черное тело
АЧХ	– амплитудно-частотная характеристика
ИК	– инфракрасный
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	– терморрадиационная характеристика
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).

ВВЕДЕНИЕ

Жизнедеятельность человека протекает во времени и пространстве и связана с окружающей средой. Что касается времени, то оно традиционно измеряется часами. Часы – это сейчас настолько привычный прибор, что на бытовом уровне его зачастую забывают относить к средствам измерений. Для определения параметров пространства в последние годы появились уникальные измерительные приборы, которые позволяют с помощью спутниковых навигационных систем найти значения координат точки пространства, в которой находится объект, а при необходимости – измерить расстояние, на какое он перемещается.

Что касается окружающей среды и тел, то их взаимодействие проявляется через физические явления и сопровождается превращением энергии, которое является важнейшим проявлением существования материального мира. Полнота информации в этой области определяет уровень познаний от макрокосмоса до элементарных частиц. Практически во всех областях техники, в экспериментальной и теоретической физике, физической химии, космических исследованиях, биологии и медицине – везде превращение энергии играет первостепенную роль.

Широкое распространение процессов теплообмена в различных сферах человеческой деятельности привело к необходимости рационального контроля их протекания. Поскольку любое физическое явление имеет две стороны: количественную и качественную, то контроль переноса энергии в конкретном физическом явлении включает в себя, как правило, измерение двух величин. Так при исследовании переноса электрической энергии информацию о процессе получают путем измерения электрического напряжения и силы тока, или напряжения и электрического сопротивления. Аналогично контроль процессов теплообмена базируется на измерении двух величин: температуры и теплового потока.

Измерения температуры традиционно хорошо обеспечены аппаратурой и метрологией, чего нельзя сказать о тепловом потоке и его плотности. На ранних этапах развития древние ученые (Архимед, Эратосфен, Евдокс, Аристотель) не видели никаких теплофизических проблем. Представляется удивительным, что осязательно доступные тепловые явления оказались вне внимания великих древних. Не замечать их они не могли, ибо осязание у них было не хуже, чем у нас. Единственно правдоподобное объяснение сводится к тому, что они не смогли найти отличия между количественной и качественной сторонами тепловых явлений. Первичная ясность в этом вопросе возникла в конце 16-го века, когда Галилей установил, что интенсивность тепловых проявлений носит неаддитивный, то есть качественный характер. Он был первым, кто составил представление о температуре как степени нагретости тела, которым пользуются в различных модификациях и поныне. Профессиональный подход в термометрии наметился в начале 18-го века, когда Фаренгейтом была создана воспроизводимая температурная шкала, в количественных тепловых измерениях проявился в начале 19-го века в калориметрии (Лавуазье, Лаплас).

Профессионализм в термометрии по настоящему возник только в 20-м веке. Таким образом, можно сказать, что достаточно долго теплопоточные измерения совмещали с температурными благодаря простоте и доступности последних. Однако разработки средств измерения теплового потока и достигнутые аппаратурные и методические успехи способствовали появлению новых прикладных задач, решение которых ставило новые требования к аппаратуре и теории. Цепная реакция такого развития привела в 60-е годы прошлого века к образованию самостоятельной области измерения – термометрии [5*].

Термометрические средства измерительной техники (далее – СИТ) применяют не только в познавательных целях, но и для измерений при контроле и регулировании тепловых

процессов в самых различных областях деятельности человека. Области познания, для которых актуальны теплоточные измерения, чрезвычайно разнообразны. С помощью теплотрической аппаратуры могут быть решены задачи, неразрешимые или трудно решаемые другими средствами, например:

- измерение теплового потока локального (в пространстве и времени) и интегрального с целью определения потерь теплоты от теплотрасс, зданий и сооружений, технологических устройств и аппаратов;
- измерение теплофизических и терморadiационных характеристик (далее – ТФХ и ТРХ) с целью исследования эффективности теплозащитных и теплопередающих свойств материалов, одежды, ограждающих конструкций зданий и сооружений, холодильного оборудования, хранилищ и прочее;
- измерение тепловыделения (или теплопоглощения) технических и биологических объектов.

При диагностике, управлении и оптимизации пользуются тепловыми параметрами многочисленных тепловых процессов и теплотехнических систем, среди которых значительное место занимает тепловой поток, ставший сегодня таким же информативным параметром, как и температура, давление, расход и пр. Именно благодаря возможности выполнять такие измерения и непрерывному росту спроса на простые и надежные теплотрические СИТ, теплотрия, представляющая собой совокупность методов и средств получения экспериментальной информации о тепловом потоке, стала самостоятельным научным направлением экспериментальной теплофизики.

Книга 1 монографии состоит из пяти глав.

В главе 1 даны основные понятия и определения, используемые в теплотрии, рассмотрены основные виды теплообмена и соответствующего теплового потока, приведены расчетные формулы.

В главе 2 представлен краткий обзор методов измерения теплового потока и его поверхностной плотности, а также соответствующих СИТ, включая первичные измерительные преобразователи теплового потока.

В главе 3 изложены результаты теоретических исследований методических погрешностей измерения теплового потока, обусловленных возможными искажениями температурного поля и теплового потока как в объекте контроля, так и внутри ПТП для различных условий теплообмена с окружающей средой (далее – ОС) и взаимного расположения преобразователя и объекта. Установлены функции зависимости измеренных преобразователем значений теплового потока от геометрических параметров ПТП, теплофизических свойств ПТП и объекта контроля (далее – ОК) и условий теплообмена ОК с ОС.

В главе 4 приведены характеристики, параметры и методики их расчета для стандартного термоэлектрического биметаллического ПТП и нестандартных термоэлектрических ПТП вида вспомогательной стенки: с тепловыми шунтами и температуровыравнивающими покрытиями, полиметаллических, биспиральных и специального исполнения, предназначенных для измерений в стационарном тепловом состоянии.

В главе 5 проанализированы временные характеристики ПТП и приемников теплового излучения (далее – ПТИ) и состояние измерений теплового потока в нестационарных тепловых процессах, описан ПТП вида вспомогательной стенки с корректирующей (-ими) термобатареей (-ями) (далее – ПТП_{КБ}) с существенно уменьшенной постоянной времени, а также сформулированы общие требования к структуре и программному обеспечению многоканальной измерительной системы на базе ПТП_{КБ}.

ГЛАВА 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Основные понятия и определения в теплотрии

Теплотрия, объединяя методы, СИТ и методики получения информации о теплоте, тепловом потоке и его плотности, поверхностной или линейной, стала к настоящему времени таким же фундаментальным методом экспериментальной физики, как термо-, электро-, магнитометрия, ядерная дозиметрия и спектроскопия.

Теплота как тепловое движение представляет собой беспорядочное перемещение образующих тело (систему тел) частиц (молекул, атомов, электронов, фотонов и т. п.). Она является одной из форм обмена энергией между телами, другой формой которого является работа. При обмене энергией в форме теплоты, то есть при *теплообмене*, часть внутренней энергии тела, обладающего более высокой температурой, передается телам и окружающему пространству с меньшей температурой. Эту часть внутренней энергии тела называют количеством теплоты (Q). Элементарное количество теплоты (dQ), переданной телу, равно произведению теплоемкости (C) тела в рассматриваемом процессе на соответствующее малое изменение температуры (dT) тела:

$$dQ = C \cdot dT, \quad (1.1)$$

то есть условием распространения теплоты в изотропной¹⁾ среде является наличие разности температуры. В общем случае процесс передачи теплоты в теле (системе тел) сопровождается изменением температурного поля²⁾ как в пространстве, так и во времени, математическим описанием которого является функция, зависящая от пространственных координат и времени: $T = f(x, y, z, \tau)$.

¹⁾ **Изотропия** – независимость свойств вещества (тела) от направления.

²⁾ **Температурное поле** – совокупность значений температуры во всех точках изучаемого объекта для каждого момента времени.

В общем случае температурное поле является неустановившимся и его называют нестационарным. Если температура есть функция только пространственных координат, поле называют стационарным. Температурное поле – это совокупность изотермических поверхностей, каждая из которых является геометрическим местом точек, значения температуры в которых одинаковые. Так как в одной и той же точке не может быть одновременно двух различных значений температуры, изотермические поверхности не пересекаются. Все они замыкаются на себя или заканчиваются на граничных поверхностях тела. Изменение температуры среды наблюдается лишь в направлениях, пересекающих изотермические поверхности, причем наибольшее изменение температуры происходит в направлении нормали к изотермической поверхности.

Вектор, направленный по нормали к изотерме в сторону возрастания температуры и численно равный производной от температуры по нормали, называется *градиентом температуры* ($grad T$), записываемый в виде:

$$grad T = \vec{n}_0 \cdot dT/dn, \quad (1.2)$$

где \vec{n}_0 – единичный вектор нормали к изотермической поверхности.

Физическую величину, характеризующую поток энергии, переносимой в процессе теплообмена через поверхность тела в единицу времени, называют *тепловым потоком* (Φ), который численно равен отношению количества теплоты к интервалу времени, за который этот перенос осуществлен:

$$\Phi = dQ/d\tau, \quad (1.3)$$

причем $1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$.

Отношение теплового потока, проходящего через поверхность, расположенную перпендикулярно направлению переноса теплоты, к площади (A) этой поверхности, называют *поверхностной плотностью теплового потока* (q):

$$q = \Phi / A. \quad (1.4)$$

Отношение теплового потока к длине (L), что принято при исследовании, например, трубных конструкций, называют *линейной плотностью* теплового потока (q_L):

$$q_L = \Phi / L. \quad (1.5)$$

1.2 Основные виды теплообмена и теплового потока

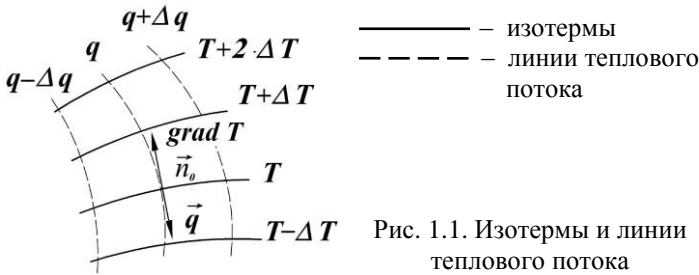
Перенос теплоты в пространстве происходит тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением, а их одновременное проявление называют сложным теплообменом [1.1–1.9]. В связи с этим различают, соответственно, кондуктивный, конвективный, радиационный и сложный тепловой поток.

Кондуктивный тепловой поток – это мощность энергии, передаваемой через изотермическую поверхность за счет теплопроводности. Механизм теплопроводности универсален, имеет место в твердых телах, жидкостях и газах, так как осуществляется на молекулярном уровне посредством механических столкновений и энергетического взаимодействия хаотически движущихся микрочастиц (молекул, атомов, электронов) без их направленного перемещения внутри тела. Процесс теплопроводности неразрывно связан с распределением температуры внутри тела, то есть с температурным полем и градиентом температуры. При малом относительном изменении температуры на расстоянии свободного пробега частиц выполняется феноменологический закон Фурье [1.10]: плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры

$$q = -\chi \cdot \text{grad } T, \quad (1.6)$$

где χ – коэффициент пропорциональности, который характеризует способность изотропного тела передавать теплоту, называемый *коэффициентом теплопроводности*.

Плотность теплового потока есть вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности, при этом положительное направление совпадает с направлением убывания температуры, так как теплота всегда передается от более нагретых частей тела менее нагретым. Векторы плотности теплового потока и градиента температуры, как показано на рисунке 1.1, лежат на одной прямой, но направлены в противоположные стороны, что и объясняет наличие знака «минус» в правой части уравнения (1.6).



Линии, касательные к которым совпадают с направлением вектора q , называются линиями теплового потока.

Если градиент температуры для разных точек изотермической поверхности различный, то количество теплоты через всю изотермическую поверхность в единицу времени, т. е. тепловой поток, находится интегрированием:

$$\Phi = \int_A q \cdot dA = - \int_A \chi \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \cdot dA, \quad (1.7)$$

где dA – площадь элемента изотермической поверхности.

Полное количество теплоты, прошедшее за время τ через изотермическую поверхность A , равно:

$$Q = - \int_0^\tau \Phi dt = - \int_0^\tau \int_A \chi \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \cdot dA \cdot dt. \quad (1.8)$$

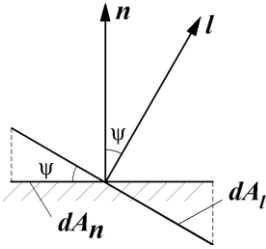


Рис. 1.2. Иллюстрация к расчету теплового потока

Исходя из формулы (1.7) с учетом интеграла (1.8), плотность теплового потока в направлении l (q_l), перпендикулярном плоскости dA_l , расположенной под углом ψ к изотермической поверхности dA_n , как показано на рисунке 1.2 [1.1], равна:

$$q_l = q \cdot \cos \psi = \frac{dQ}{d\tau} \cdot \frac{1}{dA_n} \cdot \cos \psi = \frac{dQ}{d\tau} \cdot \frac{1}{dA_l}, \quad (1.9)$$

откуда может быть рассчитано общее количество теплоты, проходящей через элементарную ячейку dA_l :

$$Q = - \int_0^\tau \int_{A_l} \chi \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \cdot dA_l \cdot d\tau. \quad (1.10)$$

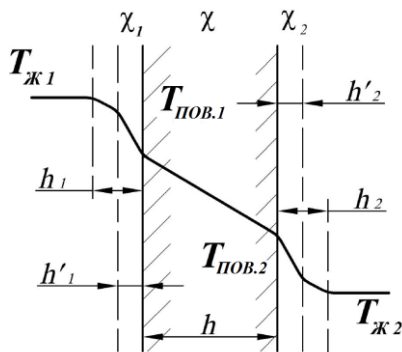
Из уравнения (1.9) следует, что максимальной является плотность теплового потока, рассчитываемая вдоль нормали к изотермической поверхности. Если поток спроецировать на координатные оси Q_x, Q_y, Q_z , то $q = \vec{i} \cdot q_x + \vec{j} \cdot q_y + \vec{k} \cdot q_z$, где \vec{i} , \vec{j} и \vec{k} – единичные ортогональные векторы; q_x, q_y, q_z – компоненты вектора плотности теплового потока, равные $q_x = -\chi \cdot (\text{grad } T)_x$, $q_y = -\chi \cdot (\text{grad } T)_y$, $q_z = -\chi \cdot (\text{grad } T)_z$.

Таким образом, плотность теплового потока – это вектор, любая компонента которого численно равна количеству теплоты, передаваемой в единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярной направлению (l) выбранной компоненты [1.7].

Конвективный теплообмен – это перенос теплоты в жидкостях и газах, в которых молекулы не занимают фиксированного положения, а постоянно его меняют. Перенос теплоты осуществляется не только теплопроводностью, но еще и вследствие макроскопического движения, при котором теп-

лота передается от одной точки среды к другой вместе с массой вещества. Таким образом, **конвективный тепловой поток** – мощность энергии, передаваемой за счет конвекции [1.1 – 1.4, 1.9].

В инженерной практике чаще всего приходится иметь дело со стенками, разделяющими жидкости и газы. В этом случае известны значения температуры, например, $T_{Ж_1}$ и $T_{Ж_2}$ жидкостей по обе стороны стенки и неизвестные $T_{ПОВ.1}$ и $T_{ПОВ.2}$ на ее поверхностях. На рисунке 1.3 для такой ситуации показано распределение температуры [1.2].



$T_{Ж,i}, T_{ПОВ,i}$ – температура жидкости и стенки ,

χ, χ_1, χ_2 – коэффициент теплопроводности материала стенки и жидкостей по обе стороны от стенки,

h – толщина стенки,

$\Delta h'_i$ – толщина пограничного слоя

h_i – толщина слоя жидкости, за пределами которого температура имеет установившиеся значения

Рис. 1.3. Характер распределения температуры при теплопередаче от жидкости «1» к жидкости «2» через плоскую стенку

Температурный градиент значителен лишь в сравнительно тонком слое у самой поверхности стенки, тогда как на больших расстояниях от нее, как правило, весьма малые разности температуры. Для простоты эту температурную кривую заменяют ломаной линией. Объяснить это явление можно, предположив, что тонкие пограничные слои жидкости (толщиной h'_1 и h'_2) связаны со стенкой, тогда как за пределами этих слоев в результате хаотических движений в жидкости значения температуры одинаковые.

Это слишком упрощенная картина гораздо более сложного процесса, однако она объясняет главное: в пограничном слое передача теплоты осуществляется путем теплопроводности, как в твердых телах. Поэтому температурный градиент в слое изображается прямой и передача теплоты описывается уравнением

$$\Phi = \frac{\chi}{h'_i} \cdot A \cdot (T_{ж,i} - T_{пов,i}), \quad i = 1, 2. \quad (1.11)$$

Значение теплового потока Φ можно определить, зная толщину слоев жидкости h'_i . Последняя, однако, в значительной степени зависит от характеристик движения жидкости, например, от скорости движения вдоль стенки, формы самой стенки, состояния ее поверхности и других подобных факторов. На практике расчеты обычно выполняют, пользуясь отношением, χ/h'_i которое называется **коэффициентом теплообмена** и обозначается, как правило, буквой α . Математическая запись процесса конвективной теплопередачи отражает закон Ньютона-Рихмана для плотности теплового потока и имеет вид:

$$q = \alpha \cdot (T_{ж} - T_{пов,i}). \quad (1.12)$$

Сначала считали, что коэффициент теплообмена α характеризует свойство текущей жидкости или газа. Позже был установлен более сложный характер этой величины. В общем случае коэффициент теплообмена может изменяться вдоль поверхности и поэтому различают средний по поверхности и локальный коэффициенты [1.4, 1.7].

Процессы теплообмена связаны с условиями движения жидкости, при этом различают два основных режима: ламинарный и турбулентный. Режим течения рабочей жидкости имеет очень большое значение, так как им определяется механизм переноса теплоты. Экспериментально установлено, что для обоих режимов, ламинарного и турбулентного, вблизи самой поверхности справедлив закон Фурье и применима

формула (1.6), где $grad T$ – градиент температуры в слое жидкости, прилегающем к поверхности твердого тела. Процесс теплопереноса конвекцией является весьма сложным процессом и более подробно описан в работах [1.1 – 1.3, 1.7].

Радиационный тепловой поток – это мощность энергии, передаваемой тепловым излучением, которое представляет собой процесс переноса энергии путем превращений внутренней энергии излучающего тела последовательно: в энергию излучения, энергию переноса излучения и его поглощения веществом облучаемого тела [1.5 – 1.9]. Особенностью этого вида теплопереноса является то, что процесс излучения связан с возбуждением молекул внутри вещества, в результате чего возникают излучательные переходы электронов. Отличается, например, от люминесценции, которая возбуждается внешним источником энергии.

Выделяющаяся при тепловом излучении энергия уносится квазичастицами – квантами (фотонами) электромагнитного поля. Освобожденное в форме излучения количество энергии (W) характеризуется длиной волны λ :

$$W = h \cdot C / \lambda, \quad (1.13)$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $C \approx 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света; λ – длина волны. Заметим, что длина волны испускаемого излучения обратно пропорциональна энергии, выделившейся при переходе.

Если в веществе происходят все возможные переходы (тепловое возбуждение молекул), то каждый атом излучает определенную энергию, а в совокупности энергетические уровни принимают все возможные значения. Распределение энергии по длинам волн в таком случае непрерывное и спектр испускаемого излучения – непрерывный.

В некоторых средах разрешенными оказываются только вполне определенные переходы (квантовые переходы электрона внутри атома). Излучение происходит тогда на дискретных длинах волн, а *спектр испускаемого излучения* – *линейчатый*. Явление поглощения излучения веществом является

обратным процессом и может быть более или менее селективным на длинах волн, присущих рассматриваемой среде. Спектр излучения произвольно делят на области по признаку функциональных особенностей источников или приемников излучения. Область теплового излучения в общем спектре электромагнитных колебаний показана на рисунке 1.4.

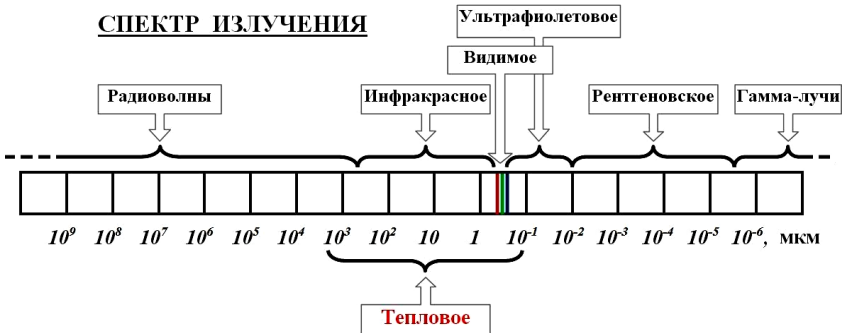


Рис. 1.4. Расположение области теплового излучения в общем спектре электромагнитных колебаний

Тепловое излучение может испускаться по всем длинам волн от самых коротких до предельно длинных. Однако, при встречающихся в технике значениях температуры практически надо принимать во внимание лишь то тепловое излучение, которое приходится, главным образом, на инфракрасную часть спектра.

Инфракрасное излучение могут давать газы, пары, жидкие и твердые тела. Это излучение возникает при вращательных и колебательных движениях молекул. Так как подобное движение происходит при нагревании, то любое тело, имеющее температуру выше абсолютного нуля, является источником инфракрасного излучения. Что касается видимой полосы спектра ($0,4 < \lambda < 0,76$, мкм), то ей отвечает обычно несущественное количество испускаемой энергии. Только при значениях температуры порядка тысяч Кельвинов тепловые эффекты излучения в этих двух областях становятся сопостави-

мыми. Что касается еще более коротковолнового излучения (ультрафиолетового, рентгеновского, гамма-лучей), то для его возбуждения при обычной температуре приходится прибегать к особым средствам, как и для возбуждения радиоволн, примыкающих к инфракрасным лучам со стороны больших значений длины волн.

Для измерения теплового излучения применяют энергетические единицы. Количество энергии, излучаемой поверхностью в единицу времени по всевозможным направлениям полупространства в узком интервале длины волн (от λ до $\lambda + d\lambda$), называют **монохроматическим** (спектральным или однородным) **поток**ом излучения и обозначают Φ_λ .

Суммарное излучение в единицу времени с поверхности тела по всем длинам волн спектра называют **интегральным** (Φ_t) или (Φ_Σ) **полным** **поток**ом теплового излучения.

Поток теплового излучения в зависимости от физического процесса взаимодействия излучения и вещества имеет такие составляющие [1.8]:

- $\Phi_{ПАД}$ – падающий поток, то есть пришедший со всех направлений на поверхность облучаемого тела;

- $\Phi_{СОБ}$ – собственный поток, то есть излученный телом по всем направлениям, обусловленный отличной от термодинамического нуля собственной температурой и зависящий от излучательной способности поверхности тела. Плотность потока собственного теплового излучения вычисляют по формуле:

$$q_{СОБ} = \sigma \cdot \varepsilon_{t,h,ПОВ} \cdot T_{ПОВ}^4, \quad (1.14)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана;

$\varepsilon_{t,h,ПОВ}$ – интегральная полусферическая степень черноты (или излучательная способность) поверхности тела, являющаяся безразмерной характеристикой, равной отношению интегральных излучательных способностей данного и абсолютно черного тела (далее – АЧТ) при одинаковой температуре;

• Φ_{OTR} – отраженный поток, то есть отраженный поверхностью тела назад по всем направлениям. Его плотность вычисляют по формуле:

$$q_{OTR} = r \cdot q_{ПАД}, \quad (1.15)$$

где r – отражательная способность поверхности облучаемого тела (или коэффициент отражения), являющаяся безразмерной характеристикой;

• $\Phi_{ПОГЛ}$ – поглощенный поток, то есть перешедший из формы излучения в форму теплового движения атомов и молекул поглощающего (облучаемого) тела. Плотность потока теплового излучения, поглощенного поверхностью тела, вычисляют по формуле:

$$q_{ПОГЛ} = a \cdot q_{ПАД}, \quad (1.16)$$

где a – поглощательная способность (коэффициент поглощения), являющаяся безразмерной характеристикой поверхности облучаемого тела;

• $\Phi_{ПРОШ}$ – часть потока теплового излучения, прошедшая сквозь тело по всем направлениям. Его плотность вычисляется по формуле:

$$q_{ПРОШ} = d \cdot q_{ПАД}, \quad (1.17)$$

где d – пропускательная способность облучаемого тела;

• $\Phi_{ИСХ}$ – исходящий тепловой поток, равный сумме собственного, отраженного и прошедшего теплового излучения. Его плотность вычисляют по формуле:

$$q_{ИСХ} = q_{СОБ} + q_{OTR} + q_{ПРОШ}; \quad (1.18)$$

• $\Phi_{РЕЗ}$ – результирующий тепловой поток, равный разности поглощенного и собственного теплового излучения, то есть поток, остающийся в теле и идущий на изменение его внутренней энергии в результате процессов поглощения и испускания. Его плотность вычисляют по формуле:

$$q_{РЕЗ} = q_{ПОГЛ} - q_{СОБ}, \quad (1.19)$$

которая с учетом формул (1.14) и (1.16) принимает вид:

$$q_{РЕЗ} = a \cdot q_{ПАД} - \sigma \cdot \varepsilon_{t,h,ПОВ} \cdot T_{ПОВ}^4; \quad (1.20)$$

• $\Phi_{РАСС}$ – часть падающего (на объем или частицу) потока теплового излучения, рассеянная по всем направлениям; является аналогом отраженного потока применительно к излучению объемов и дискретных препятствий излучению.

• $\Phi_{ОСЛ}$ – ослабленный поток теплового излучения, равный сумме поглощенного и рассеянного излучений, плотность которого равна:

$$q_{ОСЛ} = q_{ПОГЛ} + q_{РАСС}; \quad (1.21)$$

или разности падающего и прошедшего:

$$q_{ОСЛ} = q_{ПАД} - q_{ПРОШ}; \quad (1.22)$$

является аналогом прошедшего потока применительно к частицам, волокнам, объемам и выражает общую потерю энергии;

• $\Phi_{ЭФ}$ – эффективный (суммарный), равный сумме собственного и отраженного потока теплового излучения. Его плотность равна:

$$q_{ЭФ} = q_{СОБ} + q_{ОТР}. \quad (1.23)$$

Указанные составляющие потока теплового излучения связаны между собой вытекающими из баланса теплового потока как формы закона сохранения энергии соотношениями (1.18) – (1.23), но основным уравнением теплового баланса является следующее:

$$q_{ПАД} = q_{ПОГЛ} + q_{ОТР} + q_{ПРОШ}. \quad (1.24)$$

Все балансные соотношения записаны для интегральной плотности потока теплового излучения, то есть для значений по всем направлениям в полупространстве – по поверхности, а в пространстве – по объему. В этих случаях поток излучения называют соответственно, полусферическим и сферическим. Делением обеих частей равенства (1.24) на $q_{ПАД}$, получается соотношение

$$a + r + d = 1, \quad (1.25)$$

где a , r и d характеризуют, соответственно, поглощательную, отражательную и пропускательную способности тела.

Тело, которое поглощает всю падающую энергию, (когда $a = 1$), называют абсолютно черным телом – АЧТ. Если соотношение $a = \Phi_{\text{ПОГЛ}} / \Phi_{\text{ПАД}}$ относится к монохроматическому излучению, то a называют спектральным коэффициентом поглощения и обозначают a_λ . Тела, для которых a_λ не зависит от длины волны, называют серыми. Для серых тел $a_\lambda = \text{const} < 1$. Если $r = 1$, то $a + d = 0$, и это означает, что вся падающая энергия полностью отражается. При этом, если отражение подчиняется законам геометрической оптики, поверхность тела называют зеркальной; если же отражение диффузное – абсолютно белой.

Если имеет место равенство $\Phi_{\text{ПРОШ}} = \Phi_{\text{ПАД}}$, то есть $d = 1$, тело называют прозрачным для теплового излучения. Тела, у которых $0 < d < 1$, называют полупрозрачными. Для большинства твердых и жидких тел интегральная пропускательная способность принимается равной нулю, так как практически они являются непрозрачными в инфракрасной области. В этом случае $a + r = 1$.

Тепловое излучение подчиняется целому ряду законов: Кирхгофа, Стефана-Больцмана, Планка, Вина, Рэлея-Джинса, Ламберта [1.1, 1.2, 1.5 – 1.8].

Количественные исследования процессов теплопереноса выполняют средствами теплотрии. Измерения теплового потока или его плотности имеют важное значение как для научных исследований, так и для производства. Теплотрические СИТ применяют не только в научных экспериментах, но и для диагностики и регулирования производственных и технологических процессов по тепловому параметру в самых различных отраслях экономики народного хозяйства. Надежный контроль теплового режима нередко является определяющим фактором на пути повышения качества продукции, снижения ее себестоимости, а также успешного внедрения мероприятий, направленных на решение многочисленных задач энергосбережения.

В связи с этим, теплотметрия является также разделом метрологии, обеспечивающим единство теплотпоточных измерений путем создания эталонов теплотвого потока и разработки методик аттестации и поверки рабочих преобразователей и средств измерения теплотвого потока или его плотности (см. Книгу 2).

Литература к главе 1

1.1 *Исаченко В. П.* Теплотпередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергия, 1965. – 424 с.

1.2 *Михеев М. А.* Основы теплотпередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.

1.3 *Жуковский В. С.* Основы теории теплотпередачи / В. С. Жуковский. – Л. : Энергия, 1969. – 224 с.

1.4 *Жукаускас А. А.* Конвективный перенос в теплотобменниках / А. А. Жукаускас. – М. : Наука, 1982. – 472 с.

1.5 *Адрианов В. Н.* Основы радиационного и сложного теплотобмена / В. Н. Адрианов. – М. : Энергия, 1972. – 464 с.

1.6 *Спэрроу Э. М.* Теплотобмен излучением / Э. М. Спэрроу, Р. Д. Сесс : перевод с англ. ; под ред. А. Г. Блоха. – Л. : Энергия, 1971. – 296 с.

1.7 *Кутателадзе С. С.* Основы теории теплотобмена / С. С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.

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

1.9 Теория и техника теплотфизического эксперимента : учебн. пособие для вузов / Ю. Ф. Гордышев, Ф. Н. Дресвянников, Н. С. Идиатуллин [и др.] : Под ред. В. К. Щукина. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 360 с.

1.10 *Fourier, Jean-Baptiste-Joseph* Théorie analytique de la chaleur / J. B. J. Fourier. – Paris : Firmin Didot Père et Fils, 1822.

ГЛАВА 2 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ТЕПЛОВОМ ПОТОКЕ (краткая история развития)

Области познания, для которых важна информация о тепловом потоке или его плотности, чрезвычайно разнообразны. Получают теплоточную информацию двумя путями. Первый, базирующийся на измерении температуры и численном решении соответствующего уравнения, описывающего исследуемый процесс, получил название **аналитического**. Знание температурного поля тела позволяет определить расчетным путем количество теплоты или тепловой поток. Именно это обстоятельство легло в основу различных аналитических методов определения теплового потока.

Другой путь, основанный на использовании специальных СИТ, является **экспериментальным**. Он оказался на практике более предпочтительным, так как при сравнительно простых методиках измерения дает возможность применения этих же средств не только в научных исследованиях, но при контроле и регулировании технологических процессов в реальном времени в самых различных областях экономики страны.

2.1 Аналитические методы

Применительно к явлениям теплообмена известное дифференциальное уравнение теплопроводности и краевые условия однозначно описывают температурное поле данного тела (системы тел) в произвольный момент времени [2.1–2.4].

В силу однозначности нахождения значений температуры и (или) плотности теплового потока в теле по известным (заданным) условиям на пограничных поверхностях тела составляет предмет прямых задач теплопроводности [2.5, 2.6]. По известным значениям температуры внутри тела в произ-

вольные моменты времени можно определить температуру и тепловой поток на границе тела, то есть необходимо решать задачи восстановления граничных условий второго рода по температурному полю исследуемого объекта, которые называют обратными задачами теплопроводности [2.7–2.10].

Обратные задачи теплопроводности представляют собой пример некорректно поставленных задач, а их решение и практическое применение сопряжены с определенными трудностями. В первую очередь это трудности разработки методов и алгоритмов, дающих возможность получить достаточно точные и устойчивые результаты. В основе физической природы неустойчивости обратной задачи лежит свойство процесса теплопроводности, состоящее в сглаживании и временном запаздывании характерных особенностей граничных функций по мере удаления внутрь тела от теплообменной поверхности. Если характерные изменения в граничных условиях проявляются слабо и сглаживаются при удалении от поверхности тела, то наоборот, наличие даже малых колебаний температуры внутренних точек тела должно соответствовать значительным временным изменениям на поверхности. В этом состоит особенность обратных задач – существенно большие ошибки решения по сравнению с ошибками входных данных [1.9].

Поскольку аппаратура, применяемая для измерения и регистрации входных данных, имеет точностные ограничения, то решение обратной задачи, соответствующее этим измеренным входным данным, может сильно отличаться от действительности и носить ярко выраженный колебательный характер, то есть методы решения обратных задач должны учитывать высокую чувствительность к различного рода погрешностям. Более подробно методы решения обратных задач теплопроводности рассмотрены в работах [2.8–2.10, 2.12].

В некоторых случаях решение обратной задачи позволяет определять граничные условия, в том числе и плотность теплового потока, проще, чем другими методами. Иногда ре-

шение обратной задачи теплопроводности является единственным источником сведений о неизвестных параметрах теплообмена. При этом используют различные способы решения уравнения теплопроводности: метод наименьших квадратов [2.11], аналогий [1.9], Бургграфа [2.12], последовательных интервалов [2.13], регулярного режима [2.14, 2.15], средней температуры или двух точек [2.16, 2.17], сплайн-идентификации [2.18, 2.19] и ряд других методов.

Для практической оценки эффективности аналитического пути решения проблемы рассмотрим пример определения плотности теплового потока на поверхности неограниченной пластины [2.20] из решения уравнения теплопроводности [2.1, 2.2]:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (2.1)$$

где a – коэффициент температуропроводности.

Граничные условия определены тем, что температура поверхности пластины $T(x_{\text{пов}}, \tau)$ измеряется в эксперименте, а ее производная по координате в среднем сечении пластины в силу симметрии тепловых воздействий равна нулю. Плотность теплового потока через поверхность пластины находят в виде полинома:

$$q(\tau) = \sum_{i=0}^m A_i \cdot \tau^i. \quad (2.2)$$

Температура в любой точке согласно принципу суперпозиции [2.6] может быть представлена в виде суммы результатов частичных воздействий каждого из слагаемых полинома (2.2):

$$T = (x, \tau) = \sum_{i=0}^m A_i \cdot T_i(x, \tau). \quad (2.3)$$

Пользуясь формулой разложения (2.3), авторы [2.20] получили расчетные формулы для $T_i = (x, \tau)$ при $i = 0, 1, 2, 3$. При наличии $m+1$ результатов измерений составляют столько

же уравнений типа (2.2) и находят $m+1$ коэффициентов A_i для уравнения (2.2). При достаточно точных измерениях и $m \rightarrow \infty$ решение получается вполне строгим.

Практически же результаты измерений температуры всегда содержат погрешность, а число измерений m – ограничено. Для того чтобы найденное решение было наиболее вероятным, авторы работы [2.20] применили метод наименьших квадратов, по которому сумма квадратов разностей между искомым решением и результатами измерений была минимальной. Из составленных нормальных уравнений вычисляли коэффициенты A_i , а затем, дифференцируя температуру по координате, находили уравнение для плотности теплового потока.

Из одинаковости математического описания тепловых процессов дифференциальными уравнениями теплопроводности и условий однозначности явлений разной физической природы возник **метод аналогий** [1.9, 2.21–2.23]. Входящие в эти уравнения физические величины являются величинами-аналогами, а исследование любого из этих процессов может быть заменено изучением модели аналогичного процесса. Например, температурное поле в теле может быть определено посредством измерений, выполненных на электрической, гидродинамической и подобных моделях.

Наиболее широкое распространение получили **методы электрического моделирования**, в которых вместо исследования тепловых, гидродинамических, гидравлических, магнитных, электромагнитных, акустических и других неэлектрических полей изучаются электрические поля. Преимущества электромоделирования состоят в том, что электрические измерения осуществляются сравнительно просто, быстро, обладают высокой точностью и надежностью, а электрические модели отличаются универсальностью, стабильностью свойств, компактностью и простотой эксплуатации.

Электрические модели могут быть реализованы двумя способами. По первому из них в модели воспроизводят в определенном масштабе геометрию исследуемой системы, а саму модель изготавливают из материала с непрерывной проводимостью, например, из электропроводной бумаги, фольги, электролита и пр. [2.21], – это модели с непрерывными параметрами. По второму способу замену выполняют на моделирующие электрические цепи: сетки электрических сопротивлений и емкостей (R – сетки и RC – сетки), – это модели с сосредоточенными параметрами [2.22]. Принцип действия сеточных моделей основан на воспроизведении с помощью электрических схем конечно-разностных аппроксимаций дифференциальных уравнений, описывающих исследуемый процесс. Электрические модели с непрерывными свойствами применяют для исследования одномерных и двумерных стационарных полей, а сеточные модели позволяют решать более сложные пространственные задачи по определению как стационарных, так и нестационарных полей.

Аналогия между процессами теплопроводности и электропроводности воплощена в **методе электротепловой аналогии** (ЭТА), который основан на использовании уравнений теплопроводности и электропроводности (как стационарных так и нестационарных) и соответствующих краевых условий. Подробное описание способов реализации метода ЭТА приведено в [2.21, 2.23].

Развивая идеи Фурье при решении уравнения теплопроводности, Буссинеск [2.24] показал, что общее решение может быть представлено в виде ряда:

$$T(M, \tau) = \sum_{i=0}^{\infty} A_i \cdot U(M_i) \cdot \exp(-m_i \cdot \tau), \quad (2.4)$$

где $U(M_i)$ – функция температуры точки M_i .

Поскольку с возрастанием времени сумма членов ряда после первого быстро убывает, во многих случаях важен только первый член разложения (2.4).

Режимы, при которых это справедливо, обстоятельно исследованы Г.М. Кондратьевым [2.14] и названы **регулярными**. Установленные им закономерности регулярного теплового режима легли в основу ряда устройств для исследования конвективного теплообмена [2.25–2.28]. Исследуемый объект (обтекаемое тело) предварительно изолируют от потока жидкости или газа и перегревают (переохлаждают) относительно температуры теплоносителя. В момент времени, принимаемый за начало отсчета, тело приводят в контакт с потоком жидкости. По темпу изменения температуры модельного тела определенной формы [2.26], либо его части [2.27] определяют плотность локального теплового потока, коэффициент теплообмена и теплофизические характеристики [2.28]. На рисунке 2.1 показана принципиальная схема устройства для измерения локального теплового потока при исследовании коэффициента теплообмена, а на рисунке 2.2 – для определения распределения значений локального теплового потока и коэффициента теплообмена в регулярном режиме первого рода.

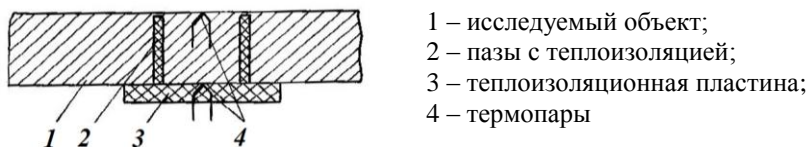


Рис. 2.1. Схема устройства для измерения локального теплового потока при исследовании коэффициентов теплообмена по методу регулярного режима первого рода

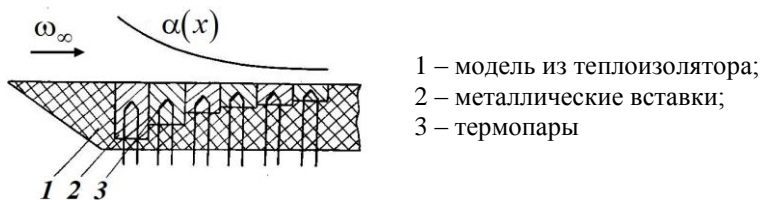


Рис. 2.2. Схема устройства для определения распределения значений теплового потока и коэффициента теплообмена по методу регулярного теплового режима первого рода

Методы регулярного теплового режима позволяют определять плотность теплового потока по экспериментальной зависимости путем последовательных приближений, задавая ожидаемые значения коэффициента теплообмена. Однако методы регулярного режима на практике трудно метрологически аттестовать.

К группе аналитических методов, основанных на решении прямой задачи теплопроводности, может быть отнесен метод, который заключается в измерении температуры тела, а тепловой поток находят расчетным путем согласно соотношению (1.6) по значению градиента температуры на поверхности тепловоспринимающего тела, в связи с чем метод назван **градиентным**. Довольно широкое распространение он получил для определения теплового потока при нахождении средних и локальных коэффициентов теплообмена [1.9].

Температурное поле, необходимое для определения температурного градиента на поверхности теплообмена, может быть найдено по распределению значений температуры, измеренной, например, термопарой на поверхности стенки, участвующей в теплообмене. Температурное поле внутри стенки при этом находят расчетным путем. Аналитическая запись температурного поля в стенках, даже имеющих правильную форму, и его численный расчет оказываются практически возможными только при одно- и двухмерном поле. Поэтому на экспериментальном участке для выполнения этого условия принимают иногда специальные меры тепловой защиты некоторых поверхностей или применяют тепловые компенсаторы.

Градиентный метод позволяет найти значение теплового потока при произвольном изменении температуры и тепловой нагрузки вдоль поверхности теплообмена в стационарных и нестационарных условиях. Его можно также использовать для исследования теплообмена с внутренними источниками теплоты. Основной недостаток метода – большой объем вычислений при обработке опытных данных.

В качестве примера рассмотрим использование градиентного метода в исследовании теплопередачи в соплах при нестационарных условиях теплообмена. На рисунке 2.3 показано продольное сечение сопла, изготовленного из стали 12Х18Н9Т с толщиной стенки 15 мм.

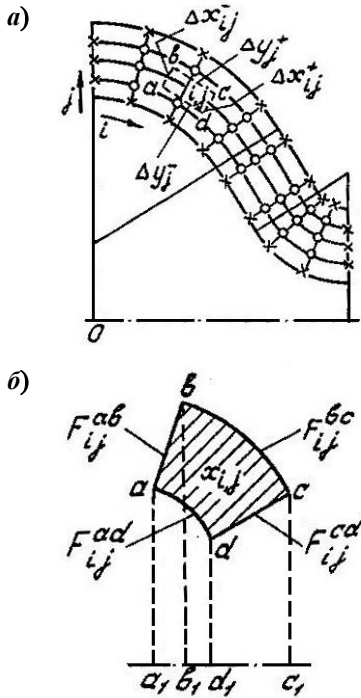


Рис. 2.3. Продольное сечение сопла (а) и схема разбиения стенки сопла на элементарные объемы (б)

На внутренней, наружной и торцевых поверхностях стенки смонтировано 29 нихром-константановых термопар (отмечены на рисунке крестиками). Их показания в расчетном алгоритме аппроксимировали по координате и времени использованием, исходя из формы сопла, набора двух функций – прямой: $y = ax + b$ и окружности: $y = y_0 \pm \sqrt{R^2 - (x - x_0)^2}$.

Схема разбиения стенки сопла на элементарные объемы показана на рис. 2.3, б. Для каждой внутренней расчетной точки получено выражение для вычисления нестационарной температуры в виде:

$$\begin{aligned}
 T_{i,j}^{\Delta\tau} = & \left(1 - \frac{(A + 0,5B \cdot T_{i,j}) \cdot \Delta\tau}{(C + D \cdot T_{i,j}) \cdot \rho \cdot V_{i,j}} \cdot \left(\frac{A_{i,j}^{ab}}{\Delta x_{i,j}^-} + \frac{A_{i,j}^{cd}}{\Delta x_{i,j}^+} + \frac{A_{i,j}^{ad}}{\Delta y_{i,j}^-} + \frac{A_{i,j}^{bc}}{\Delta y_{i,j}^+} \right) \right) \cdot T_{i,j} + \\
 & + \frac{\Delta\tau}{(C + D \cdot T_{i,j}) \cdot \rho \cdot V_{i,j}} \cdot \left(\frac{(A + 0,5B \cdot T_{i-1,j}) \cdot A_{i,j}^{ab}}{\Delta x_{i,j}^-} \cdot T_{i-1,j} + \right. \\
 & + \frac{(A + 0,5B \cdot T_{i+1,j}) \cdot A_{i,j}^{cd}}{\Delta x_{i,j}^+} \cdot T_{i+1,j} - \frac{(A + 0,5B \cdot T_{i-1,j}) \cdot A_{i,j}^{cd}}{\Delta y^-} \cdot T_{i,j-1} + \\
 & \left. + \frac{(A + 0,5B \cdot T_{i+1,j}) \cdot A_{i,j}^{bc}}{\Delta y_{i,j}^+} \cdot T_{i,j+1} \right), \tag{2.5}
 \end{aligned}$$

где $T_{i,j}$ и $T_{i,j}^{\Delta\tau}$ – значения температуры в точке с координатами (i, j) в моменты времени τ и $\Delta\tau$;

Δx , Δy и $\Delta\tau$ – шаги по координатам и времени;

A , B , C , D – коэффициенты в формулах для теплопроводности: $\chi = A + B \cdot T$ и удельной теплоемкости: $c = C + D \cdot T$;

$A_{i,j}^{ab}$, $A_{i,j}^{cd}$, $A_{i,j}^{ad}$, $A_{i,j}^{bc}$ – значения площади поверхностей, образованных вращением вокруг оси симметрии сопла линий ab , cd , ad и bc , соответственно;

$V_{i,j}$ – объем тела вращения; ρ – плотность материала стенки. Значения площади поверхностей и объема вращения определены по формулам:

$$A_{i,j} = 2\pi \int_{x_1}^{x_2} y \cdot \sqrt{1 + (dy/dx)^2} \cdot dx \quad \text{и} \quad V_{i,j} = \pi \int_{x_1}^{x_2} y^2 \cdot dx \quad \text{для вве-}$$

денных функций $y=f(x)$, описывающих профиль сопла.

Определив температурное поле в узлах расчетной сетки, далее вычисляли плотность теплового потока по формуле:

$$q_i = (A + 0,5 \cdot B \cdot T_{i,j=0}) \cdot (T_{i,j=0} - T_{i,j=1}) / \Delta y. \quad (2.6)$$

Градиентный метод характеризуется значительными погрешностями, которые обусловлены такими факторами, как неточности измерения температуры поверхности исследуемого объекта микротермопарами в процессе эксперимента и определения температурного поля, замена температурного градиента $(\partial T / \partial n)$ конечной разностью температуры, отнесенной к толщине слоя $(\Delta T / h)$, и погрешность предварительного определения коэффициента теплопроводности материала стенки.

При градиентном методе определения теплового потока измерительным преобразователем обычно служит не вносящий тепловых и гидродинамических возмущений элемент конструкции, препарированный термопарами. Однако, возникают другие погрешности, которые рассмотрены ниже.

Существенный вклад в погрешность определения плотности теплового потока вносит ошибка, связанная с определением коэффициента теплопроводности материала стенки. Так как градиент температуры на поверхности теплообмена находят в результате решения задачи о температурном поле в стенке чаще всего численным методом, то максимальная относительная погрешность метода равна

$$\frac{\Delta q}{q} = \frac{\Delta \chi}{\chi} + \frac{\Delta(\partial T / \partial n)_{n=0}}{(\partial T / \partial n)_{n=0}}, \quad (2.7)$$

причем $\Delta(\partial T / \partial n)_{n=0} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3$,

где Δ_1 – абсолютная погрешность вычисления температурного поля, обусловленная конечными значениями элементов разбиения Δ_n ;

Δ_2 – абсолютная погрешность замены частной производной $(\partial T / \partial n)_{n=0}$ отношением конечных разностей $(\Delta T / \Delta n)_{n=0}$;

Δ_3 – абсолютная погрешность регистрации граничной температуры в процессе эксперимента. Значения Δn могут быть подсчитаны с высокой точностью, поэтому погрешность их определения можно считать равной нулю.

Подробное рассмотрение погрешностей для случая определения интенсивности теплообмена на цилиндрической поверхности при стационарных условиях показало, что относительная погрешность градиентного метода измерений теплового потока для рассмотренных условий с доверительной вероятностью 0,95 достигает 12% [1.9].

Тщательный анализ составляющих погрешности градиентного метода позволил найти дополнительные пути увеличения точности этого метода. Погрешность вычисления температуры при двумерном температурном поле пропорциональна второй степени шага разбивки по координатам. Относительная же погрешность вычисления градиента температуры по конечно-разностному выражению:

$$(\partial T / \partial n)_{n=0} = \Delta T / \Delta n \quad (2.8)$$

пропорциональна шагу разбивки в первой степени, то есть погрешность вычисления градиента является преобладающей, а машинное время нерационально тратилось на поддержание высокой точности вычисления температуры. Следовательно, расчет температурного градиента целесообразно проводить не по (2.8), а по соотношению, обеспечивающему более высокую точность. Последнее было получено, например, из интерполяционной формулы Лагранжа:

$$(\partial T / \partial n)_{n=0} = T_0 \cdot \frac{n_1 + n_2}{n_1 \cdot n_2} + T_1 \cdot \frac{n_2}{n_1 \cdot (n_1 - n_2)} + T_2 \cdot \frac{n_1}{n_2 \cdot (n_2 - n_1)}, \quad (2.9)$$

где T_0, T_1, T_2 – значения температуры в нулевой (на поверхности теплообмена), первой и второй точках, расположенных по нормали к поверхности; n_1 и n_2 – координаты первой и второй точек.

К достоинствам аналитического подхода можно отнести принципиальную возможность решения нестационарной задачи в любой постановке, однако полученные результаты характеризуются невысокой точностью. Главным недостатком является то, что информация о тепловом потоке получается за пределами эксперимента и не может быть использована для текущего контроля и регулирования теплового процесса.

2.2 Экспериментальные методы и устройства для измерения теплового потока

В основе любого экспериментального метода определения теплового потока лежит принцип, отражающий связь теплоты и какой-либо физической величины, регистрация количественных изменений которой позволяет получить информацию о значении теплового потока и его плотности (поверхностной q или линейной q_L).

Экспериментальные методы отличаются большим разнообразием. Обусловлено это тем, что их разработкой занимались многие ученые и специалисты, используя при этом весьма различные физические явления, для которых прослеживается взаимосвязь с теплотой. Многообразию этих методов способствовали также и специфические особенности их применения.

При решении многочисленных прикладных задач по определению теплового потока было создано много различных экспериментальных методов и реализующих их устройств [2.29–2.50], классификацию и систематическое описание которых впервые предпринял более 50 лет назад О.А. Герашенко, представив их в публикациях [3*–5*].

Авторский вариант такой классификации представлен на рисунке 2.4, а краткое описание – ниже в последующих параграфах.

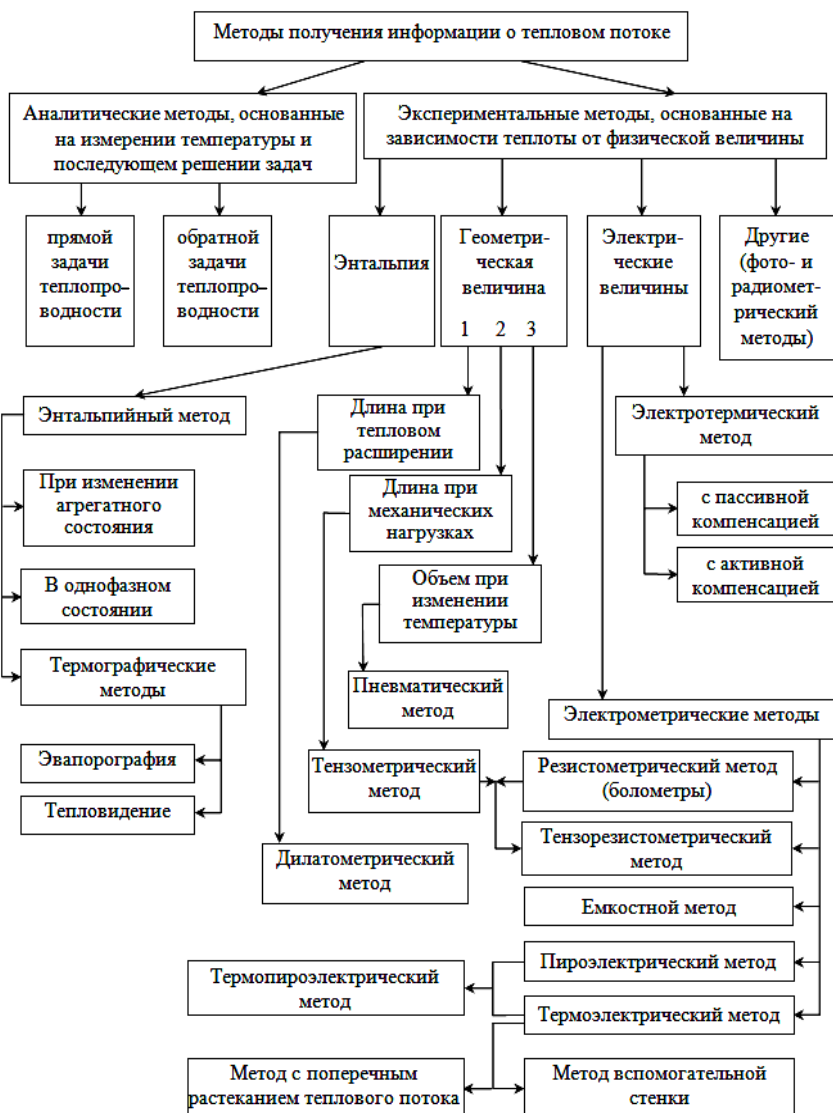
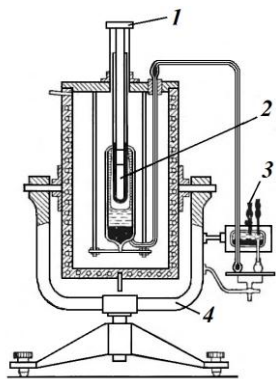


Рис. 2.4. Классификация методов получения информации о тепловом потоке и его плотности

2.2.1 Энтальпийный метод

Энтальпийный метод подразумевает определение теплового потока по изменению энтальпии рабочего тела за счет подведенной или отведенной энергии. Этот метод перенесен в теплотрию из калориметрии и осуществляется на практике двойко, базируясь либо на изменении энергии при смене агрегатного состояния вещества (рабочего тела), либо на изменении теплосодержания вещества в однофазном состоянии при условии отсутствия тепловых потерь. Превращения твердой фазы в жидкую и обратно удобны тем, что линия переходов для большинства веществ значительно удалена от тройной точки и совпадает с изотермой, а энергия сжатия для твердых и жидких сред пренебрежимо мала. Поэтому энергия такого агрегатного превращения практически не зависит от давления, что было замечено еще Лавуазье и Лапласом, которые более 200 лет назад предложили ледяной калориметр – прибор для измерения количества теплоты, выделившейся или поглощенной в каком-либо физическом, химическом или биологическом процессе. Ими же предложен и сам термин «калориметр» (1780 г.) [5*].



- 1 – диафрагма, 2 – камера Бунзена;
3 – мерное устройство;
4 – параллактический штатив

Рис.2.5. Схема пиргелиометра
Ф.Е. Волошина

Ледяной калориметр Лавуазье–Лапласа в дальнейшем был усовершенствован Бунзеном. Принципиальная схема конструкции ледяного калориметра Бунзена нашла применение в приборе для определения интенсивности прямой солнечной радиации по количеству теплоты, поглощаемой моделью АЧТ, – пиргелиометре Ф.Е. Волошина [2.29]. Схема прибора приведена на рисунке 2.5.

Затраченное на таяние льда количество теплоты, определяемое по формуле $Q = r \cdot m$ (r и m – удельная теплота плавления и масса вещества – льда), равно интегралу по времени прошедшего через диафрагму 1 потока теплового излучения. Этот же метод был применен для исследования теплообмена при плавлении автором работы [2.30]. Аналогичные работы описаны в [2.31].

На этом принципе основан метод измерения кондуктивного теплового потока, прошедшего через исследуемый образец в приборе для определения теплопроводности, в котором использован эффект плавления эвтектических растворов солей [5*]. Однако, теплоту плавления можно рекомендовать использовать в спокойных условиях измерения малых эффектов. В тех же случаях, когда на теплопередачу накладывается неконтролируемый массоперенос (например, испарение вещества во время опыта), использование теплоты плавления дает лишь качественную характеристику процесса. Определение теплового потока по количеству испарившейся или сконденсировавшейся жидкости является более точным, что следует из физического свойства вещества сохранять изобарность при изотермичности процесса и наоборот.

Энтальпийные методы с использованием теплоты парообразования или конденсации широко применяются в теплофизическом эксперименте для определения теплового потока при исследовании, например, теплообмена к воздуху внутри длинной трубы как при умеренных, так и больших скоростях газового потока, для изучения теплообмена при кипении на плоских плитах, обогреваемых изнутри конденсирующимся паром, при исследовании возможностей интенсификации теплообмена [1.9, 2.25, 2.29, 2.31–2.35] и прочее. Погрешность измерений теплового потока с использованием энергии превращения агрегатного состояния обычно не превышает 5%, при калориметрировании ее удается снизить до 1%.

Второй способ определения теплового потока энтальпийным методом, основанный на регистрации изменения

теплосодержания вещества в однофазном состоянии, применяется не менее широко. Его отличие состоит в том, что для определения изменения интегрального теплосодержания, кроме массового расхода охлаждающей среды (хладагента) с известной теплоемкостью необходимо регистрировать изменение температуры хладагента на рабочем участке исследуемого объекта.

Корректное измерение изменений температуры связано с большими трудностями, а именно: там, где подводится (или отводится) теплота, температура неизбежно распределена в охлаждающей среде неравномерно; если же среда успевает достаточно хорошо перемешаться, – влияют тепловые потери и внешние возмущения. Для уменьшения погрешности измерения, например, при работе с прибором, приемный орган которого выполнен водоохлаждаемым, температуру охлаждающей воды целесообразно поддерживать на уровне температуры окружающего воздуха.

Применительно к исследованиям конвективного или кондуктивного теплового потока этот метод позволяет получать информацию либо об усредненных по поверхности исследуемого объекта, либо о локальных значениях [2.35]. Кроме того, известны случаи применения энтальпийного метода для измерения в нестационарных тепловых режимах [5*, 1.9, 2.33]. Рабочим телом в таком случае является твердое тело – тепловоспринимающая пластина, выполненная из материала

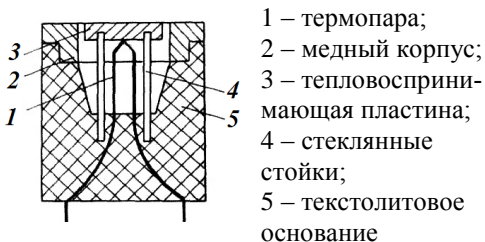


Рис. 2.6. Схема энтальпийного тепломера для измерения нестационарного теплового потока

с известной теплоемкостью. Для измерения ее температуры могут быть применены термopары, терморезисторы и др. преобразователи температуры. Типичная схема конструкции такого прибора приведена на рисунке 2.6.

2.2.2 Термографические методы: эвапорография и тепловидение

Термография – совокупность методов регистрации и наблюдения теплового излучения, а также ряд методов копирования и создания изображения. **Инфракрасная термография** – это способ получения термограммы, то есть изображения в инфракрасных лучах, показывающего картину распределения температуры. Термографические камеры обнаруживают излучение в инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра (примерно 0,9-14 мкм) и на основе этого излучения создают изображения в видимом спектре излучения, позволяющие определить перегретые или переохлажденные участки. Так как инфракрасное излучение испускается всеми объектами, имеющими температуру, термография позволяет «видеть» окружающую среду как с использованием видимого света, так и в инфракрасном излучении. Интенсивность теплового излучения тела увеличивается с повышением его температуры, поэтому термография позволяет видеть распределение температуры по поверхности тела.

Метод эвапорографии [2.36, 2.37] состоит в получении изображения объекта испарением некоторых веществ за счет энергии излучения объекта в инфракрасной области спектра. На рисунке 2.7 приведена схема получения изображения исследуемого объекта, которое создается инфракрасным объективом 2 на тонкой зачерненной мембране 3, находящейся в вакуумной камере 4.

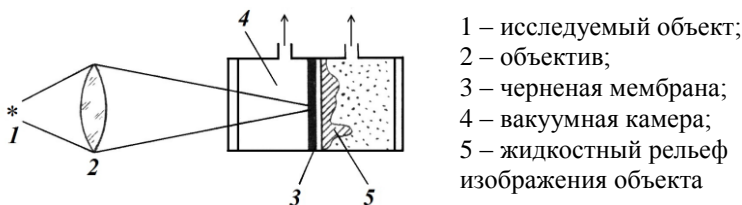


Рис. 2.7. Схема получения изображения объекта в инфракрасном освещении эвапорографическим методом

На обратной стороне мембраны конденсируются пары жидкости, находящейся в этой части камеры (метод конденсации), или испаряется предварительно сконденсированный слой жидкости (метод испарения). Скорость конденсации и испарения зависит от температуры, которая, в свою очередь, обусловлена излучением соответствующего участка объекта. Жидкостный рельеф 5 виден в интерференционных цветах при специальной его подсветке и может быть сфотографирован. Спектральная область чувствительности зависит от кривой пропускания объектива и входного окна камеры, а также от характера чернящего покрытия.

Этот метод применим для регистрации собственного инфракрасного излучения тела, но главным образом для дистанционного измерения температуры и ее распределения на поверхности объекта, визуализации пучков от ИК-лазеров, наблюдения и фотографирования в темноте.

Впервые метод эвапорографии был предложен еще в 1929 г. немецким ученым М. Черни [2.37]. Им же была осуществлена одна из первых попыток получения изображения в инфракрасном освещении.

Инфракрасная камера Черни образована из стеклянной трубки диаметром 50 мм и длиной 150 мм. Верхний край трубки закрыт пробкой, а нижний – заполирован. На нем закреплена тонкая целлулоидная мембрана толщиной 0,5 мкм, покрытая с наружной стороны скипидарной сажей. В камере на нагревательной спирали подвешена миниатюрная стеклянная пробирка, заполненная камфорным маслом (или нафталином, или каким-либо тяжелым углеводородом).

При включенной нагревательной спирали камфора плавится, испаряется и оседает тонким слоем на стенках камеры и поверхности целлулоидной мембраны. При экспонировании изображения на черненую сторону мембраны с обратной ее стороны камфора сублимирует со скоростью, пропорциональной энергетической освещенности участка.

В дальнейшем по принципу М. Черни был построен ряд приборов ночного видения в инфракрасном освещении и приборов для спектрального анализа длинноволнового излучения [2.38 – 2.42].

Наилучшие эвапорографы, разработанные к середине 20-го века, чувствовали различие в температуре деталей объекта ~ 1 К (при комнатной температуре); минимально обнаруживаемая разность энергетической освещенности в плоскости мембраны составляла $0,1 \text{ Вт/м}^2$, а время формирования изображения – от долей секунды до минуты. Разрешающая способность доходила до 14 линий на 1 мм при разности температуры, равной 10 К. По цветам интерференционных полей можно с достаточно большой точностью судить об энергетической освещенности участка, а значит, и плотности падающей энергии. В настоящее время эвапорографы практически вытеснены из употребления тепловизионной техникой.

Получение видимого изображения тел по их тепловому (инфракрасному) излучению, собственному или отраженному, используется в тепловидении для определения формы и местоположения объектов, находящихся в темноте или в оптически непрозрачных средах [2.42–2.44]. Развитие тепловидения шло одновременно по нескольким направлениям с использованием различных типов приемников, методов сканирования изображения и средств визуализации.

Первые модели тепловизоров были построены на фоторезистивных приемниках излучения. С 1916 по 1918 гг. американский ученый Теодор Кейс экспериментировал с фотосопrotivлениями для получения сигнала не за счет нагрева, а благодаря прямому взаимодействию с фотонами. В результате был получен более быстрый, более чувствительный приемник излучения на основе эффекта фотопроводимости.

В других системах тепловидения, созданных в 30-е годы 20-го столетия, в качестве приемников ИК-излучения применяли болометры и термопары, преобразующие тепловое излучение в электрические сигналы, которые затем подаются на

вход электронно-лучевой трубки и наблюдаются на люминесцентном экране. В течение 1940-1950 гг. развитие тепловизионной технологии было связано с возрастающим применением для военных целей. Немецкие ученые обнаружили, что при охлаждении фоторезистивного приемника излучения его характеристики улучшаются.

В качестве приемников в тепловизорах используют как тепловые, так и охлаждаемые фотоэлектрические приемники (например на основе InSb или HgClTe₂), которые воспринимают излучение с длиной волны до (5–6) мкм, а также пироэлектрические приемники, обладающие высокой чувствительностью, позволяющей получать изображение объектов, находящихся на расстоянии (10–15) км и имеющих температуру, лишь на (1–2) К отличающуюся от температуры окружающей среды [2.41, 2.45].

В 70-е годы появились принципиально новые, более простые устройства, в которых тепловое изображение непосредственно, без преобразования в электрические сигналы, проецируется на экран, покрытый слоем вещества, меняющего свои оптические характеристики (коэффициенты отражения или пропускания, интенсивность или цвет свечения и т. п.) под воздействием теплового излучения. На экранах таких устройств можно не только наблюдать видимые изображения объектов, но и их фотографировать. В качестве термочувствительных веществ применяют жидкие кристаллы, кристаллические люминофоры, полупроводниковые пленки, магнитные тонкие пленки и прочее. Например, некоторые предварительно возбужденные люминофоры под действием инфракрасного излучения начинают светиться в видимой части спектра. Это свойство положено в основу сравнительных оценок потоков энергии в длинноволновой области спектра [2.42, 2.44–2.50].

В 40-е годы наметились две тенденции в развитии тепловизионных приборов. К первой группе приборов относятся тепловизоры, в которых для преобразования оптического

сигнала ИК-диапазона в электрический сигнал используется принцип оптико-механического сканирования, а ко второй группе приборов – тепловизоры с электронным сканированием. В тепловизорах первого типа применялись одноэлементные или многоэлементные инфракрасные (ИК) ПТИ мгновенного действия, а в тепловизорах второго типа в качестве ПТИ использовались ИК видиконы, пириконы, а сейчас уже и матричные приемники излучения, так называемые фокальные матрицы, работающие в режиме накопления зарядов и основанные на различных физических принципах.

Хотя ранние тепловизионные системы были громоздкими, медленными, имели низкую разрешающую способность, их применяли в промышленности для обследования систем передачи и распределения электроэнергии. В 1970-х годах достижения в области военных применений привели к появлению первых переносных систем, которые можно было использовать для медицинской диагностики и неразрушающего контроля оборудования и сооружений.

В получивших распространение системах тепловидения с оптико-механическим сканированием излучение от отдельных точек объекта, находящегося в поле обзора, попеременно направляется оптической системой на приемник, преобразующий его в электрические сигналы, которые усиливаются и воспроизводятся на экране индикатора. На рисунке 2.8 представлена обобщенная функциональная схема тепловизора с системой оптико-механического сканирования.

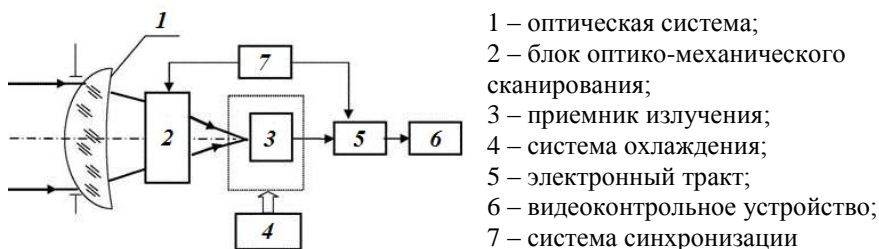


Рис. 2.8. Обобщенная функциональная схема сканирующего тепловизора

Система оптико-механического сканирования, в общем случае, должна обеспечивать обзор пространства – сканирование как в направлении строк (по горизонтали), так и по кадру (в вертикальном направлении).

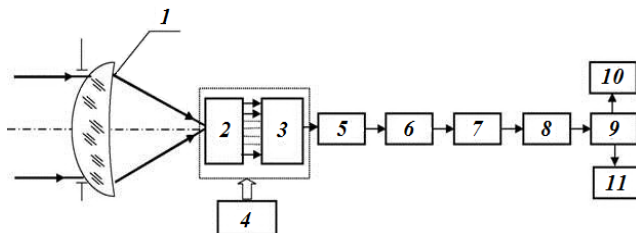
Существует множество схем сканирующих тепловизоров, различающихся методами сканирования, обработки сигналов и представления выходного изображения. Эти различия во многом обусловлены топологией ПТИ, используемых в разных приборах. В частности, в сканирующих тепловизорах могут применяться одноэлементные и многоэлементные ПТИ в виде линеек или матриц. Кроме этого, в качестве видеоконтрольного устройства, помимо широко применяемых ТВ-мониторов, использовались устройства с линейками светодиодов и оптико-механическими системами развертки.

Уже в 1970-х гг. тепловизионные системы были достаточно надежными, однако качество изображений было низким по сравнению с современными тепловизорами. Тепловизионные системы калибровались таким образом, чтобы можно было получать полностью радиометрические изображения, в которых значения радиационной температуры можно определить по всему изображению. Радиометрическое изображение – это тепловое изображение, содержащее рассчитанные значения температуры для всех точек на изображении.

В конце 1980-х гг. стали доступными для широкого применения матричные ПТИ с использованием матрицы в фокальной плоскости (ФРА), которые состоят из массива (обычно прямоугольного) инфракрасных ПТИ, расположенных в фокальной плоскости объектива. Применение матриц ФРА привело к повышению качества изображения и пространственного разрешения.

Типичные матричные ПТИ современных тепловизоров имеют размер от 16×16 до 640×480 пикселей. Пиксель является самым маленьким отдельным элементом матричного ПТИ, который может улавливать инфракрасное излучение. Для специальных задач существуют ПТИ, размер которых

превышает 1000×1000 элементов. Размер чувствительных элементов в фокальной ИК-матрице может составлять 30×30 мкм². На рисунке 2.9 представлена обобщенная функциональная схема тепловизора с фокальной ИК-матрицей.



1 – оптическая система; 2 – фокальная матрица с предусилителями; 3 – мультиплексор; 4 – система охлаждения; 5 – корректор неоднородности характеристик чувствительных элементов; 6 – аналого-цифровой преобразователь; 7 – цифровой корректор неоднородности; 8 – корректор неработающих ячеек; 9 – формирователь изображения; 10 – дисплей; 11 – цифровой выход

Рис. 2.9. Обобщенная функциональная схема тепловизора с фокальной матрицей

Фокальные матрицы изготавливаются как функционально законченные фотоприемные устройства, включающие систему охлаждения, предусилители, мультиплексор, корректор неоднородности характеристик чувствительных элементов, аналого-цифровой преобразователь, блоки цифровой обработки и формирователь выходных сигналов. Сигналы с выхода такого фотоприемного устройства могут передаваться на видеоконтрольное устройство телевизионного типа либо в цифровом виде в блоки цифровой обработки.

Интенсивность достигающего ПТИ теплового излучения определяется не только температурой тела и его излучательной способностью, но и ослаблением, вносимым атмосферой. «Окна» прозрачности атмосферы в ИК-области спектра (3,5–5,5) мкм и (7,5–12) мкм, поэтому именно в этих диапазонах обычно работают современные тепловизоры [2.44, 2.45, 2.47–2.50].

Длинноволновые тепловизоры – это тепловизоры, чувствительные к инфракрасному излучению в диапазоне длины волны от 8 мкм до 15 мкм. Средневолновые тепловизоры чувствительны к инфракрасному излучению в диапазоне длины волны от 2,5 мкм до 6 мкм. В настоящее время существуют как длинноволновые, так и средневолновые полностью радиометрические тепловизионные системы, часто с функцией наложения изображений и температурной чувствительностью 0,05 К и менее.

Температурное разрешение современных тепловизоров достигает сотых долей Кельвина. Различают наблюдательные и измерительные тепловизоры. Первые показывают только градиенты температуры объекта. Они позволяют измерить значение температуры заданной точки объекта с точностью, определяемой коэффициентом излучения материала объекта. Измерительные тепловизоры требуют периодической калибровки, для чего зачастую снабжены встроенным устройством для калибровки матрицы, обычно в виде шторки, температура которой точно измеряется. Шторка периодически надвигается на матрицу, давая возможность откалибровать матрицу по температуре шторки.

Развитие технологии матриц в фокальной плоскости, использующих различные типы ПТИ, далеко шагнуло, начиная с 2000 г. За прошедшее время стоимость таких систем снизилась больше чем в десять раз, а качество значительно повысилось. Кроме того, значительно возросло использование программного обеспечения для обработки изображений. Практически все современные инфракрасные системы используют программное обеспечение для облегчения анализа и подготовки отчетов. Отчеты можно быстро создать и отправить в электронном виде через интернет, либо сохранить в одном из широко используемых форматов, таких, как PDF, а так же записать на одном из цифровых устройств хранения данных различных типов.

2.2.3 Дилатометрический метод

Мерой интенсивности падающего излучения может служить тепловое расширение тел. Метод измерения теплового потока, основанный на тепловом расширении твердых тел и жидкостей, получил название дилатометрического.

Еще в 1800 г. В. Гершель [5*, 2.48] использовал высокочувствительный ртутный термометр при исследовании распределения плотности падающей энергии в солнечном спектре, а в 1825 г. Д. Гершель для измерения солнечной радиации применил черненный резервуар ртутного термометра, чем и положили начало развитию дилатометрического метода в теплотрии. В дальнейшем Араго и Дэви [2.48, 2.49] предложили конструкцию пиргелиометра с дифференциальным способом измерения. В приборе использованы два термометра, отличающиеся друг от друга тем, что резервуар одного был зачернен, а второго оставался блестящим. Резервуары располагали рядом и одновременно экспонировали под измеряемым радиационным потоком. О значении потока излучения судили по возникающей при экспозиции разности изменений показаний термометров.

В качестве термочувствительных приемных органов радиометров с успехом применяются и другие дилатометрические системы. Например, термическое расширение монометаллической пластинки использовано в актинометре Н.Н. Калитина [2.51] – приборе для измерения интенсивности прямой солнечной радиации по степени нагрева поглощающей радиацию зачерненной поверхности. Схема прибора приведена на рисунке 2.10.

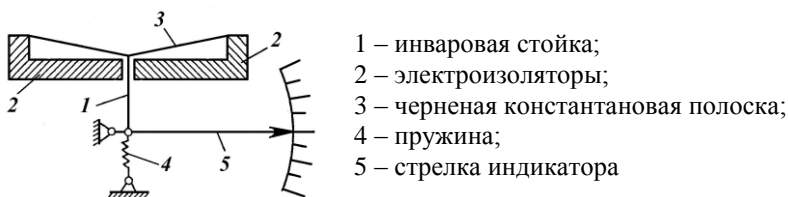


Рис. 2.10. Схема актинометра Н.Н. Калитина

На инваровой стойке 1 на электроизоляторах 2 крепится черненная константановая полоска 3, которая в средней части оттягивается пружиной. Изменение температуры при поглощении теплового излучения вызывает удлинение полоски, которое приводит к механическому смещению индикатора. При малой толщине полоски концевыми эффектами за счет теплопроводности можно пренебречь. Аналогично построен монометаллический актинограф В.Д. Третьякова [2.52].

Эффект теплового расширения двух монометаллических пластинок (серебряных), соединенных между собой через слюдяную прокладку, использован в компенсационном пиргелиометре. Хотя пластинки зачернены, тепловое излучение воспринимает одна верхняя пластинка, которая при нагреве расширяется и приводит к изгибу всего элемента. Изгиб наблюдают в микроскопе по смещению кварцевой нити. Через вторую пластинку пропускается ток, приводящий к ее нагреву. Вследствие этого значения температуры обеих пластинок выравниваются и элемент расширяется, в результате чего кварцевая нить возвращается в «нулевое» положение.

Тепловое расширение биметаллической пластинки использовано в актинометре В.А. Михельсона, предложенном еще в 1908 г. и усовершенствованном его учениками и продолжателями [2.53, 2.54]. Тонкая биметаллическая (инвар-железо) пластинка, расположенная в медном цилиндре с окном, через которое производят экспозицию, нагревается и изгибается, так как железная часть пластинки при нагревании удлиняется, а инвар практически не расширяется. Изгиб пластинки, приводящий к смещению кварцевой нити в поле закрепленного в медном корпусе микроскопа, адекватен отражению потока падающего теплового излучения. Теорию радиометра В.А. Михельсона разработал С.И. Савинов [2.54].

К группе дилатометрических методов можно отнести еще и метод, основанный на тензорезистивном эффекте, который состоит в изменении электрического сопротивления твердого материала (металла или полупроводника) в резуль-

тате его деформации. Применительно к измерению теплового потока этот метод сводится к использованию линейного теплового расширения двух имеющих неодинаковые коэффициенты линейного расширения материалов, из которых изготавливают чувствительный элемент. При воздействии теплового потока различие в тепловом расширении приводит к изменению электрического сопротивления, которое с хорошей точностью может быть зарегистрировано.

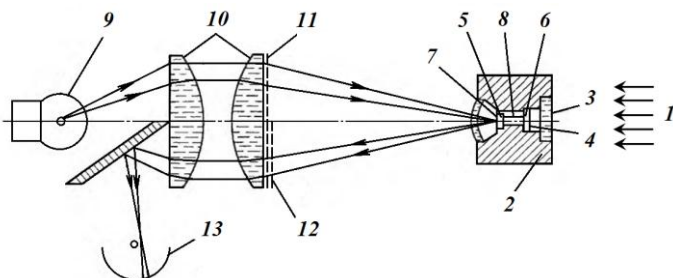
2.2.4 Пневматические методы

Эти методы основаны на уравнении Клапейрона-Менделеева и состоят в том, что падающий поток теплового излучения изменяет температуру заключенного в герметичной камере газа, который при этом изменяет свой объем. Одна из стенок камеры выполнена в виде тонкой гибкой пленки – мембраны, которая деформируется при изменении объема газа. Эту деформацию можно зарегистрировать разными способами [5*, 1.1, 2.39, 2.40, 2.47, 2.50, 2.56, 2.57].

Пневматические приемники имеют еще другое название: оптико-акустические, что связано с эффектом звучания газов в замкнутом пространстве под действием прерываемого теплового потока. Такие ПТИ бывают селективными и неселективными.

Работа неселективных приемников состоит в том, что модулированное излучение попадает в оптико-акустическую камеру, заполненную нейтральным газом, и поглощается зачерненной пленкой. Поглощенная энергия передается газу, наполняющему камеру, где возникают пульсации давления, которые совпадают с частотой модуляции и регистрируются микрофоном. Разработаны микрофоны конденсаторные и электродинамические. Микрофоны выполняют функции предварительного усилителя оптико-электронного либо электронного типа. За рубежом известны неселективные приемники, называемые элементами Голея [5*, 2.40, 2.47], схема которого приведена на рисунке 2.11. Измеряемое тепловое

излучение 1, поступаая в приемную камеру 2 через галитовое окно 3, поглощается зачерненной мембраной 4 и нагревает заключенный в приемной камере газ.

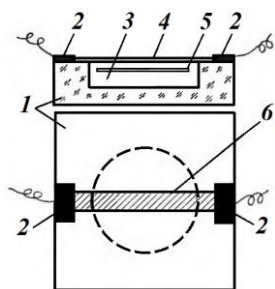


1 – тепловое излучение; 2 – приемная камера; 3 – окно; 4 – черная мембрана; 5, 6 – газовые полости, 7 – зеркальная мембрана; 8 – соединительный канал (с капилляром); 9 – источник света; 10 – конденсор; 11, 12 – решетки; 13 – фотоэлемент

Рис. 2.11. Схема неселективного пневматического приемника М. Голя

Приемная камера имеет две газовые полости 5 и 6 между двумя мембранами: черной 4 и зеркальной 7. Обе полости объемом по 3 мм^3 каждая соединены каналом 8 настолько большого сечения, что его гидравлическое сопротивление не оказывает заметного влияния и в который введен капилляр, соединяющий с атмосферой для устранения влияния медленного изменения атмосферного давления на рабочее давление газа в полостях. Приемник снабжен системой фотопневматического усиления, устроенной так, что при применении плоской зеркальной мембраны 7 свет, проходящий от источника 9 через конденсор 10 и просветы в решетке 11, отразившись от мембраны 7, попадает на «прутья» решетки 12, не достигая фотоэлемента 13. При самых незначительных искривлениях зеркальной мембраны 7 отраженные ею полосы света начинают проходить через просветы решетки 11 к фотоэлементу 13, ток которого регистрируется самопишущим прибором и является мерой поглощенного теплового излучения.

Упрощенная конструкция пневматического приемника теплового излучения [2.56] показана на рисунке 2.12. Энергия



1 – стеклянный корпус; 2 – электроды; 3 – рабочая камера; 4 – мембрана; 5 – поглотитель; 6 – тензометрическая фольга

Рис. 2.12. Схема пневматического приемника А.А. Сивкова и В.В. Гуда

теплового излучения нагревает поглощающее тело 5 и воздух в камере 3, который, расширяясь, давит на мембрану 4. Это приводит к изменению электрического сопротивления тензометрической фольговой полоски 6. В этом приборе пневматического типа совмещены тензометрический эффект с болометрическим в наносимой на мембрану фольговой полоске 6.

Чувствительность пневматических приборов зависит от газа, наполняющего приемную камеру. При этом с увеличением чувствительности возрастает и постоянная времени прибора. Например, гелий или водород, обладая большей теплопроводностью, обеспечивают меньшую инерционность, но чувствительность при этом понижается; при использовании ксенона – наоборот. Соотношения между чувствительностью и инерционностью для пневмоприемников теплового излучения изучены Н.А. Панкратовым [2.57].

Пневматический приемник ONERA научно-исследовательского авиационного управления США [2.50] в отличие от элемента Голея не имеет оптического устройства. Регистрация повышения температуры здесь осуществляется в форме электрического сигнала, обусловленного изменением емкости конденсатора, состоящего из неподвижной пластины и гибкой мембраны, покрытой серебром, расстояние между которыми порядка 10 мкм. При расширении газа происходит деформация гибкой мембраны, что вызывает изменение электрической емкости конденсатора.

Пневматический ПТИ является, как правило, интегральным по воспринимаемому спектру, но может быть преобразован в селективный, если поглощающую пленку выполнить прозрачной в необходимой области спектра. У селективного ПТИ поглощает сам газ, поэтому его спектральная чувствительность определяется спектром поглощения наполняющего газа, так как в газах поглощение излучения селективно.

Первые селективные пневмоакустические ПТИ предложены М.Л. Вейнгером [2.50]. На рисунке 2.13 дана схема такого приемника.

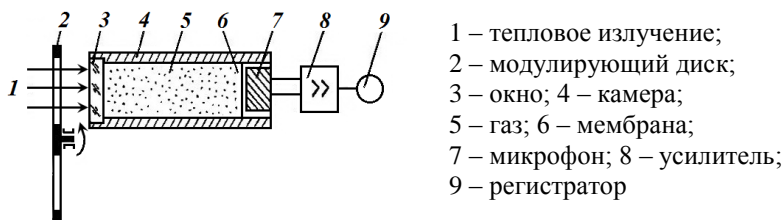


Рис. 2.13. Схема пневмоакустического приемника М.Л. Вейнгера

Измеряемый радиационный поток 1, промодулированный диском 2 через флюоритовое окно 3, попадает в камеру 4, заполненную газом 5. Под воздействием теплового потока изменяются температура и давление газа. Давление на мембрану 6 создает в микрофоне 7 электрические сигналы, усиливаемые усилителем 8 и регистрируемые регистратором 9.

В конструктивном плане пневматические (оптикоакустические) приемники более сложны, чем другие, что связано с промежуточным звеном преобразований, в которых радиационный поток, воздействуя на покрытую поглощающим составом мембрану, приводит к разогреву газа в камере, увеличению его объема, и как следствие, к деформации мембраны. Это регистрируется либо оптическим методом с помощью оптико-электронного усилителя, либо электрическим, если деформируемая мембрана выполняет роль конденсатора.

Наиболее чувствительные оптико-акустические ПТИ содержат оптический усилитель.

Коэффициент преобразования ПТИ зависит от совокупности оптических, тепловых и механических свойств чувствительного элемента камеры, а также от оптических и электрических характеристик микрофона. Оптические свойства камеры определяются характеристиками входного окна и спектральными характеристиками поглощающего покрытия. Последним может служить золотая чернь или полупрозрачный напыленный слой, причем электропроводные характеристики поглощающего слоя не должны влиять на характеристики ПТИ. В ближней и средней ИК-областях спектра подобный приемник интереса не представляет, так как вытесняется более чувствительными фотонными ПТИ, поэтому применяют его, главным образом, в дальней ИК-области спектра.

2.2.5 Оптические методы

Оптические методы исследования [2.58], получившие весьма ограниченное распространение для теплоточных измерений, лишь косвенно напоминают описанные. При распространении света в однородной по составу среде его скорость зависит от оптической плотности среды, которая, в свою очередь, является функцией массовой плотности, а значит, температуры и давления. При наличии градиента массовой плотности всякий световой луч, не параллельный вектору градиента плотности, искривляется в сторону увеличения плотности среды. Это явление было использовано в устройствах для исследования конвективного теплообмена.

Во всех случаях конвективного теплообмена в непосредственной близости к поверхности теплообмена существует ламинарный подслой, в котором передача теплоты осуществляется за счет теплопроводности. При малых проекциях градиента давления на перпендикуляр к теплообменной поверхности градиент относительной плотности будет равен

градиенту относительной температуры, но противоположен по направлению [5*].

Исследуемый сравнительно короткий цилиндр освещался узким кольцевым пучком параллельных лучей света. Отклонение лучей фиксировалось на пленке, достаточно удаленной от выходного (для световых лучей) торца цилиндра. Угол отклонения луча на выходе пропорционален градиенту температуры в подслое, а следовательно, и тепловому потоку, проходящему через поверхность цилиндра на данной образующей. Измерения получаются корректными, если лучи не выходят за пределы ламинарного подслоя и если области торцовых возмущений невелики. Тепловой баланс хорошо сводится при любых малых значениях теплового потока. При больших значениях потока наблюдается более ранний выход луча из пограничного подслоя в область пониженного градиента плотности, что приводит к значительным погрешностям измерений.

2.2.6 Фото- и радиометрические методы

Эти методы, также имеющие ограниченное распространение, основаны на фото- и радиометрических эффектах.

Явление возбуждения электронов под воздействием энергии теплового излучения получило название **фотоэффекта**. Если возбужденные квантами излучения электроны (фотоэлектроны) остаются в веществе и участвуют в токе проводимости, то фотоэффект называют внутренним. Если электроны покидают вещество, то имеет место внешний фотоэффект, сопровождающийся фотоэлектронной эмиссией. Внутренний фотоэффект наблюдается в чистых и примесных полупроводниковых материалах (кремний, германий, кадмий, теллур и др.). Внешний фотоэффект возникает в металлах и их соединениях (литий, натрий, калий, цезий, серебро и др.). Соответственно этим двум видам фотоэффекта делят и приемники теплового излучения [5*]:

– с внешним фотоэлектрическим эффектом, при котором поглощение фотона тонкой металлической пленкой сопровождается эмиссией электрона в прилежащее вакуумированное или разреженно заполненное пространство;

– с внутренним фотоэлектрическим эффектом, при котором поглощение квантов излучения сопровождается выделением свободных электронов, способных накапливаться внутри твердого тела в виде заметной разницы электрических потенциалов;

– с внутренним фотоэлектрическим эффектом, сопровождающимся заметным изменением электрического сопротивления.

Всем этим приемникам свойственна селективность восприятия, поэтому они, как правило, применялись с узкополосными светофильтрами.

Наиболее широко применялись элементы, использующие эффект заметного изменения электросопротивления. В отдельных случаях удавалось получить достаточно широкополосные приемники. В настоящее время найдены составы, эффективно реагирующие на излучение при длине волны больше 10 мкм. Правда, при этом приходится применять глубокое охлаждение до температуры кипения азота, водорода, а иногда и гелия [2.38, 2.39, 2.50, 2.59].

Однако, поскольку природа гаммы явлений, сопровождающих фотоэффекты, значительно отличается от природы радиационного теплообмена, приемники этой группы редко применяют для теплоточных измерений. Главным их недостатком является большая спектральная неоднородность чувствительности.

Радиометрический эффект состоит в возникновении сил отталкивания между двумя близко расположенными в разреженном газе пластинами неодинаковой температуры. Более холодная пластина со стороны, обращенной к горячей, бомбардируется молекулами газа, имеющими в среднем более высокую энергию, чем молекулы, бомбардирующие эту

пластину с противоположной стороны. В результате между пластинами появляется сила отталкивания, которая может служить мерой энергии излучения.

О плотности теплового излучения первоначально предполагали судить по оказываемому давлению на поглощающее или отражающее препятствие. В 1899 г. П.Н. Лебедеву удалось измерить действительное значение светового давления. Долгое время конструкции приборов с использованием светового давления оказывались неудачными. Только после появления оптических квантовых генераторов (лазеров) применение пондеромоторного эффекта оказалось настолько эффективным, что удалось, даже не прибегая к вакуумированию, создать крутильные весы, измеряющие энергию светового пучка [2.60, 2.61].

Конструктивно приборы делали либо в виде крутильных весов [2.61], в которых радиометрический момент закручивал упругую кварцевую нить и по углу поворота судили об измеряемой величине, либо в виде свободно опертой на острие турбинки с черно-блестящими крыльями, скорость вращения которой пропорциональна плотности падающего потока. Ряд чисто практических трудностей, в частности, зависимость давления в сосуде от температуры стенок, препятствовал созданию приборов такого типа, удовлетворяющих элементарным требованиям по точности, чувствительности и воспроизводимости результатов измерений.

2.2.7 Электротермический метод

В основу электротермического метода положен закон Джоуля-Ленца о теплоте, выделяющейся в металлическом проводнике при прохождении постоянного тока [4*, 2.28, 2.31]. Определяют тепловой поток Φ или его плотность q с применением электронагревательных устройств по результатам измерения потребляемой нагревателем количества энергии W . Определение значений этой величины производят ваттметром либо путем измерения силы тока I и падения напря-

жения ΔU амперметром и вольтметром, соответственно. Тепловой поток при этом вычисляют по формуле:

$$\Phi = I \cdot \Delta U . \quad (2.10)$$

Для наиболее точных измерений малых значений теплового потока используется потенциометрический способ измерения с применением образцовой катушки сопротивления [2.25], которую включают в электрическую цепь последовательно с основным нагревателем. Измерив потенциометром падение напряжения на нормальном сопротивлении (образцовой катушке) ΔU_0 и нагревателе ΔU , находят значение теплового потока по формуле:

$$\Phi = \Delta U \cdot \Delta U_0 / R_0 , \quad (2.11)$$

где R_0 – значение электрического сопротивления образцовой катушки.

Для обеспечения одномерности теплового потока принимаются специальные меры, например, организуя пассивную либо активную тепловую защиту нерабочих поверхностей электронагревателя [2.61–2.64]. На практике стремятся к тому, чтобы тепловые потери были пренебрежимо малы по сравнению с потоком теплоты, проходящей через исследуемую поверхность, либо идущую на нагрев испытываемого образца. Уменьшение искажений гидродинамической ситуации на теплообменной поверхности достигают путем размещения устройства для измерения теплового потока заподлицо с исследуемой поверхностью.

Рассмотрим в качестве примера тепломер В. К. Коробова [2.63], достаточно простой для монтажа на исследуемом объекте. Схема устройства этого тепломера приведена на рисунке 2.14. Устройство состоит из двух тонких термометров сопротивления 2 и 3, соединенных между собой тонкой диэлектрической пластиной 1, выполняющей функцию вспомогательной стенки. Термометры сопротивления одновременно являются рабочим и компенсационным электрическими нагревателями.

В этом устройстве реализован способ активной теплоизоляции. Однако наложение устройства этого типа на исследуемый объект равносильно локальному наложению на этот объект «идеальной» теплоизоляции, что приводит к локальному искажению температурного поля объекта.

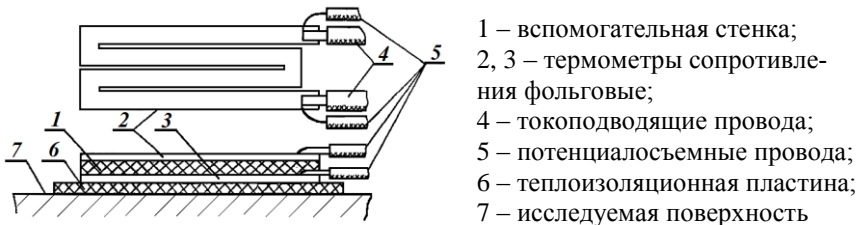


Рис. 2.14. Схема устройства тепломера В. К. Коробова

Этот недостаток устранен Д. М. Дудником [2.64] в устройстве для определения локальных коэффициентов теплоотдачи, схема которого дана на рисунке 2.15.

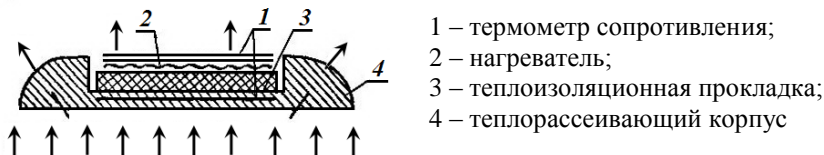


Рис. 2.15. Схема устройства тепломера Д. М. Дудника

Благодаря специальной форме корпуса и выполнению его из высокотеплопроводного материала тепловой поток, поступающий от исследуемой поверхности, рассеивается в окружающую среду.

Теплометрические устройства подобного типа применялись при исследовании теплообмена в электрических машинах, измерении теплопроводности, в приборах метрологического обеспечения теплофизических измерений, в компенсационных схемах для измерения потока теплового излучения.

2.2.8 Электрометрические методы

Среди методов теплотрии сравнительно обширную группу составляют электрометрические методы, базирующиеся на измерении электрических величин, которые заметно изменяются под воздействием теплоты, таких как электрическое сопротивление, емкость, электродвижущая сила (разность потенциалов), электрический ток, диэлектрическая проницаемость, поляризация и др. Путем регистрации результата измерения соответствующей электрической величины получают информацию об искомом тепловом потоке. К этой группе относятся резистометрический, емкостной, пироэлектрический, термоэлектрический и др. методы.

Резистометрический (болومترический) метод основан на использовании эффекта изменения электрического сопротивления от температуры. Развитие этот метод получил в связи с успехами физики в создании веществ с прогнозируемыми свойствами, когда были получены материалы с температурным коэффициентом сопротивления на порядок больше, чем у проволочных сопротивлений. Широкое применение нашел метод для измерения энергии электромагнитного излучения, главным образом, в инфракрасной области спектра [2.38, 2.42, 2.50, 2.65–2.67].

Средство измерения, в котором изменение температуры под действием измеряемого теплового излучения регистрируется с помощью термометра сопротивления, получил название **болометра** [2.50]. Служат болометры для измерения мощности интегрального излучения, а в совокупности со спектрометром – спектрального состава излучения.

Относительное изменение электрического сопротивления $\Delta R_{\vartheta}/R_{\vartheta}$ при изменении температуры на ΔT описывается приближенным равенством

$$\Delta R_{\vartheta}/R_{\vartheta} \approx \beta \cdot \Delta T, \quad (2.12)$$

где β – температурный коэффициент сопротивления [2.65, 2.66].

В связи с тем, что болометры чувствительны к изменению температуры окружающей среды, измерительные устройства выполняют по мостовой схеме, в два противоположных плеча которой включают два одинаковых чувствительных элемента: рабочий $R_{Э,Б}$ и компенсационный $R'_{Э,Б}$, расположенные в непосредственной близости друг от друга. Два других плеча моста – проволочные сопротивления ($R_{Э,1}$ и $R_{Э,2}$). Мостовая схема балансируется так, чтобы ток в измерительной диагонали моста при отсутствии теплового потока был равен нулю. Схема включения (а) металлического болометра и его внешний (б) вид приведены на рисунке 2.16.

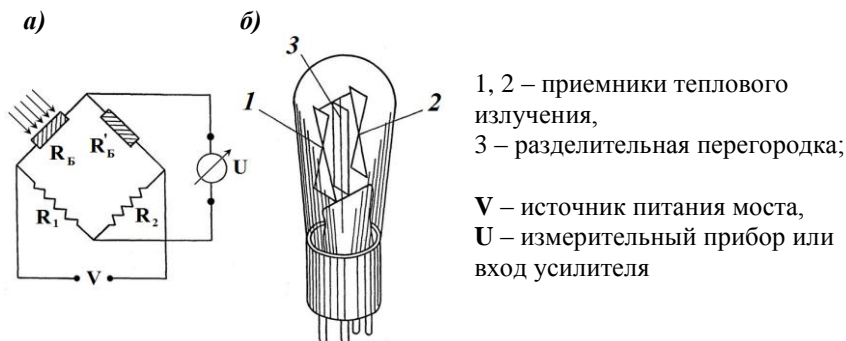


Рис. 2.16. Мостовая схема включения (а) и внешний вид (б) металлического болометра

В установившемся тепловом режиме, когда количество теплоты, выделяемое в элементе вследствие поглощения радиации, равно количеству теплоты, теряемой элементом в окружающую среду, приращение температуры равно:

$$\Delta T = \varepsilon \cdot \Phi / \gamma, \quad (2.13)$$

где ε – степень черноты поглощающего покрытия, γ – константа охлаждения.

Болометр, как ПТИ, характеризуется чувствительностью, порогом чувствительности (т. е. минимальным потоком, при котором возникающий сигнал сравним с шумами

болметра) и инерционностью. Чувствительность болометра представляет собой отношение изменения падения напряжения на чувствительном элементе болометра, вызванного изменением его электрического сопротивления, к количеству теплоты, выделившейся при поглощении теплового излучения, и определяется по формуле:

$$S = \Delta U / (\varepsilon \cdot \Phi), \quad (2.14)$$

откуда следует, что чувствительность болометра можно повышать в широких пределах, увеличивая силу тока в плечах моста. Однако, это ограничено тем, что при большой силе тока на чувствительности болометра сказывается собственный разогрев приемника, что требует специальных приемов для его компенсации или охлаждения.

Чувствительными элементами болометра служат тонкие слои металла толщиной от 0,1 мкм до 1 мкм (никель, золото, висмут и др.) и полупроводниковые материалы с большим температурным коэффициентом сопротивления, поверхность которого покрывают слоем черни, имеющей большой коэффициент поглощения в широкой области спектра, а также тонкая проволока из сверхпроводника.

Чувствительный элемент болометра обычно помещают в стеклянный (см. рис. 2.16, б) или металлический баллон с окошком, которое при необходимости вакуумирования закрывают материалом, хорошо пропускающим излучение (монокристаллом йодистого калия, бромистого калия, хлористого натрия).

Современные болометры по способу отведения поглощенной энергии делятся на группы с естественным охлаждением и искусственным до глубоко низких значений температуры. Приемники первой группы уступают по чувствительности, но выигрывают в быстродействии. Болометры, охлаждаемые, например, жидким гелием, более стабильны и значительно чувствительней, но сложны в исполнении и эксплуатации, поэтому находят применение только в прецизионных лабораторных исследованиях [2.66].

Чувствительный элемент (далее – ЧЭ) болометров с естественным охлаждением изготавливают из металла или полупроводника. Для металлических ЧЭ используют платину, никель, висмут, сурьму, золото с температурным коэффициентом сопротивления порядка $(0,3-0,4) \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$. Среди них лучшими характеристиками обладают изготовленные из золота: большой чувствительностью ($0,12 \text{ В} \cdot \text{см}^2/\text{Вт}$) при малой инерционности ((3–8) мс) и малом пороге чувствительности (10^{-7} Вт). Голеш [2.67] снизил порог чувствительности до $5,9 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}$, используя висмут и глубокое охлаждение (до 138 К). Дальнейшее снижение порога чувствительности достигается в полупроводниковых, сверхпроводящих и диэлектрических болометрах. В полупроводниковых приборах ЧЭ является термистор, выполненный в виде многослойной пластинки, монтируемой на металлическом цоколе, как показано на рисунке 2.17.

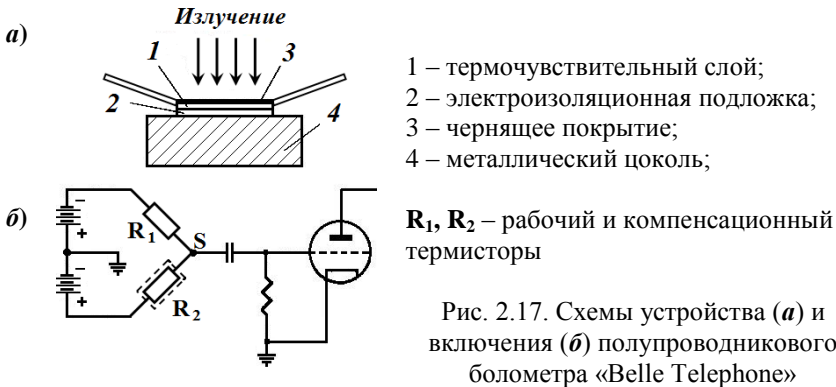


Рис. 2.17. Схемы устройства (а) и включения (б) полупроводникового болометра «Belle Telephone»

Термочувствительный слой выполняют из германия и сурьмы, а также из окислов марганца, никеля, кобальта в виде пленки, которую наносят на электроизоляционную подложку из стекла или кварца. Наружную поверхность покрывают чернью. Термисторы в болометре включают, как правило, по мостовой схеме. Большое сопротивление термисторов позволяет присоединить чувствительный элемент непосредственно к сетке лампы усилителя.

Полупроводниковые болометры обладают обычно дополнительным токовым шумом, из-за чего их порог чувствительности несколько меньше, чем у металлических, но чувствительность достигает нескольких сотен и тысяч В/Вт, однако зависит от времени экспонирования.

Болометр, ЧЭ которого выполнен из сверхпроводящей проволоки, называют *сверхпроводящим*. Одна из конструкций сверхпроводящего болометра приведена на рисунке 2.18.

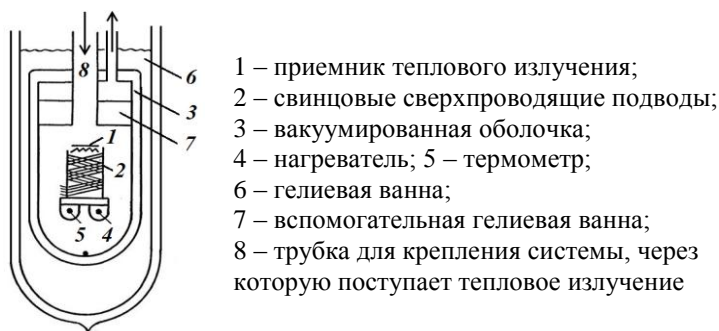


Рис. 2.18. Схема сверхпроводящего болометра

Он работает при очень глубоком охлаждении (до (3–15) К) и основан на резком изменении электрического сопротивления металла при переходе от нормального состояния к сверхпроводящему. В переходном диапазоне, составляющем доли кельвина, температурный коэффициент становится очень большим (~5000% на 1 К), что приводит к существенному увеличению чувствительности. Низкая температура, достигаемая за счет глубокого охлаждения, обеспечивает малый уровень шумов и малую теплоемкость, благодаря чему порог чувствительности составляет от 10^{-10} до 10^{-12} Вт [2.65]. В болометрах этого типа для изготовления чувствительных элементов применяют тантал, олово, нитрид ниобия. Современные болометры в спектральном диапазоне до 50 мкм при площади ЧЭ от 1 мм^2 до 10 мм^2 имеют порог чувствительности (10^{-11} – 10^{-10}) Вт/Гц при постоянной времени (10^{-3} – 10^{-1}) с, а сверхпроводящие, соответственно, 10^{-12} Вт/Гц и 10^{-4} с.

Емкостной метод основан на использовании температурной зависимости диэлектрической проницаемости материалов, которая при температуре выше точки Кюри подчиняется закону Кюри–Вейсса [2.68]. Применительно к емкости конденсатора эта зависимость имеет вид

$$C = K/(T - T_K), \quad (2.15)$$

где C – емкость, K – постоянная, T_K – температура точки Кюри.

Поскольку ЧЭ является параметрическим преобразователем, а его сопротивление носит реактивный характер, то это позволяет повысить чувствительность за счет увеличения измерительного тока при малом самонагреве [2.69]. Термозависимую емкость включают вместе с индуктивностью в колебательный контур, резонансная частота которого зависит от температуры [2.68]:

$$\nu_{PEZ} = A \cdot (T - T_K)^{1/2}, \quad (2.16)$$

где A – константа.

Измерение кратковременного теплового потока емкостным методом производится посредством записи на регистрирующий прибор, например, осциллограф, кривой изменения емкости ЧЭ во времени. В качестве ЧЭ служит конденсатор с тонкими металлическими обкладками, устанавливаемый заподлицо с поверхностью теплообмена. Тепловой поток входит внутрь конденсатора через обкладку, температура которой из-за кратковременности воздействия не успевает измениться. При незначительной толщине металлических обкладок диэлектрическая проницаемость диэлектрика является линейной функцией температуры. Таким образом, произведя запись изменения емкости во времени, по наклону записанной кривой в данной точке определяют мгновенное значение теплового потока. В качестве диэлектрика в ЧЭ применяют керамику (стронций-висмут-титанат), сохраняющую линейную зависимость диэлектрической проницаемости от температуры в диапазоне (0–200)°С.

Пироэлектрический метод [2.70, 2.71] основан на использовании пироэлектрического эффекта, состоящего в том, что при изменении температуры кристалла, обладающего спонтанной поляризацией, изменяется ее значение и при этом на гранях кристалла, перпендикулярных особенной полярной оси, возникают поверхностные заряды, которые регистрируют измерительными приборами.

Пироэлектрический эффект был известен давно, однако практического применения не находил. Появление сегнетоэлектрических кристаллов – очень активных пироэлектриков – привело к использованию этого явления для эффективной регистрации теплового излучения и открыло возможность создания быстродействующих ПТИ. В качестве ЧЭ в пироэлектрических ПТИ используют ряд нецентросимметричных кристаллов: триглицинсульфат и ему изоморфные, титанат бария и его производные, ниобат, танталат и сульфат лития, сегнетоэлектрические керамики, пироэлектрические полимеры, стекла и композиты [2.72].

Пироэлектрические ПТИ используют для измерения излучения в очень широком диапазоне длины волны. Существенным преимуществом является малая собственная постоянная времени. Качественное отличие пироэлектрических приемников от других типов состоит в том, что выходной сигнал пропорционален производной по времени от прироста температуры при облучении в отличие от других, реакция которых на излучение пропорциональна приросту температуры чувствительного элемента.

На пироэлектрическом эффекте создано много различных типов ПТИ и преобразователей [2.47, 2.65, 2.71, 2.73]. Наиболее распространены одноэлементные приемники. Наилучшая чувствительность достигнута на основе триглицинсульфата, легированного L - α – аланином. Значения их удельной обнаружительной способности составляют $2 \cdot 10^9$ см \cdot Гц $^{1/2}$ /Вт. Максимальное быстродействие получено на монокристаллах тантала лития порядка 170 пс.

Разновидностью приборов, основанных на пирозффекте, являются ПТИ, использующие пирромагнитный эффект, который является аналогом пирозлектрического и заключается в изменении степени намагниченности ферромагнитного материала под действием температуры, что вызывает возникновение пирромагнитной ТЭДС в детектирующей катушке [2.74].

Термоэлектрический метод основан на термоэлектрическом эффекте Зеебека – одном из 12 известных на сегодня в физике твердого тела термоэлектрических явлений, описывающих взаимосвязь между тепловыми и электрическими процессами в проводниках электричества [2*-6*, 2.75–2.77].

Эффект Зеебека состоит в том, что при нагревании спая двух разнородных проводников возникает ТЭДС, вызывающая в цепи электрический ток. На рисунке 2.19 приведены схемы простейшего термоэлемента (термопары) (а) и батареи термоэлементов (б), состоящих из двух разнородных проводников 1 и 2, спай (спаи) которых снабжены тепловоспринимающей поверхностью 3 с поглощательной способностью а.

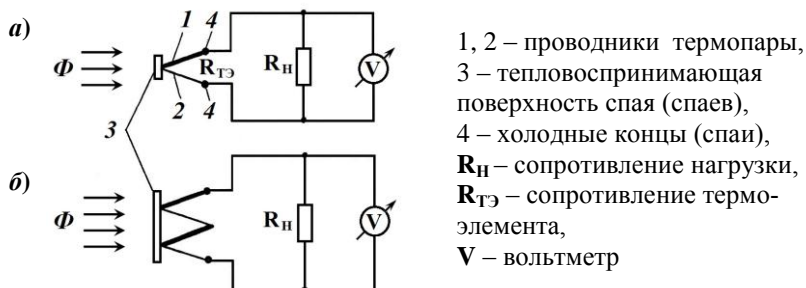


Рис. 2.19. Схемы включения термоэлементов в термоэлектрическом приемнике излучения: а – единственный термоэлемент; б – батарея термоэлементов

При попадании на поверхность термоэлемента 3 потока теплового излучения Φ горячие спаи принимают более высокую температуру, чем холодные 4. С возникновением разности температуры вдоль проводника электроны с горячего

конца начинают диффундировать в направлении, обратном градиенту температуры, так как они имеют более высокую энергию и скорость, чем на холодном конце. Избыток электронов на холодном конце создает отрицательный заряд, а на горячем остается нескомпенсированный положительный заряд. Возникает ТЭДС и в цепи появляется ток. Если цепь замкнуть через сопротивление нагрузки R_H , то появляется термоэлектрический сигнал термоэлемента $\Delta E_{TЭ}$, значение которого определяется соотношением:

$$\Delta E_{TЭ} = \alpha_{TЭ} \cdot \Delta T_{TЭ}, \quad (2.17)$$

где $\alpha_{TЭ}$ – термоэлектрический коэффициент Зеебека, численно равный разности потенциалов при разности температуры 1 К; $\Delta T_{TЭ}$ – перепад температуры на термоэлементе, возникающий на нем при прохождении теплового потока.

Коэффициент Зеебека металлических термоэлементов составляет от единиц до нескольких десятков мкВ/К, у полупроводниковых – значительно выше [4*, 2.75]. Приборами для измерения теплового потока, реализующими этот метод, регистрируется изменение ТЭДС, возникающей в термоэлементах при изменении температуры их тепловоспринимающей поверхности при воздействии теплового потока.

Если эффектом Пельтье пренебречь, то выражение для интегральной вольт-ваттной чувствительности ПТИ S_Φ , равной отношению генерируемого сигнала к падающему потоку $\Delta E_{TЭ} / \Phi_{пад}$, с учетом формулы (2.17) имеет вид:

$$S_\Phi = \alpha_{TЭ} \cdot \Delta T_{TЭ} / \Phi_{пад}. \quad (2.18)$$

Исходя из того, что воспринятый термоэлементом тепловой поток равен

$$\Delta \Phi_{TЭ} = a \cdot \Phi_{пад} = \Lambda \cdot \Delta T_{TЭ}, \quad (2.19)$$

имеет место соотношение:

$$\Delta T_{TЭ} / \Phi_{пад} = a / \Lambda_{TЭ}, \quad (2.20)$$

где a – поглощательная способность поверхности термоэлемента,

$\Lambda_{TЭ}$ – тепловая проводимость термоэлемента (в Вт/К).

С учетом соотношения (2.20) выражение (2.18) для вольт-ваттной чувствительности преобразуется к виду:

$$S_{\Phi} = \alpha_{TЭ} \cdot a / \Lambda_{TЭ}. \quad (2.21)$$

Таким образом, чтобы увеличить чувствительность необходимо увеличить поглощательную способность a и коэффициент ТЭДС $\alpha_{TЭ}$ и уменьшить тепловую проводимость $\Lambda_{TЭ}$. Увеличение a можно выполнить чернением тепловоспринимающей поверхности спаев, а уменьшение $\Lambda_{TЭ}$ – например, вакуумированием приемного элемента.

Эффект Пельтье состоит в том, что при протекании тока через спай двух проводников с термоэлектрическими коэффициентами α_1 и α_2 , в месте спаивания в единицу времени выделяется (или поглощается) некоторое количество теплоты, прямо пропорциональное силе тока: $\Phi_{\pi} = \pi \cdot I$. Здесь π – коэффициент Пельтье, равный $(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot T$, (размерность коэффициента Пельтье Вт/А = В, а теплоты Пельтье – Вт). Исходя из этого:

$$\Phi_{\pi} = -\alpha_{TЭ} \cdot T \cdot I. \quad (2.22)$$

Генерируемая термоэлементом ТЭДС ΔE с учетом эффектов Зеебека и Пельтье равна:

$$\Delta E = \Delta E_{TЭ} - \Delta E_{\pi}, \quad (2.23)$$

причем $\Delta E_{\pi} = \Phi_{\pi} \cdot \alpha_{TЭ} / \Lambda_{TЭ}$.

С учетом формул (2.18), (2.22) выражение (2.23) принимает вид

$$\Delta E = \alpha_{TЭ} \cdot \Delta T - I \cdot \alpha_{TЭ}^2 \cdot T / \Lambda_{TЭ}. \quad (2.24)$$

Эффект Пельтье увеличивает эффективное электрическое сопротивление цепи термоэлемента на $\alpha_{TЭ}^2 \cdot T / \Lambda_{TЭ}$. Исходя из уравнения баланса:

$$I \cdot R_{\vartheta} + I \cdot \alpha_{T\vartheta}^2 \cdot T / \delta_{T\vartheta} = \alpha_{T\vartheta} \cdot \Delta T, \quad (2.25)$$

формула для вычисления силы тока имеет вид:

$$I = \alpha_{T\vartheta} \cdot \Delta T / (R_{\vartheta} + \alpha_{T\vartheta}^2 \cdot T / \Lambda_{T\vartheta}), \quad (2.26)$$

где R_{ϑ} – электрическое сопротивление термоэлемента.

При использовании термоэлементов, генерирующих ТЭДС, вектор которой перпендикулярен вектору теплового потока (поперечная ТЭДС), чувствительность не зависит от геометрического размера термоэлемента вдоль направления теплового потока. Это, в принципе, снимает ограничение на возможность создания быстродействующих ПТИ без потери чувствительности. Эта способность реализуется в ПТИ с анизотропными, зонально-неоднородными, искусственно-анизотропными, вихревыми и другими типами термоэлементов, генерирующих поперечные ТЭДС [4*, 5*, 2.44, 2.45, 2.78–2.81].

Одним из эффективных способов увеличения чувствительности термоэлектрического устройства для измерения теплового потока является последовательное включение нескольких термоэлементов в блок или батарею термоэлементов, что приводит к многоспайному ЧЭ, как показано на рис. 2.19, б. Для изготовления батареи термоэлементов, кроме последовательного соединения, например, путем сварки или пайки чередующихся разнородных термоэлектродов, успешно применяется технология гальванического осаждения на основной термоэлектрод парного термоэлектрического материала [3*–5*]. В этом случае термоэлемент представляет собой пару из чистого и биметаллического термоэлектродов.

Чувствительность гальванического термоэлемента определяется для конкретного типа батарейного преобразователя и зависит не только от его конструктивных особенностей, но и от электро- и теплопроводных свойств составляющих его компонентов.

Устройства для измерения теплового потока, выполненные с использованием термоэлектрических ЧЭ, широко при-

меняются в науке и технике [2.75]. Это обусловлено тем, что они являются генераторами ТЭДС и при работе не требуют дополнительных источников питания. При этом также исключена возможность появления токовых шумов, свойственных, например, болометрам.

Рассмотренные выше методы базируются на сравнительно небольшом количестве физических явлений. Поиски новых методов измерения направлены главным образом на привлечение ранее не использованных эффектов. Например, с целью регистрации слабых потоков от работающих транзисторов авторы работы [2.82] воспользовались ярко выраженной зависимостью скорости проявления засвеченной фотоэмульсии от температуры, при которой оно происходит. На основе термочувствительности химических реакций, видимо можно создать очень чувствительные и точные приборы для измерения радиационного теплового потока.

В заключение можно отметить, что основной задачей теплотметрии является создание таких СИТ, которые бы обладали локальностью измерений, малым тепловым сопротивлением, высокой чувствительностью и хорошей воспроизводимостью результатов измерения, а также имеющих надежное метрологическое обеспечение.

2.3 Первичные преобразователи теплового потока

Любой метод измерения физической величины реализуется посредством специального технического устройства – СИТ, имеющего нормированные метрологические характеристики. Основой любого СИТ является первичный измерительный преобразователь (сенсор), который в цепи является первым элементом, испытывающим воздействие искомой физической величины. Эта величина преобразуется в нем в иную физическую величину, не всегда доступную для непосредственного наблюдения, но удобную для прямого измерения, передачи, дальнейших преобразований, обработки, хран-

нения и представления в форме, приемлемой для восприятия и документирования.

В первичном преобразователе теплового потока (ПТП) даже в самой упрощенной схеме последовательности преобразований искомая физическая величина – тепловой поток – преобразуется в разность температуры; разность температуры – в разность значений, например, термоэлектрического потенциала, или электрического сопротивления, или электрической емкости и так далее, которые в многоступенчатой схеме дальнейших преобразований превращаются в некую выходную информацию, позволяющую определить значение искомого теплового потока или его поверхностной плотности.

Таким образом, ПТП – это устройство, в котором при прохождении через него теплового потока возникает разность температуры, а для ее измерения предусмотрен термочувствительный элемент. В качестве измерителей разности температуры в ПТП применяют различные термочувствительные элементы [4*–6*, 2.68, 2.69, 2.75], которые в сочетании с конструктивными и технологическими особенностями привели к появлению широкой гаммы различных ПТП.

Более подробно остановимся на двух типах ПТП, принципиально отличающихся конструктивным исполнением, которое обусловлено различным способом прохождения теплового потока через термочувствительный элемент ПТП: с поперечным растеканием теплового потока и в виде вспомогательной стенки (плоской или цилиндрической), расположенной перпендикулярно направлению измеряемого теплового потока.

2.3.1 ПТП с поперечным растеканием теплового потока

В ПТП с поперечным растеканием теплоты [3*, 5*, 1.9, 2.80, 2.81, 2.83–2.85] измеряемый поток, проходя через термочувствительный элемент, полностью или частично изменяет свое первоначальное направление. ПТП данного типа при-

меняют исключительно для измерения плотности потока теплового излучения.

В этой группе наиболее типичным является ПТП, известный под названием «Датчик Гардона» [2.80, 2.86], а позже «Преобразователь Шмидта-Боелтера» [2.87]. На рисунке 2.20 представлена принципиальная схема ПТП этого типа.



Поток теплового излучения воспринимается поверхностью константановой фольги 1, припаянной по периферии к массивному медному блоку 2, куда и перетекает в радиальном направлении. Медный блок выполняет функцию изотермического теплостока. При этом температура в центре фольги становится больше, чем на периферии (см. рис. 2.20, а).

Дифференциальной термопарой, составленной из проводников 3 и 4, припаянных к центру константановой фольги и медному блоку, измеряется разность температуры $\Delta T = T_1 - T_2$, по значению которой вычисляют плотность принятого потока излучения по формуле:

$$q_{\text{ПТП}} = K_{\text{ПТП}} \cdot E \cdot h / r^2, \quad (2.27)$$

где $K_{\text{ПТП}}$ – коэффициент преобразования с размерностью Вт/(м·мВ), найденный при аттестации ПТП или расчетом; E – сигнал термопары; h и r толщина и радиус константановой фольги.

При длительных измерениях теплового потока большой интенсивности применяют охлаждение блока 2. При кратко-

временных – ограничиваются отводом теплоты за счет теплоемкости блока, которая на много порядков выше теплоемкости тепловоспринимающего диска из фольги. Толщина фольги обычно меньше 0,3 мм, благодаря чему инерционность этого типа ПТП мала. Ее можно рассчитать по формуле:

$$\tau^* = b \cdot r^2, \quad (2.28)$$

где b – коэффициент, определяемый расчетом или при аттестации.

Уменьшением размеров фольги можно обеспечить инерционность на уровне долей секунды, что делает ПТП с поперечной составляющей пригодными для измерений потока теплового излучения не только в стационарном режиме, но и в быстро протекающих процессах.

2.3.2 ПТП вида вспомогательной стенки

Как показывает опыт теплоточных измерений, ПТП вида вспомогательной стенки являются наиболее востребованными при наличии надежного метрологического обеспечения и пригодными для измерения теплового потока или его плотности при любом способе передачи теплового потока [2*–5*, 1.19, 2.88–2.95]. Принцип действия ПТП вида вспомогательной стенки состоит в измерении разности температуры ΔT , возникающей при прохождении теплового потока через стенку конечной толщины, расположенную на пути теплового потока по нормали к его направлению, или значений температуры двух параллельных сечений стенки, а значение его поверхностной плотности вычисляют по формуле:

$$q = \chi \cdot \Delta T / h, \quad (2.29)$$

где χ и h – известные коэффициент теплопроводности и толщина стенки.

Таким образом, ПТП вида вспомогательной стенки содержит два обязательных элемента: собственно стенку, на которой возникает разность температуры, и измеритель этой разности.

Эффект присутствия измерительного органа желательно сводить к минимуму, поэтому, по возможности, вспомогательная стенка по тепловому сопротивлению не должна быть дополнительной, как ее вначале называли [4*]. Если же дополнительное сопротивление передаче теплоты из-за присутствия ПТП на контролируемом объекте неизбежно, необходимо знать не только его числовое значение, но и долю в суммарном тепловом сопротивлении цепи, проводящей измеряемый тепловой поток [5*].

Преобразователи, основанные на принципе вспомогательной стенки, первично применяли не для измерения теплового потока через стенку, а для контроля его отсутствия [2.96].

Одним из первых измерительных ПТП вида вспомогательной стенки, доведенных до серийного производства, является ленточный тепломер Э. Шмидта, более известный как «пояс» Шмидта [3*, 4*, 2.88], долгое время применявшийся для измерения теплотерь через теплоизоляцию, главным образом, труб. Конструктивно он представлял собой резиновую ленту, на обеих поверхностях которой расположены 200 спаев батареи дифференциальных термоэлементов, сверху завулканизированных такой же резиной. Известен ПТП, аналогичный по идее, но конструктивно выполненный в виде резинового диска с заформованной батареей термоэлементов, количество которых доведено до 1500 – 2000 шт., что способствовало увеличению чувствительности в 2 – 3 раза по сравнению с поясом Шмидта [5*].

Во второй половине 20-го века был создан ряд ПТП, в которых собственно вспомогательная стенка выполнялась из различных материалов, например, из паронита, полиметилметакрилата, полиэтилена, асбестового картона, стекла, стеклоткани. С целью повышения термостойкости ПТП и расширения диапазона в область высоких значений плотности теплового потока в качестве материала для стенки использовали чистые металлы, сплавы, полупроводники.

ПТП вида вспомогательной стенки, как правило, выполняют в виде плоской конструкции (пластины квадратной, прямоугольной или круглой формы) или цилиндрической оболочке, выходной сигнал теплочувствительной зоны которой является электрическим. В зависимости от той физической величины, по измеренному значению которой определяют тепловой поток, были созданы резистивные, тензорезистивные, емкостные, пироэлектрические, термопироэлектрические, а также термоэлектрические ПТП, включая металлические, полупроводниковые и анизотропные.

Резистивные ПТП [2.92, 2.97–2.99] в принципе могут быть весьма точными, поскольку электрическое сопротивление из всех электрических величин измеряется наиболее точно [2.68]. В резистивных ПТП на торцовых плоских поверхностях вспомогательной стенки установлены термозависимые плоские термометры сопротивления.

Одним из первых в литературе описан резистивный ПТП [2.92], выполненный в виде таблетки из алунда, на обеих плоских поверхностях которой размещены пленочные платиновые термометры сопротивления подковообразной формы. К краям пленки припаяны серебряные выводы. Эти ПТП применялись для исследования теплообмена в аэродинамической трубе.

К недостаткам резистивных ПТП следует отнести малое электрическое сопротивление термометров и в связи с этим низкая чувствительность к тепловому потоку, в силу чего погрешность измерения достигала 17% .

Значительно увеличить чувствительность резистивного ПТП удалось автору [2.98], применившему в качестве термометров сопротивления две катушки из медной проволоки сопротивлением 500 Ом каждая, изготовленные из проволоки, навитой в один слой на цилиндрический каркас. Витки катушки, скрепленные лаком, после его высыхания снимали с каркаса и сплющивали в плоские пластинки, монтируемые далее на поверхностях вспомогательной стенки.

На рисунке 2.21 приведены конструкция (а) и схема коммутации сопротивлений в мост Уинстона (б), сбалансированный в условиях отсутствия теплового потока.

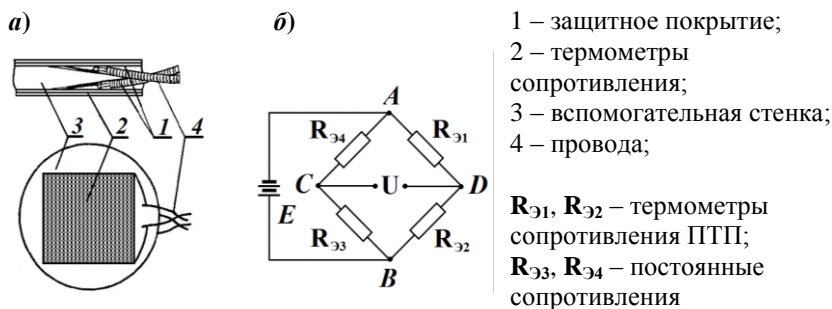


Рис. 2.21. Резистивный ПТП вида вспомогательной стенки:
 а – схема устройства; б – мостовая схема коммутации

Температурный диапазон такого ПТП ограничен термостойкостью материала вспомогательной стенки (полиметилметакрилат или поливинилхлорид). Использование никелевых термометров сопротивления в сочетании с алундовой вспомогательной стенкой значительно расширило диапазон рабочей температуры (до 1000 К) [2.97].

По техническому решению, предложенному в [2.99], значительно упрощающему технологию изготовления резистивных ПТП и предусматривающему их серийный выпуск, на обеих поверхностях вспомогательной стенки из полиимидной пленки нанесены термометры сопротивления по технологии изготовления печатных плат. Термометры сопротивления R_{31} и R_{32} скоммутированы в измерительный мост Уинстона, при этом расположены как можно близко к постоянным сопротивлениям моста R_{33} и R_{34} , как показано на рисунке 2.22. В этом ПТП термометры сопротивления с четными и нечетными индексами расположены на разных поверхностях вспомогательной стенки. Благодаря тому, что все входящие в ветви моста термометры сопротивления термозависимы и соединены короткими связями между собой, обеспе-

чена высокая чувствительность к измеряемому параметру с достаточной точностью.

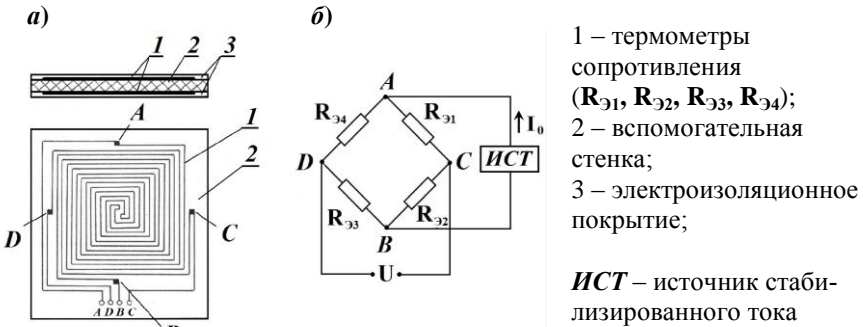


Рис. 2.22. Резистивный ПТП с четырьмя термометрами сопротивления. *а* – схема устройства; *б* – мостовая схема коммутации термометров сопротивления

Существенными недостатками резистивных ПТП являются выделение теплоты термометрами сопротивления, что искажает измеряемый тепловой поток, и весьма сложная регистрирующая аппаратура. Кроме того, в тонких резистивных ПТП, к сожалению, проявляется паразитный тензорезистивный эффект, вызываемый механическими нагрузками.

Тензорезистивные ПТП основаны на тензорезистивном эффекте [2.100, 2.101], состоящем в изменении электрического сопротивления твердого проводника (металла, полупроводника) в результате его деформации.

В ПТП, предложенном авторами [2.102], ЧЭ измерителя разности температуры, выполненные из термонеzависимого резистивного материала, расположены в наружных слоях трехслойной вспомогательной стенки, как это показано на рисунке 2.23.

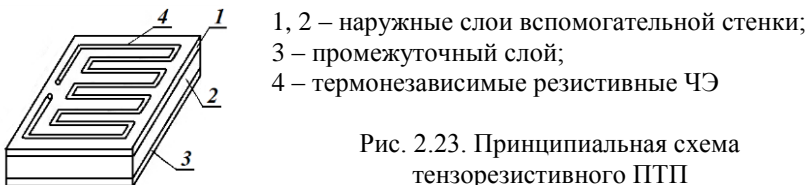


Рис. 2.23. Принципиальная схема тензорезистивного ПТП

Наружные слои выполнены из материала с положительным коэффициентом линейного расширения (например, из алюминия, для которого он равен $2,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), а средний – с отрицательным (например, из инвара с коэффициентом, равным минус $0,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).

В термoneзависимых резистивных элементах, механически жестко связанных с наружными слоями, проявляется тензорезистивный эффект, приводящий к появлению разности электрического сопротивления резистивных элементов наружных слоев, которая пропорциональна тепловому потоку. Измерение разности сопротивления осуществляется по разности падения напряжения на резистивных элементах при пропускании измерительного тока или включением резисторов в мостовую электрическую схему. Большим недостатком тензорезистивных ПТП, как и резистивных, является выделение теплоты термометрами сопротивления при пропускании через них измерительного тока.

В емкостных ПТП используется температурная зависимость диэлектрической проницаемости керамических материалов, например, конденсаторов, которая при температуре выше точки Кюри подчиняется закону Кюри–Вейсса при малом самонагреве [2.68, 2.69]. В [2.103] емкостный ПТП предложено применять для измерения кратковременного теплового потока. Конструктивно он представляет собой конденсатор – керамическую облатку с серебряными обкладками. В качестве материала для конденсатора предложена керамика СВТ (стронций-висмут-титанит). Толщину облатки выбирают, исходя из требования неизменности тепловых условий на «холодной» стороне за время действия теплового потока. Инерционность изменения емкости в зависимости от теплового потока характеризуется толщиной (около $0,3 \text{ мкм}$) серебряных обкладок. Некоторая трудность практического осуществления этой конструкции состоит в ее аттестации при переводе записанной осциллографом зависимости емкости от времени в зависимость плотности теплового потока $q = f(\tau)$.

В емкостном ПТП, предложенном в [2.104], чувствительный элемент представляет собой вспомогательную стенку, выполненную из диэлектрика, на обеих поверхностях которой смонтированы керамические металлизированные с двух сторон пластинки, изменяющие свою диэлектрическую проницаемость в зависимости от температуры. Ферроэлектрические материалы более подходят для температурных измерений в емкостном ПТП, чем полимеры, так как в них практически отсутствуют гистерезисные явления [2.105].

Пироэлектрические ПТП, основанные на пироэлектрическом эффекте (см. 2.2.8 и [2.70, 2.71]) применяются для измерения потока теплового излучения. Для ЧЭ в пироэлектрических ПТИ используют ряд нецентросимметричных кристаллов: триглицинсульфат и ему изоморфные; титанат бария и его производные; ниобат, танталат и сульфат лития; сегнетоэлектрические керамики, пироэлектрические полимеры; стекла и композиты [2.71, 2.72, 2.105–2.109]. Принцип работы пироэлектрического ПТИ проиллюстрирован на рисунке 2.24.

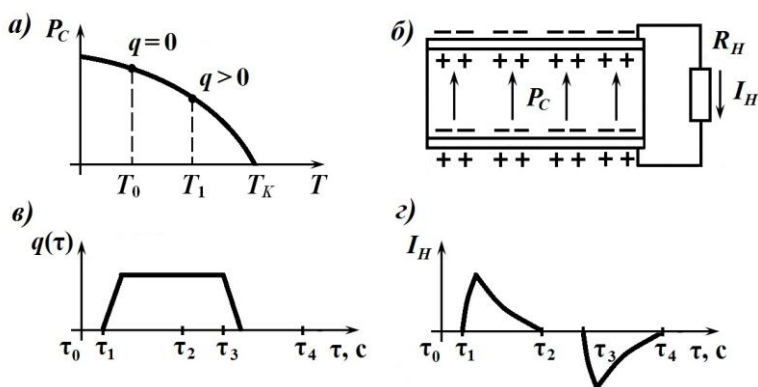


Рис. 2.24. Принцип работы пироэлектрического ПТП:
a – зависимость спонтанной поляризации P_C от температуры,
б – простейшая модель пироэлектрического ПТП,
в – график изменения падающего на ПТП потока теплового излучения $q(\tau)$, *г* – график изменения тока I_H в нагрузочном резисторе R_H

В простейшей модели пироэлектрического ПТП (см. рис. 2.24, б) чувствительный элемент представляет собой плоскопараллельную пластину с двумя электродами, нанесенными на ее параллельные поверхности. Пластина, будучи пироактивной, обладает спонтанной поляризацией, которую можно определить как дипольный момент единицы объема и схематически представить в виде диполей, направленных от нижнего электрода к верхнему. При постоянной температуре, когда мощность прерываемого потока излучения $q(\tau) = 0$, система «кристалл – электроды» в целом электронейтральна. Если кристалл подключить к нагрузочному сопротивлению R_H , ток в цепи будет отсутствовать.

Если на кристалл (в момент времени τ_1) поступает радиационный поток плотностью $q(\tau)$, то под действием теплового излучения кристалл нагревается и его спонтанная поляризация уменьшается. Это можно объяснить как уменьшение дипольного момента. При этом на электродах чувствительного элемента освобождаются заряды и через сопротивление R_H потечет ток I_H . При стабилизации температуры стабилизируется и спонтанная поляризация, а ток падает до нуля (в момент τ_2). При прекращении действия потока $q(\tau)$ появляется ток обратной полярности (в момент τ_3), который уменьшается до нуля по мере стабилизации температуры и спонтанной стабилизации (в момент τ_4).

Отличительной особенностью пироэлектрического ПТП является зависимость выходного сигнала от скорости изменения температуры, что определяет его быстродействие.

Пироэлектрический ток равен:

$$I_H = -A_{чЭ} \cdot \frac{dP_C}{d\tau} = A_{чЭ} \cdot \gamma \cdot \frac{dT}{d\tau}, \quad (2.30)$$

где $A_{чЭ}$ – площадь чувствительного элемента;

$\gamma = -dP_C/dT$ – пироэлектрический коэффициент.

Таким образом, сигнал пироэлектрического ПТП пропорционален производной температуры, а при стабильной

температуре равен нулю. Измеряемый поток теплового излучения легко можно промодулировать, то есть сделать переменным, и измерять с помощью пироэлектрического ПТП. Конвективную и кондуктивную составляющие сложного теплообмена промодулировать практически невозможно, то есть для измерения стационарных и медленно меняющихся составляющих такие ПТП практически не применимы.

Из решения уравнения теплового баланса для пироэлектрического ПТП можно получить амплитудно-частотную характеристику чувствительности, которая характеризуется низкочастотным спадом, обусловленным тепловыми процессами, и высокочастотным спадом, обусловленным электрической постоянной времени.

В зависимости от направления вектора поляризации P_C при облучении различают пироэлектрические ПТИ продольного и поперечного типов, схемы которых приведены на рисунке 2.25 [2.73].



Рис. 2.25. Принципиальные схемы чувствительного элемента пироэлектрического ПТИ: *а* – ПТИ продольного типа; *б* – ПТИ поперечного типа

Чувствительность пироэлектрического ПТИ продольного типа выше, чем у поперечного. Так как у продольного ПТИ емкость, определяемая площадью электродов, больше, чем у поперечного ПТИ, постоянная времени поперечного ПТИ меньше: $\mu_{\text{ПРОД}} = 10^{-5} \dots 10^{-6} \text{с}$, $\mu_{\text{ПОПЕР}} = 10^{-7} \dots 10^{-8} \text{с}$. При использовании золотой черни с теплоемкостью порядка $2,5 \cdot 10^{-5} \text{Дж}/(\text{К} \cdot \text{см}^3)$ расчетное значение постоянной времени $\mu_{\text{ПОПЕР}} = 10^{-7} \text{с}$. Кроме того, ПТИ поперечного типа можно из-

готовить без чернящего покрытия тепловоспринимающей поверхности, что также уменьшает их инерционность.

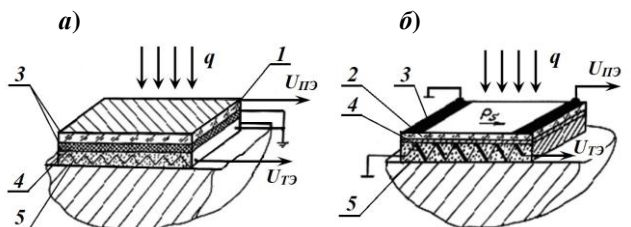
Пирозлектрический ток, генерируемый ПТИ, является сложной функцией физических характеристик кристалла, его геометрических размеров и условий теплообмена со средой и зависит от среднего прироста температуры приемного элемента и скорости изменения прироста температуры. Средний прирост температуры ПТИ обратно пропорционален частоте модуляции, а скорость его изменения прямо пропорциональна частоте модуляции. Действие этих двух факторов уравнивается в достаточно широком диапазоне частоты, чем и объясняется малая инерционность пирозлектрических ПТИ.

Пирозлектрические ПТИ не требуют источников питания. Для получения равномерной спектральной характеристики в достаточно широких спектральных диапазонах используют металлические черни и лакокрасочные покрытия [2.105, 2.110]. Следует отметить, что пирозлектрические приемники – первые быстродействующие ПТИ при комнатных значениях температуры. Повышенный интерес к их разработке и серийному выпуску связан с тем, что они, обладая такими достоинствами, как неселективность спектральной характеристики в широком диапазоне длины волны и температурная стабильность энергетических и временных характеристик. С пирозлектрическим чувствительным элементом разработано несколько типов ПТИ, нашедших широкое практическое применение. Например, импульсные ПТИ для регистрации импульсного лазерного излучения; полостные ПТИ, позволяющие измерять тепловую мощность на очень широком участке электромагнитного излучения ($(10^{-3}-10^4)$ мкм); ПТИ высоких энергетических уровней излучения (до 10^7 Вт/м²) и слабых потоков излучения (от 10^{-13} до 10^{-4} Вт/Гц), а также многоэлементные ПТИ. Различное конструктивное исполнение ПТИ описано в [2.73–2.76].

В термопирозлектрических ПТИ использовано общее свойство термоэлектрического и пирозлектрического чув-

ствительных элементов – генераторный тип преобразования измеряемой величины, что позволило создать ПТИ, совмещающий в единой конструкции обе эти разновидности ЧЭ [2.111]. В термопироэлектрическом ПТИ одновременно с процессом преобразования поглощенного потока излучения в электрический сигнал, пропорциональный приросту температуры, происходит процесс преобразования этого же входного воздействия в электрический сигнал, пропорциональный производной температуры $dT(\tau)/d\tau$ с последующим суммированием сигналов. Этот метод взаимокоррекции динамических характеристик практически представляет собой разновидность известного в автоматике метода параллельной коррекции с той существенной разницей, что термин «параллельность» относится не к электрическим сигналам, а к преобразованию входного потока излучения в приемнике, содержащем два ЧЭ: термо- и пироэлектрический.

Среди большого количества существующих типов термопироэлектрических ЧЭ имеются также выполненные в виде вспомогательной стенки. Схемы конструкции термопироэлектрического ПТИ с плоской теплопринимающей поверхностью показаны на рисунке 2.26.



1, 2 – пироэлектрики с параллельной (1) и перпендикулярной (2) особенной полярной осью; 3 – никелевые электроды; 4 – диэлектрическая пленка; 5 – термоэлектрический ЧЭ ПТП вида вспомогательной стенки; $U_{ПЭ}$, $U_{ТЭ}$ – сигналы пироэлектрического и термоэлектрического ЧЭ

Рис. 2.26. Схемы термопироэлектрических ПТИ с плоской теплопринимающей поверхностью, особенная полярная ось которой:

- а** – параллельна потоку теплового излучения;
- б** – перпендикулярна потоку теплового излучения

Обе конструкции содержат тонкую пироактивную пластину ниобата или тантала лития, особенная полярная ось которой либо параллельна (*a*), либо перпендикулярна (*b*) потоку излучения. На обе поверхности пластинки 1 и на торцевые зоны пластинки 2 нанесены никелевые электроды 3. Пироэлектрическая пластинка находится в тепловом контакте через изолирующую пленку 4 с термоэлектрическими ПТП 5 вида вспомогательной стенки. При облучении приемника регистрируют одновременно оба сигнала: пироэлектрический $U_{ПЭ}$ и термоэлектрический $U_{ТЭ}$. Излучение в случае (*a*) поглощается чернью либо непосредственно поверхностью металлического электрода, в связи с чем отклик термоэлектрического ПТП определяется временем термической диффузии через чернь или электрод. Обычно это время составляет от 10^{-5} с до 10^{-7} с. Более быстродействующим является ПТП конструкции (*b*), которая обеспечивает бóльшую широкополосность, однако, имеет более неравномерную спектральную характеристику.

Этот недостаток отсутствует в термопироэлектрическом ПТИ, выполненном в виде полостной конструкции, схематически показанной на рисунке 2.27.

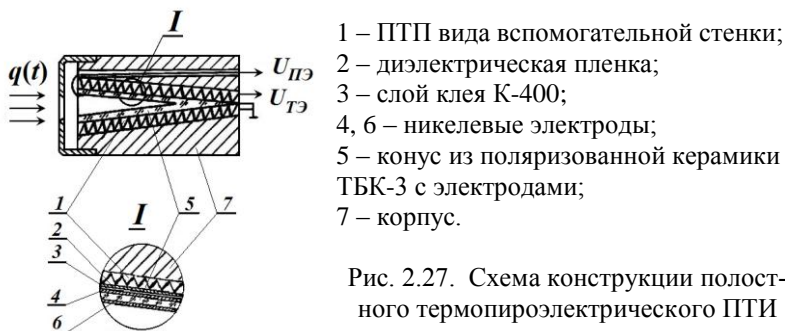


Рис. 2.27. Схема конструкции полостного термопироэлектрического ПТИ

Такое исполнение позволяет получить равномерную спектральную характеристику чувствительности в диапазоне от крайней ультрафиолетовой до дальней инфракрасной области спектра, а также стабильный коэффициент поглощения,

слабо зависящий от поглощательных свойств материала приемной поверхности. Кроме того, сигнал полостного конического ПТИ в значительно меньшей степени зависит от конвективной составляющей теплового потока, чем сигнал ПТИ с плоской поверхностью. Эти факторы predeterminedили использование полостных приемников излучения в эталонных установках, обеспечивающих единство измерений в видимой и ИК областях спектра.

Термопирозлектрические ПТИ перекрывают диапазоны измерения плотности от 10 Вт/м^2 до 10^5 Вт/м^2 непрерывного и от 10^2 Вт/м^2 до $5 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ импульсного излучения в спектральном диапазоне длины волны от 0,2 мкм до 20 мкм. Их характерной особенностью является широкополосность, т. е. равномерность амплитудно-частотной характеристики от нуля до высоких частот, практически ограничиваемых электрической постоянной времени.

На базе термоэлектрического ЧЭ выполняют быстродействующие радиометры и ПТИ полного излучения. На рисунке 2.28 показан внешний вид термопирозлектрического

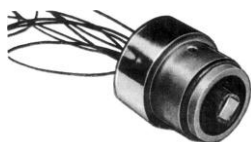


Рис. 2.28. Термопирозлектрический приемник излучения ИТТФ

ПТИ, разработанного в ИТТФ [2.111, 2.147]. Его достоинством является равномерность амплитудно-частотной характеристики от нуля до высоких частот, что выгодно отличает этот приемник от других типов ПТИ.

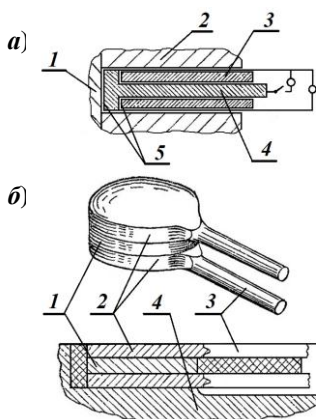
В этом приборе ЧЭ представляет собой тонкую (0,2 мм) пироактивную пластину ниобата лития с металлическими электродами, которая расположена на термоэлектрическом батарейном ПТП вида вспомогательной стенки. Облучаемая сторона пластинки зачернена. Сигналы, снимаемые с пироактивной пластины и термоэлектрического ЧЭ, суммируются либо на нагрузочном сопротивлении, либо с помощью усилителя – сумматора. Диапазон измерения составляет от $0,1 \text{ кВт/м}^2$ до 30 кВт/м^2 в спектраль-

ном диапазоне от 0,3 мкм до 11 мкм при чувствительности 0,2 В/Вт в рабочей полосе частоты (0–300) Гц. Основная погрешность измерения $\pm 5\%$.

В настоящее время известны термопироэлектрические приемные устройства различного назначения, например, для измерения импульсной и средней мощности импульсно-модулированного излучения, одновременного измерения мощности и энергии коротких лазерных импульсов. При этом форму импульса и его мощность измеряют быстрым пироэлектрическим каналом, а энергию импульса – термоэлектрическим.

Термоэлектрические ПТП [2*–5*, 2.75, 2.77–2.81, 2.88, 2.94, 2.112], являющиеся в настоящее время наиболее распространенными ПТП вида вспомогательной стенки, относятся к преобразователям генераторного типа, для работы которых не нужен источник питания. Их выходным сигналом является ТЭДС, генерируемая термоэлектрическим чувствительным элементом при прохождении через него измеряемого теплового потока.

Возникавшие при изготовлении термоэлектрических ПТП вида вспомогательной стенки трудности сочленения собственно стенки и измерителя разности температуры, большое тепловое сопротивление изоляционных материалов и необходимость локализовать измерения теплового потока на поверхностях с площадью порядка (0,1 – 1,0) см² привели к попыткам объединить функции этих элементов. В различное время и в разных областях техники Falkenberg G. в 1930 г. [2.86], Hatfield H.S. в 1950 г. [2.90], Иванцов Г.П. в 1951 г. [2.113] и Геращенко О.А. в 1957 г. [2*] предложили использовать в качестве вспомогательной стенки промежуточный термоэлектрод дифференциальной термопары, выполненной в виде диска. Две схемы таких ПТП, названных одиночными (ОДТП), показаны на рисунке 2.29 [4*].

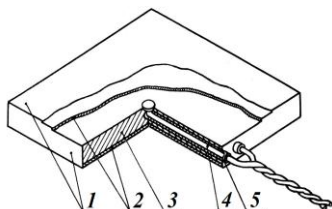


a – схема ОДТП Г.П. Иванцова:
 1 – исследуемый объект (слиток);
 2 – стенка изложницы; 3 – чугунный вкладыш; 4 – промежуточный термоэлектрод из нержавеющей стали; 5 – крайние термоэлектроды из никеля

б – внешний вид и схема ОДТП
 О.А. Герашенко:
 1 – средний слой вспомогательной стенки (основной термоэлектрод); 2 – наружные слои (парный термоэлектрод); 3 – потенциальсъемные проводники; 4 – исследуемый объект

Рис. 2.29. Одиночные металлические ПТП вида вспомогательной стенки

При прохождении теплового потока на гранях промежуточного термоэлектрода устанавливается разность температуры, пропорциональная измеряемому тепловому потоку, которая вызывает генерирование ТЭДС. Такая конструкция ПТП представляет собой своеобразную сплюснутую дифференциальную термопару, промежуточный термоэлектрод которой служит вспомогательной стенкой. Были испытаны различные технологии его изготовления: конденсирование металлов в вакууме, электроискровое покрытие, металлизация распылением, пайка, сварка и гальваническое покрытие [4*, 2.114]. Именно последний способ оказался наиболее оптимальным и серийнопригодным, обеспечивая весьма прочную и надежную конструкцию, показанную на рисунке 2.30.

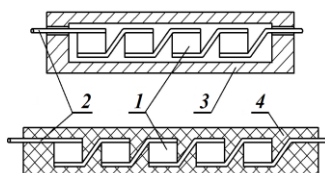


1 – никелевое защитное покрытие;
 2 – медные термоэлектроды;
 3 – промежуточный термоэлектрод (константан);
 4 – потенциальсъемные провода;
 5 – электроизоляционные втулки

Рис. 2.30. Константан-медный ОДТП, выполненный с применением гальванотехники (ИТТФ)

Такой ПТП явился одним из первых серийно изготавливаемых отечественных термоэлектрических ПТП вида вспомогательной стенки, в котором оба обязательных элемента (стенка и измеритель разности температуры) объединены в одном агрегате. Из-за низкой чувствительности, которая при толщине 1 мм составляет $(1 - 3) \cdot 10^{-6}$ мВ·м²/Вт, ОДТП нашли применение только для исследования тепловых процессов с уровнем плотности теплового потока ($10^4 - 10^5$) Вт/м². Для измерения плотности теплового потока до 10^4 Вт/м² ОДТП оказались непригодными.

Для увеличения сигнала одиночные ПТП были скоммутированы в батарею идентичных термоэлементов («галет»), соединенных последовательно по электрическому току и параллельно относительно направления измеряемого теплового потока [2.115, 2.116], заформованы в металлический сварной кожух с использованием слюдяных прокладок для электроизоляции, или в эпоксидный компаунд, керамику или фарфор. Схемы галетных термобатарей показаны на рисунке 2.31, а готовых галетных батарейных ПТП – на рисунке 2.32 [3*, 4*].



1 – батарея галетных термоэлементов, 2 – выводы; 3 – металлический корпус; 4 – электроизоляционный корпус из эпоксидного, керамического или фарфорового компаундов

Рис. 2.31. Схемы галетных термобатарей ПТП



а – ПТП прямоугольный из квадратных галет

б – ПТП дисковый из квадратных галет

в – ПТП дисковый из треугольных галет

Рис. 2.32. Батарейные металлические ПТП галетного типа (ИТТФ)

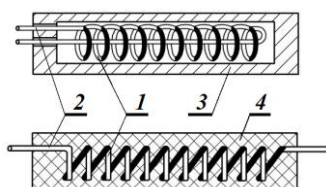
При таком способе изготовления сигнал ПТП пропорционален усредненному по большой поверхности значению теплового потока. Однако, если контролируемый объект проводит электрический ток, необходимо позаботиться об электроизоляции от него отдельных элементов ПТП, что в металлических батарейных ПТП галетного типа реализовано использованием слюдяных прокладок толщиной 0,03 мм, укладываемых по внутренней поверхности корпуса и между рядами галет.

Для ОДТП отношение высоты к диаметру выбирают 1:5. При этом обеспечено существенное уменьшение боковых тепловых потерь и тем самым уменьшение возможной погрешности измерения. Для отдельной галеты в батарее это отношение можно увеличить до 1:2, а для батареи в целом необходимо выдерживать между 1:5 и 1:10.

Галетные ПТП применялись для измерения кондуктивного и конвективного теплового потока в диапазоне значений плотности от 10^2 Вт/м² до $5 \cdot 10^3$ Вт/м². Их чувствительность на два порядка выше, чем ОДТП, но дальнейшее ее увеличение с помощью галет затруднено. Для увеличения сигнала ПТП с целью расширения диапазона измерения и возможности их применения в схемах контроля и автоматики авторами [4*] испытано различное исполнение батарейных ПТП с бóльшим числом последовательно соединенных термоэлементов [2.116–2.117]. Наиболее удачным вариантом батарейных ПТП явился спиральный ПТП [2.118], позволивший увеличить сигнал на три порядка при сохранении локальности измерений.

Для размещения большого количества (около 1000 шт/см²) одиночных термоэлементов в одном агрегате была использована технология изготовления гальванических термопар, по которой один из термоэлектродов ПТП изготовлен из какого-либо металла или сплава, а другой – как его продолжение, гальванически покрытое парным термоэлектрическим металлом. Чтобы переходы от основного термо-

электроды к биметаллическому находились на гранях вспомогательной стенки, батарее термоэлементов, как видно на рисунке 2.33, придана форма плоской лентоподобной спирали, гальванически покрытой лишь с одной стороны.



1 – спирали элементов, выполненных с применением гальванотехники;
2 – выводы; 3 – металлический сварной кожух; 4 – электроизоляционный заливочный компаунд (эпоксидная смола, керамика, фарфор)

Рис. 2.33. Схемы спиральных термобатарей

Зачерненные полувитки спирали соответствуют гальванически покрытым участкам исходной термоэлектродной проволоки, то есть биметаллическим термоэлектродам. Ленточка-спираль после лакирования может быть свернута в диск или уложена в виде квадратной пластинки и помещена в корпус (кольцо или кожух) или заформована в электроизоляционный материал и дополнительно экранирована металлическим корпусом.

При пронизывании тепловым потоком спирального ПТП перпендикулярно его плоским поверхностям в «спаях» термоэлектродов происходит его разветвление на три направления: через основной и биметаллический термоэлектроды и электроизоляционную прослойку между ними. При преодолении этих сопротивлений между «спаями» образуется разность температуры, которая вызывает ТЭДС. Значение ТЭДС и степень пропорциональности истинному тепловому потоку зависят от свойств гальванической дифференциальной термопары и заполнителя, а также от соотношения сечений обеих термоэлектродов и заполнителя [2.118].

Чувствительность спиральных ПТП, содержащих от 1000 шт. до 2000 шт. термоэлементов при толщине (1–2) мм, позволяла измерять плотность теплового потока от 10^2 Вт до 10^5 Вт. Благодаря высокой чувствительности и малым габ-

ритам с их помощью контролировали тепловой поток, которой распространялся различными способами (теплопроводностью, конвекцией, радиацией или их комбинацией).

Дальнейшее усовершенствование технологии изготовления спиральных гальванических ПТП было направлено на увеличение плотности укладки термоэлементов, что было достигнуто путем опрессовывания в специальной оправке готовой гальванизированной спиральной ленточки из константановой проволоки, благодаря чему медненные и немедненные полувитки оказывались в одной плоскости. Лакирование спиральной ленты и укладка в виде тонкой прямоугольной пластинки на специальной гребенке с последующим сжатием пуансоном в пресс-форме позволили получать плотный слоистый стержень прямоугольного сечения. Эта технология позволила достичь плотности укладки спаев до 3000 шт/см².

Единичный гальванический термоэлемент ПТП представляет собой комбинацию из восходящей ветви основного термоэлектрода и нисходящей ветви – гальванически покрытого парным термоэлектрическим материалом отрезка, пространство между которыми заполнено электроизоляционным материалом. Каждый биметаллический полувиток представляет собой замкнутый контур, в котором при наличии разности температуры появляется ток, благодаря которому между спаями устанавливается разность потенциалов.

Термопары, составленные из гальванически покрытого термоэлектрода в паре с непокрытым, имеют ряд преимуществ, благодаря которым нашли широкое применение в теплофизических измерениях. Одно из первых исследований гальванических термопар было предпринято в конце 20-х годов прошлого столетия авторами работы [2.119]. В дальнейшем свойства гальванических термопар неоднократно были предметом исследований, в частности, одно из лучших отечественных исследований принадлежит С.А. Сухову с соавторами [2.120].

В связи с большой перспективностью гальванических ПТП в 60-е годы авторы [2.121] провели большую серию экспериментов для проверки свойств биметаллических термоэлектродов и показали, что для их термоэлектрического коэффициента Зеебека ($\alpha_{БМ}$) справедливо соотношение:

$$\alpha_{БМ} = \alpha_1 - (\alpha_1 - \alpha_2) / (1 + \rho_{21} / f_{21}) = \alpha_1 - \alpha_{1-2} \cdot (1 + \rho_{21} / f_{21})^{-1}, \quad (2.31)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты Зеебека материала основной проволоки и гальванически нанесенного покрытия;

$\rho_{21} = \rho_2 / \rho_1$ – приведенное электрическое сопротивление гальванического покрытия;

$f_{21} = f_2 / f_1$ – приведенная площадь сечения гальванического покрытия.

Большой сигнал, малые габариты и инерционность (время реакции по уровню 0,63 составляет (1–2) с) открыли возможности применения термоэлектрических гальванических батарейных ПТП в самых разнообразных условиях: при исследовании локального теплообмена, наладке и эксплуатации различного теплоэнергетического и химического оборудования, в системах автоматического регулирования и управления теплотехнологическими процессами.

В научно-технической литературе можно найти описание многих типов термоэлектрических ПТП вида вспомогательной стенки и иных технологий их изготовления. Однако, не всегда чувствительности металлических многоэлементных ПТП было достаточно для получения надежной и точной информации об измеряемом тепловом потоке. Замена металлического термоэлектрического материала на полупроводниковый [2.75, 2.81, 2.90, 2.122, 2.123] позволила значительно повысить чувствительность ПТП, так как термоэлектрический коэффициент полупроводниковых материалов существенно выше, чем у металлов [6*, 2.75].

Применение **полупроводниковых** термоэлектродов позволило создать батарейные термоэлектрические ПТП с чувствительностью порядка (10–20) мВ·м²/Вт. При помощи

таких ПТП оказалось возможным регистрировать тепловой поток плотностью от 10^{-3} Вт/м² без систем усиления сигнала. Это открыло пути их использования при медико-биологических и геотермических исследованиях, а также в теплофизическом приборостроении [2.15, 2.122, 2.124]. Вольт-ваттная чувствительность полупроводниковых ПТП колеблется от 0,05 В/Вт до 0,80 В/Вт. Однако, таким ПТП присущи нелинейность чувствительности в температурном диапазоне, быстрое старение термоэлементов и большая постоянная времени.

Для измерения теплового потока в быстропротекающих тепловых процессах разработаны **анизотропные** термоэлектрические преобразователи с уменьшенной инерционностью, выполненные из материалов с анизотропией теплопроводности, электропроводности и коэффициентов ТЭДС. Их действие основано на поперечном эффекте Зеебека состоящем в том, что в сечениях ПТП, нормальных к вектору внешнего теплового потока, возникает поперечная разность температуры и генерируется пропорциональная ТЭДС [5*, 2.79, 2.125].

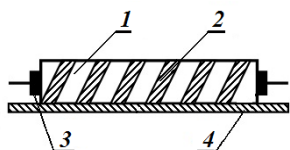
Если чувствительный элемент изготовить в виде пластинки из термоэлектрического анизотропного монокристалла, так чтобы поверхность пластинки была расположена под некоторым углом к одной из кристаллографических осей, относительно которой наблюдается максимальная анизотропия свойств, то при прохождении теплового потока появится поперечная ТЭДС, пропорциональная градиенту температуры. Возникающая поперечная относительно градиента температуры ТЭДС при условии линейного распределения температуры равна

$$\Delta E = 0,5(\alpha_{//} - \alpha_{\perp}) \cdot \Delta T \cdot L / h, \quad (2.32)$$

где $\alpha_{//}$ и α_{\perp} – коэффициенты ТЭДС в направлениях параллельном и перпендикулярном данному кристаллографическому направлению, L и h – длина и толщина пластинки в направлении приложенного градиента.

Как видно из формулы (2.32), в анизотропном термоэлементе ТЭДС определяется отношением L/h , что открывает возможность создания термоэлементов высокой чувствительности при малой инерционности одновременно.

Искусственно-анизотропный элемент, схема которого приведена на рисунке 2.34, представляет собой пластинку, состоящую из последовательно чередующихся слоев парных термоэлектрических материалов [2.78, 2.126].



- 1, 2 – слои материалов, образующих термоэлектродную пару,
3 – токосъемные контакты,
4 – теплоотводящая подложка

Рис. 2.34. Принципиальная схема косослойного искусственно-анизотропного ПТП

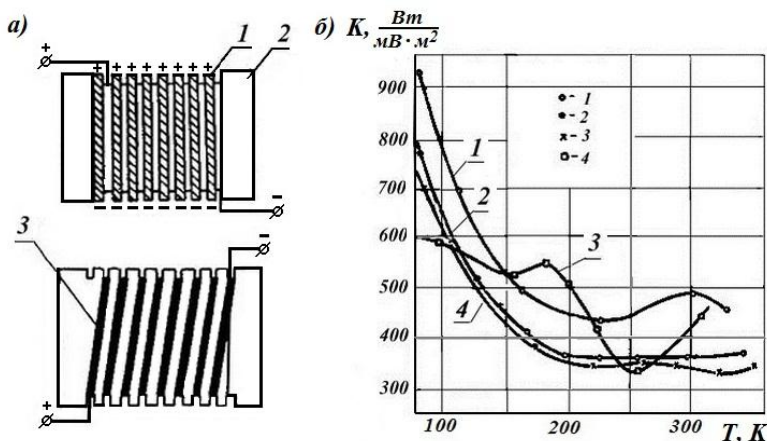
Слои располагаются косо под углом от 20° до 45° к базовой поверхности. Когда измеряемый тепловой поток пронизывает такой косослойный элемент, между его верхней и нижней поверхностями возникает разность температуры, возбуждающая ТЭДС [2.125]. Неравенство значений термоэлектрических коэффициентов в перпендикулярном и продольном направлениях слоистой композиции является причиной возникновения сигнала в косослойном термоэлементе. Максимальные значения сигналов свойственны контрастным парам материалов с большими значениями относительных тепло- и электропроводности [5*].

Причина возникновения поперечной ТЭДС состоит в том, что при тепловом воздействии средняя энергия носителей увеличивается, вследствие чего градиент температуры вызывает диффузионный поток носителей, который в изотропной среде направлен вдоль вектора температуры, а в анизотропной – под углом к этому вектору. Перераспределение носителей приводит к появлению электрического поля, которое вызывают циркуляцию вихревых термоэлектрических токов. При этом в цепи термоэлемента возникает поперечная

составляющая ТЭДС. Таким образом, при пронизывании тепловым потоком ПТП вида вспомогательной стенки, выполненного из анизотропного, искусственно-анизотропного, зонально-неоднородного материала, между верхней и нижней поверхностями ПТП возникает разность температуры, возбуждающая поперечную ТЭДС.

Авторами работы [2.81] ПТП вида вспомогательной стенки, выполненные из анизотропных материалов, названы «поперечными». Как уже упоминалось, особенностью этих ПТП является то, что их чувствительность, в отличие от продольных ПТП, не зависит от толщины, что в принципе позволяет создать высокочувствительные и одновременно быстродействующие ПТП. Теория генерирования сигнала анизотропного ПТП приведена в [5*, 2.78, 2.80, 2.81, 2.127] и др.

В [2.128] описан ПТП с батареей поперечных термоэлементов, изготовленных из монокристаллов твердых растворов $Bi_{1-x}Sb_x$ (рисунок 2.35).



a – принципиальная схема: 1 – термоэлементы; 2 – подложка; 3 – коммутационные дорожки;

б – температурная зависимость коэффициента преобразования при вариации концентрации Sb_x : 1 – $x = 0$; 2 – 0,075; 3 – 0,010; 4 – 0,050;

Рис. 2.35. Анизотропный полупроводниковый ПТП, изготовленный из монокристаллов твердых растворов $Bi_{1-x}Sb_x$

Применение этих ПТП лежит в диапазоне значений температуры от 100 К до 350 К, так как при более низких значениях чувствительность становится существенно нелинейной. Найденная авторами оригинальная технология коммутации поперечных термоэлементов в батарею позволила получить ПТП с коэффициентом преобразования порядка $0,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})$ при толщине меньше 0,5 мм.

Чувствительность, быстродействие и верхний предел выдерживаемых тепловых нагрузок могут быть улучшены

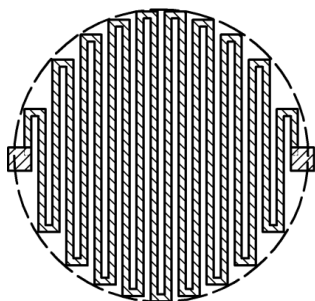


Рисунок 2.36 – Анизотропный пленочный термоэлемент в виде меандра

путем увеличения длины элемента, например, выполнением ПТП в виде меандра (рисунок 2.36), и уменьшением его толщины [2.129, 2.130]. Следует отметить, что изготовление термоэлементов в виде меандра из монокристаллических пластин и их истончение сопряжено со значительными трудностями. Целесообразно изготавливать их из пленок анизотропных термоэлектрических материалов [2.131].

Пленочные термоэлементы превосходят элементы из монокристаллических пластин по миниатюрности, надежности, быстродействию, термостойкости и другим характеристикам. Пленочное исполнение существенно расширяет группу используемых материалов и тем самым обеспечивает анизотропному термоэлементу требуемый комплекс параметров и легкость реализации полосковых, матричных и других типов приемников теплового излучения [2.131–2.133].

В последние 10 – 15 лет получили признание анизотропные ПТП поперечного типа, изготовленные из композитных материалов [2.81]. Впервые изготовить ПТП из композитного материала было предложено Л. Гайлингом [2.124], а затем авторами [2.134]. На базе композитного материала вы-

полнен также преобразователь ALTP (Atomic layer Thermo Pile – термобатарея с атомарным слоем) фирмы FORTECH HTS GmbH [2.135]. Косослойная пленка толщиной 1 мкм, полученная напылением чередующихся слоев $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ и CuO_2 , нанесена на основание из SrTiO_3 толщиной 2 мм. Вся сборка ПТП имеет форму цилиндра диаметром 6 мм и длиной 20 мм. Постоянная времени ПТП ALTP составляет, по данным фирмы, 10^{-6} с, но термостойкость не выше 350 К.

Применяя идею Л. Гайлинга, Т. Занер и др. [2.136] изготовили и испытали ПТП, в сечении которого чередуются слои меди и константана. Тепловая анизотропия обеспечена наклоном слоев композита полученного при спекании пачки фольги из константана и меди толщиной 0,1 мм. После спекания пачку разрезали под различными углами с целью поиска оптимума. Термостойкость ПТП обеспечивают подбором других металлических материалов до 700 К.

Число природных материалов, пригодных для создания анизотропных ПТП, невелико. Наиболее удачная идея – использование в конструкции ПТП монокристаллического висмута, предложенная Н.П. Дивиным [2.137]. Позднее разработками поперечных ПТП из слоистых композитов (металл + металл; металл + сплав; полупроводник + полупроводник; полупроводник + металл) занялись авторы работ [2.80, 2.81, 2.133–2.135]. К сожалению, такие ПТП имеют нелинейный характер зависимости ТЭДС от температуры и плотности теплового потока, как это видно на рисунках 2.35, б и 2.37.

Как видим, прямыми измерениями теплового потока с применением термоэлектрических ПТП вида вспомогательной стенки занимаются во всех развитых странах мира (в Нидерландах, Германии, Франции, Великобритании, Швейцарии, США, Японии, России, Украине и др). Их применяют как самостоятельные изделия в комплекте со стандартным или специальным измерителем электрического напряжения постоянного тока (например, милливольтметром), а также в составе различных теплофизических приборов [2.138–2.144].

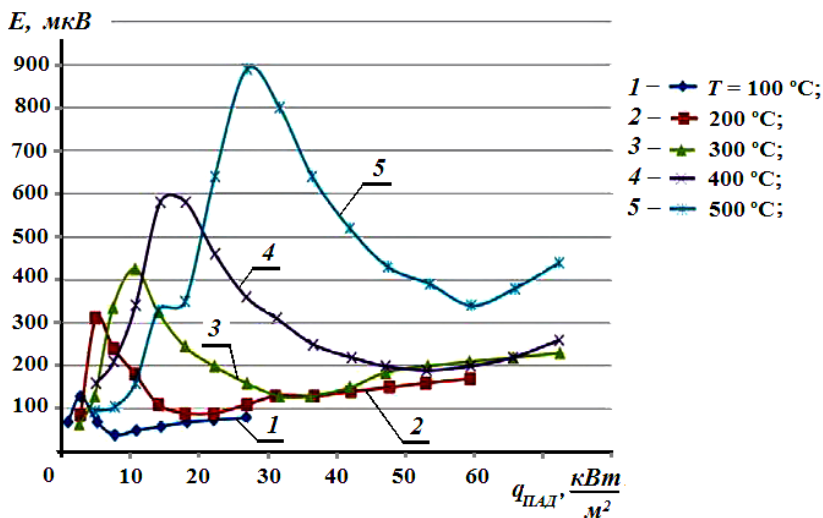


Рис. 2.37. Зависимость ТЭДС гетерогенного анизотропного ПТП от плотности воспринятого теплового потока

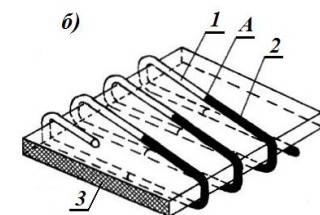
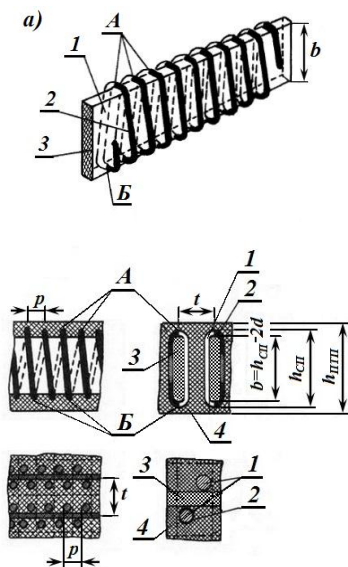
2.3.3 Серийно выпускаемые ПТП

Из анализа известных применяемых средств измерения теплового потока и его поверхностной плотности, включая первичные ПТП, следует, что преобладающими во всем мире являются СИТ с электрическим выходным сигналом благодаря наличию большого парка стандартных электроизмерительных приборов.

Если еще четыре-пять десятилетий назад исследователям приходилось самим создавать теплотметрические СИТ, то в настоящее время как у нас в стране, так и за рубежом появился ряд организаций и фирм, специализирующихся на выпуске первичных ПТП, главным образом, термоэлектрических вида вспомогательной стенки, которые стали неотъемлемым элементом процесса измерения теплового потока [2.138–2.148].

В Украине с середины прошлого столетия разработками и выпуском термоэлектрических ПТП вида вспомогательной стенки неизменно занимаются в ИТТФ [2.146–2.148]. Широкому применению гальванических термоэлектрических ПТП способствовали большие возможности конструирования ПТП с требуемыми оптимизированными характеристиками [2.149] и хорошо отработанная технология их изготовления.

К настоящему времени в ИТТФ создана большая номенклатура батарейных (многоэлементных) термоэлектрических ПТП, как традиционных, так и удовлетворяющих специальным требованиям к их характеристикам. Традиционный ПТП, как было сказано выше, представляет собой пластину, в которой размещен ЧЭ – батарея термоэлементов, изготовленных по гальванической технологии и залитых электроизоляционным компаундом. Схемы ЧЭ традиционного ПТП приведены на рисунке 2.38 [2.112].



1 – основной термоэлектрод,
 2 – биметаллический термоэлектрод,
 3 – каркасная лента, 4 – электроизоляционный заливочный компаунд,
 А, Б – границы перехода от основного термоэлектрода к биметаллическому – спай термоэлементов,
 b – высота каркасной ленты,
 p – шаг навивки проволоки на каркасную ленту,
 t – шаг укладки спирали термоэлементов

Рис. 2.38. Схемы спиральной термобатареи термоэлектрического многоэлементного ПТП вида вспомогательной стенки с вертикальным (а) и горизонтальными (б) расположением биметаллических термоэлементов

Границы перехода от отрезка чистой проволоки к биметаллическому отрезку являются своеобразными спаями термоэлементов, причем один из спаев каждого термоэлемента расположен вблизи одной из поверхностей ПТП, а второй – вблизи противоположной. Спаи могут быть расположены либо вдоль обеих кромок каркасной ленты (рис. 2.38, *а*) либо по средней линии поверхностей каркасной ленты (рис. 2.38, *б*).

Традиционные ПТП являются стандартизированными в Украине и странах СНГ. Общие технические условия на них установлены в национальном стандарте Украины ДСТУ 2756 [2.150] и межгосударственном ГОСТ 30619 [2.151], которые разработаны авторами данной монографии.

Согласно указанным стандартам ПТП по функциональному назначению подразделяют на две группы:

- измерительные преобразователи (группа 1), применяемые в составе измерительного прибора, измерительной системы, измерительно-информационного комплекса, а также самостоятельно в комплекте со стандартным или нестандартизированным прибором, измеряющим и регистрирующим сигнал ПТП или показывающим его значение, в конструкции измерительных устройств, приборов, установок;

- чувствительные элементы (группа 2), применяемые в составе систем регулирования и управления технологическими параметрами, а также в конструкции или составе индикаторов различного назначения.

ПТП группы 1 по метрологическим свойствам относятся к средствам измерения, которые могут быть эталонными (подгруппа 1А) и рабочими (подгруппа 1Б), стандартными и нестандартизированными. ПТП группы 2, не являющиеся средствами измерения, подразделяют на ПТП, имеющие точностные характеристики (подгруппа 2А) и не имеющие таковых (подгруппа 2Б). Для термоэлектрических биметаллических ПТП в зависимости от пары термоэлектрических материалов, из которых они изготовлены, установлены типы, приведенные в Приложении А (табл. А.2). Для каждого типа

ПТП имеются различные модели в зависимости от совокупности следующих признаков исполнения:

- по количеству термоэлементов (одно- и многоэлементные);
- по количеству теплочувствительных зон (одно-, двух- и многозонные);
- по виду и механическому состоянию вспомогательной стенки: (монолитные жесткие и гибкие, перфорированные жесткие и гибкие);
- по геометрической форме (пластина прямоугольная или квадратная, диск плоский, кольцо плоское, цилиндрическая оболочка);
- по конструктивному исполнению (бескорпусные или в корпусе, выполненном в виде рамки, кольца, подложки плоской или профилированной; с охранной зоной или без нее; с смонтированным преобразователем температуры или без него; с смонтированным вспомогательным электронагревательным элементом или без него);
- по типу электроизоляционного заливочного материала (с учетом технологических наполнителей).

Условное обозначение типа и модели ПТП, исходя из признаков исполнения, имеет вид: ПТП-Х.....–ДСТУ3756-98 (ГОСТ 30619–98). Расшифровка позиций приведена в Приложении А (табл. А.1–А.3). На рисунке 2.39 показаны варианты геометрической формы исполнения чувствительных элементов батарейных ПТП.

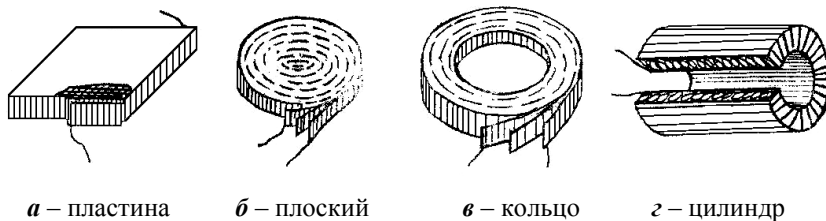
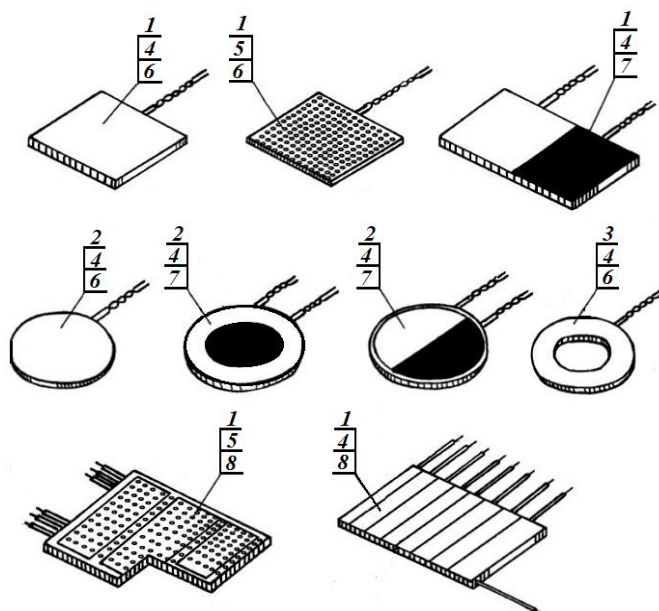


Рис. 2.39. Варианты исполнения чувствительных элементов батарейных ПТП вида вспомогательной стенки

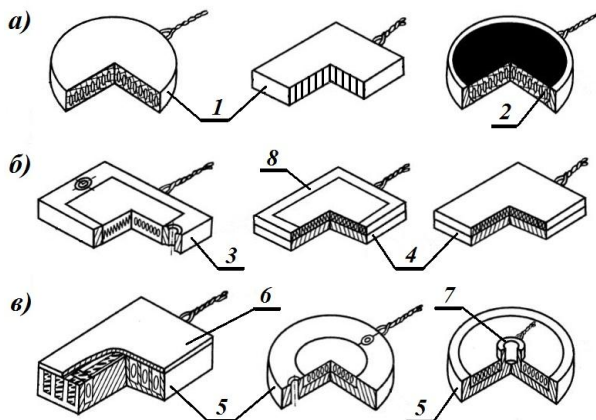
Чувствительный элемент ПТП цилиндрической формы (теплометрическая оболочка) может быть изготовлен как из плоской спирали батареи термоэлементов, поставленной на «ребро», так и лежащей «плашмя» (см. рис.2.38, *а* и *б*). Варианты моделей многоэлементных плоских ПТП показаны на рисунке 2.40, а варианты их конструктивного исполнения на рисунке 2.41.



1 – прямоугольные (или квадратные); 2 – дискообразные; 3 – кольцеобразные; 4 – монолитные; 5 – перфорированные; 6 – однозонные; 7 – двухзонные; 8 – многозонные

Рис.2.40. Варианты исполнения чувствительного элемента плоского ПТП

Начиная с 60-х годов прошлого века, в ИТТФ постоянно совершенствовалась технология и создавались новые модели ПТП. Разработана большая номенклатура многоэлементных термоэлектрических ПТП. Информация о наиболее интересных востребованных моделях систематизирована в Приложении А (таблица А.4).



- a* – ПТП без корпуса (1) или в корпусе в виде кольца (2);
б – ПТП в рамке (3) или на плоской подложке (4);
в – ПТП в корпусе в виде профилированной подложки (5) с защитной крышкой (6) или с узлом крепления по центру (7); 8 – охранная зона по периметру чувствительной зоны ПТП

Рис. 2.41. Варианты конструктивного исполнения плоских ПТП

В Российской Федерации и Беларуси в настоящее время для теплофизических измерений применяют ПТП, изготовленные в Украине, или ПТП, выпуск отдельных моделей которых освоен несколькими организациями РФ, например, ООО «Химик-Дизайн» (г. Москва), «Техноцентр» (г. Москва), НПО «ЭТАЛОН» (г. Омск)) (см. таблицу А.5 Приложения А).

Там же систематизирована информация по состоянию на 2016 г. об аналогичных ПТП и ПТИ, выпускаемых в ряде стран Европы, в США и Японии [2.138–2.144 и др. источники рекламного характера].

Литература к главе 2

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

2.2 *Карслоу Г.* Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер : перевод с англ. ; под ред. А. А. Померанцева. – М. : Наука, 1964. – 488 с.

2.3 *Карташов Э. М.* Аналитические методы в теплопроводности твердых тел : учебное пособие для вузов / Э. М. Карташов. – М. : Высшая школа, 1979. – 415 с.

2.4 *Беляев Н. М.* Методы теории теплопроводности : учеб. пособие для вузов. В 2-х ч. / Н. М. Беляев, А. А. Рядно. – М. : Высш. школа, 1982. – 327 с.

2.5 *Полянин А. Д.* Справочник по точным решениям уравнений тепло- и массопереноса / А. Д. Полянин, А. В. Вязьмин, А. И. Журов, Д. А. Казенин. – М. : Факториал, 1998. – 367 с.

2.6 *Пехович А. И.* Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Л. : Энергия, 1976. – 352 с.

2.7 *Темкин А. Г.* Обратные методы теплопроводности / А. Г. Темкин. – М. : Энергия, 1973. – 464 с.

2.8 *Мацевитый Ю. М.* Обратные задачи теплопроводности : в 2-х томах / Юрий Михайлович Мацевитый. – Т. 1. – К. : Наук. думка, 2003. – 408 с.

2.9 *Мацевитый Ю. М.* Решение обратных задач теплопроводности на электрических моделях / Ю. М. Мацевитый, В. Е. Прокофьев, В. С. Широков. – Киев : Наукова думка, 1980. – 132 с.

2.10 *Алифанов О. М.* Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов / Олег Михайлович Алифанов. – М.:Машиностроение, 1979. – 216 с.

2.11 *Френк И.* Применение метода наименьших квадратов для решения обратной задачи теплопроводности / И. Френк ;

пер. с англ. – Теплопередача, Сер. С, 1963. – Т. 85, № 4. – С. 107-108.

2.12 *Бургграф О. Р.* Точное решение обратной задачи в теории теплопроводности и ее приложениях / О. Р. Бургграф : пер. с англ. – Теплопередача, Сер. С, 1964. – Т. 86, № 3. – С. 94-106.

2.13 *Шумаков Н. В.* Метод последовательных интервалов в теплотрии нестационарных процессов / Н. В. Шумаков. – М. : Атомиздат, 1979. – 212 с.

2.14 *Кондратьев Г. М.* Тепловые измерения / Г. М. Кондратьев. – М. : Машгиз, 1957. – 244 с.

2.15 *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.

2.16 *Кудрявцев Е. В.* Нестационарный теплообмен / Е. В. Кудрявцев, К. Н. Чакалев, Н. В. Шумаков. – М. : Изд-во АН СССР, 1961. – 158 с.

2.17 *Смольский Б. М.* Нестационарный теплообмен / Б. М. Смольский, Л. А. Сергеева. – Минск : Наука и техника, 1974. – 157 с.

2.18 *Симбирский Д. Ф.* Температурная диагностика двигателей / Д. Ф. Симбирский. – Киев : Техніка, 1976. – 208 с.

2.19 Бут Е. Н. Слайн – идентификация тепловых потоков / Е. Н. Бут // ИФЖ. – 1977. – Т. 33, № 6. – С. 1085–1089.

2.20 *Муллахметов Р. Х.* Решение обратной задачи теплопроводности для случая неограниченной пластины методом наименьших квадратов / Р. Х. Муллахметов, Е. А. Хорн // Гидродинамика. – Вып. 5. – Харьков : Изд-во ХГУ, 1967.

2.21 *Фильчаков П. Ф.* Моделирование потенциальных полей на электропроводной бумаге : монография / П. Ф. Фильчаков, В. И. Панчишин. – Киев : Изд-во АН УССР, 1961. – 112 с.

2.22 *Коздоба, Л. А.* Электрическое моделирование явлений тепло- и массопереноса / Л. А. Коздоба. – М. : Энергия, 1972. – 296 с.

2.23 *Чудаков А. Д.* Электрические моделирующие сетки и их применение / А. Д. Чудаков. – М. : Энергия, 1968. – 135 с.

2.24 *Boussinesq T. V.* Theorie analytique de la chaleur / T. V. Boussinesq. – Т. I. – Paris, 1901. – 362 p.

2.25 *Аметистов Е. В.* Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент : справочник / Е. В. Аметистов, В. А. Григорьев, Б. Т. Емцев [и др.] ; под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – М. : Энергоиздат, 1982. – 512 с.

2.26 *Жукаускас А.* Теплоотдача в ламинарном потоке жидкости / А. Жукаускас, И. Жюгжда. – Вильнюс : МИНТИС, 1969. – 254 с.

2.27 А. с. 271073 (СССР), МПК G 01 K 12/03. Способ определения местных коэффициентов теплоотдачи / Н. Ф. Рагулин, Ю. Г. Швалев, С. М. Шестаев. – № 961611/18-10 ; заявл. 03.11.64 ; опубл. 12.05.70, Бюл. № 17.

2.28 *Платунов Е. С.* Теплофизические измерения и приборы / Е. С. Платунов, С. Е. Буравой, В. В. Курепин, Г. С. Петров. – Л. : Машиностроение, 1986. – 256 с.

2.29 *Перрен де Бришамбо Ш.* Солнечное излучение и радиационный обмен в атмосфере / Ш. Перрен де Бришамбо ; пер с франц. А. К. Городецкий; ред. М. С. Малкевич. – Москва : Мир, 1966. – 319 с.

2.30 *Ткачев А. Г.* Опытное исследование теплообмена при плавлении / А. Г. Ткачев // Вопросы теплообмена при изменении агрегатного состояния вещества. – М.-Л. : ГЭИ, 1953. – С. 183-192.

2.31 *Осипова В. А.* Экспериментальное исследование процессов теплообмена : учеб. пособие для вузов / В. А. Осипова. – М. : Энергия, 1979. – 320 с.

2.32 *Гухман А. А.* Основы учения о теплообмене при течении газа с большой скоростью : научное издание / А. А. Гухман, Н. В. Илюхин. – М. : Машгиз, 1951. – 226 с.

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

2.34 *Федоров В. Г.* Основы тепломассометрии / В. Г. Федоров. – К. : Вища школа, 1987. – 184 с.

2.35 *Лыков А. В.* Теория сушки / А. В. Лыков. – М. : Энергия. 1968. – 472 с.

2.36 *Фаерман Г. П.* Эвапорография / Г. П. Фаерман, В. Н. Синцов, К. Б. Попова // Оптико-механическая промышленность. – 1962. – № 11. – 27 с.

2.37 *Czerny M.* Über Photographie im Ultraroten 25 / M. Czerny // Physik 53. – 1929. – № 1.

2.38 *Марголин И. Л.* Основы инфракрасной техники / И. Л. Марголин, Н. П. Румянцев. – М. : Воениздат, 1957. – 307 с.

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

2.40 *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.

2.41 *Госсорг Ж.* Инфракрасная термография. Основы, техника, применение / Ж. Госсорг : перевод с франц. ; под ред. Л. Н. Курбатова. – М. : Мир, 1988. – 420 с.

2.42 *Криксунов Л. З.* Инфракрасные системы обнаружения, пеленгации и автоматического сопровождения движущихся объектов / Л. З. Криксунов, И. Ф. Усольцев. – М. : Сов. радио, 1968. – 320 с.

2.43 *Левитин И. Б.* Инфракрасная техника / И. Б. Левитин. – Л. : Энергия, 1973. – 157 с.

2.44 *Ллойд Дж.* Системы тепловидения / Дж. Ллойд; пер. с англ. Н. В. Васильченко; ред. А. И. Горячева. – Москва : Мир, 1978. – 414 с.

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

2.46 *Мирошников М. М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов : учебное пособие / М. М. Мирошников. – Л. : Машиностроение, 1977. – 600 с.

2.47 *Смит Р.* Обнаружение и измерение инфракрасного излучения / Р. Смит, Ф. Дженс, Р. Чесмер; пер. с англ. В. Алексеева. – М. : Иностранная литература, 1959. – 448 с.

2.48 *Encyclopedia Britannica.* – Chicago-London-Toronto, 1957.

2.49 *McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology.* – USA, McGraw-Hill Book Co. – New York, 1960.

2.50 *Шоль Ж.* Приемники инфракрасного излучения / Ж. Шоль, И. Марфан, М. Мюнш, П. Тортель ; Пер. с франц. Н. В. Васильченко; ред. Л. Н. Курбатов. – М. : Мир, 1969. – 285 с.

2.51 *Калитин Н. Н.* Новый тип актинометра для измерения напряжения солнечной радиации / Н. Н. Калитин // Метеорологический вестник, 1927. – № 1. – С. 18-22.

2.52 *Третьяков В. Д.* Монометаллический актинограф / В. Д. Третьяков // Труды Главной геофизической обсерватории. – № 5 (67). – Л. : Гидрометеиздат, 1947. – С. 18-24.

2.53 *Янишевский Ю. Д.* Актинометрические приборы и методы наблюдений / Ю. Д. Янишевский – Л. : Гидрометеиздат, 1957. – 415с.

2.54 *Савинов С. И.* К теории пластинчатого актинометра Михельсона / С. И. Савинов // Труды Главной геофизической обсерватории. – Вып. 14 (76). – Л. : Гидрометеиздат, 1949. – 88 с.

2.55 Поверка приборов для температурных и тепловых измерений : Сборник инструкций, метод. указаний и гос. стандартов. – М. : Изд-во стандартов, 1965. – 708 с.

2.56 *Сивков А. А.* Пневматический приемник лучистой энергии с тензометрическим датчиком / А. А. Сивков, В. В. Гуд. – № 1 – ПТЭ, 1967.– С. 195-196.

2.57 *Панкратов Н. А.* О соотношении удельной и пороговой чувствительности камеры неселективного оптико-акустического приемника с его постоянной времени / Н. А. Панкратов // Оптико-механическая промышленность. – 1957. – № 2.

2.58 *Жуковский В. С.* Оптический метод исследования распределения коэффициента теплоотдачи в вынужденном потоке / В. С. Жуковский, А. В. Киреев, Л. П. Шамшев // ЖТФ, 1934. – Вып. 4, № 10. – С. 1895-1909.

2.59 *Стильбанс Л. С.* Физика полупроводников / Л. С. Стильбанс. – М. : Советское радио, 1967. – 452 с.

2.60 *Knudsen M.* Ein absolutes Manometer / M. Knudsen // Ann. d. Physik, 1910. – Bd. 32, H. 4. – Nr. 9.

2.61 *Жукаускас А.* Теплоотдача в турбулентном потоке жидкости / А. Жукаускас, А. Шланчяускас. – Вильнюс : Минтис, 1973. – Вып. 5. – 327 с.

2.62 *Гришин В. А.* Тепловые измерения методом текущей компенсации / В. А. Гришин. – М. : Энергия, 1971. – 95 с.

2.63 *Коробов В. К.* Способ измерения локальных коэффициентов теплоотдачи с теплообменных поверхностей электрических машин / В. К. Коробов. – Изд. вузов : Электротехника, 1969. – № 9. – С. 630-635.

2.64 *Дудник Д. М.* Расчеты малоинерционного измерителя тепловых потоков / Д. М. Дудник // Труды Одесского технологического института пищевой и холодильной промышленности. – Т. 3. – № 2. – Облиздат : Одесса, 1962. – С. 134-136.

2.65 *Ишанин Г. Г.* Источники и приемники излучения / Г. Г. Ишанин, Э. Д. Панков, А. Л. Адреев, Г. В. Польщикова. – СПб. : Политехника, 1991. – 240 с.

2.66 *Конозенко И. Д.* Современные болометры / И. Д. Конозенко // ЖТФ, 1950. – Том 20, Вып. 6. – С. 645-665.

2.67 *Holesch H.* Ein abkühlbarer Wismut Bolometer / H. Holesch. – Wiss. Zs. M. Luther Univ. – Halle-Wittenberg : Math.-nat. Rh., 1961. – Vol.10, №5. – 903р.

2.68 *Линеверг Ф.* Измерение температур в технике : Справочник / Ф. Линеверг. ; пер. с нем. – М. : Metallургия, 1980. – 544 с.

2.69 *Курытник И. П.* Термоизмерения / И. П. Курытник, Б. И. Стаднык. – М. : Знание, 1979. – 64 с.

2.70 *Косоротов В. Ф.* Пирозлектрический эффект и его практические применения / В. Ф. Косоротов, Л. С. Кременчугский, В. Б. Самойлов, Л. В. Щедрина. – Киев : Наукова думка, 1989. – 224 с.

2.71 *Кременчугский Л. С.* Пирозлектрические приемники излучения / Л. С. Кременчугский, О. В. Ройцина. – Киев : Наукова думка, 1979. – 381 с.

2.72 *Лайнс М.* Сегнетоэлектрики и родственные им материалы / М. Лайнс, А. Гласс. – М. : Мир, 1981. – 736 с.

2.73 *Кременчугский Л. С.* Система параметров и характеристик тепловых приемников излучения / Л. С. Кременчугский, О. В. Ройцина. – Институт физики. – Киев, 1983. – 41 с.

2.74 *Phelan Jr R.* Electrically calibrated pyroelectric optical-radiation detector / R. J. Phelan Jr, A. R. Cook // Applied Optics, 1973. – V. 12, No. 10. – P. 2494-2500.

2.75 *Анатычук Л. И.* Термоэлементы и термоэлектрические устройства / Справочник. – Киев : Наукова думка, 1979. – 768 с.

2.76 *Козелкин В. В.* Основы инфракрасной техники / В. В. Козелкин, И. Ф. Усольцев. – М. : Машиностроение, 1974. – 336 с.

2.77 *Лошакова В. В.* Малоинерционные термоэлектрические приемники излучения с большой приемной площадью / В. В. Лошакова, Н. В. Пономарева. – Известия ЛЭТИ, 1974. – Вып. 142. – С. 27-30.

2.78 *Погурская Ж. Л.* Искусственно-анизотропные термоэлектрические преобразователи для измерения плотности тепловых потоков : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.04 / Погурская Жанна Леонидовна. – Киев, 1983. – 186 с.

2.79 *Пилат И. М.* Термоэлектрический приемник излучения на анизотропных термоэлементах / И. М. Пилат, В. С. Ветошников, К. И. Хохлачев // Тепловые приемники излучения : материалы Всесоюзн. семинара по тепловым приемникам излучения. – Л. : ГОИ, 1974. – С. 3-7.

2.80 *Сапожников С. З.* Градиентные датчики теплового потока / С. З. Сапожников, В. Ю. Митяков, А. В. Митяков. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2003. – 169 с.

2.81 *Сапожников С. З.* Основы градиентной теплотрии. – С.-Пб. : Изд-во СПб ГПУ, 2012. – 203 с.

2.82 *Бабилов Ю. Ф.* Регистрация тепловых полей в полупроводниковых приборах при помощи фотоэмульсии / Ю. Ф. Бабилов [и др.] // ПТЭ, 1968. – № 1. – С. 202-203.

2.83 *Gardon R.* An Instrument for the Direct Measurement of Intense Thermal Radiation / R. Gardon. – Review of Scientific Instruments, 1953. – Vol. 24, No. 5. – P. 366-370.

2.84 *Germak I.* Termoelectricki snimac tepelneho toku / I. Germak. – Automatisace, 1958. – № 10.

2.85 *Gardon R.* A transducer for the measurement of heat flow rate. / R. Gardon. – Transact. ASME (Ser. C), 1960. – Vol. 82, № 5.

2.86 *Falkenberg G.* Apparatur zur Bestimmung des momentanen nächtlichen Wärmeaustausch zwischen Erde und Luft / G. Falkenberg. – Meteor. Zischt., 1930. – № 40. – p. 154.

2.87 *Kidd C. T.* How the Schmidt-Bolter gage really works / C. T. Kidd, C. G. Nelson // Proc. 41st Int. Instrum. Symp. – Research Triangel Park, NC : ISA, 1995. – P. 347-368.

2.88 *Schmidt E.* Ein neuer Warmeflussmesser und seine praktische Bedeutung in der Warmeschutztechnik / E. Schmidt // Mit. Forschungswissens fair Wärmeschutz. – München, 1923.

2.89 *Черноголов А. И.* Приборы для измерения потоков тепла в высокотемпературных печах. – Заводская лаборатория, 1949. – № 15. – С. 2.

2.90 *Hatfield H. S.* A new heat-flow meter / H. S. Hatfield, F. J. Wilkins. // *Journal of physics*. – Ser. E. – *Journal of Scientific instruments*, 1950. – Vol. 27, № 1. – P. 57-63.

2.91 *Колесников А. Г.* Прибор для определения тепловых потоков / А. Г. Колесников, А. А. Сперанская. – *Известия АН СССР*. – Сер. Геофиз. – 1958. – № 11. – С. 78-86.

2.92 *Браун В.* Прибор для измерения стационарного потока тепла / В. Браун [и др.] : пер. с англ. – *Приборы для научных исследований*, 1961. – Т. 32, № 8. – С. 117.

2.93 *Иванов Н. С.* Методы измерения тепловых потоков в горных породах / Н. С. Иванов. – *Тепло- и массоперенос в мерзлых почвах и горных породах*. – М. : Изд-во АН СССР, 1961.

2.94 *Stempel F. C.* Direct heat transfer measurements. / F. C. Stempel, D. L. Rall. – *ISA*. – *Journ.*, 1964. – Vol. 11, No. 4.

2.95 *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.

2.96 *Амирханов Х. И.* Исследование теплопроводности закиси меди / Х. И. Амирханов. – *Изв. АН АзССР*, 1946. – № 1. – С. 4.

2.97 *Степкин А. А.* Высокотемпературные калориметры и датчики теплового потока / А. А. Степкин. – *Теплопроводность и конвективный теплообмен*. – Киев : Наук. думка, 1977. – С. 46-49.

2.98 Заявка 2571493 Франция, G 01 K 17/08. Устройство для измерения теплового потока на резисторах. / *Gradient*. – № 8415299. – Бюл. № 15, 1986.

2.99 Patent 2590982-A1 France, G01K 17/20. Device for measuring a heat flux (Патент 2590982 Франция, МКИЗ G01K 17/20. Тепломер). – Бюл. № 23, 1987.

2.100 *Andretta A.* Simple Heat Flux Meter / A. Andretta, B. Bartoli, B. Coluzzi, V. Cuomo, S. De Stefano // *Review of Scientific Instruments*, 1981. – Vol. 52, No. 2. – P. 223-224.

2.101 *Глаговский Б. А.* Электротензометры сопротивления / Б. А. Глаговский, И. Д. Пивень. – Л. : Энергия, 1972. – 88 с.

2.102 А. с. 1515075 СССР, МКИЗ G 01 K 17/08. Датчик теплового потока / О. А. Геращенко, А. С. Поник, Л. А. Лукашевич, Л. В. Гурьянов. – № 4368848/24-10 ; заявл. 25.01.88 ; опублик. 15.10.89, Бюл. № 38. – 3 с.

2.103 *Анфимов Н. А.* Емкостный метод измерения нестационарных кратковременных тепловых потоков / Н. А. Анфимов, А. П. Швецов // Изв. АН СССР. – ОТН. Механика и машиностроение, 1960. – №. 4.

2.104 А. с. 288356 СССР, МПКЗ G 01 K 17/08. Устройство для определения тепловых потоков / К. Г. Тараянц. – № 1384304/18-10 ; заявл. 12.12.69 ; опублик. 03.12.70, Бюл № 36.

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

2.106 *Новик В. К.* Пироэлектрические преобразователи / В. К. Новик, Н. Д. Гаврилова, Н. Б. Фельдман. – Москва : Сов. радио, 1979. – 177 с.

2.107 *Киес Р. Дж.* Фотоприемники видимого и ИК диапазонов / Р. Дж. Киес, П. В. Крузе, Э. Г. Патли [и др.] – М. : Радио и связь, 1985. – 328 с.

2.108 *Аксененко М. Д.* Приемники оптического излучения : Справочник / М. Д. Аксененко, М. Л. Баранчиков. – М. : Радио и связь, 1987. – 296 с.

2.109 *Roundy С. В.* Subnanosecond Pyroelectric Detector / С. В. Roundy, R. L. Byer. – Applied Physics Letters, 1972. – Vol. 21, No. 10. – P. 512-515.

2.110 *Лысенко В. С.* Получение и свойства поглощающих покрытий / В. С. Лысенко, А. Ф. Мальнев // Тепловые приемники излучения. – Киев : Наукова думка, 1967. – С. 146-163.

2.111 *Кременчугский В. Л.* Термопироэлектрические приемники излучения : дис. ... канд. техн. наук / Кременчугский Владимир Львович. – Киев, 1988. – 192 с.

2.112 *Декуша Л. В.* Теплометрические измерительные преобразователи для исследования сложного теплообмена : дис ... канд. техн. наук : 05.11.04 / Декуша Леонид Васильевич. – Киев, 1990. – 278 с.

2.113 *Иванцов Г. П.* Теплообмен между слитком и изложницей / Г. П. Иванцов. – М. : Metallurgizdat, 1951. – 40 с.

2.114 *Герашенко О. А.* Датчик теплового потока / О. А. Герашенко, В. Г. Федоров // Передовой научно-технический и производственный опыт. – Тема 34. – М. : ВИНТИ, 1958. – № П-58-80/8. – 12 с.

2.115 А.с. 159048 СССР, МКИЗ G 01 K 17/08. Датчик для измерения локальных тепловых потоков / В. Г. Федоров, О. А. Герашенко. – 1963. – Опубл. Бюл. № 23. – с. 15.

2.116 *Герашенко О. А.* Галетные датчики теплового потока / О. А. Герашенко, В. Г. Федоров // Передовой научно-технический и производственный опыт. – М. : ГОСИНТИ, 1964. – № 26-64-1029/55. – 14 с.

2.117 *Герашенко О. А.* Слоистый датчик теплового потока / О. А. Герашенко, А. Д. Лебедев, В. Г. Федоров // Передовой научно-технический и производственный опыт. – М. : ГОСИНТИ, 1964. – № 26-64-1162/57. – 13 с.

2.118 *Герашенко О. А.* Спиральный датчик теплового потока / О. А. Герашенко, В. Г. Федоров // Передовой научно-технический и производственный опыт. – М. : ГОСИНТИ, 1964. – № 26-64-1028/54. – 14 с.

2.119 *Wilson W. H.* The Construction of Thermo-couples by Electro-deposition / W. H. Wilson, T. D. Epps // Proc. Phys. Soc. – London, 1919. – Volume 32. – P. 326-340.

2.120 *Сухов С. А.* Исследование электролитической термомпары / С. А. Сухов, С. Я. Кадлец, Г. Д. Павлюк // Измерительная техника. – 1959. – № 1. – С. 35-36.

2.121 *Герашенко О. А.* ТермоЭДС гальванических термомпар / О. А. Герашенко, Н. Н. Ионова // Измерительная техника. – 1966. – № 1. – С. 65-66.

2.122 Теплофизические приборы и комплектные лаборатории : каталог / Гос. спец. констр. бюро теплофиз. приборостроения. – М. : Внешторгиздат, 1981. – 87 с.

2.123 *Анатычук Л. И.* Полупроводники в экстремальных температурных условиях / Л. И. Анатычук, Л. П. Булат. – СПб. : Наука, 2001. – 224 с.

2.124 *Петров Г. С.* Применение термоэлектрических полупроводниковых преобразователей теплового потока в разработках приборов / Г. С. Петров, В. Г. Карпов, Д. А. Тайц // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 1983. – Т. 5, № 1. – С. 29-32. – ISSN 0204-3602.

2.125 *Geiling L.* Das Thermoelement als Strahlungsmesser / L. Geiling. – Zschr. F. Angew. Phys. – 1951. – Bd. 3, V. – № 12. – P. 467-477.

2.126 *Герашенко О. А.* Датчики теплового потока на основе искусственно анизотропного термоэлектрического материала / О. А. Герашенко, Е. К. Иорданишвили, Т. С. Губкин, Е. Э. Фискинд, Ж. Л. Погурская // ИФЖ. – 1978. – Том 35, № 2 – с. 229-233.

2.127 *Митяков А. В.* Градиентные датчики теплового потока в нестационарной теплометрии : дис. канд. техн. наук : 05.14.05 / Андрей Владимирович Митяков. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2000. – 132 с.

2.128 Исследование теплового режима соединителя электрического морского: отчет о НИР (заключительный) / Севастополь, 1986. – 82 с. – № ГР 01840037636.

2.129 *Ухлинов Г. А.* Пленочные анизотропные датчики теплового излучения / Г. А. Ухлинов, Ф. Ч. Каримов, Ф.В. Марков, Б. Л. Разников // Оптико-механическая промышленность. – 1985. – № 6. – С. 50-52.

2.130 *Ухлинов Г. А.* Анизотропия и анизотропный термоэлектрический градиент в наклонно конденсированных пленках / Г. А. Ухлинов, Д. М. Краснов // Материалы и техноло-

гические процессы микроэлектроники. – М. : МИЭТ, 1986. – С. 192-195.

2.131 *Опаричев А. Б.* Термоэлектрическая эффективность пленочных наклонно-конденсированных преобразователей из изотропных и анизотропных материалов / А. Б. Опаричев, М. А. Каримбеков // Прикладная физика. – 2005. – № 3. – С. 109-112.

2.132 *Ащеулов А. А.* Анизотропная термоэлектрическая матрица для регистрации излучения / А. А. Ащеулов, И. С. Романюк // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2007. – № 1. – С. 40-41.

2.133 *Сапожников С. З.* Градиентные датчики для высокотемпературной теплотометрии / С. З. Сапожников, В. Ю. Митяков, А. В. Митяков, С. А. Можайский // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34, Вып. 19. – 3 с.

2.134 *Пшеница-Северин Д. А.* Искусственно анизотропный термоэлектрический материал с полупроводниковыми и сверхпроводящими слоями / Д. А. Пшеница-Северин, Ю. И. Равич, М. В. Ведерников // Физика и Техника Полупроводников. – 2000. – Т. 34, Вып. 10. – С. 1265-1269.

2.135 *Knauss H.* A Novel sensor for fast heat flux measurements. / H. Knauss, U. Gaisbauer, S. Wagner, D. Buntin, A. Maslov, V. Smorodsky, J. Betz // AIAA. – 2006. – № 3637. – 32 p.

2.136 *Zahner Th.* Transverse thermoelectric response of a tilted metallic multilayer structure / Th. Zahner, R. Forg, H. Lengfellner. // Applied Physics Letters. – 1998. – Vol. 73, Num. 10. – P. 1364-1366.

2.137 Свидетельство на полезную модель 9959 (с приоритетом 10 августа 1998 г.) Датчик теплового потока / Н. П. Дивин (Россия). – Российское агентство по патентам и товарным знакам; 16.05.99, Бюл. Полезные модели, №5.

2.138 TNO Industrial Research: Heat Flux Sensors Catalog, 1992. <http://pdf.directindustry.com/pdf/hukseflux-thermal-sensors-bv/bs01/88003-531125.html>

2.139 Heat Flux Sensors [Electronic resource] / Wuntronic GmbH, Heppstrasse 30, D-80995 Munich, Germany // Каталог. – Режим доступа к каталогу : <http://www.wuntronic.de/>.

2.140 Heat Flow Thermal Sensor [Electronic resource] / The website of Wuntronic GmbH, Germany. – The access mode to the website: <http://www.wuntronic.de/>. – Title screen.

2.141 Heat flux sensors. Products & services [Electronic resource] / The website of TNO TPD, The Netherlands. – The access mode to the website: <http://www.hukseflux.com/page/products-services>. – Title screen.

2.142 Hukseflux Thermal Sensors : рекламные листки / The access mode to the website: www.hukseflux.com. INFO@HUKSEFLUX.COM.

2.143 Micro-Foil® Heat Flow Sensors [Electronic resource] / The website of RdF Corporation, USA. – The access mode to the website: http://www.rdfcorp.com/products/hflux/hfs-a_01.shtml. – Title screen.

2.144 The heat flux sensor specialist : каталог / CAPTEC / Enterprise, <http://www.captec.fr>.

2.145 Каталог продукции, часть II, раздел V : каталог / ОАО Научно-производственного предприятия «ЭТАЛОН» ФАТРМ. – Омск, 2007. – С.26-28.

2.146 Приборы для теплофизических измерений : каталог / Институт технической теплофизики АН УССР. – К. : Реклама, 1986. – 73 с.

2.147 Приборы для теплофизических измерений : каталог / Киев : Час, 1991. – 56 с.

2.148 Приборы для теплофизических измерений [Электронный ресурс] : каталог – Киев : ИТТФ НАН Украины, 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Название с этикетки диска.

2.149 *Геращенко О. А.* Методика конструирования оптимальных преобразователей теплового потока / О. А. Геращенко, Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша // Проблемы энергосбе-

режения : Респ. межвед. сб. науч. тр. – К. : Наук. думка, 1990. – Вып. 3. – С. 36-42. – ISSN 0236-4077.

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

2.151 Энергосбережение. Преобразователи теплового потока термоэлектрические общего назначения. Общие технические условия : ГОСТ 30619-98. – [Введ. 2000-07-01]. – К. : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2000. – 28 с. – (Межгосударственный стандарт).

ГЛАВА 3 МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОвого ПОТОКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ВИДА ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ СТЕНКИ

3.1 Оценка искажений при измерении теплового потока с применением ПТП вида вспомогательной стенки

Как и в других видах измерения, также и в теплотрии, главной проблемой является погрешность измерения, зависящая от многих факторов, включая особенности ПТП. В случае применения ПТП вида вспомогательной стенки к источникам погрешности относятся, главным образом, замена в формуле (1.6) градиента температуры $grad T$ на отношение конечных значений разности температуры к толщине ПТП $\Delta T/h$, приводящая к формуле (2.29), отличающейся от формулы (1.6), которая справедлива при бесконечно малых размерах примененного ПТП, и неидентичность ТФХ ПТП и ОК. Последнее приводит к существенному искажению естественных полей температуры и теплового потока, из-за чего измеренные значения теплового потока или его плотности не соответствуют истинным. В связи с этим внимание экспериментаторов неоднократно было обращено на решение задач по оценке искажений теплового поля при наличии ПТП на поверхности или внутри ОК. Уже в 60-е годы в бывшем СССР появляются первые соответствующие публикации [3*, 5*, 3.1–3.5]. В последующие годы этой проблеме были посвящены работы как отечественных, так и зарубежных ученых [3.6–3.19].

В работах [3.1, 3.2] решена задача об искажении стационарного плоского температурного поля присутствующим ПТП – ограниченным телом с ТФХ, отличными от характеристик ОК. Авторы при этом аппроксимировали форму ПТП

сплюснутым эллипсоидом с полуосями a , b , и c ($a \geq b > c$), находящимся в однородном температурном поле так, что малая полуось c расположена перпендикулярно изотермическим поверхностям [3.3]. Для приведенной плотности теплового потока $q_{ИЗМ}/q_0$, измеряемого ПТП, являющимся сильно сплюснутым эллипсоидом, справедлива зависимость:

$$q_{ИЗМ}/q_0 = (1 - (c/b) \cdot (1 - \Lambda^{-1})) \cdot E^* \left(\sqrt{(1 - (b/a)^2)} \right)^{-1}, \quad (3.1)$$

где $\Lambda = \chi_{ПТП}/\chi_{ОК}$ – приведенный коэффициент теплопроводности; E^* – полный эллиптический интеграл.

Для частного случая, когда ПТП имеет форму диска, то есть при $a = b = r_{ПТП}$ и $r_{ПТП} > c$, получена расчетная зависимость приведенной плотности теплового потока от приведенной теплопроводности при вариации геометрического параметра ПТП $D_{ПТП}/h_{ПТП}$ ($h = c$), графически представленная на рисунке 3.1 [3.2].

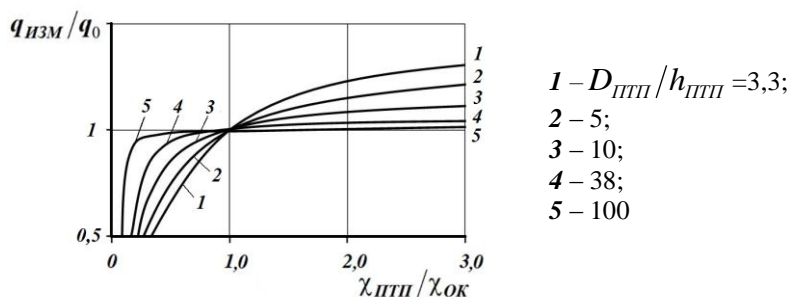


Рис.3.1. Зависимость приведенной измеренной плотности теплового потока $q_{ИЗМ}/q_0$ от приведенной теплопроводности при вариации геометрического параметра ПТП $D_{ПТП}/h_{ПТП}$

Результаты аналогичного исследования, полученные методом моделирования на электропроводной бумаге [3*] с применением интегратора [2.21] приведены на рисунке 3.2, а полученные расчетным путем методом элементарных балансов – на рисунке 3.3 [5*].

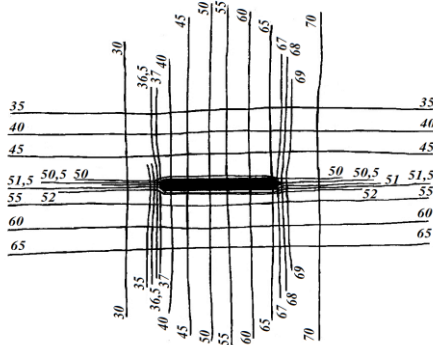


Рис. 3.2. Сетка изолиний при наличии ТТП в объекте для случая

$$h_{\text{ТТП}}/D_{\text{ТТП}}=0,1 \text{ и } \chi_{\text{ТТП}}/\chi_{\text{СР}} = \infty$$

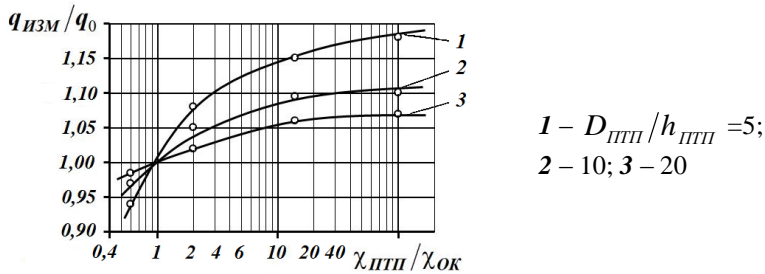


Рис.3.3. Зависимость $q_{\text{изм}}/q_0$ от приведенной теплопроводности

$$\chi_{\text{ТТП}}/\chi_{\text{ОК}} \text{ при вариации параметра ТТП } D_{\text{ТТП}}/h_{\text{ТТП}}$$

Результаты этих авторов хорошо коррелируют между собой, показывая, что измеренное посредством ТТП вида вспомогательной стенки значение плотности теплового потока равно его исходному (действительному) значению в двух случаях: при одинаковой теплопроводности ТТП и материала ОК или при малом отношении толщины ТТП к его поперечному размеру, то есть для очень тонкого ТТП. По результатам, полученным электро моделированием [3*], установлено, что при любом отношении $\chi_{\text{ТТП}}/\chi_{\text{ОК}}$ искажение линий тепло-

вого потока прекращается на расстоянии от ПТП, равном его десяти толщинам. Эти результаты хорошо совпадают с результатом, полученным авторами публикаций [3.1, 3.2]. Кроме того в [3*] показано, что нарушение одномерности температурного поля в ПТП происходит в его периферийной области (вблизи кромки) (см. рис. 3.2). Отсюда следует необходимость изготовления ПТП с охранной зоной.

Задача оценки погрешности измерения стационарного теплового потока внутри массивных объектов с помощью ПТП с учетом фактических размеров ПТП и его ЧЭ решена в [3.10, 3.11]. Эти результаты, подтвердив выводы предшественников, показали, что уменьшение зоны ЧЭ в ПТП тоже приводит к существенному уменьшению погрешности в достаточно широком диапазоне значений отношения $\chi_{ПТП}/\chi_{ОК}$. При заданных значениях точности измерений и геометрического параметра ПТП полученные результаты позволяют предварительно устанавливать допустимый диапазон коэффициентов теплопроводности ПТП в зависимости от возможной теплопроводности материала исследуемого ОК. Из анализа результатов видно, что обеспечение требуемой точности измерений на уровне относительной погрешности менее 5% для часто применяемых на практике ПТП со значениями геометрического параметра $D_{ПТП}/h_{ПТП}$ от 5 до 20 приводит к весьма жестким ограничениям по теплопроводности материала исследуемой ОК.

Вопрос учета искажений поля теплового потока, вносимых ПТП, расположенным на поверхности полуограниченного тела при граничных условиях третьего рода, рассмотрен авторами [3.7]. Ими получена формула поправочного коэффициента K^q для вычисления истинного значения плотности теплового потока согласно выражению: $q_0 = K^q \cdot q_{ИЗМ}$.

На рисунке 3.4 даны графики, необходимые для практического нахождения поправочного коэффициента (K^q) для случая размещения ПТП на полуограниченном массиве.

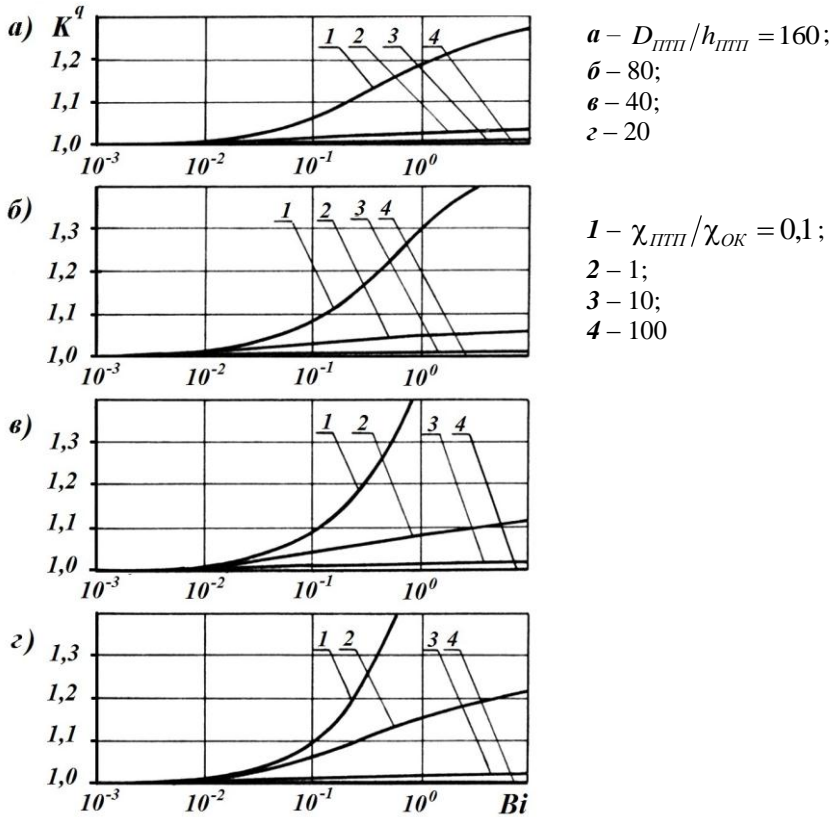


Рис. 3.4. Поправочный коэффициент $K^q = q_0/q_{ИЗМ}$ для ПТП, установленного на полуограниченном массиве, при вариации геометрического параметра $D_{ПТП}/h_{ПТП}$ для различных значений отношения $\chi_{ПТП}/\chi_{ОК}$ в зависимости от числа Bi , равного отношению $R_{ПТП}/R_{ОК}$

Искажениям теплового потока в случае расположения ПТП на поверхности ограниченной пластины, охлаждаемой за счет конвекции, посвящена работа [3.8]. Задача решена для однородного осевого потока теплоты при граничных условиях 3-го рода путем введения эффективного коэффициента теплообмена для участка поверхности, где установлен ПТП:

$$\alpha_{\text{эф}} = (\alpha^{-1} + h_{\text{ПТП}} / \chi_{\text{ПТП}})^{-1}, \quad (3.2)$$

где α – коэффициент теплообмена поверхности ОК с ОС в невозмущенной присутствием ПТП зоне. Такое упрощение позволило оценить ряд ошибок, которые могут содержаться в показаниях ПТП. Автор работы [3.8] установил, что погрешность измерения теплового потока зависит от соотношения размеров ПТП и ОК, их коэффициентов теплопроводности, значений числа Био, характеризующего конвективное охлаждение поверхности ОК, и температуры ПТП. Из полученных результатов предложен критерий, которому надо следовать, чтобы минимизировать возможные ошибки измерений:

$$\frac{h_{\text{ПТП}} \cdot \chi_{\text{ПТП}}}{r_{\text{ПТП}} \cdot \chi_{\text{ОК}}} \cdot C_q \ll 1 \quad \text{или} \quad h_{\text{ПТП}} \cdot \chi_{\text{ПТП}} \cdot C_q \ll r_{\text{ПТП}} \cdot \chi_{\text{ОК}}, \quad (3.3)$$

где C_q – коэффициент одномерной проводимости, при этом для практического пользования коэффициентом C_q необходимо привлекать информацию о значении коэффициента теплообмена α для определения числа Био и применять итерационную процедуру вычислений, что не только усложняет отыскание погрешности измерения, но и уменьшает точность ее определения.

Более надежным для получения точного значения измеряемой плотности теплового потока является экспериментальный метод, основанный на уравнении теплового баланса:

$$q_0 = q_{\text{ИЗМ}} \cdot (T_{\text{ОК}} - T_{\text{ОС}}) / (T_{\text{ПТП}} - T_{\text{ОС}}) = K^q \cdot q_{\text{ИЗМ}}. \quad (3.4)$$

Если указанные в (3.4) разности значений температуры измерять двумя дифференциальными термопарами, то определение поправочного коэффициента K^q сводится к измерению их ТЭДС [3.4].

Если при исследовании конвективного теплообмена ПТП расположить на теплообменной поверхности из высоко-теплопроводного материала, то разность значений температуры поверхностей ПТП и ОК в невозмущенной зоне может быть учтена через тепловое сопротивление ПТП ($h_{\text{ПТП}} / \chi_{\text{ПТП}}$)

[3.5], а действительное значение плотности теплового потока вычисляется по формуле:

$$q_0 = q_{\text{ИЗМ}} \cdot \left(1 + \frac{q_{\text{ИЗМ}} \cdot h_{\text{ПТП}} / \chi_{\text{ПТП}}}{T_{\text{ОК}} - T_{\text{ОС}} - q_{\text{ИЗМ}} \cdot h_{\text{ПТП}} / \chi_{\text{ПТП}}} \right). \quad (3.5)$$

Достоинством этой методики является то, что значения всех величин, входящих в формулы (3.4) или (3.5), получают непосредственным измерением. Однако, целесообразнее в измерительной практике применять ПТП с характеристиками, согласованными с конкретными условиями измерений.

Среди зарубежных публикаций, посвященных искажениям теплового потока и погрешностям его измерения с помощью ПТП вида вспомогательной стенки [3.12 – 3.18], особенно заслуживает внимания работа [3.17], в которой рассмотрены метрологические аспекты применения ПТП при обследовании состояния теплозащиты зданий и сооружений. ПТП может быть установлен в середине теплоизоляционной или бетонной плиты, или между слоями бетона (или деревянного настила) и изоляции, то есть оказаться в условиях, когда $\chi_{\text{ПТП}} < \chi_{\text{ОК}}$ или $\chi_{\text{ПТП}} > \chi_{\text{ОК}}$.

На рисунке 3.5 приведены результаты измерения с помощью ПТП дисковой формы, вмонтированных в различные стеновые материалы, например, в бетон (см. рис. 3.5, а) или изоляцию (см. рис. 3.5, б).

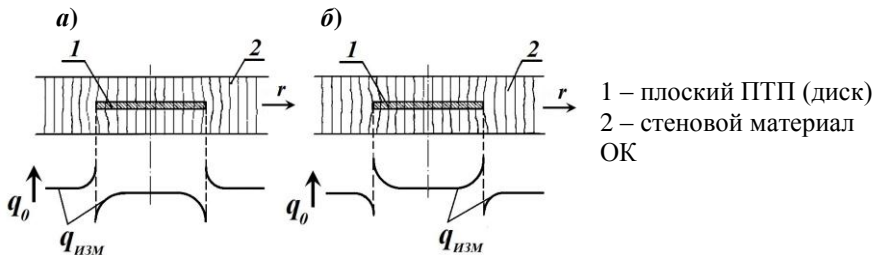


Рис.3.5 – Эпюры измеренного с помощью ПТП теплового потока, для которого: а – $\chi_{\text{ОК}} > \chi_{\text{ПТП}}$, $q_{\text{ИЗМ}} < q_0$; б – $\chi_{\text{ОК}} < \chi_{\text{ПТП}}$, $q_{\text{ИЗМ}} > q_0$

Эти измерения подтвердили, что действительные и измеренные значения теплового потока идентичны только при условии $\chi_{ПТП} = \chi_{ОК}$. При анализе искажений теплового потока автор воспользовался понятиями одномерного и трехмерного искажений, различие между которыми проиллюстрировано на рисунке 3.6.

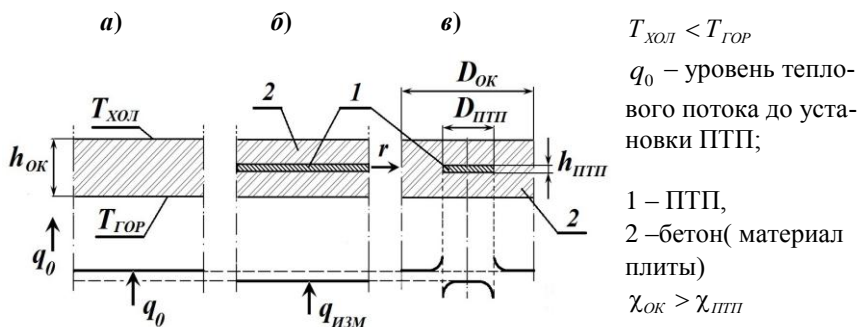


Рис. 3.6. Иллюстрация различий одномерного и трехмерного искажений: а – ПТП отсутствует; б – ПТП бесконечного диаметра (одномерное искажение); в – ПТП с диаметром конечного размера (трехмерное искажение)

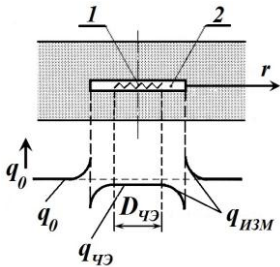
Для грубой оценки степени одномерности теплового потока в ПТП в [3.18] выполнены вычисления значений приведенной плотности теплового потока $q_{ИЗМ}/q_0$ по формуле:

$$q_{ИЗМ}/q_0 = h_{ОК}/(h_{ОК} - h_{ПТП} + h_{ПТП} \cdot \chi_{ОК}/\chi_{ПТП}). \quad (3.6)$$

Для исходных данных: $h_{ОК} = 60$ мм, $\chi_{ОК} = 0,03$ Вт/(м·К); $h_{ПТП} = 3$ мм, $\chi_{ПТП} = 0,3$ Вт/(м·К), это отношение $q_{ИЗМ}/q_0 = 1,047$, что соответствует одномерной погрешности менее 5%.

Трехмерные искажения, связанные с сильными градиентами теплового потока в периферийной зоне ПТП (см. рис. 3.6 в), явились предметом аналитических и экспериментальных исследований [3.17–3.20], из которых был сделан вывод об обязательности изготовления ПТП с охранной зоной. По-

лученные результаты показаны на рисунке 3.7, где видно, что охранная зона защищает зону ЧЭ от искажений.



- 1 – охранная зона ПТП;
- 2 – термобатарея ПТП;
- $D_{\text{ЧЭ}}$ – диаметр чувствительного элемента ПТП

Рис. 3.7. Характер эпюры теплового потока при использовании ПТП, выполненного с охранной зоной

Если через ЧЭ проходит тепловой поток, который можно рассматривать как одномерно искаженный, а приведенная измеренная плотность потока соответствует формуле (3.6), то находят погрешность измерения δ^q , которая согласно [3.21] равна:

$$\delta^q = q_{\text{ИЗМ}} / q_0 - 1. \quad (3.7)$$

При расположении ПТП с тепловым сопротивлением $R_{\text{ПТП}}$ (с учетом контактного теплового сопротивления) на изотермической высокотеплопроводной поверхности для случая конвективного или конвективно-радиационного теплообмена поверхности с ОС приведенная плотность теплового потока $q_{\text{ИЗМ}} / q_0$ равна:

$$q_{\text{ИЗМ}} / q_0 = R_{\alpha} / (R_{\text{ПТП}} + R_{\alpha}), \quad (3.8)$$

где R_{α} – тепловое сопротивление конвективному теплообмену.

Погрешность измерения можно предсказуемо уменьшить, если использовать тонкий ПТП с тепловым сопротивлением значительно меньшим R_{α} .

В публикации [3.18] приведены погрешности, вычисленные для таких исходных данных: $\chi_{\text{ОК}} = 0,03$ Вт/(м·К), $h_{\text{ОК}} = 100$ мм, $\chi_{\text{ПТП}} = 0,6$ Вт/(м·К), $h_{\text{ПТП}} = 5$ мм и $D_{\text{ПТП}} = 40$ мм, кото-

рые составили: одномерная – 5%; трехмерная (в отсутствие охранной зоны) – 40% и трехмерная при наличии охранной зоны – 2%. Влияние размеров охранной зоны на трехмерную погрешность как функция нескольких параметров рассмотрено также в [3.14].

В случае измерения теплового потока через ОК с помощью установленного на наружной поверхности ПТП, он подвержен суммарному воздействию теплового излучения и конвекции в приповерхностном слое. Эпюра измеренного теплового потока показана на рисунке 3.8 *а*, а влияние поперечного размера ПТП на результат измерения на рисунке 3.8 *б* [3.18].

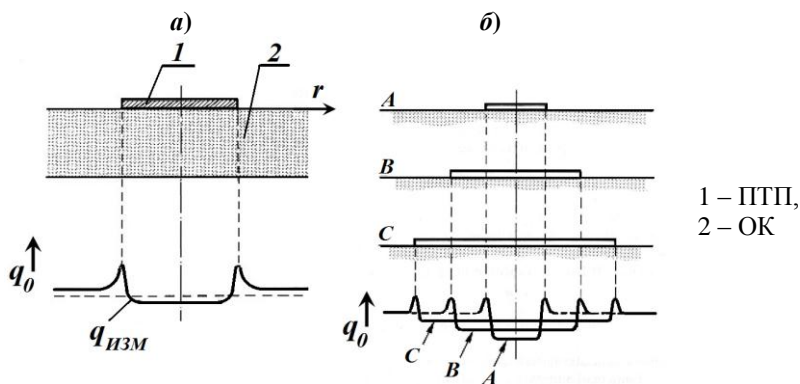


Рис. 3.8. Характер эпюр теплового потока при размещении ПТП на поверхности ОК (*а*) и при вариации поперечного размера ПТП (*б*)

Из вышеизложенного следует, что на отдельные моменты методических погрешностей измерения стационарного теплового потока по мере расширения сферы применения ПТП вида вспомогательной стенки как в научных исследованиях, так и промышленном производстве, обращали свое внимание ученые ряда стран в различные годы. Так, в связи с тем, что теплопоточные измерения и необходимые для их проведения ПТП стали широко распространенными (см. [3.19] и Приложение А), выполнено достаточно полное изучение факторов, влияющих на точность технических измерений для

наиболее типичных ОК и распространенных случаев взаимного расположения ПТП и ОК при различных граничных условиях теплообмена с ОС.

В связи с тем, что ПТП практически может быть установлен на поверхности или заподлицо с поверхностью ОК, или внутри массива ОК, а ОК может представлять собой неограниченный или полуограниченный массив, бесконечную пластину конечной толщины, изотермическую пластину и другие ОК при различных граничных условиях теплообмена с ОС, рассмотрено несколько задач, отразивших многообразие случаев применения ПТП, описанных в последующих параграфах данной главы [3.19, 3.20].

Кроме обозначений, указанных в «Перечне условных обозначений, индексов и сокращений», в этой главе дополнительно применены следующие:

ΔT – разность температуры ОС (T_{OC}) и первоначальной температуры ОК (T_0)

$$\Delta T = T_{OC} - T_0; \quad (3.9)$$

Θ – искажение первоначальной температуры ОК, равное разности значений температуры искаженной и первоначальной (действительной)

$$\Theta(r, z) = T(r, z) - T_0; \quad (3.10)$$

K^T – коэффициент искажения первоначальной температуры ОК

$$K^T = (T(r, z) - T_0) / (T_{OC} - T_0); \quad (3.11)$$

K^q – коэффициент искажения первоначального теплового потока

$$K^q = q_{ИЗМ} / q_0; \quad (3.12)$$

δ^q – погрешность измерения плотности теплового потока, которая, исходя из (3.7) и (3.12), равна [3.21]:

$$\delta^q = \frac{q_{ИЗМ} - q_0}{q_0} = K^q - 1. \quad (3.13)$$

3.2 ПТП на поверхности изотермической металлической пластины

Наиболее частым случаем применения ПТП является размещение его на поверхности ОК в виде неограниченной пластины, температурное поле которой изотермично, что имеет место в пластине, выполненной из высокотеплопроводного материала ($\chi_{ОК} \gg \chi_{ПТП}$). Одна из ее сторон омывается хорошо турбулизированным потоком жидкости, что обеспечивает на ней граничное условие 1-го рода: $T_{ОК} = T_2 = const$. На другой поверхности, где установлен ПТП, происходит теплообмен с граничными условиями 3-го рода [3.19, 3.20]. Модель теплообмена в рассматриваемой задаче приведена на рисунке 3.9.

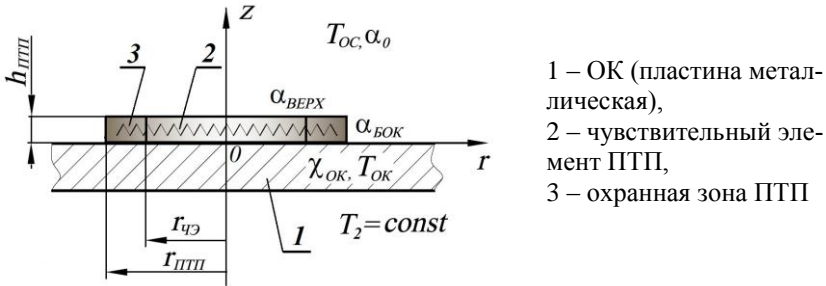


Рис.3.9. Схема физической модели системы «Изотермическая пластина из высокотеплопроводного материала – ПТП – ОС»

Ввиду изотермичности ОК и при неодинаковых коэффициентах теплообмена $\alpha_{верх} \neq \alpha_{бок} \neq \alpha_0$ имеют место искажения температурного и теплового полей в самом ПТП [3.20]. При этом методическая погрешность измерения обусловлена не только тепловым сопротивлением конвективному теплообмену с ОС на поверхности ОК $R_{\alpha,0} = 1/\alpha_0$, собственным тепловым сопротивлением ПТП $R_{ПТП} = h_{ПТП}/\chi_{ПТП}$, контактными тепловым сопротивлением R_K между нижним торцом ПТП и поверхностью ОК, но и тепловым сопротивлени-

ем конвективному теплообмену на торцевой и боковой поверхностях ПТП: $R_{\alpha, \text{БЕРХ}} = 1/\alpha_{\text{БЕРХ}}$ и $R_{\alpha, \text{БОК}} = 1/\alpha_{\text{БОК}}$.

В этом случае плотность действительного теплового потока равна

$$q_0 = \Delta T / R_{\alpha, 0} = (T_{OK} - T_{OC}) / R_{\alpha, 0}, \quad (3.14)$$

а измеренного с применением ПТП равна

$$q_{\text{ИЗМ}} = \Delta T / (R_{\alpha, \text{БЕРХ}} + R_{\text{ПТП}} + R_K). \quad (3.15)$$

Исходя из (3.14) и (3.15), согласно определению (3.13) методическая погрешность измерения теплового потока ПТП, расположенным на изотермической пластине, равна:

$$\delta^q = R_{\alpha, 0} / (R_{\alpha, \text{БЕРХ}} + R_{\text{ПТП}} + R_K) - 1, \quad (3.16)$$

откуда видно, что погрешность уменьшается при снижении теплового сопротивления ПТП $R_{\text{ПТП}}$ или контактного сопротивления R_K или того и другого вместе. Особенностью измерения плотности теплового потока является наличие краевых эффектов в самом ПТП, обусловленных теплообменом на его боковой поверхности.

Одномерность температурного и теплового полей ПТП обеспечивается охранной зоной. Ее размеры могут быть заранее определены, исходя из решения задачи о стационарном осесимметричном распределении теплового потока в ПТП, представляющем собой ограниченный короткий цилиндр высотой $h_{\text{ПТП}}$, диаметром $D_{\text{ПТП}} = 2r_{\text{ПТП}}$ и с коэффициентом теплопроводности $\chi_{\text{ПТП}}$. На свободной поверхности ПТП ($z = h_{\text{ПТП}}$) происходит конвективный теплообмен с ОС, температура которой $T_{OC} = \text{const}$ и коэффициент теплообмена $\alpha_{\text{БЕРХ}}$, а на боковой поверхности ($r = r_{\text{ПТП}}$) – теплообмен с ОС с коэффициентом теплообмена $\alpha_{\text{БОК}}$, чему соответствуют значения теплового сопротивления теплообмену $R_{\alpha, \text{БЕРХ}}$ и $R_{\alpha, \text{БОК}}$. В плоскости контакта ПТП с поверхностью ОК в общем случае имеется контактное тепловое сопротивление R_K .

Схема модели теплообмена ПТП, установленного на поверхности изотермического объекта контроля дана на рисунке 3.10.

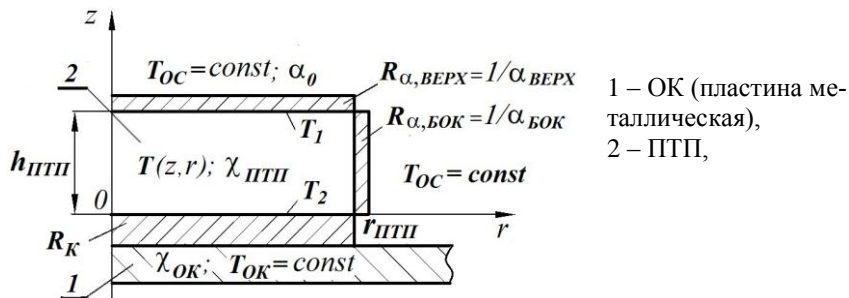


Рис.3.10. Схема модели теплообмена в ПТП, установленном на поверхности изотермической ОК – металлической пластины

При условии осевой симметрии и независимости ТФХ ПТП от температуры стационарное распределение температуры в ПТП описывается классическим уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах r и z [2.1, 2.2]:

$$\frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial z^2} = 0 \quad (3.17)$$

с граничными условиями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{ПТП} \cdot \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} = \alpha_{ВЕРХ} \cdot (T_{OC} - T_1), \quad T_1 = T(r, z = h_{ПТП}) \quad \text{при } r \leq r_{ПТП} \\ \lambda_{ПТП} \cdot \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} = \frac{1}{R_K} \cdot (T_2 - T_{ОК}), \quad T_2 = T(r, z = 0) \quad \text{при } r \leq r_{ПТП} \\ \lambda_{ПТП} \cdot \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} = \alpha_{БОК} \cdot (T_{OC} - T_{БОК}), \quad T_{БОК} = T(r = r_{ПТП}, z) \quad \text{при } 0 \leq z \leq h_{ПТП} \\ \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} = 0 \quad \text{при } r = 0 \end{array} \right. \quad (3.18)$$

При введении безразмерных координат $\rho = r/r_{ПТП}$, $\zeta = z/h_{ПТП}$, геометрического параметра ПТП $k = D_{ПТП}/h_{ПТП}$, чисел Био $Bi_{ВЕРХ} = \alpha_{ВЕРХ} \cdot h_{ПТП}/\lambda_{ПТП} = R_{ПТП}/R_{\alpha,ВЕРХ}$ и

$Bi_{\text{БОК}} = \alpha_{\text{БОК}} \cdot r_{\text{ППП}} / \chi_{\text{ППП}}$, а также температуры $\vartheta(\rho, \zeta)$ и разности температуры ϑ_i в безразмерной форме: $\vartheta(\zeta, \rho) = (T(r, z) - T_{\text{ОС}}) / T_{\text{ОС}}$ и $\vartheta_i = (T_i - T_{\text{ОС}}) / T_{\text{ОС}}$ при $i = 1, 2$ уравнение (3.17) и граничные условия (3.18) преобразуются к виду [3.22]:

$$\frac{k^2}{4} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta(\rho, \zeta)}{\partial \zeta^2} + \frac{\partial^2 \vartheta(\rho, \zeta)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \vartheta(\rho, \zeta)}{\partial \rho} = 0, \quad (3.19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vartheta(\rho, 1)}{\partial \zeta} = \frac{R_{\text{ППП}}}{R_{\alpha, \text{ВЕРХ}}} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta(\rho, 1)) \quad \text{при } \rho \leq 1 \\ \frac{\partial \vartheta(\rho, 0)}{\partial \zeta} = \frac{R_{\text{ППП}}}{R_K} \cdot (\vartheta(\rho, 0) - \vartheta_2) \quad \text{при } \rho \leq 1 \\ \frac{\partial \vartheta(1, \zeta)}{\partial \rho} + Bi_{\text{БОК}} \cdot \vartheta(1, \zeta) = 0 \quad \text{при } 0 \leq \zeta \leq 1 \\ \frac{\partial \vartheta(0, \zeta)}{\partial \zeta} = 0 \quad \text{при } \rho = 0 \end{array} \right. \quad (3.20)$$

Из решения этого уравнения для локальной температуры получается следующее выражение [3.20, 3.22]:

$$\vartheta(\zeta, \rho) = K^T \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot J_0(v_n \rho) \cdot S_n(\zeta), \quad (3.21)$$

где $J_0(v\rho)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка [3.23],

v_n – собственные числа характеристического уравнения:

$$v \cdot J_0(v) + Bi_{\text{БОК}} \cdot J_0(v) = 0; \quad (3.22)$$

$$K^T = Bi_{\text{БОК}} / (\alpha_{\text{БОК}} \cdot R_{\alpha, \text{ВЕРХ}}) = R_{\text{ППП}} / R_{\alpha, \text{ВЕРХ}}, \quad (3.23)$$

$$A_n = \frac{2Bi_{\text{БОК}}}{v_n \cdot J_0(v_n) \cdot (Bi_{\text{БОК}}^2 + v_n^2)}, \quad (3.24)$$

$$S_n(\zeta) = (B_n(\zeta) + C_n(\zeta)) / Z_n(M), \quad (3.25)$$

$$\text{где } M = 2/k = h_{\text{ПТП}} / r_{\text{ПТП}} \quad (3.26)$$

$$B_n(\zeta) = \mathfrak{D}_1(\text{sh}(v_n \cdot M \cdot \zeta) + D_{n,2} \cdot \text{ch}(v_n \cdot M \cdot \zeta)), \quad (3.27)$$

$$C_n(\zeta) = \mathfrak{D}_2(\text{sh}(v_n \cdot M \cdot (1 - \zeta)) + D_{n,1} \cdot \text{ch}(v_n \cdot M \cdot (1 - \zeta))), \quad (3.28)$$

$$Z_n(M) = (D_{n,2} + D_{n,1}^{-1}) \cdot \text{sh}(v_n \cdot M) + (1 + D_{n,2}/D_{n,1}) \cdot \text{ch}(v_n \cdot M), \quad (3.29)$$

$$D_{n,1} = v_n \cdot \alpha_{\text{БОК}} \cdot R_{\alpha, \text{ВЕРХ}} / \text{Bi}_{\text{БОК}}, \quad D_{n,2} = v_n \cdot \alpha_{\text{БОК}} \cdot R_K / \text{Bi}_{\text{БОК}}. \quad (3.30)$$

Исходя из (3.21), производная от локальной температуры $\mathfrak{D}(\rho, \zeta)$ имеет вид:

$$\frac{\partial \mathfrak{D}(\rho, \zeta)}{\partial \zeta} = K^q \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot v_n \cdot J_0(v_n \rho) \cdot P_n(\zeta), \quad (3.31)$$

где $K^q = K^T \cdot M$, при этом K^T по формуле (3.23), A_n – по (3.24); M – по (3.26);

$$P_n(\zeta) = (G_n(\zeta) + H_n(\zeta)) / Z_n(M), \quad (3.32)$$

где $G_n(\zeta) = \mathfrak{D}_1(\text{ch}(v_n \cdot M \cdot \zeta) + D_{n,2} \cdot \text{sh}(v_n \cdot M \zeta)), \quad (3.33)$

$$H_n(\zeta) = \mathfrak{D}_2(\text{ch}(v_n \cdot M \cdot (1 - \zeta)) + D_{n,1} \cdot \text{sh}(v_n \cdot M \cdot (1 - \zeta))), \quad (3.34)$$

$Z_n(M)$ – по формуле (3.29), $D_{n,1}$ и $D_{n,2}$ – по формуле (3.30).

Так как плотность локального теплового потока в направлении нормали к поверхности по определению равна $q_{\text{ЛОК}}(r, z) = -\chi \cdot \partial T(z, r) / \partial n$, функция плотности локального теплового потока в направлении, нормальном торцевой поверхности ПТП, имеет вид:

$$q_{\text{ЛОК}}^*(\rho, \zeta) = -\frac{\chi_{\text{ПТП}} \cdot T_{\text{ОС}}}{h_{\text{ПТП}}} \cdot \frac{\partial \mathfrak{D}(\rho, \zeta)}{\partial \zeta} = \frac{T_{\text{ОС}}}{R_{\text{ПТП}}} \cdot \frac{\partial \mathfrak{D}(\rho, \zeta)}{\partial \zeta}. \quad (3.35)$$

Действительное значение плотности теплового потока по нормали к торцевой поверхности ПТП в отсутствие теплообмена на его боковой поверхности равно:

$$q_0^* = -\frac{T_1 - T_2}{R_{\text{ПТП}} + R_{\alpha, \text{ВЕРХ}} + R_K} = -\frac{T_{\text{ОС}}}{R_{\text{ПТП}}} \cdot \frac{\mathfrak{D}_1 - \mathfrak{D}_2}{1 + R_{\alpha, \text{ВЕРХ}} / R_{\text{ПТП}} + R_K / R_{\text{ПТП}}}, \quad (3.36)$$

которое в безразмерной форме принимает вид:

$$q_0 = (\mathfrak{D}_1 - \mathfrak{D}_2) / (1 + R_{\alpha, \text{ВЕРХ}} / R_{\text{ПТП}} + R_K / R_{\text{ПТП}}). \quad (3.37)$$

Поскольку сигнал ПТП, выполненного в виде вспомога-
 тельной стенки с конкретными размерами и ТФХ, пропорци-
 онален среднеинтегральному тепловому потоку по поверхно-
 сти чувствительного элемента ПТП, целесообразно рассмат-
 ривать расчетные формулы для среднеинтегральных значе-
 ний по торцевой поверхности плотности теплового потока и
 температуры, которые в безразмерной форме имеют вид:

$$q_{CP}(\rho, \zeta) = \frac{1}{\pi \rho^2} \cdot \int_0^{\rho} \frac{\partial \vartheta(\rho, \zeta)}{\partial \zeta} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot d\rho = 2 \cdot K^q \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \frac{J_1(v_n \cdot \rho)}{\rho} \cdot P_n(v_n \cdot \zeta), \quad (3.38)$$

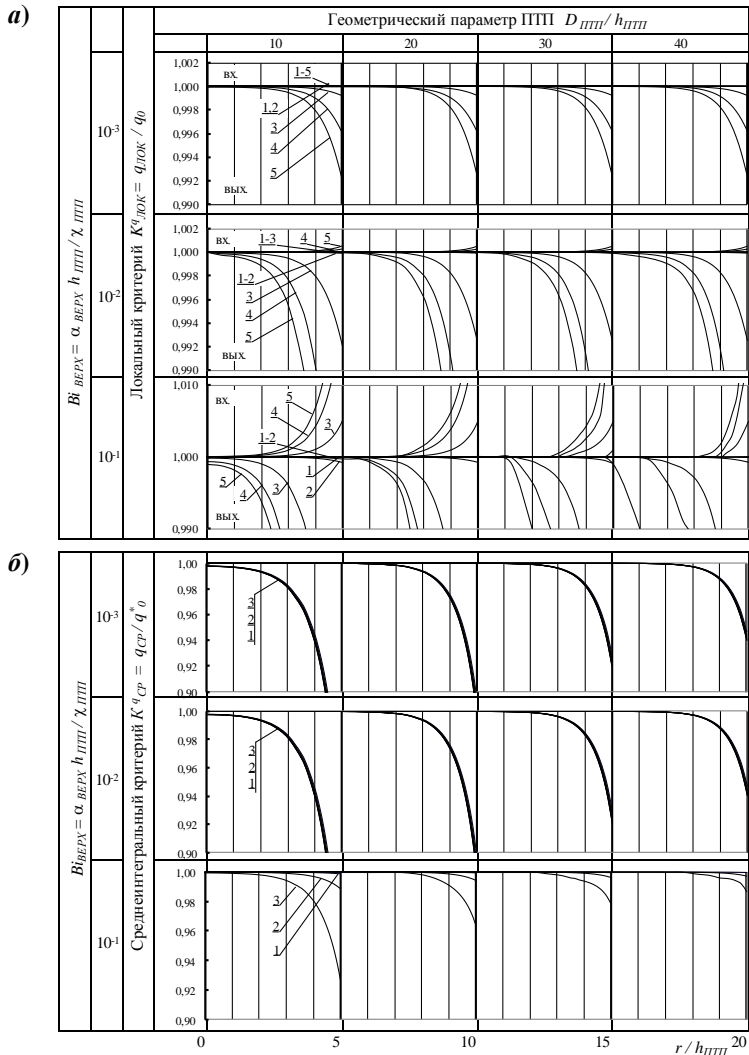
$$\vartheta_{CP}(\rho, \zeta) = \frac{1}{\pi \rho^2} \cdot \int_0^{\rho} \vartheta(\rho, \zeta) \cdot 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot d\rho = 2 \cdot K^T \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \frac{J_1(v_n \cdot \rho)}{v_n \rho} \cdot S_n(\zeta). \quad (3.39)$$

Таким образом, поле температуры в безмерной форме
 можно определить по формуле (3.21), а плотности локального
 теплового потока – по (3.35) и среднеинтегрального – по
 (3.38). С учетом того, что для металлической пластины мож-
 но считать $R_K = 0$, коэффициенты искажения первоначального
 теплового поля через приведенную плотность локального и
 среднеинтегрального теплового потока равны:

$$K_{ЛОК}^q = \frac{q_{ЛОК}^*}{q_0^*} = \frac{\partial \vartheta(\rho, \zeta) / \partial \zeta}{\vartheta_1 - \vartheta_2} \cdot (1 + 1 / Bi_{ВЕРХ}), \quad (3.40)$$

$$K_{СР}^q = \frac{q_{СР}}{q_0} = \frac{q_{СР}}{\vartheta_1 - \vartheta_2} \cdot (1 + 1 / Bi_{ВЕРХ}). \quad (3.41)$$

На рисунке 3.11 в графическом виде представлены ре-
 зультаты вычислений по формулам (3.40) и (3.41) теплопо-
 точных коэффициентов искажения локального (а) и средне-
 интегрального (б) теплового потока на входе и выходе ПТП.
 Эти результаты показаны семействами графиков в зависимо-
 сти от текущего относительного радиуса $r / h_{ПТП}$ при вари-
 ациях числа Био $Bi_{ВЕРХ} = 10^{-1}; 10^{-2}; 10^{-3}$, геометрического пара-
 метра ПТП $k = D_{ПТП} / h_{ПТП} = 10; 20; 30; 40$ и отношения коэф-
 фициентов теплообмена $\alpha_{БОК} / \alpha_{ВЕРХ} = 10^{-4}; 10^{-2}; 1; 5; 10$ [3.19,
 3.20].



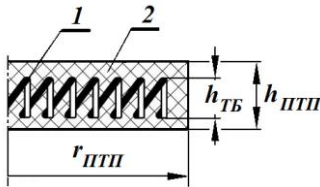
1 – $\alpha_{БОК} / \alpha_{ВЕРХ} = 0,001$; 2 – 0,01; 3 – 1,0; 4 – 5,0; 5 – 10,0

Рис. 3.11. Графики искажений плотности локального (**а**) и среднеинтегрального (**б**) теплового потока в зависимости от относительного текущего радиуса $r / h_{ПТП}$ при вариациях геометрического параметра ПТП, числа Био и отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{БОК} / \alpha_{ВЕРХ}$ на входе (вх.) и выходе (вых.) ПТП

Как видим, значения входящего и соответствующего выходящего из ПТП теплового потока не одинаковы. Краевой эффект распространяется от боковой поверхности в глубину ПТП на расстояние до пяти высот ПТП. Результаты получены для ПТП, представляющего собой изотропное тело, у которого коэффициент теплопроводности в радиальном и поперечном направлении равны, то есть $\chi_{РАД} = \chi_{ПР}$. В анизотропном ПТП глубина проникновения искажения тем больше, чем $\chi_{РАД} < \chi_{ПР}$.

Представленные графики подтверждают, что глубина проникновения искажений теплового потока из-за теплообмена на боковой поверхности ПТП не превышает пяти высот ПТП, однако для среднеинтегральных значений они быстро уменьшаются с увеличением радиуса ПТП.

Как правило, ПТП вида вспомогательной стенки представляет собой плоскую монолитную конструкцию из электроизоляционного компаунда с термобатареей, расположенной внутри, по обе стороны которой имеются защитные электроизоляционные слои, как показано на рисунке 3.12 [3.20].



1 – термобатарея;
2 – электроизоляционный компаунд

Рис. 3.12. Схема ПТП вида вспомогательной стенки

Для определения распределения среднеинтегрального теплового потока в зависимости от глубины заделки термобатареи в ПТП рассмотрена плотность

среднеинтегрального теплового потока на выходе из термобатареи через разность значений среднеинтегральной температуры:

$$q_{CP} = \chi_{ПТП} \cdot \frac{T_{CP}(r, h_1) - T_{CP}(r, h_2)}{h_{ТБ}} = \chi_{ПТП} \cdot \frac{T_{CP}(r, h_1) - T_{CP}(r, h_2)}{h_{ПТП}(h_{ТБ}/h_{ПТП})}, \quad (3.42)$$

где h_1 и h_2 – безразмерные параметры термобатарей в ПТП, определяемые следующими соотношениями:

$$h_1 = 0,5 \cdot (1 - h_{TB} / h_{ПТП}), \quad h_2 = 1 - 0,5 \cdot (1 - h_{TB} / h_{ПТП}). \quad (3.43)$$

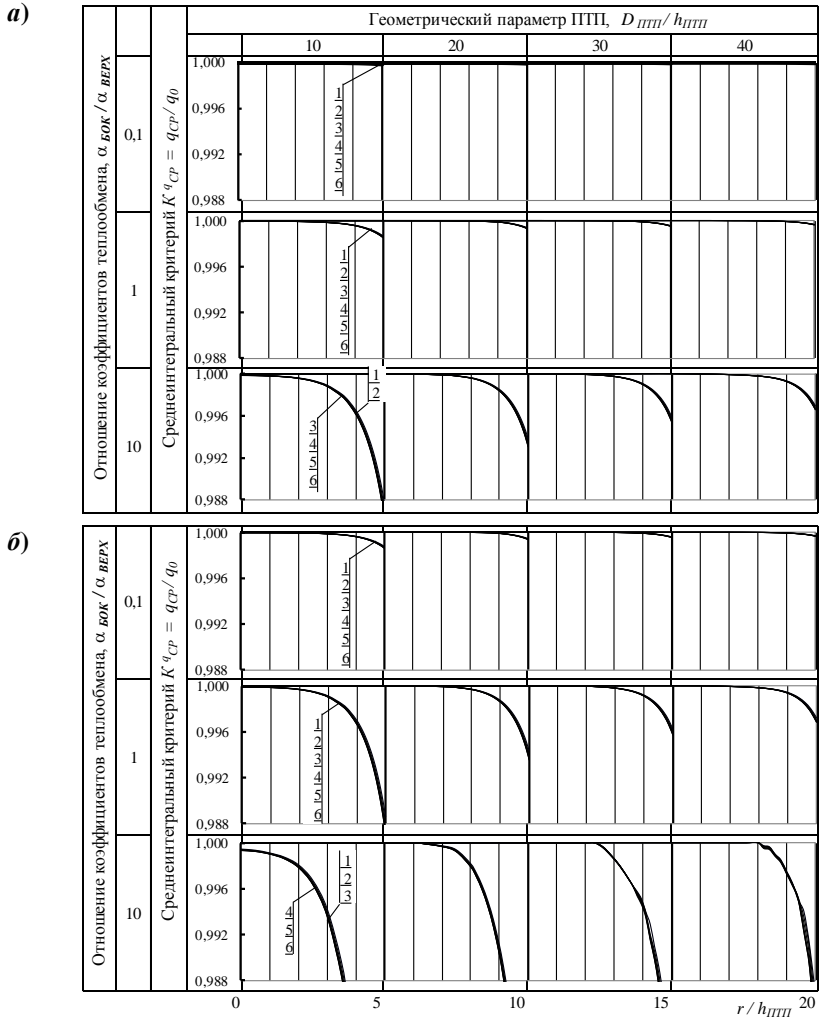
Коэффициент распространения искажения среднеинтегрального теплового потока с учетом формул (3.42) и (3.43) равен:

$$K_{CP}^q = \frac{q_{CP}}{q_0} = \frac{\vartheta_{CP}(r, h_1) - \vartheta_{CP}(r, h_2)}{h_{TB} / h_{ПТП}}, \quad (3.44)$$

где среднеинтегральная температура ϑ_{CP} определяется по формуле (3.39).

На рисунке 3.13 графически представлены результаты вычислений по формуле (3.44) коэффициента K_{CP}^q в зависимости от относительного текущего радиуса $r / h_{ПТП}$ при вариации приведенной высоты термобатарей $h_{TB} / h_{ПТП}$. Результаты показаны семействами графиков для двух фиксированных значений числа Био: $Bi_{ВЕРХ} = 0,01$ (рис. 3.13, а) и $Bi_{ВЕРХ} = 0,1$ (рис. 3.13, б) и при вариациях отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{БОК} / \alpha_{ВЕРХ} = 0,1: 1; 10$, геометрического параметра ПТП $D_{ПТП} / h_{ПТП} = 10; 20; 30; 40$ и относительной высоты термобатарей $h_{TB} / h_{ПТП} = 1; 0,6; 0,2$.

Как видим, искажение теплового потока внутри ПТП с уменьшением числа $Bi_{ВЕРХ}$ уменьшается, и им практически можно пренебречь. Таким образом, изменение толщины внешних защитных слоев по обе стороны термобатарей, вмонтированной в ПТП, не приводит к краевому эффекту, то есть не влияет на точность измерения плотности теплового потока.



$a - Bi_{ВЕРХ} = 0,01; \quad б - Bi_{ВЕРХ} = 0,1$

$1 - h_{ТБ} / h_{ПТП} = 1,0; \quad 2 - 0,8; \quad 3 - 0,6; \quad 4 - 0,4; \quad 5 - 0,2; \quad 6 - 0,1$

Рис.3.13. Графики искажений плотности среднеинтегрального потока на выходе из ПТП в зависимости от относительного радиуса $r / h_{ПТП}$ при вариации геометрического параметра ПТП $D_{ПТП} / h_{ПТП}$, приведенной высоты термобатареи $h_{ТБ} / h_{ПТП}$ и отношения коэффициентов теплообмена

$\alpha_{БОК} / \alpha_{ВЕРХ}$ для чисел $Bi_{ВЕРХ}$

3.3 ПТП в изотермической металлической пластине заподлицо с ее поверхностью

Не менее часто приходится монтировать ПТП в металлическую пластину заподлицо с поверхностью, например, в приборостроении или при контроле промышленного оборудования. При этом очень важно грамотно выполнить охранную зону вокруг ЧЭ ПТП. Ее размеры определяются из решения задачи для ПТП, расположенного на изотермической металлической пластине заподлицо с ее поверхностью, около которой происходит теплообмен с граничным условием 3-го рода, как это показано на рисунке 3.14. На противоположной поверхности пластины имеет место высокоинтенсивный теплообмен, обеспечивающий на ней граничное условие 1-го рода [3.19, 3.20].

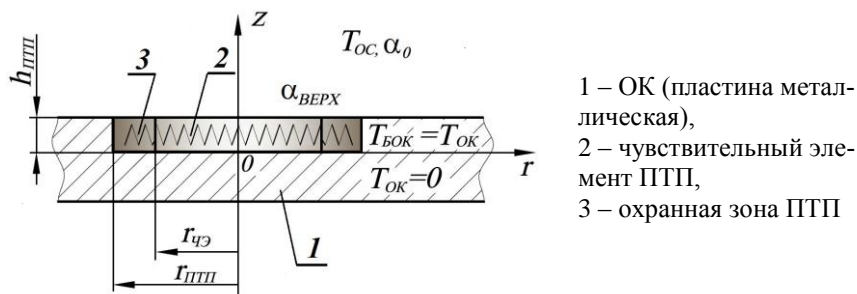


Рис. 3.14. Схема физической модели системы «Изотермическая металлическая пластина – ПТП заподлицо с ее поверхностью – ОС»

Как и в предыдущей задаче (см. 3.2), методическая погрешность измерения плотности теплового потока δ^q зависит от отношения значений теплового сопротивления ПТП и конвективному теплообмену $R_{ПТП}/R_{\alpha,ВЕРХ}$ и может быть определена по формуле (3.16). В данной задаче на боковой поверхности ПТП в связи с высокой теплопроводностью пластины температура $T_{БОК} = T_{ОК}$, а тепловое сопротивление $R_{БОК} = 0$. В этом случае теплопередача в ПТП, как и в 3.2, описывается

уравнением (3.19) с граничными условиями (3.20), решение которого имеет вид (3.21). Однако, вместо характеристического уравнения (3.22) имеет место уравнение $J_0(v) = 0$, а вместо коэффициента A_n , определенного формулой (3.24), будет коэффициент A_n , равный:

$$A_n = 2 / (v_n^2 \cdot J_1(v_n)). \quad (3.45)$$

По аналогии с предыдущей задачей краевой эффект в ПТП исследован путем вычисления теплоточного коэффициента $K_{cp}^q = q_{cp} / q_0$. Результаты вычислений по формуле, аналогичной (3.41), представлены на рисунке 3.15 семействами графиков для коэффициента K_{cp}^q как функции относительного текущего радиуса $r/h_{ПТП}$ на входе и выходе ПТП при вариациях геометрического параметра ПТП $D_{ПТП} / h_{ПТП}$ (10; 20; 30; 40) и числа Био $Bi_{ВЕРХ}$.

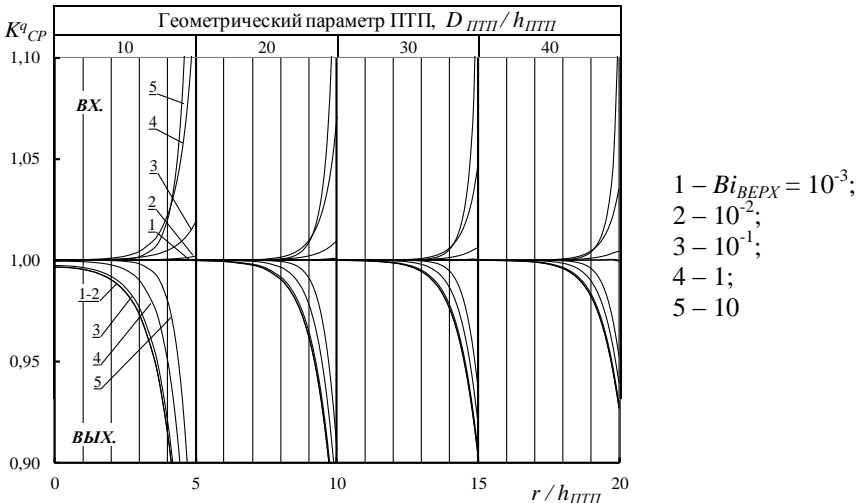


Рис. 3.15. Графики искажений плотности среднеинтегрального теплового потока на входе и выходе ПТП в зависимости от текущего относительного радиуса $r/h_{ПТП}$ при вариации геометрического параметра ПТП

$D_{ПТП} / h_{ПТП}$ и числа Био $Bi_{ВЕРХ}$

Как видим, искажения теплового потока достаточно большие, что подтверждает необходимость выполнения ПТП с охранной зоной.

На рисунке 3.16 показаны искажения среднеинтегрального потока на выходе ПТП в зависимости от текущего относительного радиуса, у которого $h_{ТБ}/h_{ПТП} = 1$, при вариации числа $Bi_{ВЕРХ}$ и геометрического параметра $D_{ПТП}/h_{ПТП}$.

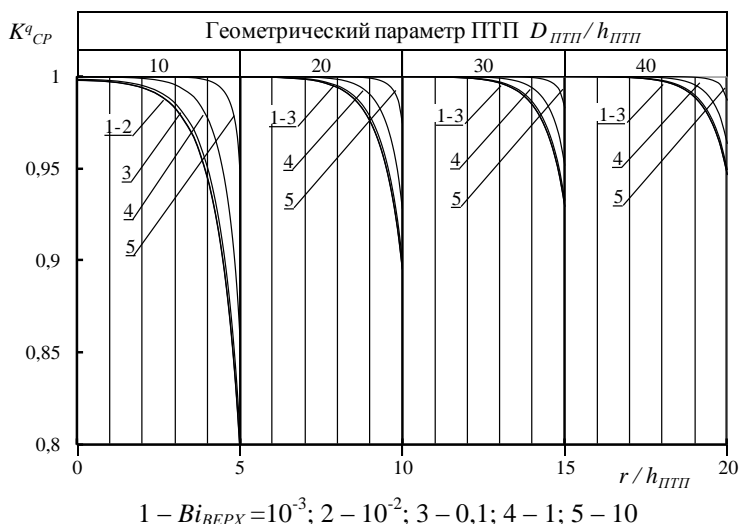


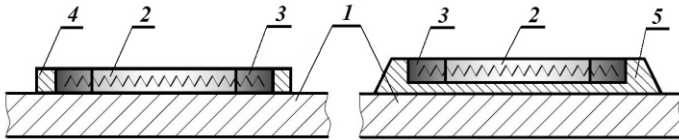
Рис. 3.16. Графики искажения плотности среднеинтегрального теплового потока в зависимости от относительного текущего радиуса на выходе ПТП у которого $h_{ТБ}/h_{ПТП} = 1$ при вариациях геометрического параметра

$$D_{ПТП} / h_{ПТП} \text{ и числа Био } Bi_{ВЕРХ}$$

Такие же расчеты, выполненные при вариации относительной высоты термобатарей $h_{ТБ}/h_{ПТП} = 0,8; 0,6; 0,4; 0,2$ и $0,1$, показали, что этот фактор не приводит к каким-либо изменениям характера распределения q_{CP} вдоль радиальной координаты по сравнению с данными, полученными для $h_{ТБ}/h_{ПТП} = 1$. Результаты исследования, описанные в 3.3, позволили сделать вывод о том, что охранная зона ПТП должна

быть выполнена шириной, составляющей (3–5) высоты ПТП; тепловое сопротивление ПТП не более 0,1 сопротивления теплообмену с ОС; геометрический параметр ПТП – более 10.

Все результаты, полученные в параграфах 3.2 и 3.3 могут быть распространены на ПТП, устанавливаемые поверх металлического ОК, как показано на рисунке 3.17.



1 – ОК, 2 – чувствительный элемент ПТП, 3 – охранная зона, 4 – металлическое кольцо, 5 – профилированная металлическая подложка

Рис. 3.17. Варианты установки ПТП на поверхности металлической пластины

Эти варианты монтажа ПТП обусловлены невозможностью в некоторых случаях размещения ПТП заподлицо с поверхностью, например, в стенках различного промышленного оборудования. При этом наличие профилированной металлической подложки позволяет уменьшить влияние гидродинамического фактора на направление теплового потока, а защитного металлического кольца – усилить механическую прочность.

3.4 ПТП в полуограниченном массиве из высокотеплопроводного материала заподлицо с его поверхностью

При расположении ПТП в полуограниченном массиве из высокотеплопроводного материала заподлицо с его поверхностью [3.19, 3.20, 3.24], как показано на рисунке 3.18, теплообмен на поверхности ($z = 0$) обусловлен тепловым излучением, чему соответствует граничное условие 2-го рода: $q_0 = const$, а в плоскости контакта ПТП с ОК ($z = h_{ПТП}$) – граничное условие 1-го рода: $T_2 = const$.

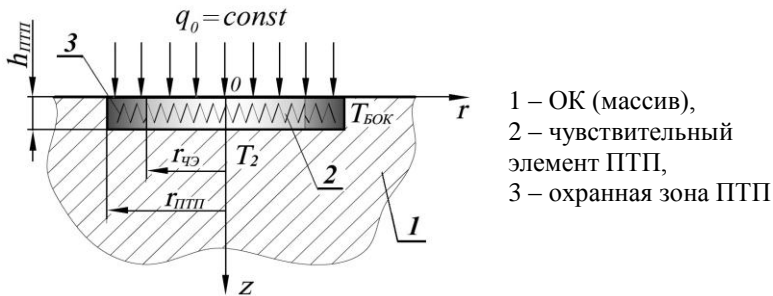


Рис. 3.18. Схема физической модели системы «Полуограниченный массив из высокотеплопроводного материала – ПТП заподлицо с его поверхностью – ОС»

Кроме того, в силу высокой теплопроводности материала ОК его температура постоянна по всему массиву кроме области, занятой ПТП, в том числе $T_{БОК} = T_2$. Из-за существенного различия коэффициента теплопроводности ОК и ПТП в последнем формируется двухмерное температурное поле, описываемое известным уравнением теплопроводности (3.17) или (3.19) при следующих граничных условиях:

$$\begin{cases} q_0(r, z) = const & \text{при } 0 \leq r \leq \infty \text{ и } z = 0 \\ T(r, z) = T_2 = const & \text{при } 0 \leq r \leq r_{ПТП} \text{ и } z = h_{ПТП} \\ T(r, z) = T_{БОК} = const & \text{при } r = r_{ПТП} \text{ и } 0 < z \leq h_{ПТП} \\ T_2 = T_{БОК} = 0 & \text{при } r = r_{ПТП} \text{ и } 0 < z \leq h_{ПТП} \end{cases} \quad (3.46)$$

решение которого заимствовано из работы [3.24] и имеет вид:

$$T(\rho, \zeta) = 2 \cdot \frac{q_0 \cdot r_{ПТП}}{\chi_{ПТП}} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(v_m \cdot \rho) \cdot sh(M \cdot v_m \cdot (1 - \zeta/h_{ПТП}))}{v_m^2 \cdot J_1(v_m) \cdot ch(M \cdot v_m)}, \quad (3.47)$$

где M – согласно формуле (3.26), v_m – собственные числа характеристического уравнения $J_0(v) = 0$, J_0 и J_1 – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков [3.23].

Воспользовавшись выражением для разности температуры ΔT_0 , возникающей в ПТП и равной $\Delta T_0 = q_0 \cdot h_{ПТП} / \chi_{ПТП}$, исходя из (3.47), получено следующее

выражение для функции приведенной локальной температуры:

$$\vartheta(r, z) = \frac{T(r, z)}{\Delta T_0} = \frac{2r_{\text{ППП}}}{h_{\text{ППП}}} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(v_m \cdot r/r_{\text{ППП}}) \cdot \text{sh}(v_m \cdot (1-z/h_{\text{ППП}}) \cdot h_{\text{ППП}}/r_{\text{ППП}})}{v_m^2 \cdot J_1(v_m) \cdot \text{ch}(v_m \cdot h_{\text{ППП}}/r_{\text{ППП}})}. \quad (3.48)$$

Результаты вычисления значений приведенных локальной температуры и локального теплового потока, то есть локальных температурного и теплоточного коэффициентов искажения полей $K_{\text{ЛОК}}^T$ и $K_{\text{ЛОК}}^q$ в зависимости от относительного текущего радиуса $r/h_{\text{ППП}}$ представлены на рисунке 3.19.

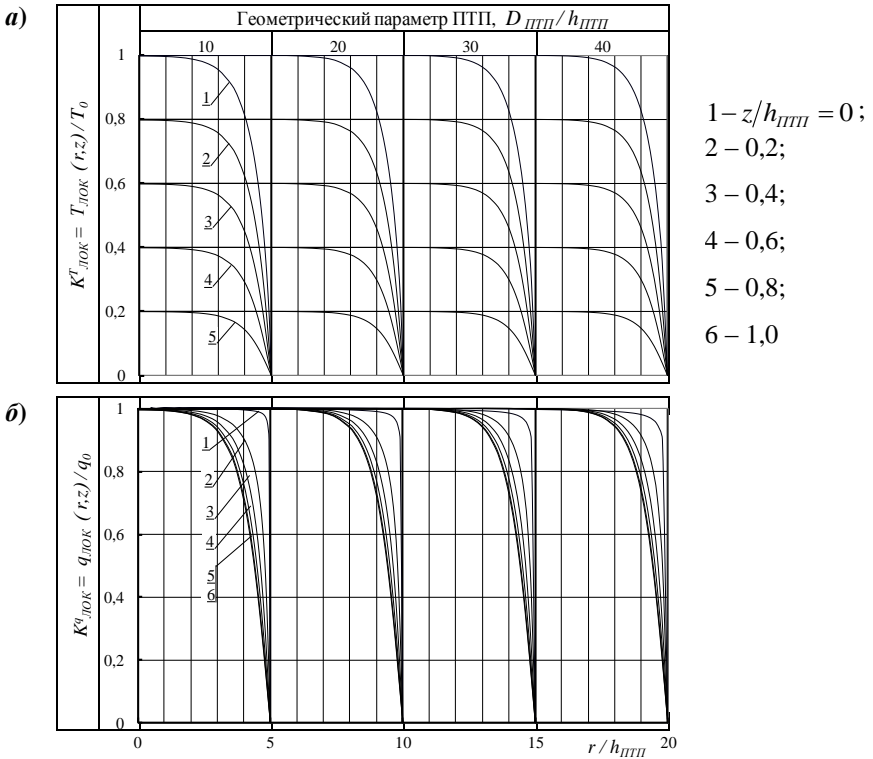


Рис. 3.19. Графики искажений по высоте ПТП приведенных локальных температуры (**а**) и плотности теплового потока (**б**) в зависимости от относительного текущего радиуса $r/h_{\text{ППП}}$ при вариации геометрического параметра ПТП и его относительной высоты $z/h_{\text{ППП}}$

Графики получены при вариации геометрического параметра ПТП для нескольких значений относительной высоты ПТП: (графики 1,...,6). Как видно, и в этом случае искажения температурного поля также проникают на глубину, равную (3–4) высотам ПТП, а чтобы их избежать геометрический параметр ПТП должен быть более 10. Степень искажения плотности локального теплового потока была оценена по теплоточному коэффициенту $K_{ЛОК}^q$, который, исходя из (3.48) равен:

$$K_{ЛОК}^q = 2 \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(v_m \cdot r / r_{ПТП})}{v_m^2 \cdot J_1(v_m)} \cdot \frac{ch(v_m \cdot (1 - z / h_{ПТП}) \cdot h_{ПТП} / r_{ПТП})}{ch(v_m \cdot h_{ПТП} / r_{ПТП})}. \quad (3.49)$$

Для определения распределения плотности среднеинтегрального теплового потока в зависимости от глубины заделки термобатареи в ПТП рассмотрена плотность среднеинтегрального теплового потока на выходе из термобатареи, как и в 3.2, через разность значений среднеинтегральной температуры для сечений $z = h_1$ и $z = h_2$, где h_1 и h_2 взяты согласно (3.43). Коэффициент K_{CP}^q распространения искажения среднеинтегрального теплового потока с учетом (3.42) имеет вид (3.44), где $\mathfrak{G}_{CP}(\rho, \zeta)$ взята согласно (3.39).

Для оценки зависимости K_{CP}^q от высоты термобатареи выполнены вычисления по формуле (3.44) значений коэффициента K_{CP}^q как функции от относительного радиуса $r / h_{ПТП}$ при вариации геометрического параметра $D_{ПТП} / h_{ПТП}$ для трех значений относительной высоты термобатареи $z_{ТБ} / h_{ПТП}$ (0,1; 0,5 и 1,0). Полученные результаты расчета подтвердили, что глубина заделки термобатареи в ПТП практически не влияет на распределение среднеинтегрального теплового потока вдоль радиуса ПТП, в то время как характер влияния геометрического параметра остается таким же.

3.5 ПТП внутри неограниченного массива

Для случая расположения ПТП внутри ОК, представляющего собой неограниченный сплошной массив, как показано на рисунке 3.20 [3.19, 3.20], первоначальное температурное поле массива одномерное и определяется уравнением:

$$T_0(z) = b \cdot (0,5h + z) \quad \text{при } z \in (-\infty, \infty), \quad (3.50)$$

где $b = \partial T_0(z) / \partial z$ – первоначальный градиент температуры ОК.

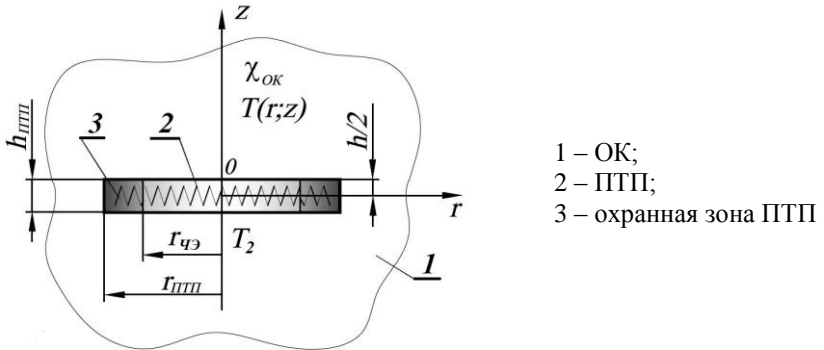


Рис. 3.20. Схема модели системы «Неограниченный сплошной массив – ПТП внутри массива»

Из-за неодинаковых значений коэффициентов теплопроводности ОК и ПТП в зоне размещения ПТП формируется новое, искаженное его присутствием, температурное поле $T(r, z)$, симметричное относительно плоскости, разделяющей ПТП по высоте на две равные части (см. рис. 3.20).

Для температурного возмущения $\Theta(r, z)$ по (3.11) из уравнения Лапласа [2.1] аналитическое решение при соответствующих данной схеме граничных условиях согласно [3.10] имеет следующий вид:

$$\Theta(r, z) = T(r, z) - T_0(z) = -B \cdot \int_0^{\infty} \frac{J_1(x) \cdot J_0(x \cdot \rho) \cdot \exp(-x \cdot \zeta)}{(x+k)} dx, \quad (3.51)$$

где $B = \frac{\delta^z \cdot r_{ПТП} \cdot b}{1 + \delta^z \cdot k \cdot I(k, \rho)}$; $\delta^z = \chi_{ПТП} / \chi_{ОК} - 1$; $I(k, \rho) = \int_0^\infty \frac{J_1(x) \cdot J_0(x \cdot \rho)}{x + k} dx$.

k – геометрический параметр ПТП.

Для определения размеров зоны распространения искажения теплового потока в радиальном и продольном направлениях по нормали к плоской поверхности ПТП, а также степени влияния на эту зону различных факторов рассмотрены теплоточные радиальный и продольный коэффициенты искажения первоначального теплового потока. При этом за радиальный коэффициент $K_{РАД}^q$, в отличие от принятого в [3.10], взято отношение значений плотности измеренного и действительного теплового потока $q_{ИЗМ} / q_0$ на границе контакта ПТП и ОК ($z = 0$), а за продольный $K_{ПР}^q$ – вдоль оси z ($r = 0$).

С учетом формулы (3.50) действительная плотность теплового потока равна:

$$q_0(z) = -\chi_{ОК} \cdot \frac{dT_0(z)}{dz} = -\chi_{ОК} \cdot b, \quad (3.52)$$

а измеренная плотность потока с учетом (3.10), исходя из (3.51), равна:

$$q_{ИЗМ}(r, z) = -\chi_{ОК} \cdot \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} = -\chi_{ОК} \left(\frac{\partial \Theta(r, z)}{\partial z} + \frac{dT_0(z)}{dz} \right). \quad (3.53)$$

Согласно (3.12) теплоточный K^q равен:

$$K^q = \frac{q_{ИЗМ}(r, z)}{q_0(z)} = \frac{1}{b} \cdot \frac{\partial \Theta(r, z)}{\partial z} + 1. \quad (3.54)$$

Так как функция производной по z от $\Theta(r, z)$ равна:

$$\frac{\partial \Theta(r, z)}{\partial z} = \frac{B}{r_{ПТП}} \cdot \int_0^\infty \frac{x \cdot J_1(x) \cdot J_0(x \cdot \rho) \cdot \exp(-x \cdot \zeta)}{x + k} dx, \quad (3.55)$$

градиенты радиального и продольного теплоточных искажений имеют вид:

$$\left. \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{B}{r_{ПТП}} \cdot I_r(k, \rho), \quad (3.56)$$

$$\left. \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right|_{r=0} = \frac{B}{r_{ПТП}} \cdot I_z(k, \zeta), \quad (3.57)$$

где $I_r(k, \rho) = \int_0^{\infty} \frac{x \cdot J_1(x) \cdot J_0(x \cdot \rho)}{x + k} dx$; $I_z(k, \zeta) = \int_0^{\infty} \frac{x \cdot J_1(x) \cdot \exp(-x \cdot \zeta)}{x + k} dx$.

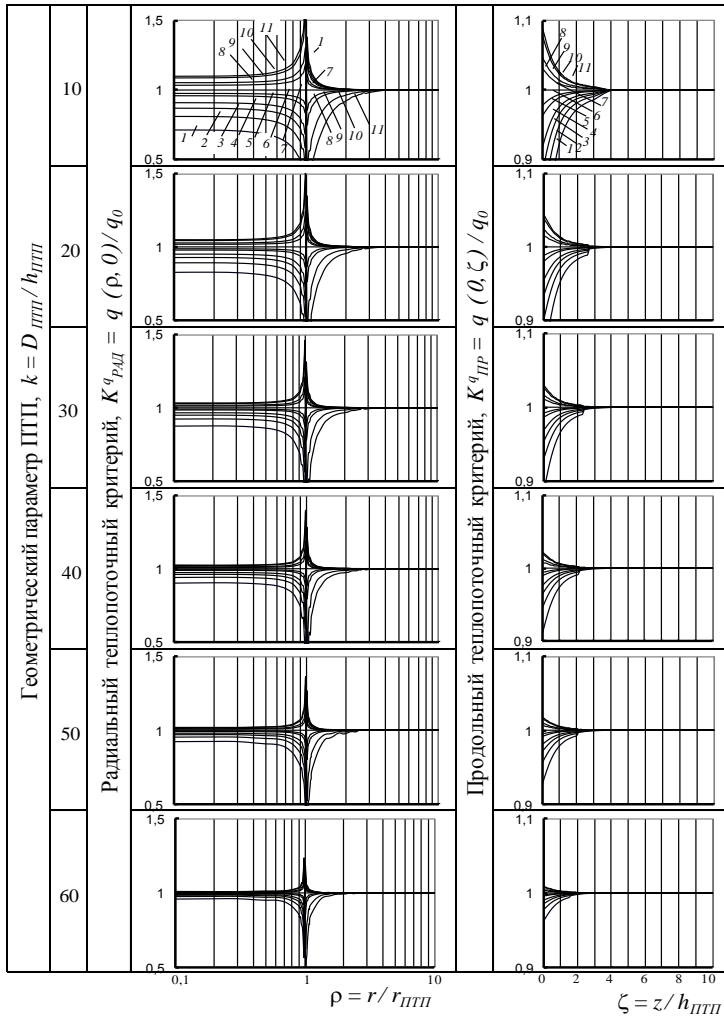
Таким образом, теплоточные радиальный и продольный коэффициенты, исходя из (3.54) с учетом (3.56) и (3.57), соответственно, а также введенных к решению (3.51) обозначений, имеют вид:

$$K_{РАД}^q = \left. \frac{q_{ИЗМ}(r, z)}{q_0(z)} \right|_{z=0} = 1 + \frac{\delta^\lambda \cdot I_r(k, \rho)}{1 + \delta^\lambda \cdot k \cdot I(k, \rho)}, \quad (3.58)$$

$$K_{ПР}^q = \left. \frac{q_{ИЗМ}(r, z)}{q_0(z)} \right|_{r=0} = 1 + \frac{\delta^\lambda \cdot I_z(k, \zeta)}{1 + \delta^\lambda \cdot k \cdot I(k, 0)}. \quad (3.59)$$

Результаты вычислений радиального по формуле (3.58) и продольного по формуле (3.59) коэффициентов искажения в зависимости от безразмерных координат ρ и ζ при вариациях геометрического параметра ПТП и приведенной теплопроводности ПТП $\chi_{ПТП} / \chi_{ОК}$ представлены на рисунке 3.21. Эти данные дают возможность оценить влияние размеров ПТП и его ЧЭ, а также приведенной теплопроводности $\chi_{ПТП} / \chi_{ОК}$ на методическую погрешность δ^q измерения по (3.13) с применением ПТП, размещенного внутри сплошного неограниченного массива.

ОК можно считать неограниченным массивом при расположении ПТП внутри, если расстояние от обеих поверхностей ОК до соответствующих поверхностей ПТП более глубины проникновения искажений теплового потока, вносимых ПТП. Согласно графикам рис. 3.21 эта глубина может составить от одного до двух диаметров ПТП в зависимости от геометрического параметра.



1 – $\chi_{ППП}/\chi_{ок} = 0,2$; 2 – 0,3; 3 – 0,4; 4 – 0,5; 5 – 0,7; 6 – 0,8; 7 – 1,0; 8 – 1,5; 9 – 2,0; 10 – 5,0; 11 – 10

Рис. 3.21. Графики искажения плотности теплового потока, вносимого ПТП, размещенным внутри неограниченного сплошного массива, в радиальном и осевом направлениях при вариации геометрического параметра

$D_{ППП}/h_{ППП}$ и приведенной теплопроводности ПТП $\chi_{ППП}/\chi_{ок}$

К таким ОК относятся дисперсные засыпки, грунты, большие слои теплоизоляционных покрытий и пр. На всех графиках видно, что во всех случаях, соответствующих расстояниям, равным (4–5) радиусам ПТП, искажения теплового потока не наблюдаются даже в случае, когда ОК – пластина ограниченных размеров, но превышающих радиус ПТП в пять раз и более. Это позволяет считать формулы, полученные при решении задачи для неограниченного массива, справедливыми и для массивов с конечными размерами, соответственно, больше радиуса ПТП в пять и более раз. Кроме того, для обеспечения наименьшего искажения теплового потока необходимо применять ПТП, коэффициент теплопроводности которого отличается от коэффициента теплопроводности объекта как в большую, так и в меньшую сторону, но не более, чем в два раза.

Для анализа методической погрешности в радиальном направлении следует воспользоваться формулой (3.13), подставив в нее в качестве коэффициента K^q выражение (3.58):

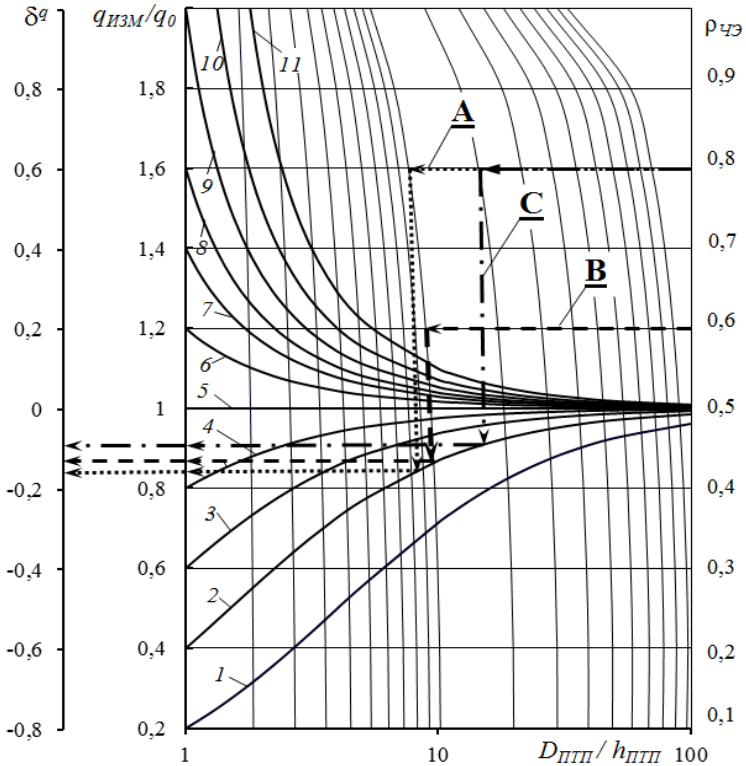
$$\delta^q(\rho_{чэ}, \chi, k) = \delta^\chi \cdot \frac{\varphi(k, \rho_{чэ})}{1 + \delta^\chi (1 - \varphi(k, \rho_{чэ}))}, \quad (3.60)$$

$$\text{где } \varphi(k, \rho_{чэ}) = \int_0^\infty \frac{J_1(x) \cdot J_1(x \cdot \rho_{чэ})}{x + k} dx \bigg/ \int_0^\infty \frac{J_1(x) \cdot J_1(x \cdot \rho_{чэ})}{x} dx, \quad (3.61)$$

$\rho_{чэ} = r_{чэ} / r_{ПТП}$ – безразмерный радиус ЧЭ ПТП;

$k = D_{ПТП} / h_{ПТП}$.

По результатам вычислений методической погрешности δ^q по формуле (3.60) и отношения $q_{ИЗМ} / q_0$ по формуле (3.58) в зависимости от безразмерного радиуса $\rho_{чэ}$ в диапазоне значений от 0,1 до 1,0 при вариациях отношения $\chi_{ПТП} / \chi_{ОК}$ от 0,2 до 10 и геометрического параметра $D_{ПТП} / h_{ПТП}$ построена номограмма, приведенная на рисунке 3.22 [3.19, 3.20].



1 – $\chi_{ПТП}/\chi_{ОК} = 0,2$; 2 – $0,4$; 3 – $0,6$; 4 – $0,8$; 5 – $1,0$; 6 – $1,2$; 7 – $1,4$; 8 – $1,6$; 9 – $2,0$; 10 – $3,0$; 11 – 10

Рис. 3.22. Номограмма для определения методической погрешности δ^q измерения теплового потока в зависимости от относительного текущего радиуса $\rho_{qЭ}$ и геометрического параметра $D_{ПТП} / h_{ПТП}$ при вариации отношения $\chi_{ПТП} / \chi_{ОК}$ (случай расположения ПТП внутри ОК – неограниченного массива)

Номограмма позволяет прогнозировать методическую погрешность измерения плотности теплового потока еще на этапе подбора ПТП для конкретных условий эксплуатации. В качестве примера на номограмме «ключом» показаны варианты прогноза значений относительной погрешности δ^q при

изготовлении ПТП, имеющего $\rho_{чЭ} = 0,8$ или $0,6$ при $k=10$ (линии А и Б рис. 3.22) и $\rho_{чЭ} = 0,8$ при $k=20$ (линия С) для отношения $\chi_{ПТП} / \chi_{ОК} = 0,4$, которым соответствуют значения $\delta^a = 0,17; 0,15$ и $0,08$ соответственно.

Полученные результаты можно применять для случая измерения теплового потока через тонкую металлическую конструкцию (пластинку) преобразователем, установленным на ней под слоем теплоизоляции, например, на металлической стенке теплоэнергетического оборудования под слоем мягкого теплоизоляционного покрытия толщиной более пяти радиусов ПТП, как показано на рисунке 3.23. В этом случае справедливы полученные в 3.5 формулы, графики и номограмма (см. рис.3.22), только в качестве геометрического параметра k следует брать половинные значения.

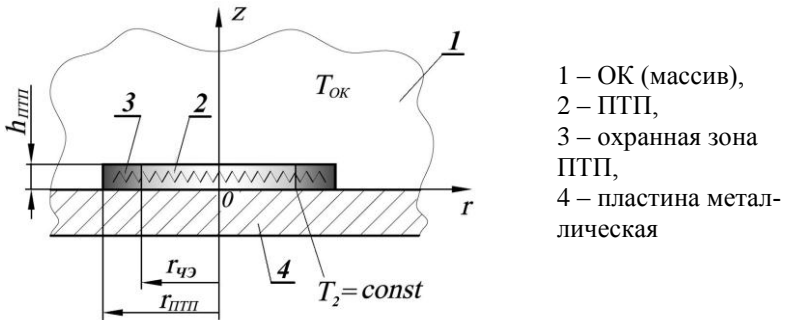


Рис.3.23. Схема модели системы «Металлическая пластинка – ПТП – полуограниченный низкотеплопроводный массив»

3.6 ПТП на поверхности полуограниченного массива

В случае расположения ПТП на поверхности ОК – полуограниченного сплошного массива, как показано на рисунке 3.24 [3.19, 3.20], теплообмен с ОС происходит при граничных условиях 3-го рода.

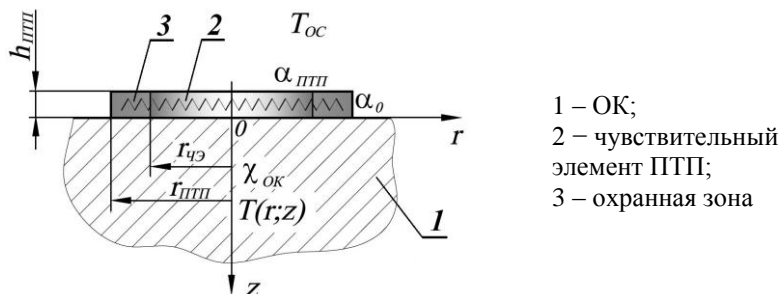


Рис. 3.24. Схема физической модели системы «Полуограниченный сплошной массив – ПТП – ОС»

В результате этого теплообмена в массиве ОК формируется одномерное температурное поле $T_0(z)$, а плотность входящего в ОК действительного теплового потока определяется выражением:

$$q_0 = \alpha_0 \cdot (T_{OC} - T_0(z=0)) = \alpha_0 \cdot \Delta T. \quad (3.62)$$

При установке на поверхности массива ПТП, для которого $\chi_{ПТП} / \chi_{ОК} \neq 1$, степени черноты поверхностей объекта и ПТП приняты одинаковыми. Для отыскания температурного возмущения $\Theta(r, z)$ по (3.11) в данной задаче использовано решение авторов работы [3.11], где введено следующее число Био для первоначального состояния:

$$Bi_{0,r} = \alpha_0 \cdot r_{ПТП} / \chi_{ОК}. \quad (3.63)$$

В отсутствие радиальных перетоков в ПТП решение для температурного возмущения $\Theta(r, z)$ в безразмерных координатах имеет вид:

$$\Theta(r, z) = T(r, z) - T_0 = -A \cdot \int_0^{\infty} \frac{J_1(x) \cdot J_0(x \cdot \rho) \cdot \exp(-x \cdot \zeta)}{(x + Bi_{0,r})} dx, \quad (3.64)$$

где
$$A = \frac{\Delta T \cdot Bi_{0,r} \cdot (R_{\alpha, ОК} / (R_{\alpha, ПТП} + R_{ПТП}) - 1)}{1 + Bi_{0,r} \cdot (R_{\alpha, ОК} / (R_{\alpha, ПТП} + R_{ПТП}) - 1) \cdot I_r(Bi_{0,r}, \rho)}, \quad (3.65)$$

где $R_{\alpha,OK} = 1/\alpha_0$; $R_{\alpha,ППП} = 1/\alpha_{ППП}$; $I_r(Bi_{0,r}, \rho) = \int_0^\infty \frac{J_1(x) \cdot J_0(x \cdot \rho)}{x + Bi_{0,r}} dx$.

Для уточнения места установки другого ПТП на поверхности массива за пределами возмущенной зоны из-за присутствия первого ПТП рассмотрен радиальный температурный коэффициент $K_{РАД}^T$, который с учетом (3.11) и (3.64) имеет вид:

$$K_{РАД}^T = \left. \frac{\Theta(r, z)}{\Delta T} \right|_{z=0} = \frac{Bi_{0,r} \cdot (R_{\alpha,OK} / (R_{\alpha,ППП} + R_{ППП}) - 1) \cdot I_r(Bi_{0,r}, \rho)}{1 + Bi_{0,r} \cdot (R_{\alpha,OK} / (R_{\alpha,ППП} + R_{ППП}) - 1) \cdot I_r(Bi_{0,r}, \rho)}. \quad (3.66)$$

С целью установления применимости формул, полученных для полуограниченного массива, к телам конечной толщины исследованы зоны распространения искажения теплового потока как в радиальном направлении по поверхности, так и по глубине массива. Для этого использованы теплопоточные коэффициенты: $K_{РАД}^q$ и $K_{ПП}^q$ (см. (3.58) и (3.59)).

При наличии ПТП на поверхности полуограниченного массива измеренная плотность теплового потока определяется уравнением, аналогичным (3.53):

$$\begin{aligned} q_{ИЗМ}(r, z) &= -\chi_{OK} \cdot \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} = -\chi_{OK} \cdot \left(\frac{\partial \Theta(r, z)}{\partial z} + \frac{dT_0(z)}{dz} \right) = \\ &= -\chi_{OK} \cdot \frac{\partial \Theta(r, z)}{\partial z} + q_0, \end{aligned} \quad (3.67)$$

откуда в связи с тем, что первоначальная плотность теплового потока определяется уравнением (3.62), получено следующее выражение для приведенной плотности измеренного теплового потока:

$$\frac{q_{ИЗМ}(r, z)}{q_0(z)} = -\frac{\chi_{OK} \cdot \partial \Theta(r, z) / \partial z}{\alpha_0 \cdot \Delta T} + 1. \quad (3.68)$$

Исходя из (3.64), производная функции $\Theta(r, z)$ по z имеет вид:

$$\frac{\partial \Theta(r, z)}{\partial z} = \frac{A}{r_{ПТП}} \cdot \int_0^{\infty} \frac{x \cdot J_1(x) \cdot J_0(x \cdot \rho) \cdot \exp(-x \cdot \zeta)}{(x + Bi_0)} dx, \quad (3.69)$$

откуда производная в радиальном направлении равна:

$$\left. \frac{\partial \Theta(r, z)}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{A}{r_{ПТП}} \cdot I_r(Bi_{0,r}, \rho) = \int_0^{\infty} \frac{x \cdot J_1(x) \cdot \exp(-x \cdot \zeta)}{x + Bi_{0,r}} dx, \quad (3.70)$$

а в осевом:

$$\left. \frac{\partial \Theta(r, z)}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{A}{r_{ПТП}} \cdot I_z(Bi_{0,r}, \zeta) = \int_0^{\infty} \frac{x \cdot J_1(x) \cdot J_0(-x \cdot \rho)}{(x + Bi_{0,r})} dx. \quad (3.71)$$

Зона распространения искажения теплового потока по поверхности ОК в радиальном направлении, характеризуется радиальным теплоточным коэффициентом $K_{РАД}^q$, который с учетом (3.70) имеет вид:

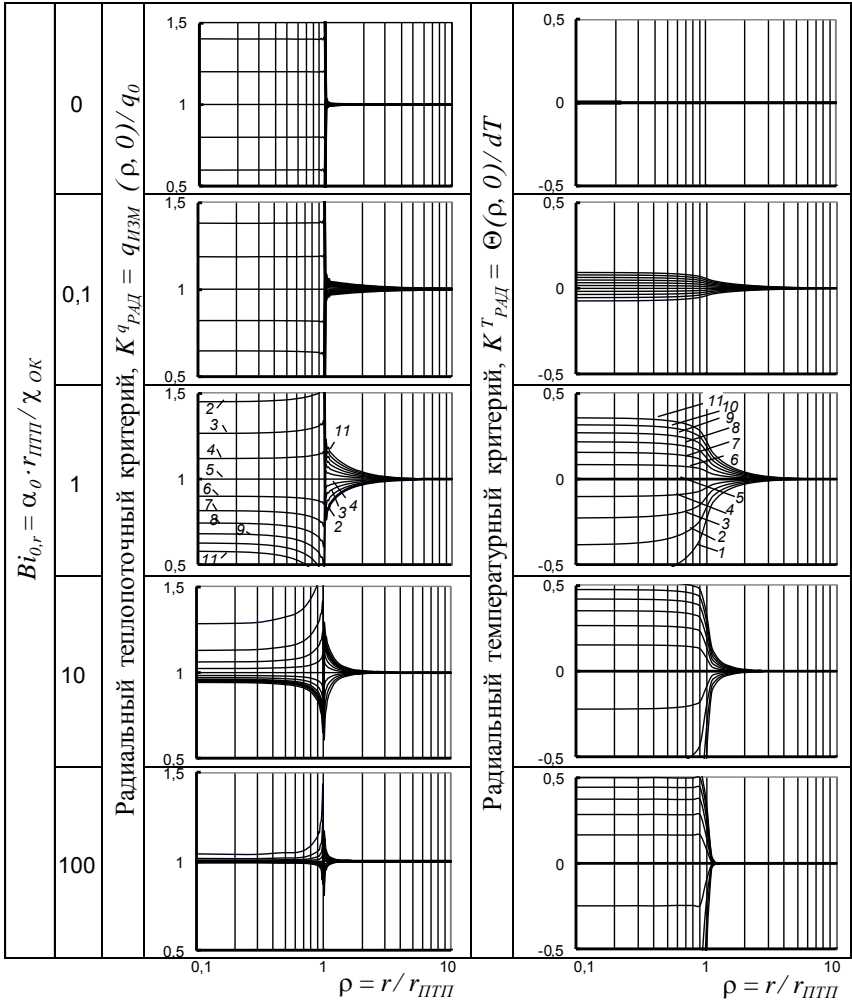
$$K_{РАД}^q = \frac{q_{ИЗМ}}{q_0} \Big|_{z=0} = 1 - \frac{(R_{\alpha, ОК} / (R_{\alpha, ПТП} + R_{ПТП}) - 1) \cdot I_r(Bi_{0,r}, \rho)}{1 + Bi_{0,r} \cdot (R_{\alpha, ОК} / (R_{\alpha, ПТП} + R_{ПТП}) - 1) \cdot I_r(Bi_{0,r}, \rho)}, \quad (3.72)$$

а зона распространения искажения теплового потока в глубину массива – продольным теплоточным критерием $K_{ПР}^q$, который с учетом (3.71), равен

$$K_{ПР}^q = \frac{q_{ИЗМ}}{q_0} \Big|_{r=0} = 1 - \frac{(R_{\alpha, ОК} / (R_{\alpha, ПТП} + R_{ПТП}) - 1) \cdot I_z(Bi_{0,r}, \zeta)}{1 + Bi_{0,r} \cdot (R_{\alpha, ОК} / (R_{\alpha, ПТП} + R_{ПТП}) - 1) \cdot I_z(Bi_{0,r}, 0)}. \quad (3.73)$$

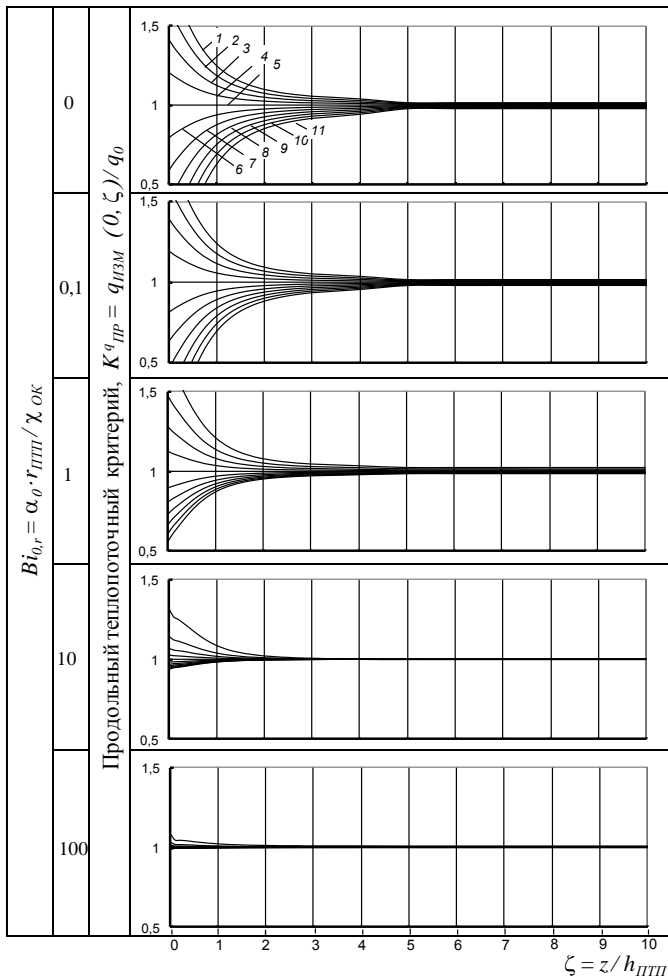
Результаты вычислений по (3.66), и (3.72) приведены на рисунке 3.25, а по (3.73) – рисунке 3.26. Расчеты выполнены в зависимости от безразмерной координаты $\rho = r/r_{ПТП}$ при вариации числа Био $Bi_{0,r}$ и отношения $R_{\alpha, ОК} / (R_{\alpha, ПТП} + R_{ПТП})$ в диапазоне от 0,2 до 2,2.

Результаты, представленные на рис. 3.25, показывают, что искажение теплового потока в радиальном направлении не распространяется по поверхности объекта далее, чем на расстояние, равное пяти радиусам ПТП. Такой же вывод можно сделать и относительно радиального распространения температурного искажения.



1 – $R_{\alpha,ок} / (R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП}) = 0,2$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – 1,0; 6 – 1,2;
 7 – 1,4; 8 – 1,6; 9 – 1,8; 10 – 2,0; 11 – 2,2

Рис. 3.25. Характер распространения искажений по поверхности ($z = 0$) в радиальном направлении приведенных плотности теплового потока и температуры, вносимых ПТП, расположенным на полуограниченном массиве, в зависимости от текущего радиуса ρ при вариации числа $Bi_{0,r}$ и отношения $R_{\alpha,ок} / (R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП})$



1 – $R_{\alpha,OK} / (R_{\alpha,ППП} + R_{ППП}) = 0,2$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – 1,0; 6 – 1,2;
 7 – 1,4; 8 – 1,6; 9 – 1,8; 10 – 2,0; 11 – 2,2

Рис. 3.26. Характер распространения в глубину ОК искажения приведенной плотности теплового потока, вносимого ПТП, расположенным на поверхности полуограниченного массива, в зависимости от относительной осевой координаты $z/r_{ППП}$ при вариации числа Био $Bi_{0,r}$ и отношения $R_{\alpha,OK} / (R_{\alpha,ППП} + R_{ППП})$

Эти данные дают возможность подобрать такое сочетание числа Био и отношения значений теплового сопротивления, при котором искажение минимально. Пользуясь ими, можно также решить вопрос о расположении нескольких ПТП на одной поверхности без их взаимного влияния.

Результаты, представленные на рис. 3.26, дают возможность оценить степень проникновения искажения теплового потока в глубину массива. Максимальная глубина, на которой сказывается присутствие ПТП на поверхности, не превышает пяти радиусов ПТП. Из этих данных следует, что ОК можно считать полуограниченным массивом, если при расположении ПТП на поверхности или заподлицо с поверхностью ОК расстояние от поверхности контакта ОК с ПТП до другой поверхности ОК более глубины проникновения искажений теплового потока, вносимых ПТП. Согласно рис. 3.26 в зависимости от числа Био $Bi_{0,r}$ и отношения $R_{\alpha,OK} / (R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП})$ ОК при толщине, равной (2–3) радиусам ПТП, можно считать полуограниченным массивом.

Для этих же значений числа $Bi_{0,r}$ и отношения $R_{\alpha,OK} / (R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП})$ определена методическая погрешность измерения плотности теплового потока δ^q и влияние на нее эффективного безразмерного радиуса чувствительного элемента ПТП ($\rho_{qЭ}$). Формула для ее расчета имеет вид [3.11]:

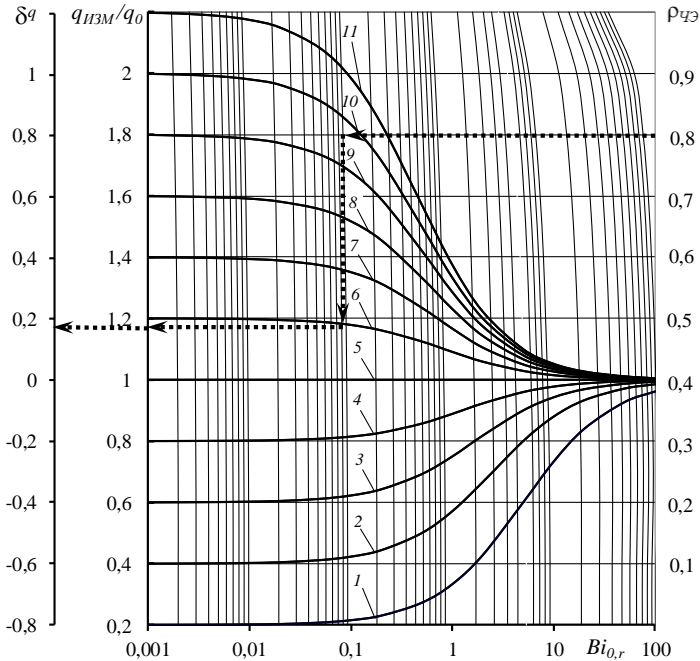
$$\delta^q(Bi_{0,r}, \frac{R_{\alpha,OK}}{R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП}}, \rho_{qЭ}) = \frac{q_{ИЗМ}}{q_0} - 1 =$$

$$= \left(\frac{R_{\alpha,OK}}{R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП}} - 1 \right) \cdot (1 + Bi_{0,r} \cdot \frac{R_{\alpha,OK}}{R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП}} \cdot \varphi(\rho_{qЭ}, Bi_{0,r})), \quad (3.74)$$

где $\varphi(\rho_{qЭ}, Bi_{0,r}) = \int_0^{\infty} \frac{J_1(x) \cdot J_1(x \cdot \rho_{qЭ})}{x(x + Bi_{0,r})} dx / \int_0^{\infty} \frac{J_1(x) \cdot J_1(x \cdot \rho_{qЭ})}{x + Bi_{0,r}} dx$.

Результаты вычислений по (3.72) приведенной измененной плотности теплового потока $q_{ИЗМ} / q_0$ и погрешности

δ^q по (3.74) в зависимости от относительного радиуса $\rho_{\text{ЧЭ}}$ при тех же вариациях чисел Био и отношения значений теплового сопротивления представлены на рисунке 3.27.



1 – $R_{\alpha,ок}/(R_{\alpha,ППП} + R_{ППП}) = 0,2$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – 1,0; 6 – 1,2;
7 – 1,4; 8 – 1,6; 9 – 1,8; 10 – 2,0; 11 – 2,2

Рис. 3.27. Номограмма для определения методической погрешности измерения плотности теплового потока δ^q в зависимости от относительного текущего радиуса $\rho_{\text{ЧЭ}}$ и числа Био $Bi_{0,r}$ при вариации отношения $R_{\alpha,ок}/(R_{\alpha,ППП} + R_{ППП})$ (случай расположения ПТП на поверхности полуграниченного массива)

Эта номограмма [3.20] позволяет подбирать значения соотношения и размеров ПТП и его ЧЭ, удовлетворяющих пределам допустимой методической погрешности измерений.

Формулы, графики и номограмма, полученные при решении данной задачи, распространяются на строительные конструкции – стены, пол, потолок, перегородки, – если они представляют собой элементы с толщиной более пяти радиусов ПТП и могут считаться полуограниченным массивом.

3.7 ПТП на конвективно охлаждаемой поверхности неограниченной пластины

При установке ПТП на поверхности неограниченной пластины конечной толщины h_{OK} с неодинаковыми граничными условиями на ее поверхностях, как показано на рисунке 3.28 [3.19, 3.20], теплообмен в системе «Неограниченная пластина – ПТП – ОС» определен граничным условием 2-го рода на поверхности пластины при $z = 0$ ($q_0 = const$) и 3-го рода – при $z = h_{OK}$ и $r_{ПТП} \leq r < \infty$. При этом коэффициент теплообмена на всей свободной поверхности пластины ($r \geq r_{ПТП}$ и $z = h_{OK}$) и на всех открытых поверхностях ПТП принят одинаковым и является постоянной величиной ($\alpha_0 = const$), что соответствует отсутствию радиальных потерь теплоты через боковую поверхность ПТП.

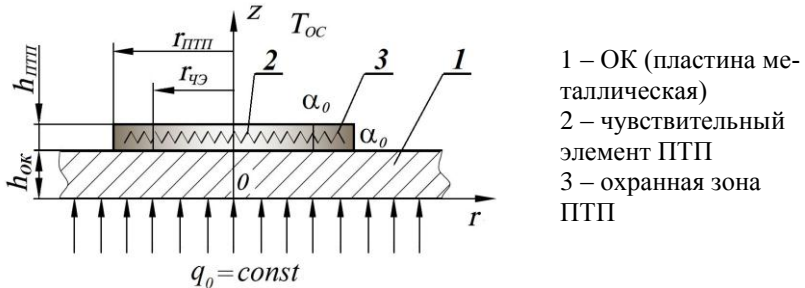


Рис. 3.28. Схема физической модели теплообмена в системе «Неограниченная пластина – ПТП – ОС»

В отсутствие ПТП температурное поле в пластине одномерное и симметричное относительно оси координат, а на

конвективно охлаждаемой поверхности пластины ($z = h_{OK}$) температура определяется формулой:

$$T|_{z=h_{OK}} = T_{OK} = q_0/\alpha_0 + T_{OC}. \quad (3.75)$$

При допущении об отсутствии теплообмена по боковой поверхности ПТП и учета теплового сопротивления ПТП $R_{ПТП}$, включая контактное сопротивление между ПТП и ОК, путем введения эффективного коэффициента теплообмена соотношением [3.8]:

$$\alpha_{\text{эф}} = (1/\alpha_0 + h_{ПТП}/\chi_{ПТП})^{-1} = (R_{\alpha} + R_{ПТП})^{-1}, \quad (3.76)$$

сформулированная задача трансформирована в следующую: определить температурное поле в ОК – неограниченной пластине толщиной h_{OK} при граничном условии 2-го рода на конвективно охлаждаемой поверхности ($z = 0$) и 3-го рода на поверхности с установленным ПТП ($z = h_{OK}$) с учетом скачкообразного изменения коэффициента теплообмена при $r = r_{ПТП}$. Схема модели теплообмена в трансформированной задаче показана на рисунке 3.29.

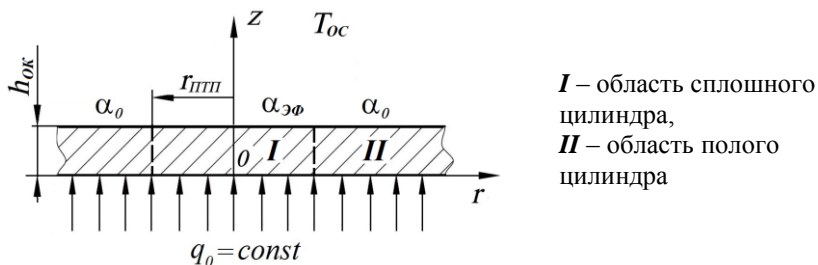


Рис. 3.29. Схема физической модели трансформированной задачи

Рассмотрено две области: область I с координатами $0 \leq r \leq r_{ПТП}$ и $0 \leq z \leq h_{ПТП}$, соответствующая ограниченному сплошному цилиндру высотой h_{OK} и радиусом $r_{ПТП}$; область II – полному цилиндру высотой h_{OK} с внутренним радиусом

r_{III} и бесконечным наружным радиусом. На поверхность при $z = 0$ поступает постоянный тепловой поток q_0 , а на поверхности при $z = h_{OK}$ происходит конвективный теплообмен с ОС с постоянными коэффициентами теплообмена: $\alpha_{\text{ЭФ}}$ при $r \leq r_{III}$ и α_0 при $r > r_{III}$. Обе области имеют общую цилиндрическую поверхность высотой h_{OK} и радиусом r_{III} .

Для получения решения классического уравнения теплопроводности вида (3.17) для каждой области применен метод разделения переменных с представлением функций температуры и плотности теплового потока в виде бесконечных рядов [2.1]. Определение коэффициентов этих рядов выполнено, исходя из сопряжения граничных условий на общей границе обеих областей, то есть равенства температуры $T_I(r_{III}, z) = T_{II}(r_{III}, z)$ и радиального теплового потока $\chi_{OK} \cdot \partial T_I(r_{III}, z) / \partial r = \chi_{OK} \cdot \partial T_{II}(r_{III}, z) / \partial r$ при $0 \leq z \leq h_{OK}$.

При переходе к безразмерной системе координат для температуры $T_i(r, z)$ введены безразмерные величины [3.8]: $\tilde{T}_i(\rho, \zeta) = (T_{i(r,z)} - T_{OC}) / (T_{OK} - T_{OC})$, ($i = I, II$), где T_{OK} – неискаженная действительная температура поверхности ОК согласно формуле (3.75).

Обе функции температуры представляются в виде таких линейных комбинаций:

$$\tilde{T}_{I(\rho, \zeta)} = \vartheta_1(\rho, \zeta) + Bi_{0,h} \cdot (1 - \zeta) + \frac{Bi_{0,h}}{Bi_{\text{ЭФ},h}} = \vartheta_1(\rho, \zeta) + Bi_{0,h} \cdot (1 - \zeta) + \frac{\alpha_0}{\alpha_{\text{ЭФ}}}, \quad (3.77)$$

$$\tilde{T}_{II(\rho, \zeta)} = \vartheta_2(\rho, \zeta) + Bi_{0,h} \cdot (1 - \zeta) + 1, \quad (3.78)$$

где $Bi_{0,h} = \alpha_0 \cdot h_{OK} / \chi_{OK}$; $Bi_{\text{ЭФ},h} = \alpha_{\text{ЭФ}} \cdot h_{OK} / \chi_{OK}$ – числа Био, при этом $Bi_{0,h} / Bi_{\text{ЭФ},h} = \alpha_0 / \alpha_{\text{ЭФ}}$, а функции температуры $\vartheta_1(\rho, \zeta)$ и $\vartheta_2(\rho, \zeta)$ в безразмерной форме удовлетворяют дифференциальному уравнению (3.19) при граничных условиях:

$$\begin{array}{l}
 \text{– для области } I: \\
 \left\{ \begin{array}{l}
 \vartheta_1(0, \zeta) \text{ – ограничена} \\
 \frac{\partial \vartheta_1(\rho, 0)}{\partial \zeta} = 0, \\
 \frac{\partial \vartheta_1(\rho, 1)}{\partial \zeta} = -Bi_{\vartheta\phi, h} \cdot \vartheta_1(\rho, 1);
 \end{array} \right. \quad (3.79)
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \text{– для области } II: \\
 \left\{ \begin{array}{l}
 \frac{\partial \vartheta_2(\infty, \zeta)}{\partial \rho} \text{ – ограничена} \\
 \frac{\partial \vartheta_2(\rho, 0)}{\partial \zeta} = 0, \\
 \frac{\partial \vartheta_2(\rho, 1)}{\partial \zeta} = -Bi_{\vartheta\phi, h} \cdot \vartheta_2(\rho, 1);
 \end{array} \right. \quad (3.80)
 \end{array}$$

На общей границе областей *I* и *II* функции температуры и плотности теплового потока непрерывны и равны

$$\vartheta_1(1, \zeta) + \frac{Bi_{0, h}}{Bi_{\vartheta\phi, h}} = \vartheta_2(1, \zeta) + 1, \quad (3.81)$$

$$\frac{\partial \vartheta_1(1, \zeta)}{\partial \rho} = \frac{\partial \vartheta_2(1, \zeta)}{\partial \rho}. \quad (3.82)$$

Для уравнения (3.19) при сформулированных граничных условиях (3.70) и (3.80) для областей *I* и *II* получены следующие решения для функций температуры:

– для области *I*:

$$\vartheta_1(\rho, \zeta) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot I_0(\bar{\nu}_n \cdot \rho) \cdot \cos\left(\frac{h_{OK} \cdot \bar{\nu}_n}{r_{III}} \cdot \zeta\right), \quad (3.83)$$

– для области *II*:

$$\vartheta_2(\rho, \zeta) = \sum_{m=1}^{\infty} B_m \cdot K_0(\bar{\mu}_m \cdot \rho) \cdot \cos\left(\frac{h_{OK} \cdot \bar{\mu}_m}{r_{III}} \cdot \zeta\right), \quad (3.84)$$

где I_0 и K_0 – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода, соответственно, нулевого порядка [3.23], $\bar{\nu}_n$ и $\bar{\mu}_m$ – собственные числа, являющиеся корнями следующих характеристических уравнений:

$$\frac{h_{OK} \cdot \bar{\nu}_n}{r_{III}} \cdot \operatorname{tg} \frac{h_{OK} \cdot \bar{\nu}_n}{r_{III}} = Bi_{\vartheta\phi, h} \quad \text{и} \quad \frac{h_{OK} \cdot \bar{\mu}_m}{r_{III}} \cdot \operatorname{tg} \frac{h_{OK} \cdot \bar{\mu}_m}{r_{III}} = Bi_{0, h}$$

при $n = 1, 2, 3, \dots$ и $m = 1, 2, 3, \dots$, соответственно.

Для определения коэффициентов A_n и B_m в равенство (3.81) вместо ϑ_1 и ϑ_2 подставляют выражения (3.83) и (3.84). Исходя из свойства ортогональности собственных функций, находят сначала коэффициенты A_n через B_m по формуле:

$$A_n = D_n + \sum_{m=1}^{\infty} B_m \cdot E_{mn}, \quad (3.85)$$

где $D_n = \frac{\sin v_n}{v_n} \cdot \frac{1}{Z_n} \cdot (1 - Bi_{0,h} / Bi_{\varnothing\phi,h})$, при $v_n = \bar{v}_n \cdot h_{OK} / r_{III}$;

$$E_{mn} = \frac{1}{Z_n} \cdot 0,5 \cdot K_0(\mu_m) \cdot \left(\frac{\sin(v_n - \mu_m)}{v_n - \mu_m} + \frac{\sin(v_n + \mu_m)}{v_n + \mu_m} \right)$$

при $v_n = \bar{v}_n \cdot h_{OK} / r_{III}$; $\mu_m = \bar{\mu}_m \cdot h_{OK} / r_{III}$; $Z_n = 0,5 \cdot I_0(\bar{v}_n) \cdot \left(1 + \frac{\sin 2v_n}{2v_n} \right)$.

Затем подстановкой в условие (3.82) частных производных $\partial\vartheta_1(\rho, \zeta) / \partial\rho$ и $\partial\vartheta_2(\rho, \zeta) / \partial\rho$, которые имеют вид:

$$\partial\vartheta_1(\rho, \zeta) / \partial\rho = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \bar{v}_n \cdot I_1(\bar{v}_n \cdot \rho) \cdot \cos\left(\frac{h_{OK} \cdot \bar{v}_n}{r_{III}} \cdot \zeta\right),$$

$$\partial\vartheta_2(\rho, \zeta) / \partial\rho = \sum_{m=1}^{\infty} B_m \cdot \bar{\mu}_m \cdot K_1(\bar{\mu}_m \cdot \rho) \cdot \cos\left(\frac{h_{OK} \cdot \bar{\mu}_m}{r_{III}} \cdot \zeta\right),$$

где I_l и K_l – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода нулевого порядка, получают зависимости, выражающие коэффициенты B_m через A_n :

$$B_m = \sum_{k=1}^{\infty} A_n \cdot F_{km}, \quad (3.86)$$

где $F_{km} = -\frac{1}{ZZ_m} \cdot 0,5 \cdot \bar{v}_k \cdot I_1(\bar{v}_k) \cdot \left(\frac{\sin(v_k - \mu_m)}{v_k - \mu_m} + \frac{\sin(v_k + \mu_m)}{v_k + \mu_m} \right)$

при $ZZ_m = 0,5 \cdot \bar{\mu}_m \cdot K_1(\bar{\mu}_m) \cdot (1 + \sin 2\mu_m / (2 \cdot \mu_m))$.

Теперь подстановкой (3.86) в (3.85) получается система алгебраических уравнений для определения A_n :

$$\begin{cases} A_1 = D_1 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \sum_{m=1}^{\infty} F_{km} \cdot E_{m_1} \\ A_2 = D_2 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \sum_{m=1}^{\infty} F_{km} \cdot E_{m_2} \\ A_n = D_n + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \sum_{m=1}^{\infty} F_{km} \cdot E_{m_n} \end{cases} \quad (3.87)$$

Порядок системы уравнений (3.87) определяется количеством найденных собственных чисел, которое диктуется точностью сходимости рядов (3.83) и (3.84) и, согласно расчетам, зависит от отношения толщины пластины к радиусу ПТП ($h_{OK} / r_{ПТП}$), а также от коэффициента теплообмена.

Как отмечено ранее, результат измерения ПТП определяется плотностью среднеинтегрального теплового потока, которая в области I равна:

$$q_{CP,I}(\zeta, \rho) = -\frac{\chi_{OK}}{\rho^2} \cdot \frac{T_{OK} - T_{OC}}{h_{OK}} \int_0^{\rho} \frac{\partial \tilde{T}_I}{\partial \zeta} \cdot 2\rho d\rho. \quad (3.88)$$

С учетом (3.83) выражение (3.88) принимает вид:

$$\begin{aligned} q_{CP,I}(\zeta, \rho) = & \frac{\chi_{OK}}{\rho^2} \cdot \frac{T_{OK} - T_{OC}}{h_{OK}} \cdot (\rho^2 \cdot Bi_{0,h} + \\ & + 2 \cdot \int_0^{\rho} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot v_n \cdot I_0(\bar{v}_n \cdot \rho) \cdot \sin(v_n \cdot \zeta) \cdot \rho d\rho) \end{aligned} \quad (3.89)$$

Путем несложных преобразований с учетом корней $v_n = (h_{OK} \cdot \bar{v}_n / r_{ПТП})$ и того, что $\int_0^{\rho} I_0(\bar{v}_n \cdot \rho) \rho d\rho = \frac{\rho}{v_n} I_1(\bar{v}_n \cdot \rho)$, выражение (3.89) принимает вид:

$$\begin{aligned} q_{CP,I}(\zeta, \rho) = & \frac{\chi_{OK}}{\rho^2} \cdot \frac{T_{OK} - T_{OC}}{h_{OK}} \cdot \left(\rho^2 \cdot Bi_{0,h} + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot v_n \cdot \frac{\rho}{v_n} \cdot I_1(\bar{v}_n \cdot \rho) \cdot \sin(v_n \cdot \zeta) \right) = \\ = & \frac{\chi_{OK}}{\rho^2} \cdot \frac{T_{OK} - T_{OC}}{h_{OK}} \cdot \left(\rho^2 \cdot Bi_{0,h} + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \frac{h_{OK}}{r_{ПТП}} \cdot \rho \cdot I_1(\bar{v}_n \cdot \rho) \cdot \sin(v_n \cdot \zeta) \right). \end{aligned} \quad (3.90)$$

Измеренная плотность теплового потока, равная плотности среднеинтегрального теплового потока по площади, занимаемой ПТП, равна:

$$q_{ИЗМ} = q_{CP,I}(1,1) = \chi_{OK} \cdot \frac{T_{OK} - T_{OC}}{h_{OK}} \cdot \left(Bi_{0,h} + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \frac{h_{OK}}{r_{ПТП}} \cdot I_1(\bar{v}_n) \cdot \sin v_n \right), \quad (3.91)$$

а плотность входящего теплового потока определяется по той же площади на нижней стороне пластины:

$$q_0 = -\chi_{OK} \cdot \frac{T_{OK} - T_{OC}}{h_{OK}} \cdot \left. \frac{\partial \bar{T}_I}{\partial \zeta} \right|_{\zeta=0} = \chi_{OK} \cdot \frac{T_{OK} - T_{OC}}{h_{OK}} \cdot Bi_{0,h}. \quad (3.92)$$

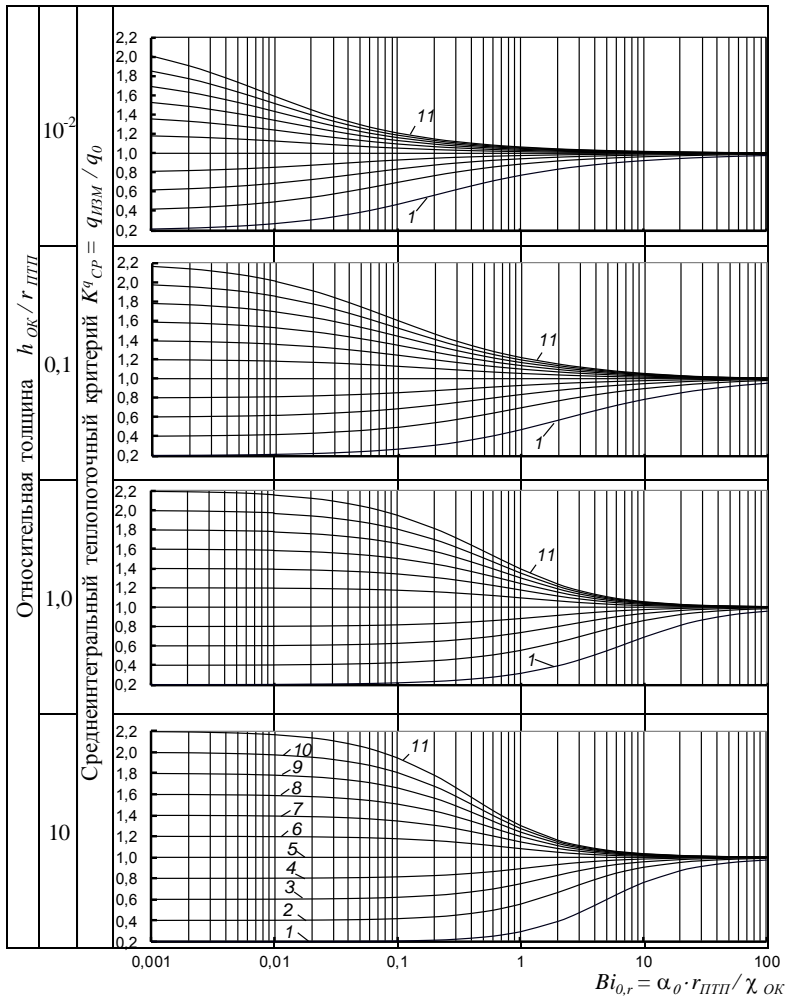
Таким образом, коэффициент искажения среднеинтегрального теплового потока K_{CP}^q , равен:

$$K_{CP}^q = \frac{q_{ИЗМ}}{q_0} = 1 + \frac{2 \cdot h_{OK}}{Bi_{0,h} \cdot r_{ПТП}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot I_1(\bar{v}_n) \cdot \sin v_n. \quad (3.93)$$

В связи с необходимостью знать зоны, не подверженные влиянию ПТП, использован критерий Био с характерным геометрическим размером, равным радиусу ПТП: $Bi_{0,r} = \alpha_0 \cdot r_{ПТП} / \chi_{OK}$. Так как критерии $Bi_{0,h}$ и $Bi_{0,r}$ связаны соотношением: $Bi_{0,r} = Bi_{0,h} \cdot r_{ПТП} / h_{OK}$, формула (3.93) принимает вид:

$$K_{CP}^q = \frac{q_{ИЗМ}}{q_0} = 1 + \frac{2}{Bi_{0,r}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot I_1(\bar{v}_n) \cdot \sin v_n. \quad (3.94)$$

Результаты вычислений по формуле (3.94) представлены на рисунке 3.30 семействами графиков зависимости теплоточного коэффициент K_{CP}^q от числа Био $Bi_{0,r}$ в диапазоне от 0,001 до 100 при вариации значения отношения $R_\alpha / (R_\alpha + R_{ПТП})$ в диапазоне от 0,2 до 2,2 для пяти фиксированных значений относительной толщины пластины $h_{OK} / r_{ПТП} = 10^{-3}; 10^{-2}; 10^{-1}; 1$ и 10. При этом отношение значений теплового сопротивления находится из равенства: $R_\alpha / (R_\alpha + R_{ПТП}) = \alpha_{эф} / \alpha_0$.



1 – $R_\alpha / (R_\alpha + R_{III}) = 0,2$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – 1,0; 6 – 1,2; 7 – 1,4; 8 – 1,6; 9 – 1,8; 10 – 2,0; 11 – 2,2

Рис.3.30. Характеристика распространения искажений приведенного среднеинтегрального теплового потока в зависимости от числа $Bi_{0,r}$ при вариации отношения $R_\alpha / (R_\alpha + R_{III})$ для фиксированных значений относительной толщины пластины $h_{ок} / r_{III}$

Анализ графиков позволил сделать вывод о том, что с увеличением относительной толщины пластины методическая погрешность возрастает. В случае $h_{OK} / z_{III} \geq 1$ пластину можно считать полуограниченным массивом и пользоваться соответствующими формулами (см. параграф 3.6).

Для определения мест установки двух и более ПТП без их взаимного влияния исследовано распространение искажений локальных плотности теплового потока и температуры на поверхности ОК. Функции локальной температуры в безразмерном виде на поверхности ОК $\zeta = 1$, найденные для обеих областей, имеют вид:

- для области I при $\rho \leq 1$ с учетом (3.77) и (3.83):

$$\begin{aligned} \bar{T}_{ЛОК,I} &= \frac{T_I(r, h_{OK}) - T_{OC}}{T_{OK} - T_{OC}} = \mathfrak{G}_1(\rho, 1) + \frac{Bi_{0,h}}{Bi_{\mathfrak{E}\Phi,h}} = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot I_0(\bar{\nu}_n \cdot \rho) \cdot \cos(\nu_n) + \frac{Bi_{0,h}}{Bi_{\mathfrak{E}\Phi,h}}; \end{aligned} \quad (3.95)$$

- для области II при $\rho \geq 1$ с учетом (3.78) и (3.84):

$$\begin{aligned} \bar{T}_{ЛОК,II} &= \frac{\tilde{T}_{II}(r, h_{OK}) - T_{OC}}{T_{OK} - T_{OC}} = \mathfrak{G}_2(\rho, 1) + 1 = \\ &= \sum_{m=1}^{\infty} B_m \cdot K_0(\bar{\mu}_m \cdot \rho) \cdot \cos \mu_m + 1; \end{aligned} \quad (3.96)$$

а функции плотности локального теплового потока:

- для области I (при $r \leq r_{III}$):

$$q_{ЛОК,I} = \alpha_{\mathfrak{E}\Phi} \cdot (T_I(r, h_{OK}) - T_{OC}), \quad (3.97)$$

- для области II (при $r \geq r_{III}$):

$$q_{ЛОК,II} = \alpha_0 \cdot (T_{II}(r, h_{OK}) - T_{OC}). \quad (3.98)$$

Исходя из того, что $q_0 = \alpha_0 \cdot (T_{OK} - T_{OC})$, коэффициенты искажения локального теплового потока на поверхности ОК равны:

- для области I (исходя из формул (3.76) и (3.97)):

$$K_{ЛОК, I}^q = \frac{q_{ЛОК, I}}{q_0} = \frac{\alpha_{ЭФ}}{\alpha_0} \cdot \frac{T_I(r, h_{ОК}) - T_{ОС}}{T_{ОК} - T_{ОС}} =$$

$$= \frac{R_\alpha}{R_\alpha + R_{ПТП}} \cdot \vartheta_I(\rho, 1) + 1;$$

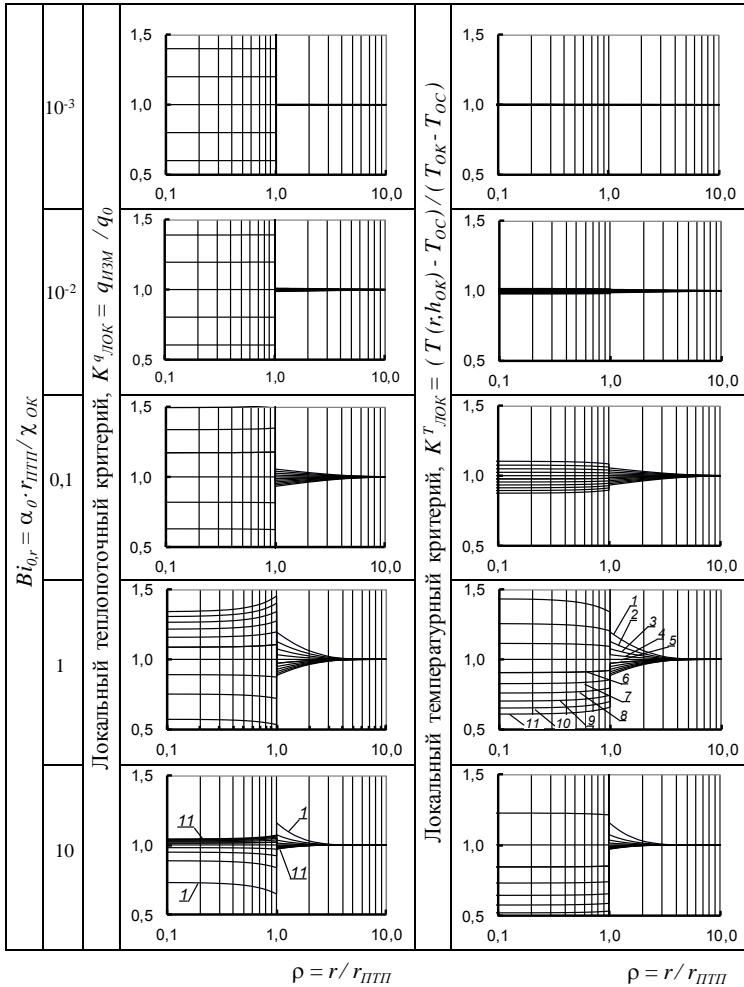
– для области II (исходя из формул (3.96) и (3.98)):

$$K_{ЛОК, II}^q = \frac{q_{ЛОК, II}}{q_0} = \frac{\alpha_0 \cdot (T_{II}(r, h_{ОК}) - T_{ОС})}{\alpha_0 \cdot (T_{ОК} - T_{ОС})} = \vartheta_2(\rho, 1) + 1. \quad (3.100)$$

На рисунках 3.31 – 3.34 представлены полученные по результатам расчета семейства графиков зависимостей локальных теплоточного $K_{ЛОК}^q$ и температурного $K_{ЛОК}^T$ коэффициентов искажения теплового потока и температуры от относительного текущего радиуса при вариации числа Био ($Bi_{0,r}$) и отношения $R_\alpha / (R_\alpha + R_{ПТП})$ для четырех фиксированных значений относительной толщины пластины $h_{ОК} / h_{ПТП} = 1$ (на рис. 3.31); 0,1 (на рис. 3.32); 0,01 (на рис. 3.33) и 0,001 (на рис. 3.34).

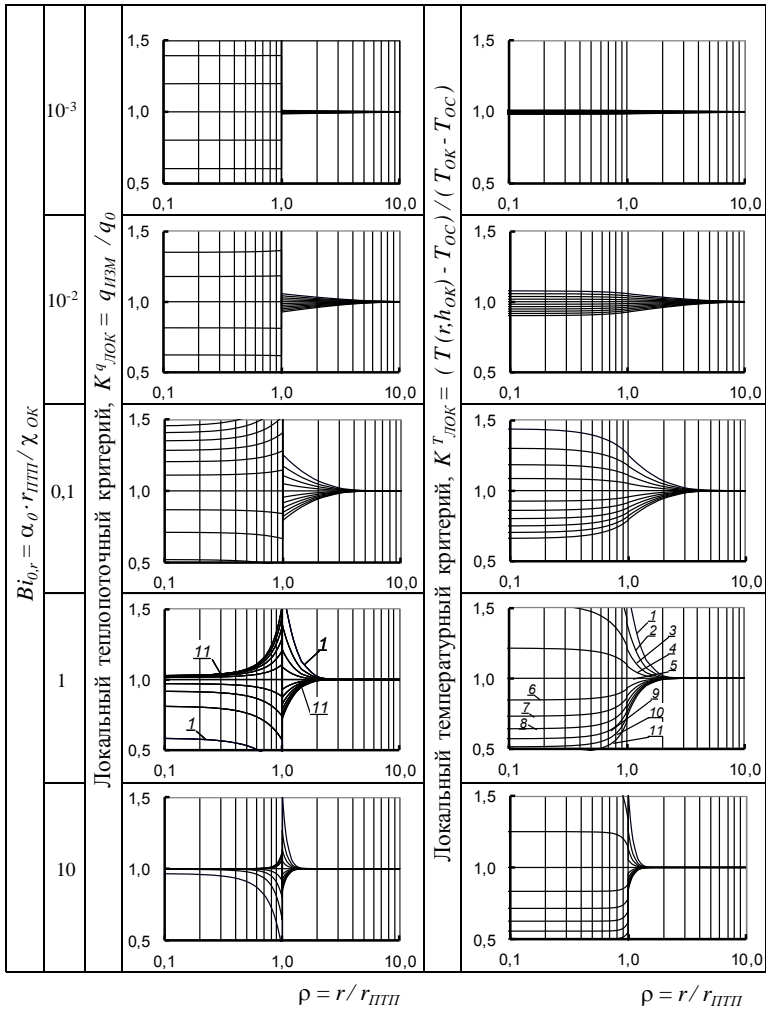
Из представленных данных следует, что для уменьшения методической погрешности необходимо, чтобы тепловое сопротивление ПТП ($R_{ПТП}$) было на порядок меньше теплового сопротивления конвективному теплообмену на поверхности ОК ($R_{\alpha, ОК}$). При этом с увеличением радиуса ПТП и уменьшением коэффициента теплопроводности ОК методическая погрешность уменьшается.

При необходимости измерения температуры поверхности ОК, не подверженной влиянию искажения температурного поля, преобразователь температуры должен быть размещен на расстоянии от ПТП не меньше пяти радиусов ПТП.



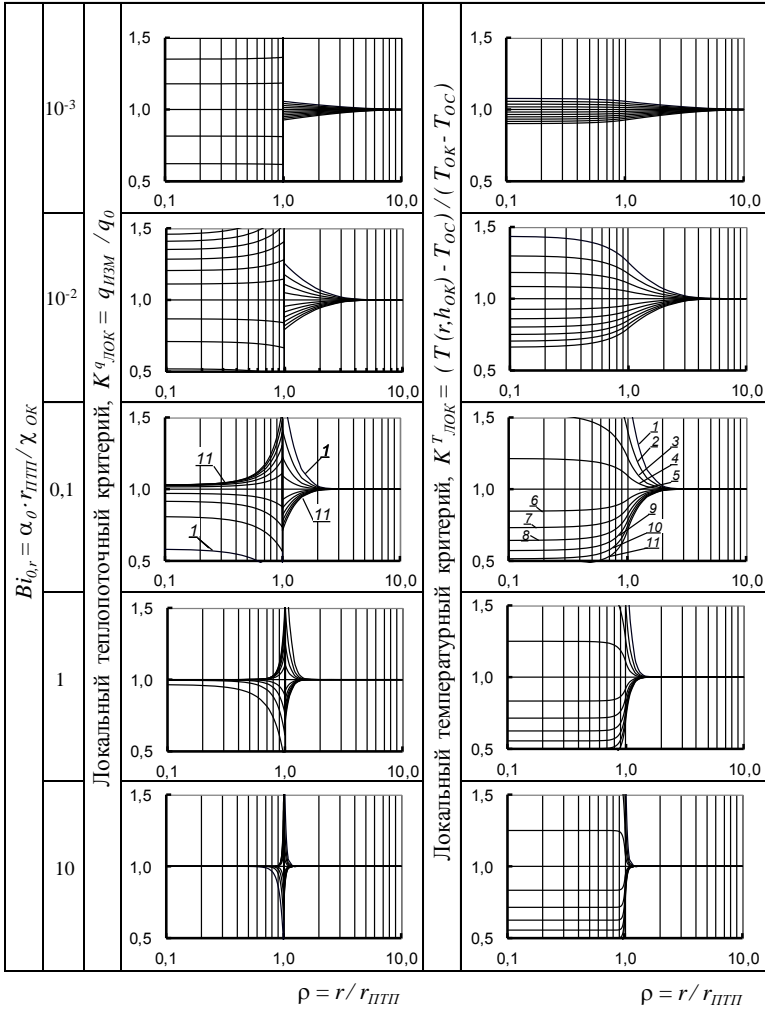
1 – $R_\alpha / (R_\alpha + R_{плзм}) = 0,2$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – 1,0; 6 – 1,2; 7 – 1,4;
 8 – 1,6; 9 – 1,8; 10 – 2,0; 11 – 2,2

Рис. 3.31. Характер распространения по поверхности ОК в радиальном направлении искажений локальных плотности теплового потока и температуры для относительной толщины ОК $h_{ок} / h_{плзм} = 1$ при вариациях отношения $R_\alpha / (R_\alpha + R_{плзм})$ и числа $Bi_{0,r}$



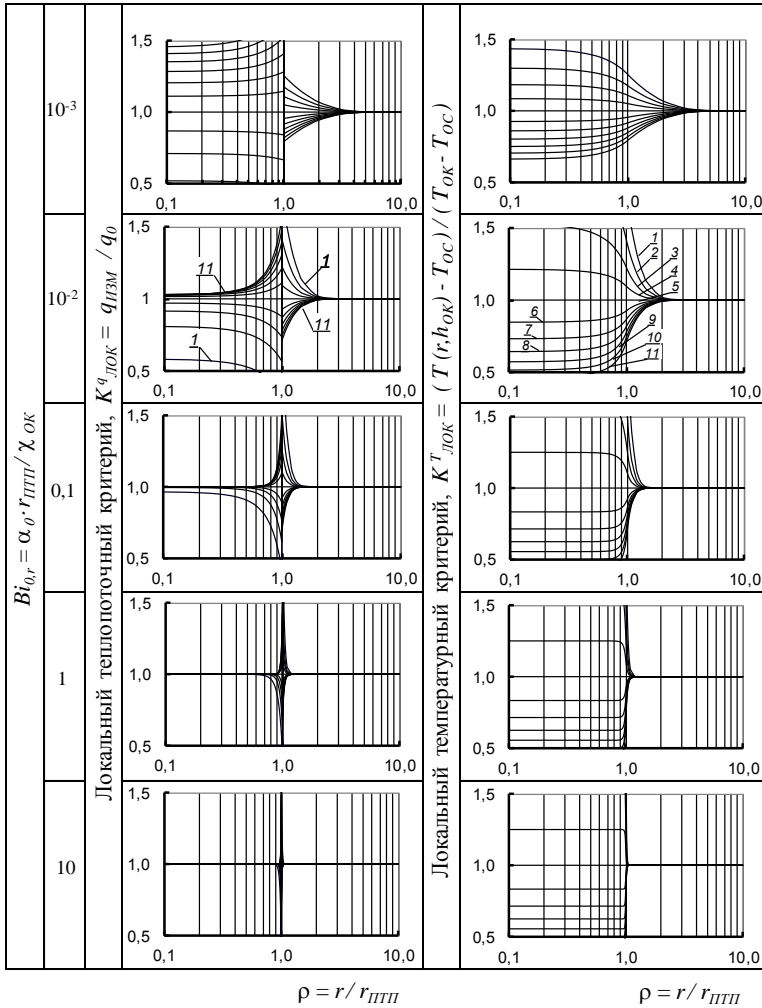
1 – $R_\alpha/(R_\alpha + R_{III}) = 0,2$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – 1,0; 6 – 1,2; 7 – 1,4;
 8 – 1,6; 9 – 1,8; 10 – 2,0; 11 – 2,2

Рис. 3.32. Характер распространения по поверхности ОК в радиальном направлении искажений локальных плотности теплового потока и температуры при относительной толщине ОК $h_{OK}/h_{III} = 10^{-1}$ при вариациях отношения $R_\alpha/(R_\alpha + R_{III})$ и числа Био $Bi_{0,r}$



1 – $R_\alpha / (R_\alpha + R_{III}) = 0,2$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – 1,0; 6 – 1,2; 7 – 1,4;
 8 – 1,6; 9 – 1,8; 10 – 2,0; 11 – 2,2

Рис. 3.33. Характер распространения по поверхности ОК в радиальном направлении искажений локальных плотности теплового потока и температуры при относительной толщине ОК $h_{OK}/h_{III} = 10^{-2}$ при вариациях отношения $R_\alpha / (R_\alpha + R_{III})$ и числа Био $Bi_{0,r}$.



1 – $R_\alpha / (R_\alpha + R_{III}) = 0,2$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – 1,0; 6 – 1,2; 7 – 1,4;
 8 – 1,6; 9 – 1,8; 10 – 2,0; 11 – 2,2

Рисунок 3.34 – Характер распространения на поверхности ОК в радиальном направлении искажений локальных плотности теплового потока и температуры при относительной толщине ОК $h_{ОК} / h_{III} = 10^{-3}$ при вариациях отношения $R_\alpha / (R_\alpha + R_{III})$ и числа Био $Bi_{0,r}$

3.8 ПТП на поверхности неограниченной пластины, конвективно охлаждаемой с двух сторон

Рассмотрим случай, когда объектом контроля (ОК) является неограниченная пластина толщиной h_{OK} из материала с коэффициентом теплопроводности χ_{OK} , обе поверхности которой конвективно охлаждаются окружающими средами (ОС), значения температуры которых $T_{OC,1}$ и $T_{OC,2}$ неодинаковые, например $T_{OC,1} < T_{OC,2}$. При этом значения температуры обеих поверхностей пластины тоже различные ($T_{ПОВ,1} < T_{ПОВ,2}$).

При размещении на одной из поверхностей пластины ПТП теплообмен будет происходить в системе «ОС₁ – ПТП – ОК – ОС₂», модель которой представлена на рисунке 3.35 [3.19, 3.25].

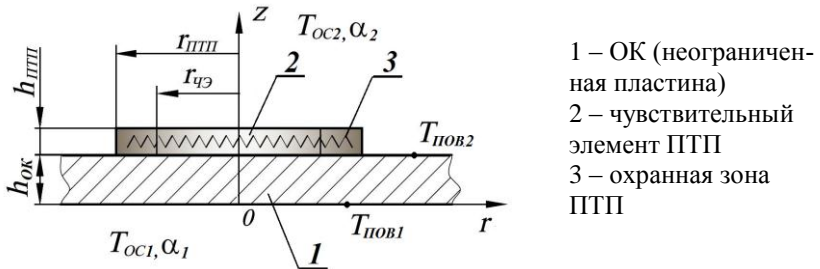


Рис.3.35. Схема модели теплообмена в системе «ОС₁ – ПТП – ОК – ОС₂»

Учитывая цилиндрическую форму ПТП и неограниченность размеров пластины, процесс теплообмена можно считать осесимметричным и рассматривать задачу теплопроводности в цилиндрической системе координат (r, z) или (ρ, ζ) . Таким образом, имеем задачу о двух средах (с температурой $T_{OC,1}$ и $T_{OC,2}$), разделенных однородной плоской стенкой (с температурой ее поверхностей $T_{ПОВ,1}$ и $T_{ПОВ,2}$), по разные

стороны которой происходит теплообмен с ОС, с коэффициентами теплообмена α_1 и α_2 , то есть с граничными условиями 3-го рода [2.1], причем величины $T_{OC,1}$, $T_{OC,2}$, α_1 и α_2 – постоянны и не меняются вдоль поверхностей стенки. Это позволяет при отсутствии ПТП рассматривать изменение температуры стенки только в одном направлении: перпендикулярном ее поверхности.

Исходная плотность теплового потока q_0 равна:

$$q_0 = (T_{OC,2} - T_{OC,1}) / R_{\Sigma}, \quad (3.101)$$

где $R_{\Sigma} = 1/\alpha_1 + h_{OK}/\lambda_{OK} + 1/\alpha_2 = R_{\alpha 1} + R_{OK} + R_{\alpha 2}$ – полное тепловое сопротивление теплопередаче через рассматриваемую неограниченную пластину (в отсутствие ПТП). Температура поверхностей пластины в стационарном режиме определяется выражениями:

$$T_{ПОВ,1} = q_0 / \alpha_1 + T_{OC,1} \quad \text{при } z = h_{OK}, \quad (3.102)$$

$$T_{ПОВ,2} = q_0 / \alpha_2 + T_{OC,2} \quad \text{при } z = 0. \quad (3.103)$$

Наличие ПТП, установленного на пластине, приводит к искажению температурного поля, так как ПТП создает дополнительное тепловое сопротивление, состоящее из собственного сопротивления ($R_{ПТП} = h_{ПТП}/\chi_{ПТП}$) и контактного (R_K) между поверхностями ПТП и ОК. Температурное поле пластины перестает быть одномерным, а тепловой поток, проходящий через эту зону, искажается и становится неидентичным исходному q_0 . Потери теплоты на боковой поверхности ПТП не учитываются, а коэффициент теплообмена α_1 принимается одинаковым на всей открытой поверхности пластины и торцевой поверхности ПТП. Такие упрощения позволяют считать тепловой поток в самом ПТП одномерным. Однако, они допустимы лишь в случае, если присутствие ПТП не вызывает возмущения ОС и, как следствие, перехода ламинарного режима обтекания в турбулентный.

Как и в 3.7, допущение об одномерности поля теплового потока в ПТП позволяет объединить тепловое сопротивление ПТП $R_{ПТП}$ (включая контактное сопротивление между ПТП и пластиной) с сопротивлением конвективному теплообмену на его торцевой поверхности и воспользоваться формулой (3.76) для эффективного коэффициента конвективного теплообмена:

$$\alpha_{\text{эф}} = (1/\alpha_1 + h_{ПТП} / \chi_{ПТП})^{-1} = (R_{\alpha_1} + R_{ПТП})^{-1}. \quad (3.104)$$

Эта замена позволяет по аналогии с 3.7 исходную задачу трансформировать в задачу определения температурного поля в неограниченной пластине при граничных условиях 3-го рода на обеих поверхностях с неодинаковыми коэффициентами теплообмена. При этом на верхней поверхности конвективный теплообмен происходит со скачкообразным изменением коэффициента теплообмена при $r = r_{ПТП}$. Схема модели теплообмена для этого случая представлена на рисунке 3.36 [3.19, 3,25]. Температурное поле в пластине в данном

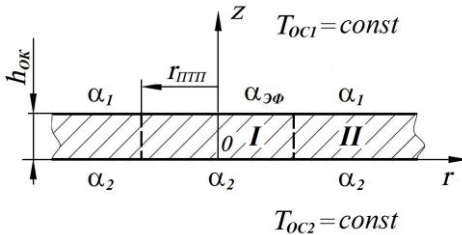


Рисунок 3.36 – Схема физической модели теплообмена трансформированной задачи

случае также осесимметрично и описывается классическим уравнением теплопроводности в цилиндрической системе координат (3.17) [2.1].
Следуя [3.8], в трансформированной задаче рассмотрены две области I и II, из которых область I представляет собой ограниченный сплошной цилиндр высотой $h_{ок}$, и радиусом $r_{ПТП}$, а область II – полный цилиндр высотой $h_{ок}$ с внутренним радиусом $r_{ПТП}$ и бесконечным наружным радиусом.

Распределение температуры в каждой области описывается функциями $T_I(r, z)$ при $0 \leq r \leq r_{III}$ и $0 \leq z \leq h_{OK}$ и $T_{II}(r, z)$ при $r_{III} \leq r < \infty$ и $0 \leq z \leq h_{OK}$.

Граничные условия на поверхностях пластины имеют следующий вид

– на верхней поверхности:

$$-\chi_{OK} \cdot \frac{\partial T_I(r, z = h_{OK})}{\partial z} = \alpha_{\text{эф}} \cdot (T_{\text{пов.1}} - T_{\text{ос.1}}) \text{ при } 0 \leq r < r_{III}, \quad (3.105)$$

$$-\chi_{OK} \cdot \frac{\partial T_{II}(r, z = h_{OK})}{\partial z} = \alpha_1 \cdot (T_{\text{пов.1}} - T_{\text{ос.1}}) \text{ при } r_{III} \leq r < \infty; \quad (3.106)$$

– на нижней поверхности:

$$-\chi_{OK} \cdot \frac{\partial T_i(r, z = 0)}{\partial z} = \alpha_2 \cdot (T_{\text{пов.2}} - T_{\text{ос.2}}) \text{ при } 0 \leq r < \infty; i = I, II; \quad (3.107)$$

– на общей границе, то есть при $0 \leq z \leq h_{OK}$:

$$T_I(r_{III}, z) = T_{II}(r_{III}, z), \quad (3.108)$$

$$\frac{\partial T_I(r_{III}, z)}{\partial r} = \frac{\partial T_{II}(r_{III}, z)}{\partial r}. \quad (3.109)$$

При переходе к системе безразмерных координат $\rho = r/r_{III}$ и $\zeta = z/h_{OK}$ для текущих значений температуры имеют место следующие выражения:

$$\tilde{T}_I(\rho, \zeta) = (T_I(r, z) - T_{\text{ос.1}}) / (T_{\text{ос.2}} - T_{\text{ос.1}}), \quad (3.110)$$

$$\tilde{T}_{II}(\rho, \zeta) = (T_{II}(r, z) - T_{\text{ос.1}}) / (T_{\text{ос.2}} - T_{\text{ос.1}}), \quad (3.111)$$

$$\tilde{T}_{\text{пов.1}}(\rho, \zeta) = (T_{\text{пов.1}}(r, z) - T_{\text{ос.1}}) / (T_{\text{ос.2}} - T_{\text{ос.1}}), \quad (3.112)$$

$$\tilde{T}_{\text{пов.2}}(\rho, \zeta) = (T_{\text{пов.2}}(r, z) - T_{\text{ос.1}}) / (T_{\text{ос.2}} - T_{\text{ос.1}}), \quad (3.113)$$

при этом $\tilde{T}_{\text{ос.1}} = 0$ и $\tilde{T}_{\text{ос.2}} = 1$. (3.114)

С учетом (3.114) и введенных чисел Био:

$$Bi_{1,h} = \alpha_1 \cdot h_{OK} / \chi_{OK}, Bi_{2,h} = \alpha_2 \cdot h_{OK} / \chi_{OK}, Bi_{\text{эф},h} = \alpha_{\text{эф}} \cdot h_{OK} / \chi_{OK} \quad (3.115)$$

граничные условия (3.105) – (3.109) преобразуются к следующему виду:

$$\frac{\partial \tilde{T}_I}{\partial \zeta}(\rho, 1) = -Bi_{\mathcal{E}\Phi, h} \cdot \tilde{T}_{ПОВ, 1}(\rho, 1) \quad \text{при } 0 \leq \rho < 1, \quad (3.116)$$

$$\frac{\partial \tilde{T}_{II}}{\partial \zeta}(\rho, 1) = -Bi_{1, h} \cdot \tilde{T}_{ПОВ, 1}(\rho, 1) \quad \text{при } 1 \leq \rho < \infty, \quad (3.117)$$

$$\frac{\partial \tilde{T}_i}{\partial \zeta}(\rho, 0) = -Bi_{2, h} \cdot (1 - \tilde{T}_{ПОВ, 2}), \quad i = I, II \quad \text{при } 0 \leq \rho < \infty. \quad (3.118)$$

$$\tilde{T}_I(1, \zeta) = \tilde{T}_{II}(1, \zeta) \quad \text{при } 0 \leq \zeta \leq 1, \quad (3.119)$$

$$\frac{\partial \tilde{T}_I(1, \zeta)}{\partial \rho} = \frac{\partial \tilde{T}_2(1, \zeta)}{\partial \rho} \quad \text{при } 0 \leq \zeta \leq 1. \quad (3.120)$$

Эти граничные условия – неоднородные, но, пользуясь линейностью данной задачи, безразмерные выражения температуры (3.110) и (3.111) представлены в виде таких линейных комбинаций, которые позволили перейти к однородным граничным условиям и применить метод разделения переменных. При этом для области I ($0 \leq \rho \leq 1$), воспользовавшись подстановкой

$$\tilde{T}_I(\rho, \zeta) = \mathfrak{G}_I(\rho, \zeta) + \frac{Bi_{\mathcal{E}\Phi, h} \cdot Bi_{2, h} \cdot (1 - \zeta) + Bi_{2, h}}{Bi_{\mathcal{E}\Phi, h} + Bi_{2, h} + Bi_{\mathcal{E}\Phi, h} \cdot Bi_{2, h}}, \quad (3.121)$$

получены выражения для температуры на торцах сплошного цилиндра ($\rho \leq 1$)

$$\tilde{T}_{ПОВ, 1} = \tilde{T}_I(\rho, 1) = \mathfrak{G}_I(\rho, 1) + (1 + \alpha_{\mathcal{E}\Phi} / \alpha_2 + Bi_{\mathcal{E}\Phi, h})^{-1}, \quad (3.122)$$

$$\tilde{T}_{ПОВ, 2} = \tilde{T}_I(\rho, 0) = \mathfrak{G}_I(\rho, 0) + (1 + Bi_{\mathcal{E}\Phi, h}) \cdot (1 + \alpha_{\mathcal{E}\Phi} / \alpha_2 + Bi_{\mathcal{E}\Phi, h})^{-1}; \quad (3.123)$$

– для области II ($1 \leq \rho < \infty$), воспользовавшись подстановкой

$$\tilde{T}_{II}(\rho, \zeta) = \mathfrak{G}_{II}(\rho, \zeta) + \frac{Bi_{1, h} \cdot Bi_{2, h} \cdot (1 - \zeta) + Bi_{2, h}}{Bi_{1, h} + Bi_{2, h} + Bi_{1, h} \cdot Bi_{2, h}}, \quad (3.124)$$

получены выражения для температуры на торцах полого цилиндра:

$$\tilde{T}_{ПОВ, 1} = \tilde{T}_{II}(\rho, 1) = \mathfrak{G}_{II}(\rho, 1) + (1 + \alpha_1 / \alpha_2 + Bi_{1, h})^{-1}, \quad (3.125)$$

$$\tilde{T}_{ПОВ,2} = \tilde{T}_{II}(\rho,0) = \vartheta_{II}(\rho,0) + (1 + Bi_{1,h}) \cdot (1 + \alpha_1/\alpha_2 + Bi_{1,h})^{-1}, \quad (3.126)$$

Функции температуры в безразмерной форме $\vartheta_I(\rho, \zeta)$ и $\vartheta_{II}(\rho, \zeta)$, удовлетворяют дифференциальному уравнению (3.19) со следующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} - \text{ для области } I \\ (0 \leq \rho < 1): \end{aligned} \quad \left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \vartheta_I}{\partial \zeta}(\rho, 0) &= Bi_{2,h} \cdot \vartheta_I(\rho, 0) \\ \frac{\partial \vartheta_I}{\partial \zeta}(\rho, 1) &= -Bi_{\varphi,h} \cdot \vartheta_I(\rho, 1) \\ \vartheta_I(0, \zeta) & - \text{ограничена} \end{aligned} \right. \quad (3.127)$$

$$\begin{aligned} - \text{ для области } II \\ (1 < \rho < \infty): \end{aligned} \quad \left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \vartheta_{II}}{\partial \zeta}(\rho, 0) &= Bi_{2,h} \cdot \vartheta_{II}(\rho, 0) \\ \frac{\partial \vartheta_{II}}{\partial \zeta}(\rho, 1) &= -Bi_{1,h} \cdot \vartheta_{II}(\rho, 1) \\ \frac{\partial \vartheta_{II}}{\partial \rho}(\rho \rightarrow \infty, \zeta) &\rightarrow 0; \end{aligned} \right. \quad (3.128)$$

На общей границе ($\rho = 1$), где непрерывность перехода из области I в область II обеспечена соотношениями (3.108) и (3.109), преобразование которых привело к таким равенствам сопряжения:

$$\vartheta_I(1, \zeta) + (Bi_{\varphi,h} \cdot (1 - \zeta) + 1) \cdot C_{\varphi-2} = \vartheta_{II}(1, \zeta) + (Bi_{1,h} \cdot (1 - \zeta) + C_{1-2}), \quad (3.129)$$

$$\frac{\partial \vartheta_I(1, \zeta)}{\partial \rho} = \frac{\partial \vartheta_{II}(1, \zeta)}{\partial \rho}, \quad (3.130)$$

$$\text{где } C_{\varphi-2} = Bi_{2,h} \cdot (Bi_{\varphi,h} + Bi_{2,h} + Bi_{\varphi,h} \cdot Bi_{2,h})^{-1} = (1 + \alpha_{\varphi}/\alpha_2 + Bi_{\varphi,h})^{-1},$$

$$C_{1-2} = Bi_{2,h} \cdot (Bi_{1,h} + Bi_{2,h} + Bi_{1,h} \cdot Bi_{2,h})^{-1} = (1 + \alpha_1/\alpha_2 + Bi_{1,h})^{-1}.$$

Решение дифференциального уравнения (3.19), полученное методом разделения переменных [2.1], имеет вид:

$$- \text{ для области } I: \quad \vartheta_I(\rho, \zeta) = R_1(\rho) \cdot Z_1(\zeta), \quad (3.131)$$

$$- \text{ для области } II: \quad \vartheta_{II}(\rho, \zeta) = R_2(\rho) \cdot Z_2(\zeta). \quad (3.132)$$

После подстановки (3.131) в уравнение (3.19) и деления на произведение $R_1(\rho) \cdot Z_1(\xi)$ получается равенство:

$$\left(R_1''(\rho) + \frac{1}{\rho} R_1'(\rho) \right) / R_1(\rho) + (r_{III} / h_{OK})^2 \cdot \frac{Z_1''(\zeta)}{Z_1(\zeta)} = 0, \quad (3.133)$$

откуда с учетом факта, что каждое из слагаемых уравнения (3.133) для области I зависит только от одной переменной, при этом каждое из них не равно нулю, получаются два уравнения, каждое только с одной переменной:

$$R_1''(\rho) + \frac{1}{\rho} \cdot R_1'(\rho) = \lambda^2 \cdot R_1(\rho), \quad (3.134)$$

$$Z_1''(\zeta) = -\lambda^2 \cdot (h_{OK} / r_{III})^2 \cdot Z_1(\zeta) \quad (3.135)$$

с граничными условиями, полученными из (3.127):

$$\begin{cases} Z_1'(0) = Bi_{2,h} \cdot Z_1(0) \end{cases} \quad (3.136)$$

$$\begin{cases} Z_1'(1) = -Bi_{\phi,h} \cdot Z_1(1) \end{cases} \quad (3.137)$$

$$\begin{cases} R_1(0) - \text{ограничена} \end{cases} \quad (3.138)$$

Уравнение (3.134) представляет собой модифицированное уравнение Бесселя, решением которого, вообще говоря, является линейная комбинация модифицированных функций Бесселя первого и второго рода. Однако, учитывая условие (3.138), коэффициент при функции Бесселя второго рода должен быть равен нулю, откуда следует, что решением уравнения (3.134) при этих условиях является модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка

$$R_1(\rho) = I_0(\lambda \cdot \rho), \quad (3.139)$$

а решением уравнения (3.135) является следующая функция:

$$Z_1(\zeta) = c_1 \cdot \cos(\varepsilon \cdot \zeta) + c_2 \cdot \sin(\varepsilon \cdot \zeta), \quad (3.140)$$

где $\varepsilon = \lambda \cdot h_{OK} / r_{III}$.

Подстановка в (3.140) значений коэффициентов c_1 и c_2 , найденных из условий (3.136) и (3.137), приводит к характеристическому трансцендентному уравнению для определения собственных чисел ε_n для области I :

$$\varepsilon_n \cdot ctg(\varepsilon_n) = \frac{\varepsilon_n^2 - Bi_{\varepsilon\phi, h} \cdot Bi_{2, h}}{Bi_{\varepsilon\phi, h} + Bi_{2, h}}, \quad n = 1, 2, 3... \quad (3.141).$$

Подстановкой в формулу (3.131) полученных выражений (3.139) и (3.140) для $R_1(\rho)$ и $Z_1(\zeta)$ находится общее решение для температуры области I , которое представляет собой линейную комбинацию множества фундаментальных решений в виде бесконечного ряда:

$$\vartheta_I(\rho, \zeta) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot I_0(\lambda_n \cdot \rho) \cdot (\cos(\varepsilon_n \cdot \zeta) + \frac{Bi_{2, h}}{\varepsilon_n} \cdot \sin(\varepsilon_n \cdot \zeta)) \quad (3.142)$$

при $0 \leq \rho \leq 1$, $0 \leq \zeta \leq 1$.

Аналогичные рассуждения применены для получения решения для температуры в области II с учетом граничных условий для этой области. Вместо уравнения (3.19) имеем два следующих:

$$R_2''(\rho) + \frac{1}{\rho} R_2'(\rho) = \delta^2 \cdot R_2(\rho), \quad 1 \leq \rho \leq \infty \quad (3.143)$$

$$Z_2''(\zeta) = -\delta \cdot (h_{OK}/r_{III})^2 \cdot Z_2(\zeta), \quad 0 \leq \zeta \leq 1 \quad (3.144)$$

с граничными условиями, полученными из условий (3.128) для области II :

$$Z_2'(0) = Bi_{2, h} \cdot Z_2(0), \quad (3.145)$$

$$Z_2'(1) = -Bi_{1, h} \cdot Z_2(1), \quad (3.146)$$

$$R_2(\infty) \rightarrow 0 \quad (3.147)$$

Уравнение (3.143) представляет собой модифицированное уравнение Бесселя, решением которого, учитывая условие (3.147), является модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка:

$$R_2(\rho) = K_0(\delta \cdot \rho), \quad (3.148)$$

а решением уравнения (3.144) такая функция:

$$Z_2(\zeta) = b_1 \cdot \cos(\psi \cdot \zeta) + b_2 \cdot \sin(\psi \cdot \zeta), \quad (3.149)$$

где $\psi = \delta \cdot h_{OK}/r_{III}$ – собственные числа характеристического трансцендентного уравнения для области II :

$$\Psi_m \cdot \operatorname{ctg}(\Psi_m) = \frac{\Psi_m^2 - Bi_{1,h} \cdot Bi_{2,h}}{Bi_{1,h} + Bi_{2,h}}, m = 1, 2, 3 \dots \quad (3.150)$$

Подстановкой полученных выражений (3.148) и (3.149) для $R_2(\rho)$ и $Z_2(\zeta)$ в формулу (3.132), находится общее решение для температуры области II, которое представляет собой линейную комбинацию множества фундаментальных решений в виде бесконечного ряда:

$$\vartheta_{II}(\rho, \zeta) = \sum_{m=1}^{\infty} B_m \cdot K_0(\delta_m \cdot \rho) \cdot \left(\cos(\Psi_m \zeta) + \frac{Bi_{2,h}}{\Psi_m} \cdot \sin(\Psi_m \zeta) \right) \quad (3.151)$$

для области значений $1 \leq \rho < \infty$ и $0 \leq \zeta \leq 1$.

Коэффициенты ряда A_n и B_m в формулах (3.142) и (3.148) находятся, исходя из условий сопряжения решений на границе областей I и II. Подстановкой этих выражений в (3.129), с учетом ортогональности собственных функций, получаются выражения коэффициентов A_n через коэффициенты B_m :

$$A_n = D_n + \sum_{m=1}^{\infty} (B_m \cdot E_{mn}), \quad (3.152)$$

где
$$D_n = \frac{1}{Z_n} \left(\frac{1}{1 + \alpha_1/\alpha_2 + Bi_{1,h}} - \frac{1}{1 + \alpha_{\text{эф}}/\alpha_2 + Bi_{\text{эф},h}} \right) \times$$

$$\times \left(\frac{\sin \varepsilon_n}{\varepsilon_n} - \frac{Bi_{2,h}}{\varepsilon_n} \cdot \frac{\cos \varepsilon_n - 1}{\varepsilon_n} \right), \quad (3.153)$$

$$E_{mn} = \frac{1}{ZN_n} \cdot 0,5 \cdot K_0(\delta_m) \cdot (E1_{mn} + E2_{mn}), \quad (3.154)$$

где
$$E1_{mn} = \left(1 + \frac{Bi_{2,h}^2}{\Psi_m \varepsilon_n} \right) \cdot \frac{\sin(\Psi_m - \varepsilon_n)}{\Psi_m - \varepsilon_n} + \left(1 - \frac{Bi_{2,h}^2}{\Psi_m \varepsilon_n} \right) \cdot \frac{\sin(\Psi_m + \varepsilon_n)}{\Psi_m + \varepsilon_n},$$

$$E2_{mn} = \frac{Bi_{2,h}}{\Psi_m \cdot \varepsilon_n} \cdot (\cos(\Psi_m - \varepsilon_n) - \cos(\Psi_m + \varepsilon_n));$$

$$ZN_n = 0,5 \cdot I_0(\lambda_n) \cdot \left(\left(1 + \frac{Bi_{2,h}^2}{\varepsilon_n^2} \right) + \left(1 - \frac{Bi_{2,h}^2}{\varepsilon_n^2} \right) \cdot \frac{\sin 2\varepsilon_n}{2\varepsilon_n} + \frac{Bi_{2,h}}{\varepsilon_n} \cdot \frac{1 - \cos 2\varepsilon_n}{\varepsilon_n} \right)$$

Для удовлетворения второго условия сопряжения (3.130) найдены частные производные от $\theta_I(\rho, \zeta)$ и $\theta_{II}(\rho, \zeta)$, которые с учетом равенств $I_0'(x) = -I_1(x)$ и $K_0'(x) = -K_1(x)$, имеют следующие выражения:

$$\frac{\partial \theta_I(\rho, \zeta)}{\partial \rho} = -\sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot \lambda_n \cdot I_1(\lambda_n \cdot \rho) \cdot (\cos(\varepsilon_n \cdot \zeta) + \frac{Bi_{2,h}}{\varepsilon_n} \cdot \sin(\varepsilon_n \cdot \zeta)), \quad (3.155)$$

$$\frac{\partial \theta_{II}(\rho, \zeta)}{\partial \rho} = -\sum_{m=0}^{\infty} B_m \cdot \delta_m \cdot K_1(\delta_m \cdot \rho) \cdot (\cos(\psi_m \cdot \zeta) + \frac{Bi_{2,h}}{\psi_m} \cdot \sin(\psi_m \pm \zeta)), \quad (3.156)$$

где $I_1(\lambda_n \cdot \rho)$ и $K_1(\delta_m \cdot \rho)$ – модифицированные функции Бесселя, соответственно, первого и второго рода первого порядка [3.23].

Подстановкой выражений (3.155) и (3.156) в (3.130), с учетом ортогональности собственных функций, получены выражения коэффициентов B_m через коэффициенты A_n :

$$B_m = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot F_{km} \quad (3.157)$$

где $F_{km} = -(ZM_m)^{-1} \cdot 0,5 \cdot \lambda_k \cdot I_1(\lambda_k) \cdot (F1_{km} + F2_{km}), \quad (3.158)$

где $F1_{km} = \left(1 + \frac{Bi_{2,h}^2}{\psi_m \cdot \varepsilon_K}\right) \cdot \frac{\sin(\psi_m - \varepsilon_K)}{\psi_m - \varepsilon_K} + \left(1 - \frac{Bi_{2,h}^2}{\psi_m \cdot \varepsilon_K}\right) \cdot \frac{\sin(\psi_m + \varepsilon_K)}{\psi_m + \varepsilon_K},$

$$F2_{km} = \frac{Bi_{2,h}}{\psi_m \cdot \varepsilon_K} \cdot (\cos(\psi_m - \varepsilon_K) - \cos(\psi_m + \varepsilon_K)),$$

$$ZM_m = 0,5 \delta_m \cdot K_1(\delta_m) \cdot \left(\left(1 + \frac{Bi_{2,h}^2}{\psi_m^2}\right) + \left(1 - \frac{Bi_{2,h}^2}{\psi_m^2}\right) \cdot \frac{\sin 2\psi_m}{2\psi_m} + \frac{Bi_{2,h}}{\psi_m} \cdot \frac{1 - \cos 2\psi_m}{\psi_m} \right)$$

Подстановкой выражения (3.157) в (3.152), получается алгебраическая система уравнений для определения коэффициентов A_n :

$$A_n = D_n + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot G_{kn}, \quad n = 1, 2, 3... \quad (3.159)$$

где $G_{kn} = \sum_{m=1}^{\infty} F_{km} \cdot E_{mn}$; E_{mn} и F_{km} – согласно формулам (3.154) и (3.158).

Таким образом, находится система алгебраических уравнений:

$$\sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot G_{kn} - A_n = -D_n, \quad (3.160)$$

порядок которой определяется количеством найденных собственных чисел. Это количество диктуется точностью сходимости рядов (3.142) и (3.151) и, как показывают расчеты, зависит от соотношения толщины пластины и радиуса ПТП, а также от коэффициентов теплообмена.

Исходя из того, что сигнал ПТП пропорционален среднему по площади контакта значению теплового потока, рассмотрена плотность среднеинтегрального теплового потока, которая в области I ($0 \leq \rho \leq 1$) определяется интегралом:

$$q_{CP}(z, r) = -\frac{\chi_{OK}}{\pi \cdot r^2} \cdot \int_0^{\rho} \frac{\partial T_1}{\partial z} \cdot 2\pi \cdot r \cdot \partial r, \quad (3.161)$$

а в безразмерных координатах имеет вид:

$$q_{CP}(\zeta, \rho) = -\frac{\chi_{OK}}{\rho^2} \cdot \frac{T_{OC2} - T_{OC1}}{h_{OK}} \int_0^{\rho} \frac{\partial \tilde{T}_1}{\partial \zeta} \cdot 2\rho \cdot \partial \rho. \quad (3.162)$$

С учетом соотношений (3.121), (3.122) и (3.142) функция плотности среднеинтегрального теплового потока преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} q_{CP}(\zeta, \rho) &= \frac{-2\chi_{OK} \cdot (T_{OC2} - T_{OC1})}{\rho^2 \cdot h_{OK}} \cdot \int_0^{\rho} \left(\frac{\partial \vartheta_I}{\partial \zeta} - Bi_{\vartheta\phi,h} \cdot (1 + \alpha_{\vartheta\phi}/\alpha_2 + Bi_{\vartheta\phi,h})^{-1} \right) \cdot \rho \partial \rho = \\ &= \frac{2\chi_{OK} \cdot (T_{OC2} - T_{OC1})}{\rho^2 \cdot h_{OK}} \cdot \left(\int_0^{\rho} Bi_{\vartheta\phi,h} \cdot (1 + \alpha_{\vartheta\phi}/\alpha_2 + Bi_{\vartheta\phi,h})^{-1} \cdot \rho d\rho - \right. \\ &\left. - \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\rho} A_n \cdot I_0(\lambda_n \cdot \rho) \cdot (-\varepsilon_n \cdot \sin(\varepsilon_n \cdot \zeta) + Bi_{2,h} \cdot \cos(\varepsilon_n \cdot \zeta)) \cdot \rho d\rho \right). \quad (3.163) \end{aligned}$$

Путем несложных преобразований с учетом того, что $x \cdot I_0(x) = (x \cdot I_1(x))'$, откуда $\int_0^{\rho} I_0(\lambda_n \rho) \cdot \rho \cdot d\rho = \frac{\rho}{\lambda_n} \cdot I_1(\lambda_n \cdot \rho)$, выражение (3.163) преобразуется к виду:

$$q_{CP}(\zeta, \rho) = \frac{\chi_{OK} \cdot (T_{OC,2} - T_{OC,1})}{h_{OK}} \cdot (Bi_{\varnothing\phi,h} \cdot (1 + \alpha_{\varnothing\phi}/\alpha_2 + Bi_{\varnothing\phi,h}) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\lambda_n \rho} \cdot A_n \cdot I_1(\lambda_n \cdot \rho) \cdot (-\varepsilon_n \cdot \sin(\varepsilon_n \cdot \zeta) + Bi_{2,h} \cdot \cos(\varepsilon_n \cdot \zeta))) \quad (3.164)$$

Измеренная плотность теплового потока равна плотности среднеинтегрального теплового потока по площади, занимаемой ПТП, то есть $q_{CP}(1; 1)$. Следовательно, если учесть формулу (3.101), определяющую плотность входящего (невозмущенного) теплового потока (q_0), отношение измеренной плотности теплового потока через область I ($0 \leq \rho \leq 1$) к исходной плотности теплового потока равно:

$$\frac{q_{ИЗМ}}{q_0} = -K^R \cdot \left(\sum_{n=1}^{\infty} 2A_n \cdot \frac{I_1(\lambda_n)}{\lambda_n} \cdot (-\varepsilon_n \cdot \sin \varepsilon_n + Bi_{2,h} \cdot \cos \varepsilon_n) - Bi_{\varnothing\phi,h} \cdot (1 + \alpha_{\varnothing\phi}/\alpha_2 + Bi_{\varnothing\phi,h})^{-1} \right), \quad (3.165)$$

$$\text{где } K^R = \frac{R_{\Sigma}}{h_{OK}/\chi_{OK}} = \frac{1}{Bi_{1,h}} + \frac{1}{Bi_{2,h}} + 1. \quad (3.166)$$

Алгоритм отыскания отношения плотности искаженного теплового потока к действительной плотности состоит в следующем: из решения уравнений (3.122) и (3.123) определяют собственные числа ε_n ; решением системы алгебраических уравнений (3.159) находят коэффициенты A_n ряда; по формулам (3.165) с учетом (3.166) находят отношение значений измеренной ПТП и действительной плотности среднеинтегрального теплового потока.

В связи с необходимостью знать размер зоны влияния ПТП здесь введено число Био с характерным геометрическим

размером – радиусом ПТП: $Bi_{i,r} = \alpha_i \cdot r_{ПТП} / \chi_{ОК}$ ($i=1, 2$), который связан с критерием $Bi_{i,h}$ соотношением:
 $Bi_{i,r} = Bi_{i,h} \cdot (r_{ПТП} / h_{ОК})$.

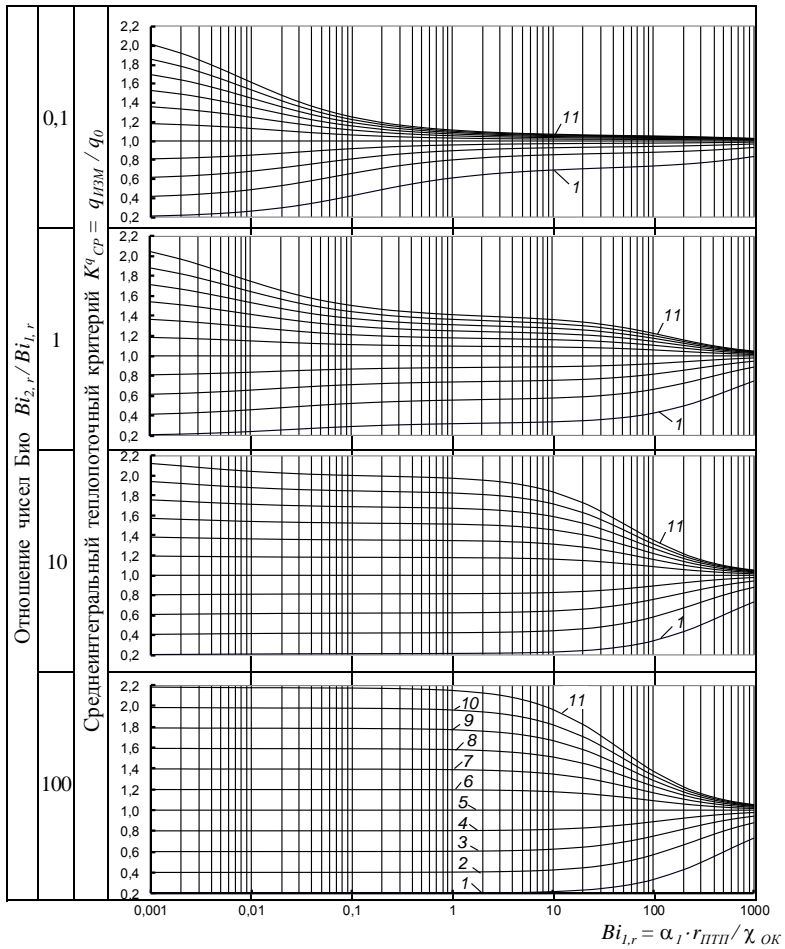
Отношение теплового сопротивления пластины конвективному теплообмену с ОС в отсутствие ПТП к суммарному тепловому сопротивлению пластины с ПТП находится с учетом (3.104) из следующего выражения:

$$R_{\alpha_1, ОК} / (R_{\alpha_1, ПТП} + R_{ПТП}) = \alpha_{\varphi} / \alpha_1. \quad (3.167)$$

В результате вычислительного эксперимента получены представленные на рисунках 3.37 – 3.39 семейства графиков зависимостей отношения измеренного и действительного значений плотности среднеинтегрального теплового потока (то есть среднеинтегрального теплоточного коэффициента K_{CP}^q) от числа Био $Bi_{i,r}$ при фиксированных значениях относительной толщины ОК: $h_{ОК} / r_{ПТП} = 10^{-2}$; 10^{-1} и 1 и вариации отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{\varphi} / \alpha_1$ в диапазоне значений от 0,2 до 2,2 и отношения чисел Био $Bi_{2,r} / Bi_{1,r}$ в диапазоне от 0,1 до 100.

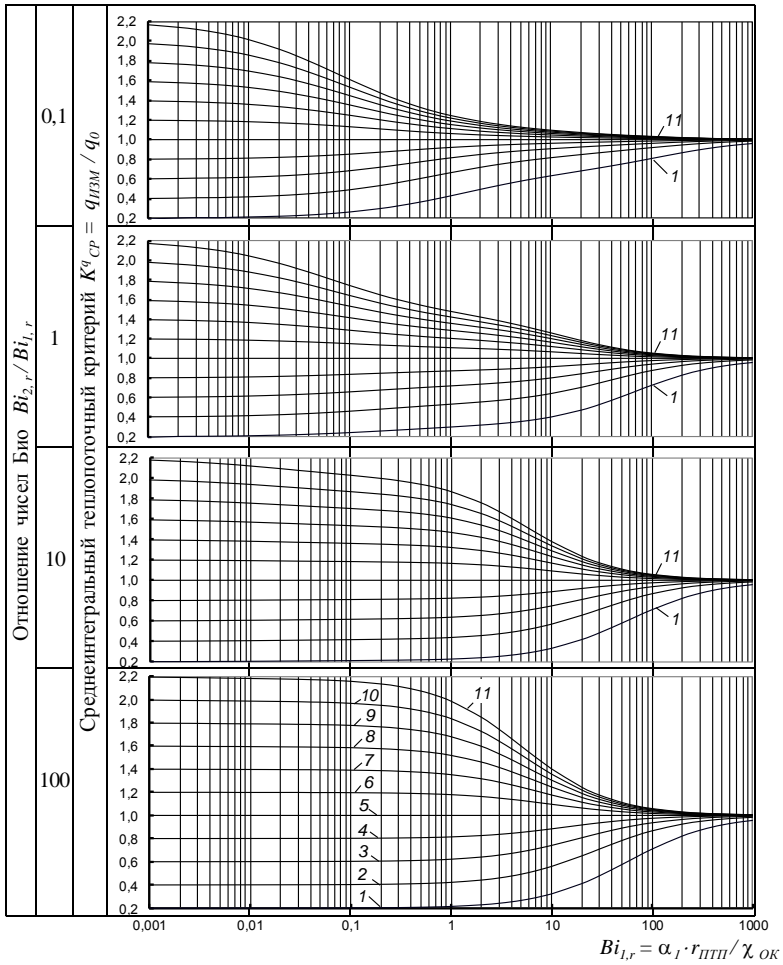
Из анализа этих графиков следует, что основное влияние на погрешность измерения оказывает тепловое сопротивление ПТП. Крепление ПТП желательно проводить с той стороны, где коэффициент теплообмена меньше, так как в этом случае зона с меньшими погрешностями несколько расширяется. И, наконец, увеличение радиуса ПТП приводит к увеличению числа $Bi_{1,r}$ и, как следствие, к уменьшению погрешности измерения.

Для определения радиуса чувствительного элемента, а также расстояния, на каком должны быть установлены два ПТП, не оказывая при этом взаимного влияния, необходимо знать распространение искажения локальных температуры и плотности теплового потока на поверхности $z = h_{ОК}$.



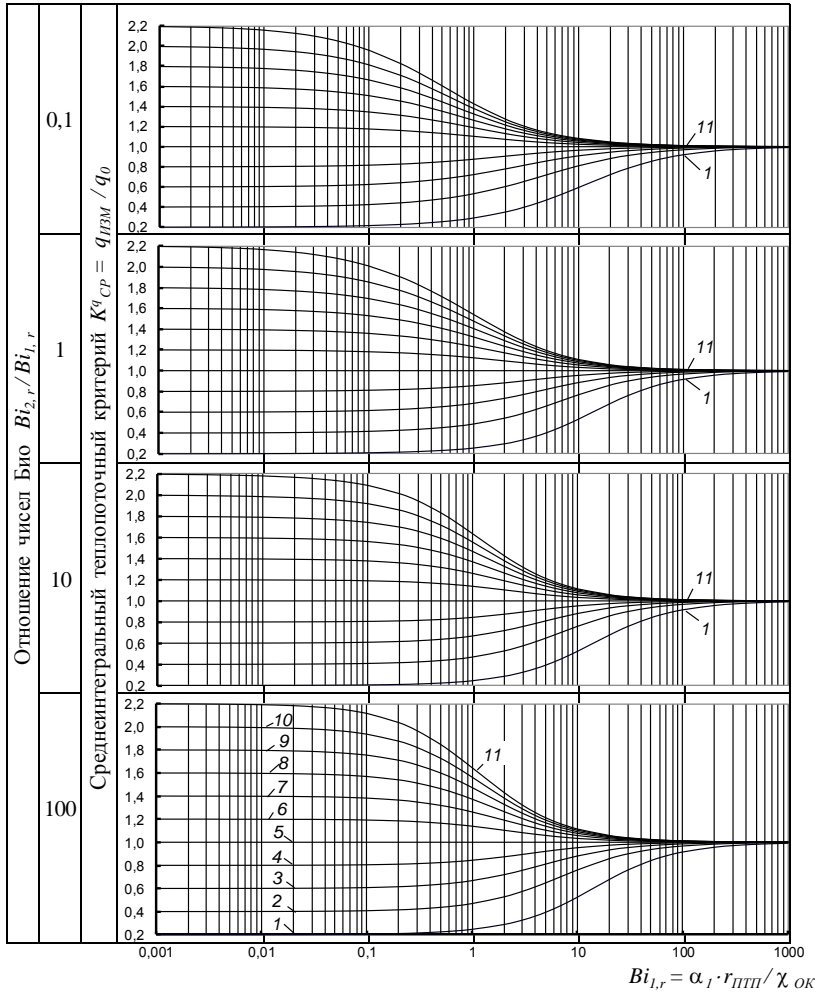
1 – $\alpha_{3\phi} / \alpha_1 = 0,2$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – 1,0; 6 – 1,2; 7 – 1,4; 8 – 1,6; 9 – 1,8; 10 – 2,0; 11 – 2,2

Рис. 3.37. Зависимости среднеинтегрального теплоточного критерия K^q_{CP} от числа Био $Bi_{1,r}$ при фиксированном значении $h_{OK} / r_{ПТП} = 0,01$ и вариации отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{3\phi} / \alpha_1$ и отношения чисел Био $Bi_{2,r} / Bi_{1,r}$



1 – $\alpha_{\phi}/\alpha_1=0,2$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – 1,0; 6 – 1,2; 7 – 1,4; 8 – 1,6;
 9 – 1,8; 10 – 2,0; 11 – 2,2

Рис. 3.38. Зависимости среднеинтегрального теплоточного критерия K_{CP}^q от числа Био $Bi_{1,r}$ при фиксированном значении $h_{OK}/r_{III} = 0,1$ и вариации отношения коэффициентов теплообмена α_{ϕ}/α_1 и отношения чисел Био $Bi_{2,r}/Bi_{1,r}$



1 – $\alpha_{3\phi}/\alpha_1=0,2$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – 1,0; 6 – 1,2; 7 – 1,4; 8 – 1,6;
 9 – 1,8; 10 – 2,0; 11 – 2,2

Рис. 3.39. Зависимости среднеинтегрального теплоточного критерия K^q_{CP} от числа Био $Bi_{1,r}$ при фиксированном значении $h_{OK}/r_{ППП} = 1$ и вариации отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{3\phi}/\alpha_1$ и отношения чисел Био $Bi_{2,r}/Bi_{1,r}$

Функция локальной безразмерной температуры на поверхности с координатой $\zeta = 1$ для области I ($\rho \leq 1$) находится по формуле (3.122) при значении $\zeta = 1$, которая с учетом формулы (3.142) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \tilde{T}(\rho < 1, 1) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot I_0(\lambda_n \cdot \rho) \cdot \left(\cos \varepsilon_n + \frac{Bi_{2,h}}{\varepsilon_n} \cdot \sin \varepsilon_n \right) + \\ + \left(1 + \alpha_{\varepsilon\phi} / \alpha_2 + Bi_{\varepsilon\phi,h} \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (3.168)$$

Аналогично для поверхности $z = h_{OK}$ области II ($\rho \geq 1$) функция локальной безразмерной температуры, найденная по формуле (3.125), с учетом формулы (3.151), имеет вид:

$$\begin{aligned} \tilde{T}(\rho \geq 1, 1) = \sum_{m=1}^{\infty} B_m \cdot K_0(\delta_m \cdot \rho) \cdot \left(\cos \psi_m + \frac{Bi_{2,h}}{\psi_m} \cdot \sin \psi_m \right) + \\ + \left(1 + \alpha_1 / \alpha_2 + Bi_{\varepsilon\phi,h} \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (3.169)$$

а локальная плотность теплового потока на поверхности пластины при $\zeta = 1$ определяется по формулам:

– для области I ($0 \leq \rho \leq 1$):

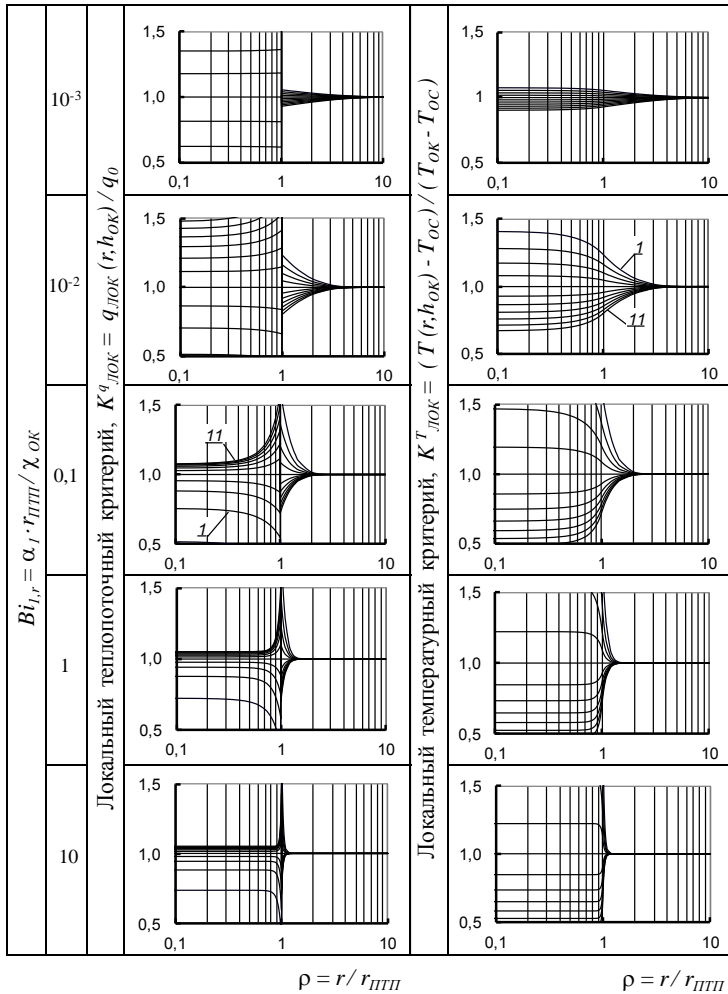
$$\begin{aligned} \frac{q_{ЛОК,I}(\rho, 1)}{q_0} = -K^R \cdot \left(\sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot I_0(\lambda_n \rho) \cdot \left(-\varepsilon_n \sin \varepsilon_n + Bi_{2,h} \cdot \cos \varepsilon_n \right) - \right. \\ \left. - Bi_{\varepsilon\phi,h} \cdot \left(1 + \alpha_{\varepsilon\phi} / \alpha_2 + Bi_{\varepsilon\phi,h} \right)^{-1} \right); \end{aligned} \quad (3.170)$$

– для области II ($1 \leq \rho < \infty$):

$$\begin{aligned} \frac{q_{ЛОК,II}(\rho, 1)}{q_0} = -K^R \cdot \left(\sum_{m=1}^{\infty} A_m \cdot K_0(A_m \rho) \cdot \left(-\psi_m \sin \psi_m + Bi_{2,h} \cdot \cos \psi_m \right) - \right. \\ \left. - Bi_{1,h} \cdot \left(1 + \alpha_1 / \alpha_2 + Bi_{1,h} \right)^{-1} \right), \end{aligned} \quad (3.171)$$

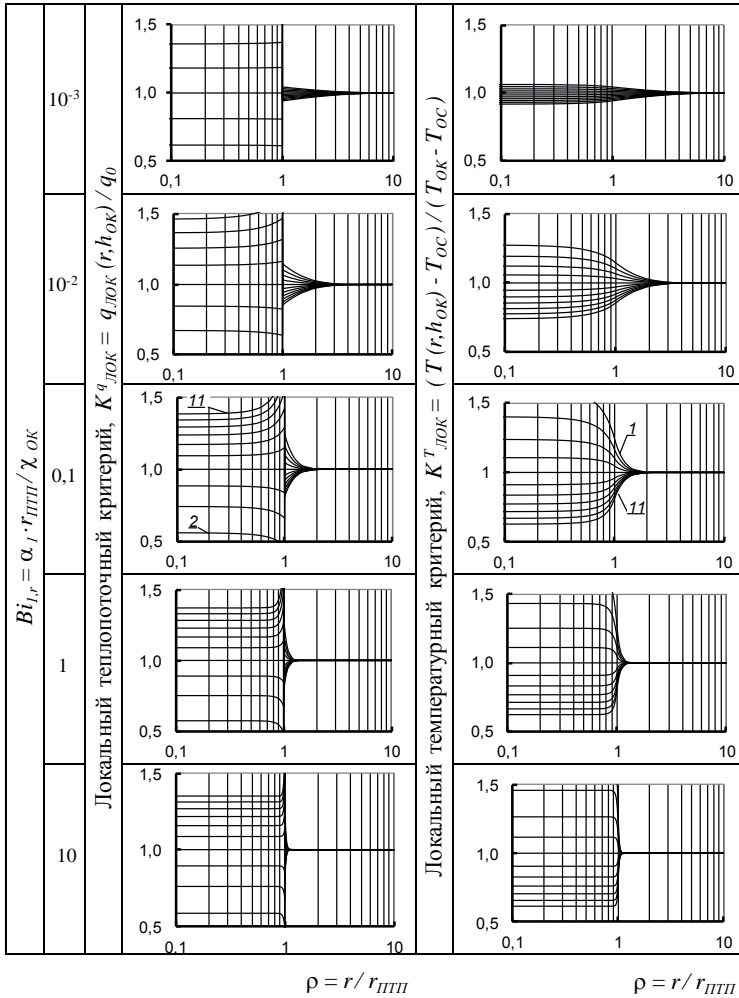
где K^R – по формуле (3.166).

На рисунках 3.40 – 3.45 систематизированы результаты расчетов локальной температуры в безразмерной форме по формулам (3.168) и (3.169), а также локальной плотности теплового потока по формулам (3.170) и (3.171).



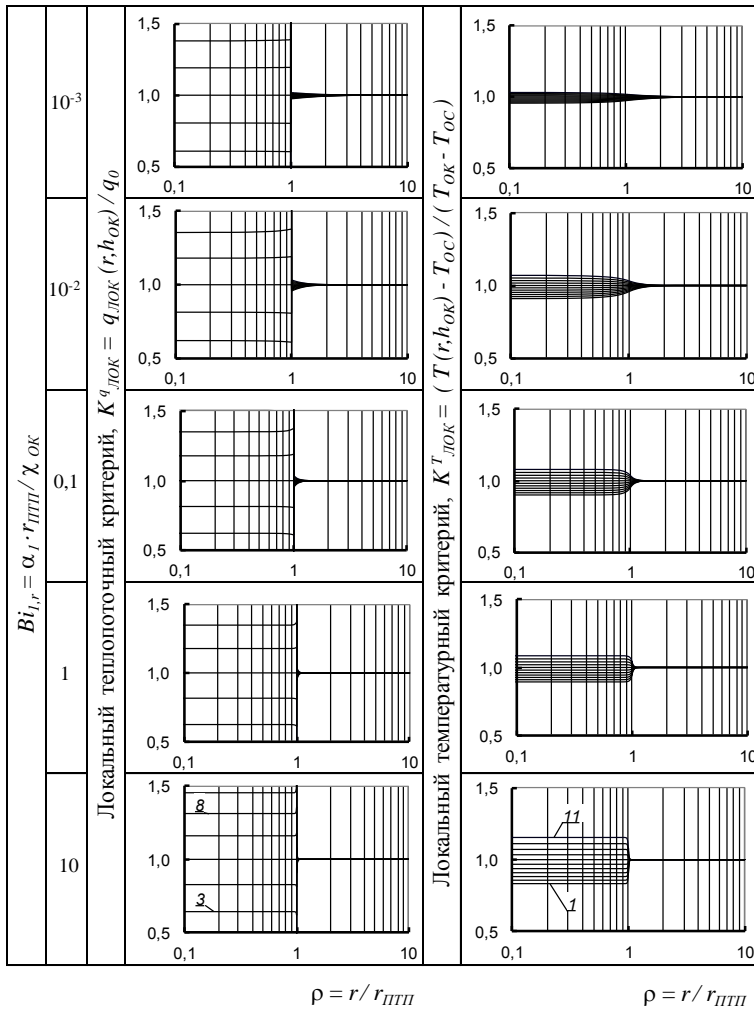
1 – $\alpha_{\text{э}\phi} / \alpha_1 = 0,2$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – 1,0; 6 – 1,2; 7 – 1,4; 8 – 1,6;
 9 – 1,8; 10 – 2,0; 11 – 2,2

Рис. 3.40. Характер распространения на поверхности ОК в радиальном направлении искажений локальной плотности теплового потока и локальной температуры, при относительной толщине ОК $h_{\text{OK}} / r_{\text{ППП}} = 0,01$ для фиксированного отношения чисел Био $Bi_{2,h} / Bi_{1,h} = 0,1$ при вариации числа Био $Bi_{1,r}$ и отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{\text{э}\phi} / \alpha_1$



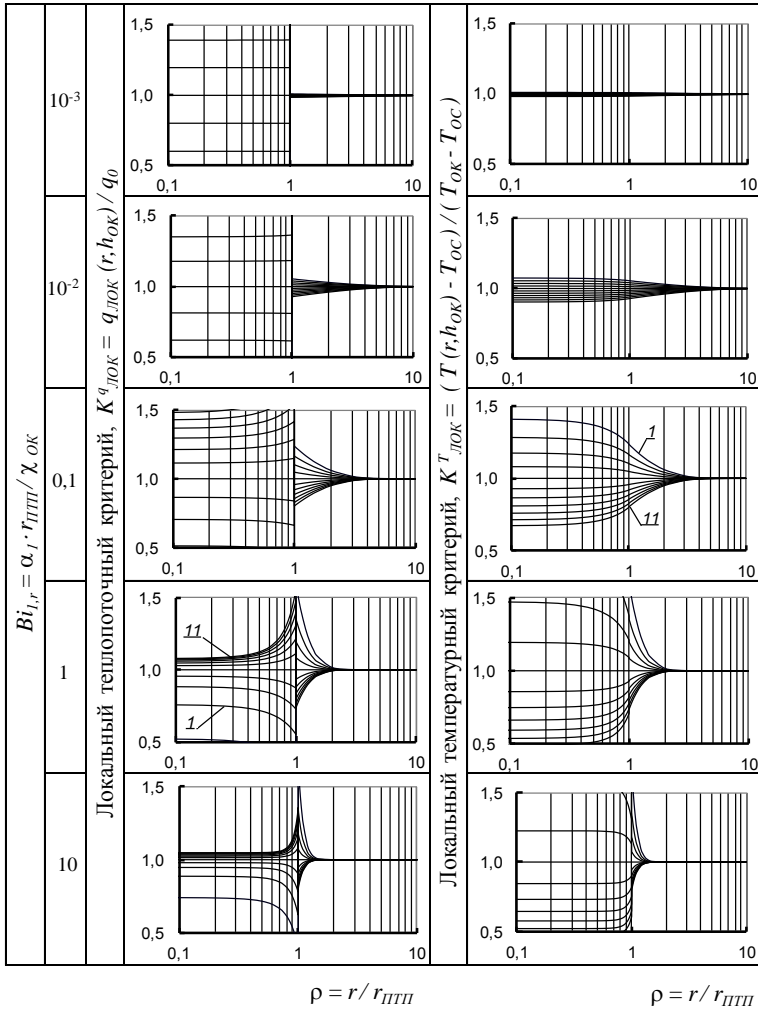
1 – $\alpha_{2Ф}/\alpha_1=0,2$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – 1,0; 6 – 1,2; 7 – 1,4; 8 – 1,6;
 9 – 1,8; 10 – 2,0; 11 – 2,2

Рис. 3.41. Характер распространения на поверхности ОК в радиальном направлении искажений локальной плотности теплового потока и локальной температуры, при относительной толщине ОК $h_{OK}/r_{ППП}=0,01$ для фиксированного отношения чисел Био $Bi_{2,h}/Bi_{l,h}=1$ при вариации числа Био $Bi_{l,r}$ и отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{2Ф}/\alpha_1$



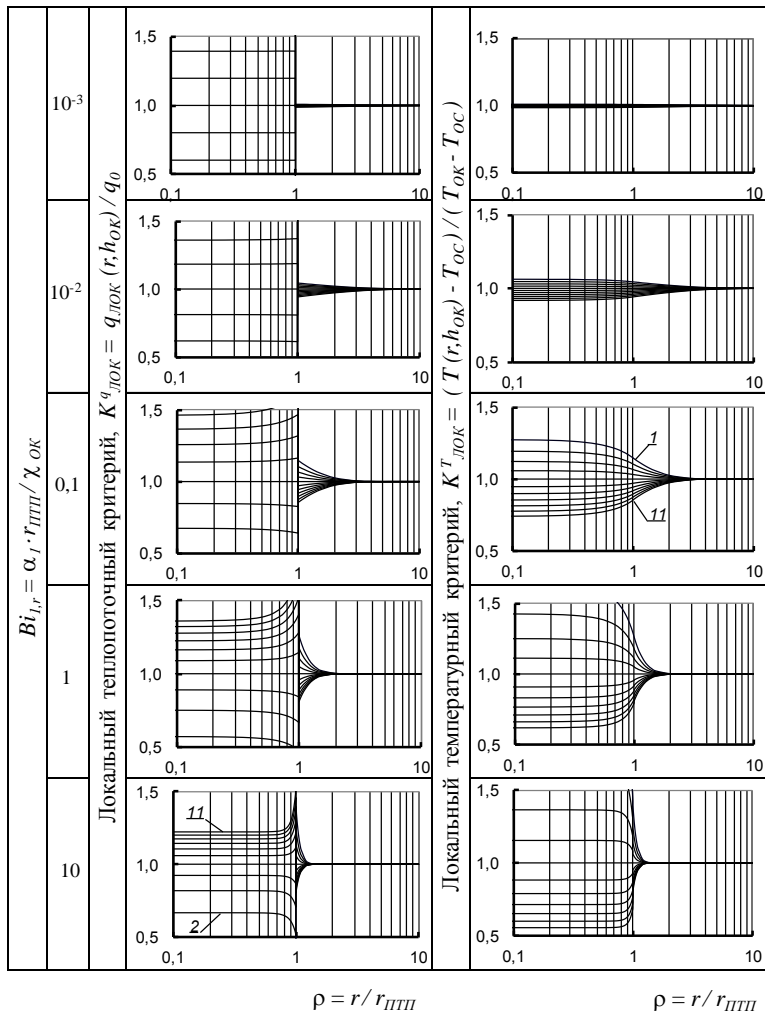
1 – $\alpha_{\text{эф}}/\alpha_1=0,2$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – 1,0; 6 – 1,2; 7 – 1,4; 8 – 1,6;
 9 – 1,8; 10 – 2,0; 11 – 2,2

Рис.3.42. Характер распространения на поверхности ОК в радиальном направлении искажений локальной плотности теплового потока и локальной температуры, при относительной толщине ОК $h_{\text{ок}}/r_{\text{ППП}}=0,01$ для фиксированного отношения чисел Био $Bi_{2,h}/Bi_{1,h}=10$ при вариации числа Био $Bi_{1,r}$ и отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{\text{эф}}/\alpha_1$



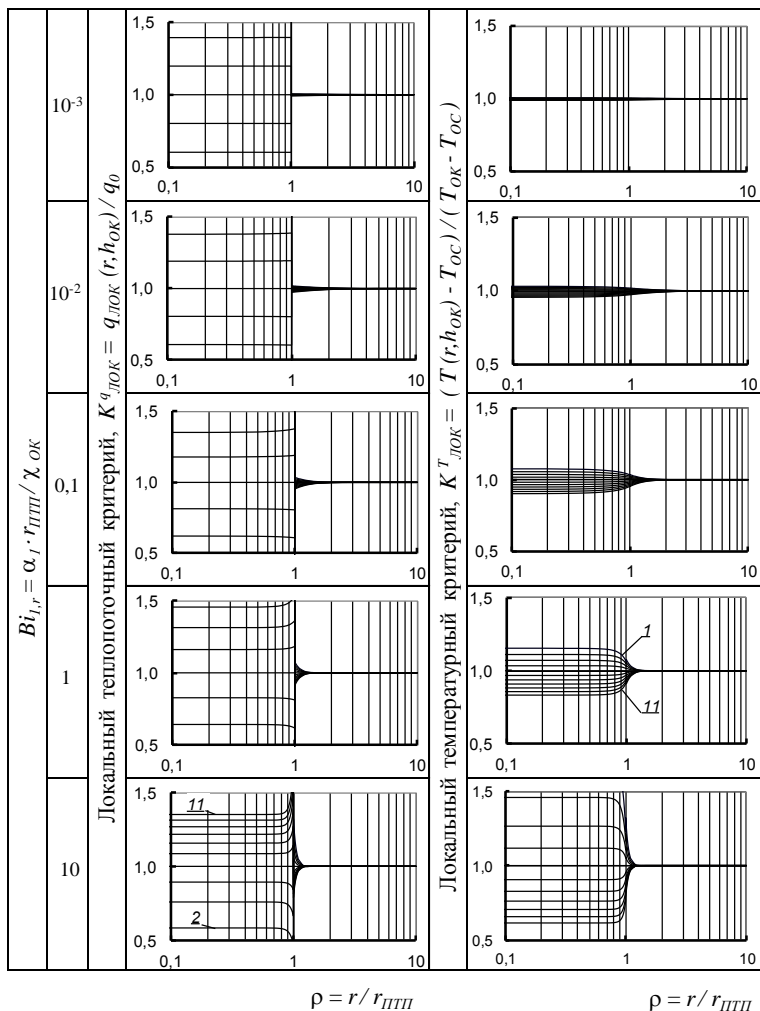
1 – $\alpha_{\text{эФ}} / \alpha_1 = 0,2$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – 1,0; 6 – 1,2; 7 – 1,4; 8 – 1,6; 9 – 1,8; 10 – 2,0; 11 – 2,2

Рис. 3.43. Характер распространения на поверхности ОК в радиальном направлении искажений локальной плотности теплового потока и локальной температуры, при относительной толщине ОК $h_{OK} / r_{III} = 0,1$ для фиксированного отношения чисел Био $Bi_{2,h} / Bi_{1,h} = 0,1$ при вариации числа Био $Bi_{1,r}$ и отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{\text{эФ}} / \alpha_1$



1 – $\alpha_{\text{эФ}}/\alpha_1=0,2$; 2 – 0,4; 3 – 0,6; 4 – 0,8; 5 – 1,0; 6 – 1,2; 7 – 1,4; 8 – 1,6;
 9 – 1,8; 10 – 2,0; 11 – 2,2

Рис. 3.44. Характер распространения на поверхности ОК в радиальном направлении искажений локальной плотности теплового потока и локальной температуры, при относительной толщине ОК $h_{\text{ОК}}/r_{\text{ППП}}=0,1$ для фиксированного отношения чисел Био $Bi_{2,h}/Bi_{1,h}=1$ при вариации числа Био $Bi_{1,r}$ и отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{\text{эФ}}/\alpha_1$



1 – $\alpha_{\text{эФ}} / \alpha_1 = 0.2$; 2 – 0.4; 3 – 0.6; 4 – 0.8; 5 – 1.0; 6 – 1.2; 7 – 1.4; 8 – 1.6; 9 – 1.8; 10 – 2.0; 11 – 2.2

Рис. 3.45. Характер распространения на поверхности ОК в радиальном направлении искажений локальной плотности теплового потока и локальной температуры, при относительной толщине ОК $h_{OK} / r_{III} = 0,1$ для фиксированного отношения чисел Био $Bi_{2,h} / Bi_{1,h} = 10$ при вариации числа Био $Bi_{1,r}$ и отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{\text{эФ}} / \alpha_1$

Представленные графики позволяют сделать вывод о необходимости подбора ПТП таким образом, чтобы радиус его чувствительного элемента составлял не более 0,7 радиуса ПТП. Это обеспечивает измерение в зоне, где практически отсутствуют искажения полей температуры и теплового потока. Глубина распространения влияния ПТП на соседние зоны в худшем случае составляет не более пяти радиусов ПТП.

Таким образом, при проектировании ПТП следует учитывать, что при размещении ПТП на ОК различных типов имеют место искажения теплового и температурного полей как в ПТП, так и ОК, являющиеся причиной неидентичности значения измеренной плотности теплового потока и ее действительного значения. Для уменьшения различия между этими значениями необходимо следовать рекомендациям, сформулированным в этой главе.

Литература к главе 3

3.1 *Каганов М. А.* О точности измерения тепловых потоков с помощью тепломеров / М. А. Каганов, Ю. Л. Розеншток // Инженерно-физический журнал. – 1960. – Т. 3, № 3. – С. 138-142.

3.2 *Каганов М. А.* Теоретические основы применения тепломеров для измерения тепловых потоков в почве и в толще снежного ледяного покрова / М. А. Каганов, Ю. Л. Розеншток // Приборы и методы наблюдений : труды Всесоюз. метеорологического совещания. – Л. : Гидрометеорологическое из-во, 1963. – Т. IX. – С. 108-114.

3.3 *Ландау Л. Д.* Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Физматгиз, 1959. – 532 с.

3.4 *Герашенко О. А.* Особенности применения датчиков теплового потока / О. А. Герашенко, В. Г. Карпенко, Ю. М. Чимисов // Тепло- и массоперенос. – Том 7. – Физические параметры тепло- и массопереноса – Минск : Наука и техника, 1968. – С. 274-278.

3.5 *Геращенко О. А.* Учет влияния термического сопротивления датчика при измерении конвективных тепловых потоков / О. А. Геращенко, В. Г. Карпенко, Ю. М. Чимисов // Конвективный теплообмен. – Киев : Наукова думка, 1968. – С. 139-146.

3.6 *Чудновский А.Ф.* Теплофизика почв / А. Ф. Чудновский. – М. : Наука, 1976. – 353 с.

3.7 *Михайлов А. И.* Тепломер конечной толщины / А. И. Михайлов, С. Г. Платонова // Инженерно-физический журнал. – 1979. – Т. 37, № 5. – С. 835-842.

3.8 *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.

3.9 *Грищенко Т. Г.* Особенности использования тепломера в приборах для определения теплопроводности / Т. Г. Грищенко // Инж.-физ. журнал. – 1981. – Т. 40, № 6. – С. 1055-1061.

3.10 *Ярышев Н. А.* Влияние теплопроводности и размеров тепломера на точность измерения теплового потока / Н. А. Ярышев, Н. Н. Заровная, Т. В. Смирнова // Инж.-физ. журнал. – 1988. – Т. 55, № 5. – С. 847-853.

3.11 *Ярышев Н. А.* Погрешность измерения стационарного теплового потока на поверхности тела / Н. А. Ярышев, Т. В. Смирнова, Н. Н. Заровная // Инж.-физ. журнал. – 1989. – Т. 57, № 4. – С. 667-674.

3.12 *Apthorp D. M.* Modelling of Heat Flux Distortion Around Heat Flux Sensors / D. M. Apthorp, T. P. Bligh : Edited by E. Bales, M. Bomberg, G. E. Courville // Building Applications of Heat Flux Transducers, ASTM STP 885. – ASTM, 1985. – P. 45-64.

3.13 *Flanders S. N.* Heat Flow Sensors on Walls – What Can We Learn? – S. N. Flanders : Edited by E. Bales, M. Bomberg, G. E. Courville // Building Applications of Heat Flux Transducers, ASTM STP 885. – ASTM, 1985. – P. 140-157.

3.14 *Trethowen H. A. Engineering Application of Heat Flux Sensors in Buildings – The Sensor and Its Behavior / H. A. Trethowen : Edited by E. Bales, M. Bomberg, G. E. Courville // Building Applications of Heat Flux Transducers, ASTM STP 885. – ASTM, 1985. – P. 9-24.*

3.15 *Trethowen H. A. Measurement Errors with Surface-mounted Heat Flux Sensors / H. A. Trethowen // Building and Environment. – 1986. – Vol. 21, № 1. – P. 41-56.*

3.16 *Standeard P. Numerical Analysis of Operational Errors with Surface – mounted Heat Flux Sensors, Report of Research by the Direction of Prime Minister’s Service. Policy of Science National Program of Energy, Belgium, 1987.*

3.17 *Van der Graaf F. Research in Calibration and Application Errors of Heat Flux Sensors / F. van der Graaf // Building Applications of Heat Flux Transducers, ASTM STP 885. – Philadelphia : ASTM, 1985. – P. 79-96.*

3.18 *Van der Graaf F. Heat Flux Sensor / F. van der Graaf // Thermal Sensors. VCH Verlagsgesellschaft mbh.– Weinheim, FRG. –1989. – Chapter 8, Vol. 4. – 28p.*

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

3.20 *Визначення теплових потоків крізь огорожувальні конструкції (Определение теплового потока через ограждающие конструкции) : Методика М 00013184.5.023-01 / Розробники: Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша [та ін.] // Нормативний документ. Держком України з енергозбереження та Держком України з будівництва та архітектури. – К. : ЛОГОС, 2002. – 131 с. – (На українській та російській мовах).*

3.21 *Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения: РМГ 29-99 [Введен в действие 01.01.2001] // Збірник нормативно-правових актів України та організаційно-методичних документів з питань метрології. – К. : Держстандарт України,*

2002. – С. 195-246. (Рекомендации по межгосударственной стандартизации).

3.22 *Грищенко Т. Г.* Теплометрический экспресс-метод и прибор для определения коэффициента теплопроводности : дис. ... канд. техн. наук / Грищенко Татьяна Георгиевна. – Киев, 1977. – 198 с.

3.23 *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.

3.24 *Исаев С. И.* Теория тепломассообмена : учебник для вузов / С. И. Исаев, И. А. Кожин, В. И. Кофанов ; ред. А.И. Леонтьева. – Москва : Высшая школа, 1979. – 495 с.

3.25 *Декуша Л. В.* Измерение стационарного теплового потока, проходящего через бесконечную пластину по обе стороны, которой происходит конвективный теплообмен / Л. В. Декуша, Т. В. Менделеева // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2007. – Т. 29, № 2. – С. 88-96. – ISSN 0204-3602.

ГЛАВА 4 ПТП ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ В УСЛОВИЯХ СТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ

Для теплометрирования объектов в стационарном тепловом состоянии как в бывшем СССР, так и за рубежом широко распространены термоэлектрические многоэлементные (батареи) ПТП [см. приложение А] [2.123, 2.137–2.148], в частности, биметаллические ПТП с использованием для их изготовления технологии электролитического осаждения металлов [4.1– 4.3]. При этом с 1998 г. для пользователей Украины и бывшего СССР являются действующими аутентичные стандарты: национальный в Украине [2.150] и межгосударственный в СНГ [2.151] на общие технические условия, распространяющиеся на традиционные термоэлектрические биметаллические ПТП вида вспомогательной стенки.

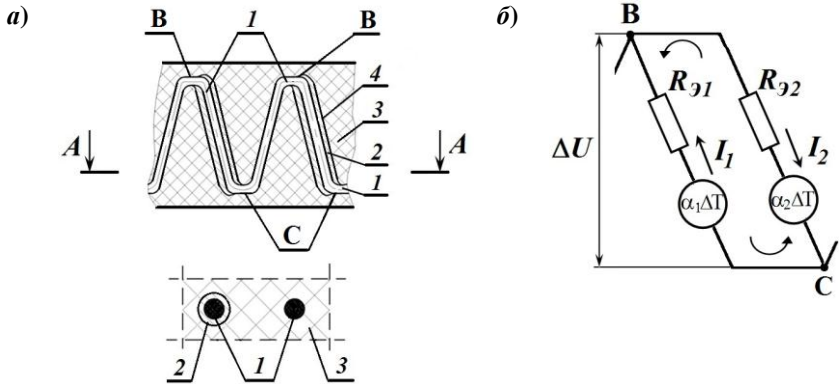
4.1 Характеристики и параметры стандартного биметаллического ПТП и расчетные методики

Традиционный термоэлектрический биметаллический батарейный ПТП выполняют из спирали идентичных термоэлементов, изготовленных по гальванической технологии и залитых связующим электроизоляционным компаундом для придания ПТП монолитной формы (см. § 2.3.3, рис. 2.39 – 2.41). Принципиальная схема батареи гальванического ПТП (а) и эквивалентная электрическая схемы биметаллического термоэлектрода (б) приведены на рисунке 4.1.

Полувиток 2, являющийся биметаллическим термоэлектродом, представляет собой замкнутый контур, в котором при наличии разности температуры между спаями А и Б появляется электрический ток и между узлами А и Б возникает ТЭДС, пропорциональная проходящему тепловому потоку. Полувитки чистой термоэлектродной проволоки выполняют в термобатарее коммутационные функции.

Материалов, из которых может быть изготовлен термо-

электрический ПТП, обеспечивающих широкий диапазон значений его выходных характеристик, достаточно много [5*, 2.112, 2.150, 2.151, 4.4 – 4.10].



1 – основной термоэлектрод (полувиток несущей термоэлектродной проволоки); 2 – гальваническое покрытие; 3 – заливочный электроизоляционный компаунд; 4 – биметаллический термоэлектрод (полувиток несущей проволоки, покрытой парным термоэлектрическим материалом)
 В, С – спаи термоэлемента

Рис. 4.1. Схемы термоэлектрического биметаллического батарейного ПТП: *а* – принципиальная схема батареи термоэлементов; *б* – эквивалентная электрическая схема биметаллического термоэлектрода

Наиболее используемыми при изготовлении ПТП являются материалы, указанные в таблице 4.1, среди которых самыми распространенными являются пары константан-медь, копель-медь и нихром-никель. Учитывая только требования к диапазону возможных рабочих значений температуры, ПТП можно изготавливать из различных термоэлектрических материалов. Если для области наиболее распространенных значений температуры от 250 К до 450 К годится любая из приведенных в табл. 4.1 пар термоэлектродов, то для области низких и криогенных значений (менее 250 К) целесообразно применять пары, в которых для гальванического покрытия использованы медь или серебро, а для высоких значений температуры (от 460 К до 660 К) – железо или никель.

Таблица 4.1. Характеристики термоэлектрических материалов для различных типов ПТП (при температуре 273 К)

Тип ПТП по ДСТУ 3576 (ГОСТ 3069) [2.150, 2.151]	Чувствительность, мВ/К	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)		Удельное электрическое сопротивление, Ом·м		
		$\alpha_1 - \alpha_2$	χ_1		χ_2	ρ_1
Наименование типа ¹⁾ Условное обозначение						
Константан – медный	11	0,03874 [4.4]	22,1 [4.6]	403 [4.7]	0,483 [4.8]	0,0159 ³⁾ [4.9]
Константан – серебряный	12	0,03842 [4.4]	22,1 [4.6]	429 [4.7]	0,483[2.123]	0,0149 [4.9]
Константан – железный	13	0,05037 [4.4]	22,1 [4.6]	74,7 [4.7]	0,483[2.123]	0,0890 [4.8]
Константан – никелевый	18	0,01975 ²⁾ [4.4]	22,1 [4.8]	94,1 [4.7]	0,483[2.123]	0,0614 [4.8, 4.10]
Копель – медный	21	0,04310 [4.5]	22,1 [4.6]	403 [4.7]	0,504[2.123]	0,0159 ⁴⁾ [4.9]
Копель – серебряный	22	0,04278 [6*, 4.5]	22,1 [4.6]	429 [4.7]	0,504[2.123]	0,0149 [4.9]
Копель – железный	23	0,05473 [4.4, 4.5]	22,1 [4.6]	74,7 ³⁾ [4.7]	0,504[2.123]	0,890 [4.8]
Копель – никелевый	28	0,05056 ²⁾	22,1 [4.6]	94,1 [4.7]	0,504[2.123]	0,0614 [4.8, 4.10]
Нихром – никелевый	31	0,02030 ²⁾	12,8 [4.6]	94,1 [4.7]	1,03 [4.8]	0,0614 [4.8, 4.10]
Хромель – никелевый	41	0,03760 ²⁾	16,0 [4.6]	94,1 [4.7]	0,79 [5*]	0,0614 [4.8, 4.10]

Примечания: 1) первым указан материал основного термоэлектрода (несущей проволоки), вторым – материал гальванического покрытия;

2) данные получены в отделе теплотометрии ИТГФ НАН Украины;

3) значения приведены для железа Армо, так как при гальваническом железнении осаждается не химически чистое железо, а железо с малыми примесями углерода [4.11]

4) данные приведены для гальванически осажденной меди

В качестве заливочного электроизоляционного материала, как правило, используются эпоксидные компаунды для ПТП, предназначенных для применения при умеренных и низких значениях температуры. Украинский полимер – для ПТП с термостойкостью до 500 К, цементы и эмали – для обеспечения термостойкости ПТП до 1000 К.

Основной метрологической характеристикой ПТП является индивидуальная статическая функция преобразования – зависимость значений генерируемого конкретным ПТП измеряемого электрического сигнала (E) от значений определяемого теплового потока (Φ) или плотности теплового потока (q) в установившемся тепловом состоянии [2.150, 2.151].

Определяемые значения теплового потока и плотности теплового потока при линейном характере функции преобразования вычисляют по формулам:

$$\Phi = E/S_{\phi} = K_{\phi} \cdot E, \quad (4.1)$$

$$q = E/S_q = K_q \cdot E, \quad (4.2)$$

где S_{ϕ} – чувствительность ПТП по тепловому потоку, мВ/Вт;

S_q – чувствительность ПТП по плотности теплового потока, мВ/(Вт/м²);

K_{ϕ} – константа ПТП по тепловому потоку (или коэффициент преобразования), Вт/мВ;

K_q – константа ПТП по плотности теплового потока (или коэффициент преобразования), Вт/(м²·мВ).

Индивидуальную статическую характеристику ПТП, которую находят, как правило, по результатам эксперимента (при аттестации ПТП), называют оцененной характеристикой. В практике теплоточных измерений наиболее часто применяют термин «коэффициент преобразования», связанный с чувствительностью соотношениями:

$$K_{\phi} = 1/S_{\phi}, \quad (4.3)$$

$$K_q = 1/S_q. \quad (4.4)$$

К выходным характеристикам ПТП, кроме основной (индивидуальной функции преобразования), отнесены его задаваемые размеры (высота h и площадь A), а также электрическое сопротивление R_3 , коэффициент эффективной теплопроводности χ или тепловое сопротивление $R (R = h/\chi)$, теплоемкость C и инерционность (τ^*). Согласно стандартам [2.150, 2.151] инерционность ПТП характеризуется временем реакции ПТП τ_N в секундах по уровню N . Уровень N – это промежуток времени от начала воздействия стационарного теплового потока до момента достижения сигналом ПТП значения $E = N \cdot E_{уст}$, где $E_{уст}$ – значение сигнала ПТП в установившемся состоянии, то есть $N = E/E_{уст}$.

К исходным параметрам ПТП отнесены [2.149]: диаметр основной термоэлектродной проволоки d_1 или площадь ее сечения f_1 ; толщина наносимого покрытия Δ_2 или приведенная площадь сечения покрытия f_{21} ($f_{21} = f_2/f_1$); длина заготовки спирали L ; плотность заполнения площади теплочувствительной зоны ПТП термоэлементами n (в шт/мм²) и шаг t укладки витков спирали или плотность n_1 и шаг p навивки проволоки, а также свойства всех исходных компонентов ПТП, а именно: термоэлектрическая способность выбранной пары термоэлектродов $\alpha_{1-2} = \alpha_1 - \alpha_2$, удельное электрическое сопротивление каждого термоэлектрода ρ_i и коэффициент теплопроводности χ_i материала каждого компонента ПТП (индекс i соответствует: 1 – основному термоэлектроду; 2 – гальваническому покрытию; 3 – заливочному компаунду).

4.1.1 Методика расчета оптимизированной статистической функции преобразования стандартного ПТП

При проектировании ПТП значения исходных параметров ПТП, при которых обеспечиваются требуемые выходные характеристики, устанавливают расчетным путем. Измеряе-

мый тепловой поток, пришедший на тепловоспринимающую поверхность термобатареи (см. рис. 4.1), пронизывает каждый термоэлемент батареи тремя параллельными путями: по основному термоэлектроду (1), гальваническому покрытию (2) и прослойке заливочного материала между витками (3) согласно их тепловой проводимости (χ_i/h) и площади сечения каждого компонента (f_1, f_2 и f_3). Площадь сечения единичного термоэлемента равна $f_{TЭ} = 2f_1 + f_2 + f_3$, которая, будучи отнесенной к площади сечения основного термоэлектрода $f_{TЭ}/f_1$, определена как формпараметр традиционного гальванического ПТП:

$$\varphi = (2f_1 + f_2 + f_3)/f_1 = 2 + f_{21} + f_{31} = A_{ПТП}/(Z \cdot f_1) = 1/(n \cdot f_1), \quad (4.5)$$

где $A_{ПТП}$ – площадь теплочувствительной зоны ПТП, где размещена термобатарея; Z – общее количество термоэлементов в ПТП; n – плотность заполнения термоэлементами.

При одинаковой высоте $h_{TЭ}$ обоих полувитков (отрезков чистой несущей проволоки и биметаллического) и наличии разности температуры ΔT между спаями проходящий через каждый термоэлемент тепловой поток $\Phi_{TЭ}$ в установившемся режиме равен:

$$\Phi_{TЭ} = (2\chi_1 \cdot f_1 + \chi_2 \cdot f_2 + \chi_3 \cdot f_3) \cdot \Delta T / h_{TЭ}, \quad (4.6)$$

а поверхностная плотность теплового потока с использованием формпараметра φ равна:

$$q_{TЭ} = \chi_1 \cdot (2 + \chi_{21} \cdot f_{21} + \chi_{31} \cdot f_{31}) \cdot \Delta T / (h_{TЭ} \cdot \varphi), \quad (4.7)$$

где $\chi_{i,1} = \chi_i/\chi_1$ и $f_{i,1} = f_i/f_1$ – приведенные коэффициент теплопроводности и площадь сечения каждого i -го компонента к основному термоэлектроду;

$h_{TЭ}$ – высота термоэлемента, за которую при расчетах следует брать значение, равное высоте спирали за вычетом удвоенного диаметра проволоки. Еще автором [2.112] было экспериментально установлено, что вклад ТЭДС, вырабаты-

ваемой в зонах перегиба несущей проволоки, не существенен для общего сигнала термобатареи;

ΔT – разность температуры между спаями термоэлементов, равная:

$$\Delta T = \frac{q \cdot h_{TE} \cdot \Phi}{\chi_1 \cdot (2 + \chi_{21} \cdot f_{21} + \chi_{31} \cdot f_{31})}. \quad (4.8)$$

С учетом формулы (4.8) генерируемая преобразователем ТЭДС равна [5*]:

$$E_{TЭ} = (\alpha_1 - \alpha_{БМ}) \cdot \Delta T = \frac{\alpha_{1-2} \cdot h_{TЭ} \cdot q_{TЭ} \cdot \Phi}{\chi_1 \cdot (2 + \chi_{21} \cdot f_{21} + \chi_{31} \cdot f_{31}) \cdot (1 + \rho_{21}/f_{21})}, \quad (4.9)$$

которая, с учетом формул (2.31) и (4.5) для термобатареи ПТП, содержащей Z термоэлементов ($Z = A_{ПТП}/f_{TЭ}$), принимает вид:

$$E_{ПТП} = \frac{\alpha_{1-2} \cdot h_{TЭ} \cdot q_{TЭ} \cdot A_{ПТП}}{f_1 \cdot \chi_1 \cdot (2 + \chi_{21} \cdot f_{21} + \chi_{31} \cdot f_{31}) \cdot (1 + \rho_{21}/f_{21})}. \quad (4.10)$$

Для получения ПТП с оптимизированным коэффициентом преобразования плотности теплового потока в ТЭДС, соответствующим максимальной чувствительности, параметры ПТП предварительно оценивают относительно оптимальной толщины покрытия, при которой обеспечивается требуемая максимальная чувствительность. Для конкретной основной проволоки по ее заданному диаметру d_1 оптимальное значение толщины гальванического покрытия рассчитывается по формуле:

$$\Delta_{opt} = 0,5 \cdot d_1 \cdot \left(\sqrt{1 + (f_{21})_{opt,E}} - 1 \right), \quad (4.11)$$

где $(f_{21})_{opt,E}$ – оптимальное значение приведенной площади сечения гальванического покрытия, равное:

$$(f_{21})_{opt,E} = \sqrt{(\rho_{21}/(\chi_{21} - \chi_{31})) \cdot (2 + (\Phi - 2) \cdot \chi_{31})}. \quad (4.12)$$

Эта формула получена из соотношения (4.9) при исследовании его на максимум относительно f_{21} .

Исходя из определений (4.1) и (4.2), для заранее найденного значения $(f_{21})_{opt.E}$ индивидуальная статическая функция преобразования рассчитывается по одному из следующих соотношений для:

– чувствительности S_q по плотности теплового потока (см. формулу (4.2)):

$$S_q = E_{TЭ} / q_{TЭ} = \frac{\alpha_{1-2} \cdot h_{TЭ} \cdot A_{ПТП}}{\chi_1 \cdot f_1 (1 + \rho_{21} / f_{21})} \cdot (2 + \chi_{21} \cdot f_{21} + \chi_{31} \cdot f_{31})^{-1}; \quad (4.13)$$

– чувствительности S_Φ по тепловому потоку (см. формулу (4.3) и (4.13)):

$$S_\Phi = E_{TЭ} / \Phi_{TЭ} = E_{TЭ} / (q_{TЭ} \cdot A_{ПТП}) = S_q / A_{ПТП}; \quad (4.14)$$

– приведенной чувствительности S_V , за которую принята чувствительность по плотности теплового потока, отнесенная к единице объема теплочувствительной зоны ПТП, (с размерностью мВ/(м·Вт)):

$$S_V = \frac{E_{TЭ}}{q \cdot h_{TЭ} \cdot A_{ПТП}} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)}{\chi_1 \cdot f_1 \cdot (1 + \rho_{21} / f_{21}) \cdot (2 + \lambda_{21} \cdot f_{21} + \lambda_{31} \cdot (\varphi - 2 - f_{21}))}. \quad (4.15)$$

Между приведенной чувствительностью S_V и коэффициентом преобразования K_q , являющимся наиболее распространенной метрологической характеристикой ПТП, для вычисления измеряемой плотности теплового потока справедливы следующие соотношения:

$$K_q = (S_V \cdot h_{TЭ} \cdot A_{ПТП})^{-1}, \quad (4.16)$$

$$S_V = (K_q \cdot h_{TЭ} \cdot A_{ПТП})^{-1}. \quad (4.17)$$

Из соотношений (4.13) – (4.15) видно, что индивидуальная функция преобразования ПТП зависит от большого количества исходных параметров. Изменяя целенаправленно их значения в разумных пределах, можно влиять на основную выходную характеристику ПТП, а также на другие характеристики ПТП, такие как стабильность во времени, динамиче-

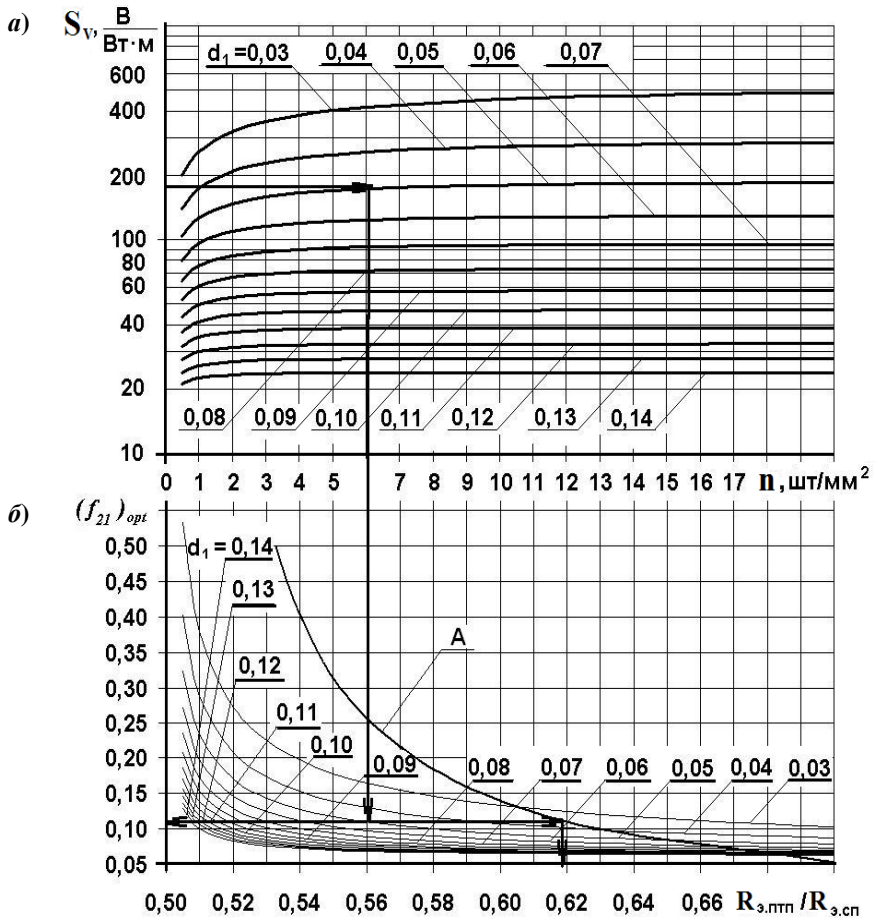
ский диапазон температуры, температурная зависимость характеристик, инерционность, тепловое сопротивление.

Для определения значений исходных конструктивных и технических параметров конкретного ПТП с заданной чувствительностью (или коэффициентом преобразования) в первую очередь необходимо знать зависимости приведенной чувствительности S_V и оптимального отношения $(f_{21})_{opt}$ от плотности n заполнения термоэлементами и диаметра исходной термоэлектродной проволоки d_1 . Эти зависимости, найденные расчетным путем для константан-медного ПТП, изготовленного с использованием заливочного компаунда УП-610 с корундовым наполнителем, в графическом виде представлены на рисунке 4.2. Вычисления выполнены при вариации диаметра константановой проволоки d_1 в диапазоне значений от 0,03 мм до 0,14 мм с шагом 0,01 мм.

Графики рис. 4.2, *а* позволяют найти диаметр d_1 проволоки основного термоэлектрода, обеспечивающей требуемое значение чувствительности при конкретной плотности заполнения термоэлементами n (или в выбранном диапазоне допускаемых значений n). Графики рис. 4.2, *б* указывают соответствующее значение $(f_{21})_{opt}$. График А позволяет определить по «ключу» для найденного значения отношения $(f_{21})_{opt}$ необходимое значение технологического параметра $R_{\text{Э.ПТП}}/R_{\text{Э.СП}}$ по расчетной формуле:

$$R_{\text{Э.ПТП}}/R_{\text{Э.СП}} = 0,5 \left(1 + \left(1 + (f_{21})_{opt} / \rho_{21} \right)^{-1} \right), \quad (4.18)$$

где $R_{\text{Э.СП}}$ – электрическое сопротивление заготовки спирали ПТП, $R_{\text{Э.ПТП}}$ – то же после гальванического нанесения покрытия. По найденному значению технологического параметра устанавливается время гальванического осаждения покрытия на исходную термоэлектродную проволоку при фиксированной рекомендуемой силе тока [4.11].



а – графики зависимости $S_V = f(n, d_1 = \text{var})$,

б – графики зависимости $(f_{21})_{opt} = f(n, d_1 = \text{var})$

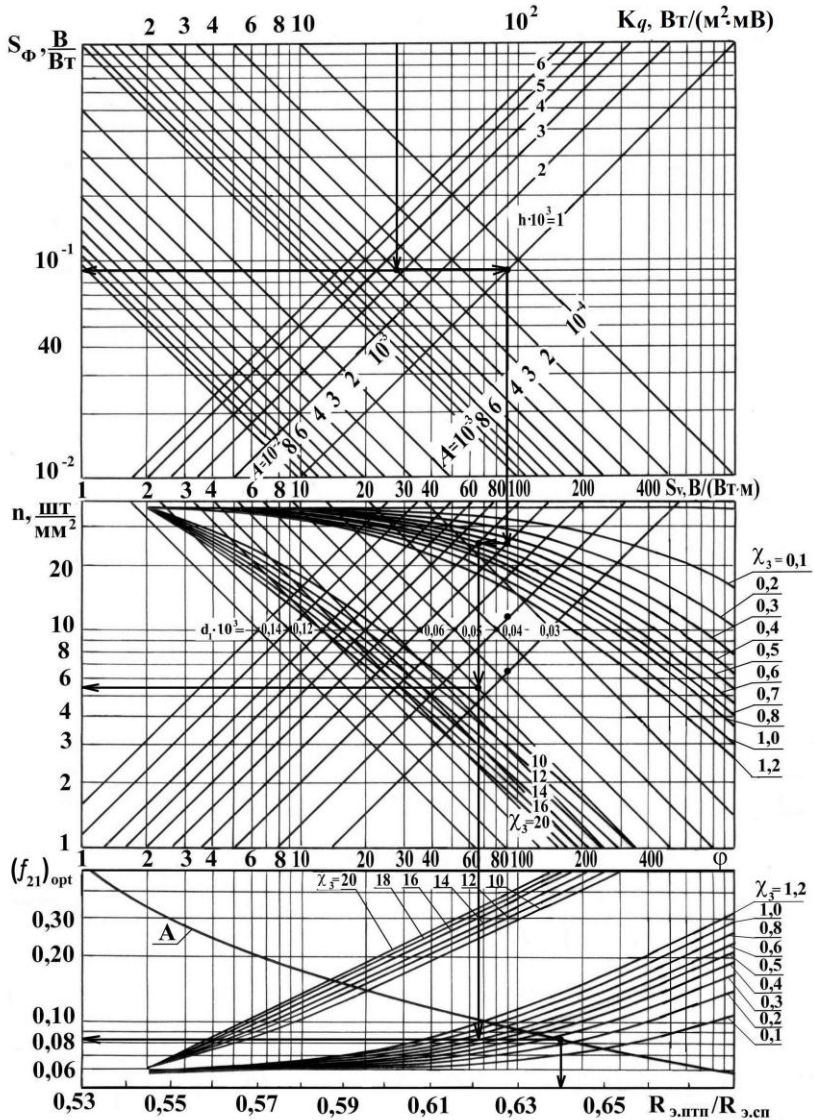
А – график зависимости значений $(f_{21})_{opt}$ от $R_{Э.ПТП}/R_{Э.СП}$

Рис. 4.2. Номограмма для расчета константан-медного ПТП

Аналогичные номограммы, полученные еще для девяти термоэлектродных пар согласно табл. 4.1, приведены в Приложении Б.

Из анализа результатов этого исследования следует, что для ПТП, изготовленного из основной проволоки диаметром 0,10 мм, плотность заполнения термоэлементами должна быть $n < 6$ шт/мм². При необходимости допускается ее увеличение, но не более 10 шт/мм² из-за возможного замыкания витков. Кроме того, эти номограммы позволяют предварительно оценивать значение (или диапазон допускаемых значений) плотности заполнения термоэлементами из проволоки конкретного диаметра d_1 из указанного выше диапазона.

Большой набор параметров, влияющих на выходные характеристики ПТП, привел к необходимости построения обобщенных номограмм для прогнозных расчетов и выбора исходных параметров, необходимых для изготовления ПТП с требуемыми характеристиками. Номограмма, представленная на рисунке 4.3 [4.12], показывает на примере константан-медного ПТП взаимосвязь между коэффициентом преобразования K_q , чувствительностью S_Φ и приведенной чувствительностью S_V с заданными размерами, формпараметром φ и коэффициентом теплопроводности заливочного материала χ_3 . Расчеты выполнены при вариации толщины ПТП h от 1 мм до 6 мм с шагом 1 мм; площади ПТП $A_{\text{ПТП}}$ от 10^{-4} м² до 10^{-2} м²; диаметра основной проволоки d_1 от 0,03 мм до 0,14 мм и коэффициента теплопроводности χ_3 от 0,1 Вт/(м·К) до 20 Вт/(м·К). Значения коэффициента теплопроводности $\chi_3 > 1,2$ Вт/(м·К) предусмотрены для расчетов ПТП, выполняемых с теплопроводными шунтами (см. 4.2), увеличивающими эффективную теплопроводность ПТП, что способствует расширению диапазона измеряемой плотности теплового потока в область высоких значений.



А – график зависимости значений $(f_{21})_{opt}$ от $R_{э.птт} / R_{э.сп}$

Рис. 4.3.Обобщенная номограмма для проектирования константан-медных ПТП

Номограмма с «ключом» для подбора варианта исходных параметров открывает возможности нахождения требуемого значения любой выходной характеристики ПТП путем варьирования исходными данными. Для других типов ПТП согласно табл. 4.1 аналогичные обобщенные номограммы приведены в Приложении В.

Определив конкретный формпараметр φ и выбрав заливочный материал, по номограмме, соответствующей выбранному типу ПТП, находят оптимальное значение приведенной площади сечения покрытия $(f_{21})_{opt}$, которое позволяет определить с использованием графика А технологический параметр $R_{\Sigma, ПТП} / R_{\Sigma, СП}$. Взаимосвязь $(f_{21})_{opt}$ и $R_{\Sigma, ПТП} / R_{\Sigma, СП}$, формпараметра φ и коэффициента теплопроводности заливочного материала χ_3 , предоставленная графиком А на каждой номограмме (см. приложение В), открывает возможность вычисления по формуле (4.11) требуемого оптимального значения толщины покрытия Δ_{opt} . Кроме того, этот график позволяет контролировать толщину покрытия по результату измерения электрических сопротивлений до и после гальванизации.

Плотность заполнения термоэлементами n и диаметр d_1 основного термоэлектрода являются исходными данными для определения таких технологических параметров как плотность навивки проволоки n_1 и шаг укладки спирали t при формовании ПТП, ($n = n_1 / t$). Максимальная плотность навивки $n_{1, max}$ проволоки выбранного диаметра определяется минимальным шагом навивки p_{min} ($p = 1 / n_1$), который должен быть меньше $1,5 d_1$ во избежание замыкания соседних витков спирали, то есть $n_{1, max} = 1 / (1,5 \cdot d_1)$.

Это условие позволяет определить для выбранных значений d_1 и n максимальный шаг укладки спирали:

$$t_{\max} = n_{1\max} / n = 1 / (1,5 \cdot d_1 \cdot n).$$

Шаг укладки в свою очередь позволяет выбрать технологию формования термобатареи в виде «камушка», «улитки» или матричную [5*, 2.12, 2.146]. Первые две технологии допускают варьирование шагом укладки t от 0,3 мм до 1 мм, а матрица предполагает фиксированный шаг укладки, равный 1 мм, 1,5 мм, 2 мм.

После выбора технологии формования корректируют значения n_1 и t , вычисляют требуемую длину L заготовки спирали по одной из формул: $L = A \cdot n / n_1$ или $L = A / t$, а ожидаемое электрическое сопротивление готового ПТП по формуле:

$$R_{\Sigma, \text{ПТП}} = \omega \cdot (p / f_1) \cdot (A_{\text{ПТП}} \cdot n_1 / t) \cdot \left(\pi(a + d_1) + \sqrt{4b^2 + p^2} \right), \quad (4.19)$$

где ω – значение отношения $R_{\Sigma, \text{ПТП}} / R_{\Sigma, \text{СП}}$, найденное с помощью графика А на номограмме рис. 4.4; p – минимальный шаг навивки; a и b – толщина и высота ленточки, на которую навита проволока (см. рис. 2.38). Именно с этим значением сравнивается измеренное значение электрического сопротивления готового ПТП при технологическом контроле.

Прогнозный расчет чувствительности ПТП или коэффициента преобразования основан на требованиях, вытекающих из условий эксплуатации. Так для изготовления ПТП, предназначенного для измерения теплового потока с известными максимумом его поверхностной плотности q_{\max} и пределом регистрирующего прибора E_{lim} , искомый коэффициент преобразования должен иметь значение не более рассчитанного по формуле:

$$K_{\min} \geq q_{\max} / E_{\text{lim}}. \quad (4.20)$$

Для измерения малых значений плотности теплового потока определяется максимально допустимое значение коэффициента преобразования, при котором будет обеспечено измерение с заданной погрешностью δ^q по формуле:

$$K_{\max} = q_{\min} \cdot \delta^E / \Delta E, \quad (4.21)$$

где ΔE – цена деления шкалы регистрирующего прибора; δ^E – допускаемая относительная погрешность измерения сигнала ПТП регистрирующим прибором, обеспечивающая измерение минимального теплового потока с заданной погрешностью, вычисляемая по формуле: $\delta^E = \left((\delta^q / t_\alpha)^2 - \delta^2 \right)^{0.5}$, где δ^q – заданная погрешность измерения плотности теплового потока; t_α – коэффициент Стьюдента [4.13]; δ – относительная погрешность градуирования ПТП.

При проектировании ПТП с заданными геометрическими размерами ($h_{TЭ}$ и $A_{ПТП}$) и оцененным по формулам (4.20) и (4.21) значением градуировочного коэффициента K с помощью номограммы, соответствующей конкретной паре термоэлектродов (см. приложение В), легко находятся все необходимые технологические параметры ПТП: d_1 , n , χ_3 ; $(f_{21})_{opt}$ и ω . Затем вычисляют требуемые значения n_1 и длину L спирали, которую необходимо вмонтировать в ПТП заданной площади A при фиксированных размерах толщины a и высоты b ленточки. Если оказалось, что выбранная пара термоэлектродов не обеспечивает выполнения всех требований, то расчет повторяют для другой согласно табл. 4.1 пары термоэлектродов с бóльшей чувствительностью.

4.1.2 Температурные зависимости характеристик компонентов и функции преобразования ПТП

При измерениях с применением стандартных термоэлектрических ПТП в случае независимости индивидуальной функции преобразования от температуры для вычисления теплового потока или его поверхностной плотности справедливости формулы (4.1) и (4.2). В общем случае при выполнении измерений в условиях изменения температуры в широком диапазоне значений необходимо учитывать, что чувствитель-

ность ПТП и коэффициент преобразования являются функциями нескольких параметров, зависящих от температуры. С учетом температурного фактора коэффициент преобразования, например, K_q (см. формулы (4.4) и (4.13)) имеет вид:

$$K_q = \frac{(1 + \rho_{21}(T)/f_{21}(T)) \cdot f_1}{\alpha_{1-2}(T) \cdot h_{TЭ} \cdot A_{III}} \cdot (2\chi_1(T) + \chi_2(T) \cdot f_{21}(T) + \chi_3(T) \cdot f_{31}(T)), \quad (4.22)$$

при этом приведенную площадь f_{31} целесообразно представить через формпараметр φ (см. формулу 4.5):

$$f_{31} = \varphi - 2 - f_{21}, \quad (4.23)$$

то есть

$$K_q = f(\alpha_{1-2}(T); \rho_{21}(T); f_{21}(T); \chi_i(T); \varphi(T)) \quad (4.24)$$

является функцией пяти характеристик ПТП, зависящих от температуры.

Свойства термоэлектрических материалов хорошо изучены [5*, 6*, 2.75, 2.120, 2.121, 4.14, 4.15], основные из них систематизированы в табл. 4.1.

По литературным данным на рисунке 4.4 построены графики температурной зависимости разности ТЭДС $\Delta E(T)$ различных термоэлектрических материалов в паре с платиной диапазоне от 73 К до 773 К, а на рисунках 4.5 и 4.6 соответственно – термоэлектрической чувствительности $\alpha_{1-2}(T)$ и удельного электрического сопротивления, отнесенного к его значению при 273 К, $(\rho_i(T)/\rho_{i,273})$ в диапазоне от 73 К до 473 К, а графики зависимости $\rho_{21}(T)$ – на рисунке 4.7.

Как видим, с понижением температуры термоэлектрическая чувствительность $\alpha_{1-2}(T)$ уменьшается, а электрическое сопротивление различных термоэлектродов с изменением температуры изменяется по-разному.

Электрическое сопротивление копеля и константана практически не зависит от температуры: $\rho(T)/\rho_{273} = 1 \pm 0,02$.

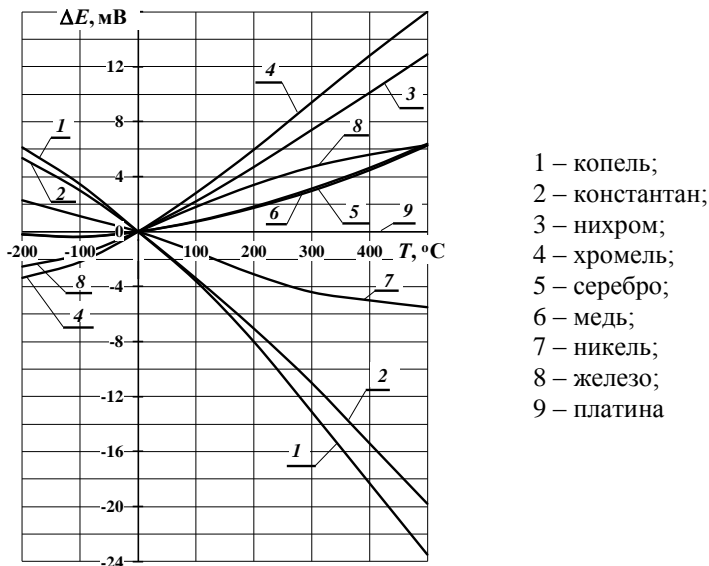


Рис.4.4. Температурные зависимости ТЭДС $\Delta E(T)$ относительно платины различных термоэлектрических материалов

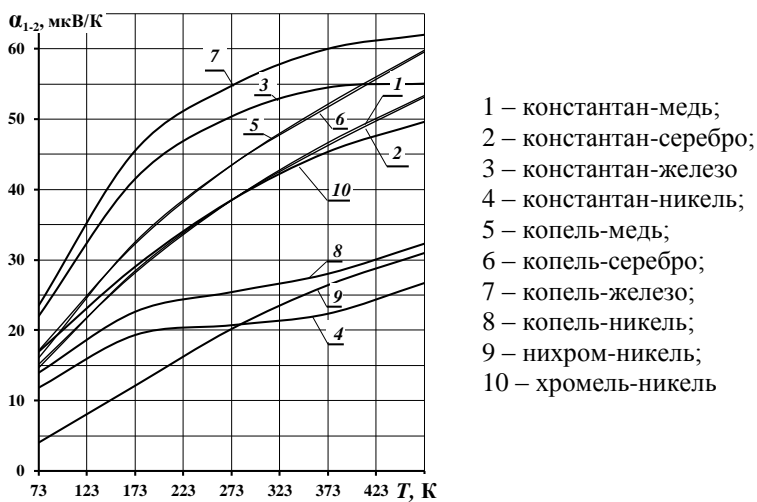


Рис. 4.5. Температурная зависимость термоэлектрической чувствительности различных термоэлектродных пар относительно ее значения при 273 К

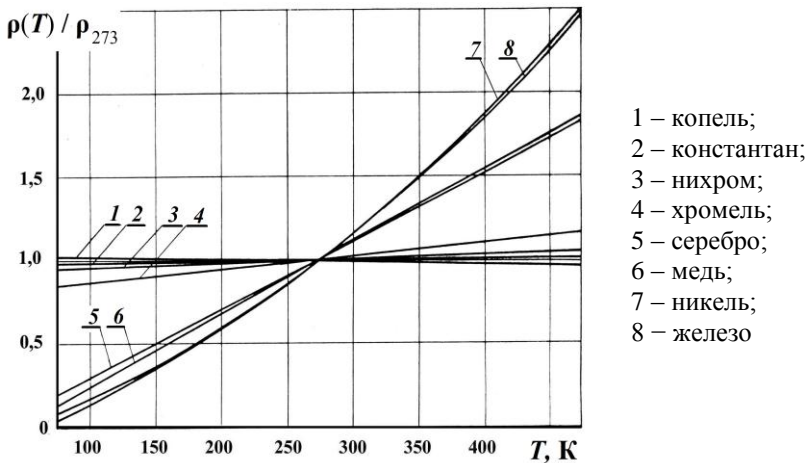


Рис. 4.6. Температурная зависимость удельного электрического сопротивления, различных термоэлектродов относительно его значения при 273 К

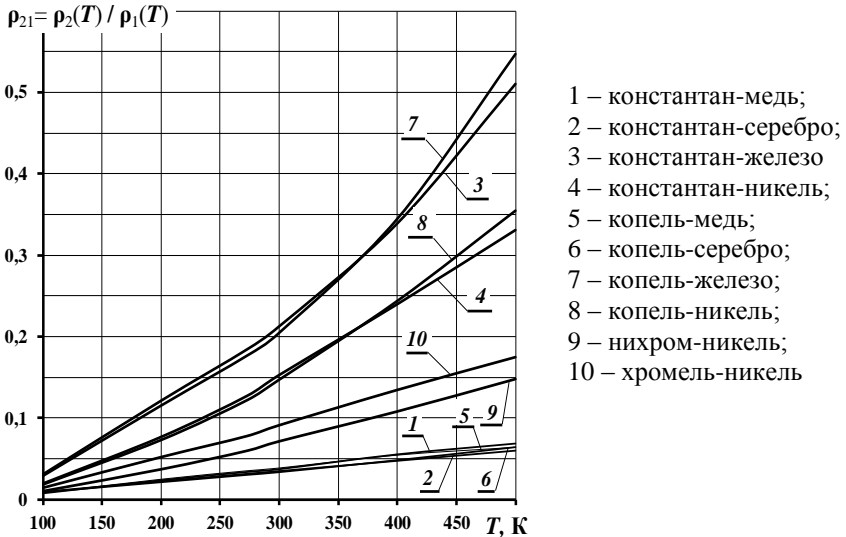


Рис. 4.7. Температурная зависимость приведенного удельного электрического сопротивления для различных термоэлектродных пар

У чистых металлов – меди и серебра – более заметно уменьшение сопротивления при понижении температуры от 273 К до 77 К: $\rho_{77}/\rho_{273} = 0,138$ для меди и $\rho_{77}/\rho_{273} = 0,20$ для серебра, то есть температурная зависимость сплавов значительно меньше, чем чистых металлов. Таким образом, с понижением температуры суммарное электрическое сопротивление контура, например, копель-медного термоэлектрода, $(R_{\text{Э1}} + R_{\text{Э2}})$ будет уменьшаться, компенсируя при этом уменьшение термоэлектрической чувствительности $\alpha_{1-2}(T)$ этой пары. При этом разность потенциалов $\Delta E(T)$ для биметаллического копель-медного термоэлемента изменяется при снижении температуры менее существенно, чем для пары таких же, но проволочных термоэлектродов, и зависит от соотношения площадей сечений покрытия и несущей проволоки f_{21} .

Кроме данных по температурной зависимости электрического сопротивления отдельных компонентов ПТП при определении температурной зависимости коэффициента преобразования в диапазоне (100 – 500) К следует учитывать температурные зависимости приведенных электрического сопротивления биметаллического термоэлектрода $\rho_{21}(T)$, площади сечения покрытия $f_{21}(T)$ и относительной теплопроводности $\chi(T)/\chi_{273}$.

Температурные зависимости отношения $(f_{21})_{opt}$, рассчитанные по формуле (4.12) при вариации формпараметра $\varphi = 10; 25; 50; 75; 100; 250; 500; 1000$ для всех десяти типов ПТП согласно табл. 4.1, изготовленных с применением заливочных компаундов, наполненных плавленным кварцем и корундом, представлены на рисунках 4.8 – 4.10.

Характер температурных изменений коэффициента теплопроводности различных термоэлектрических материалов, показанный на рисунке 4.11, представлен в безразмерном виде путем отнесения к его значению при температуре 273 К.

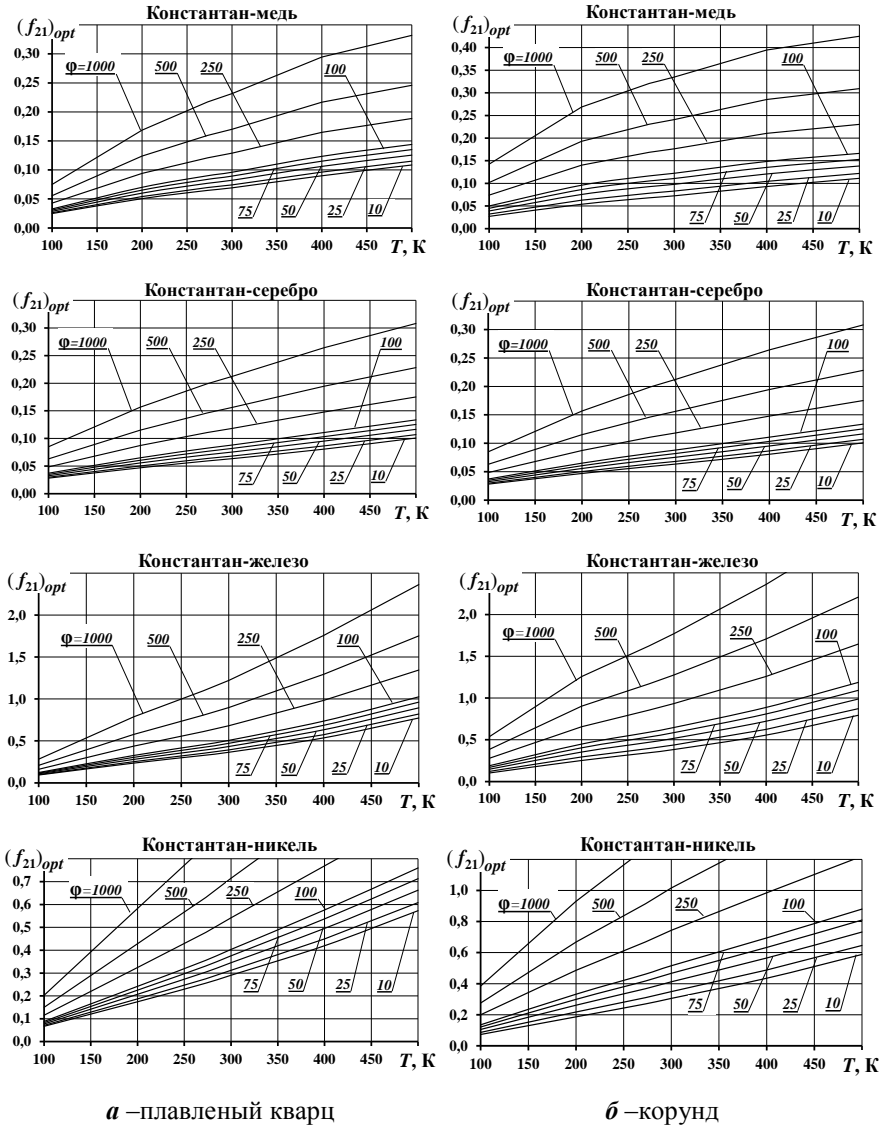
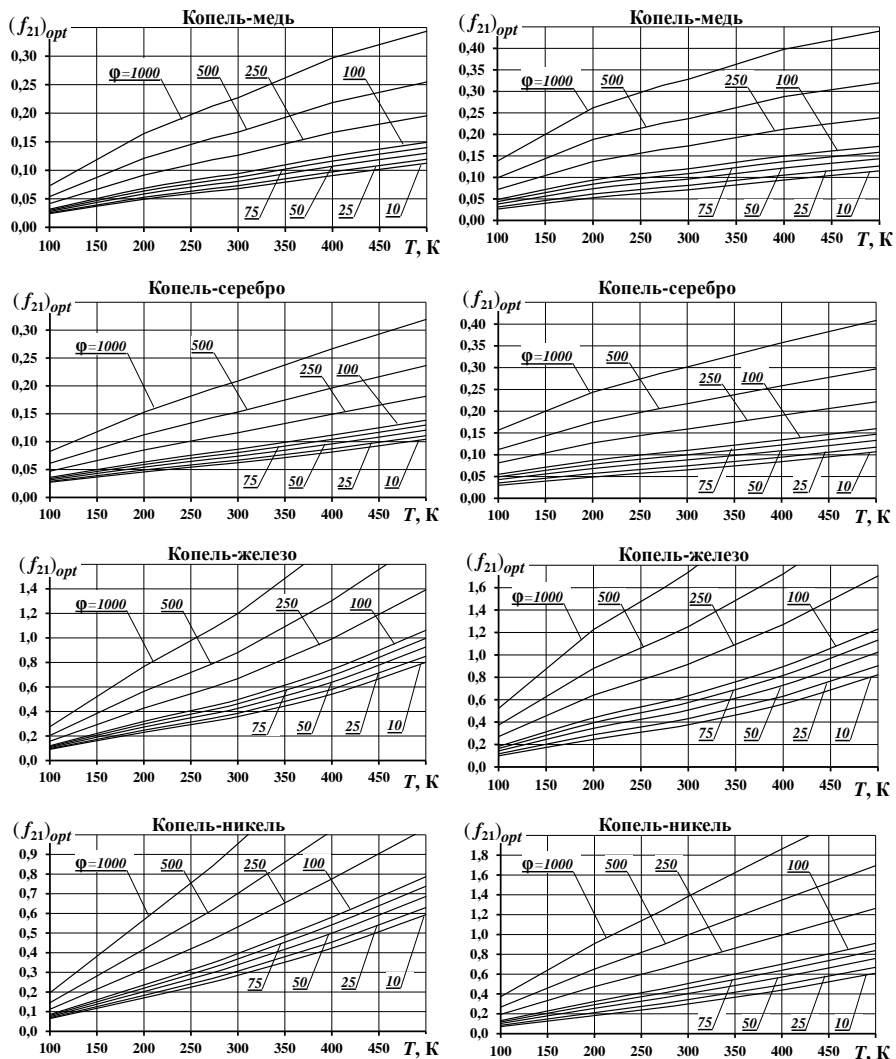


Рис. 4.8. Температурная зависимость оптимального отношения $(f_{21})_{opt}$ для ПТП на основе константана при вариации формпараметра ϕ и наполнителя заливочного компаунда



а – плавленный кварц

б – корунд

Рис. 4.9. Температурная зависимость оптимального отношения $(f_{21})_{opt}$ для ПТП на основе копеля при вариации формпараметра ϕ и наполнителя заливочного компаунда

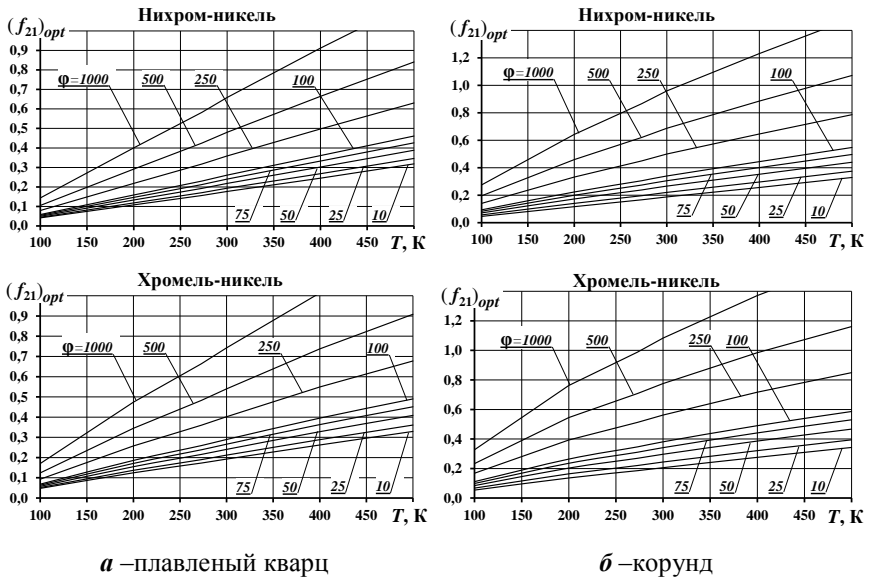


Рис.4.10. Температурная зависимость приведенной площади сечения $(f_{21})_{opt}$ для нихром-никелевого и хромель-никелевого ПТП при вариации формпараметра Φ и наполнителя заливочного компаунда

Как следует из графиков рис. 4.11, коэффициент теплопроводности сплавов (кривые 1 – 5) с ростом температуры от 75 К до 500 К увеличивается, а металлов, пригодных для электрического осаждения на парную термоэлектродную проволоку (кривые 6 – 9), – уменьшается. Это открывает путь подбора такого соотношения сечений f_1 и f_2 , при котором уменьшение чувствительности биметаллического термоэлектрода компенсируется уменьшением эффективной тепловой проводимости батареи термоэлементов.

При формировании термоэлектрических батарейных ПТП для электроизоляции, как правило, используют различные эпоксидные компаунды. Конструкция ПТП характеризуется тем, что пространство между витками заполняется элек-

троизоляционным материалом, что открывает возможность влияния на коэффициент теплопроводности и термическое линейное расширение готового ПТП путем вариации заливочного компаунда.

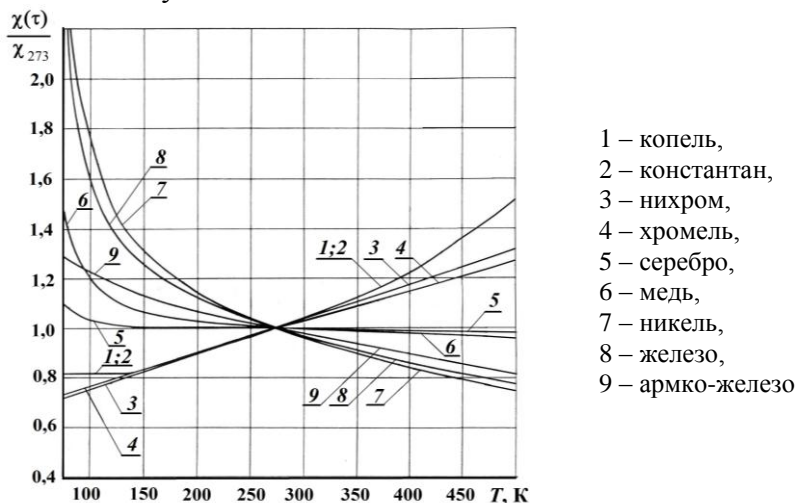


Рис. 4.11. Температурная зависимость коэффициентов теплопроводности исходных термоэлектрических материалов

Несмотря на большое число материалов, применяемых в качестве наполнителя полимерного компаунда с целью увеличения прочности, теплопроводности и термостойкости, в настоящее время выбор остановлен в основном на двух материалах: молотом плавном кварце (кварцевое стекло КВ) и порошкообразном корунде.

На рисунке 4.12 приведены графики зависимости коэффициентов теплопроводности компонентов заливочного компаунда: эпоксидной смолы с отвердителем (изометилтетрагидрофталевым ангидридом) и двух наполнителей: корунда и плавного кварца, построенные по литературным данным [2.28, 2.112, 4.6–4.8, 4.14].

Варьирование различными наполнителями и их концентрацией позволяет получать достаточно широкий диапазон

коэффициента теплопроводности заливочного компаунда и, в конечном итоге, ПТП.

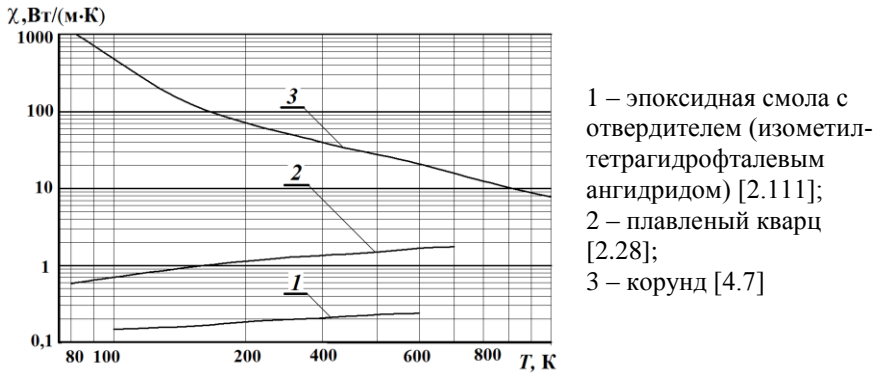


Рис. 4.12. Температурные зависимости коэффициентов теплопроводности компонентов заливочного компаунда ПТП

На рисунке 4.13 приведены полученные экспериментально авторами данной монографии зависимости коэффициента теплопроводности заливочного компаунда на базе эпоксидной смолы УП-610 от температуры при вариации объемной концентрации наполнителя – порошкообразного корунда, чаще всего применяемого при изготовлении ПТП.

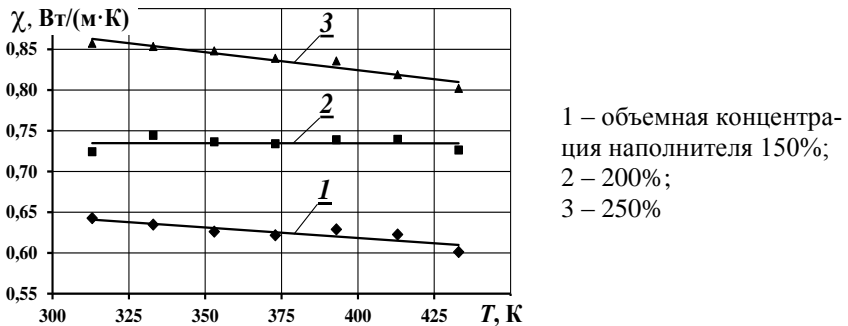
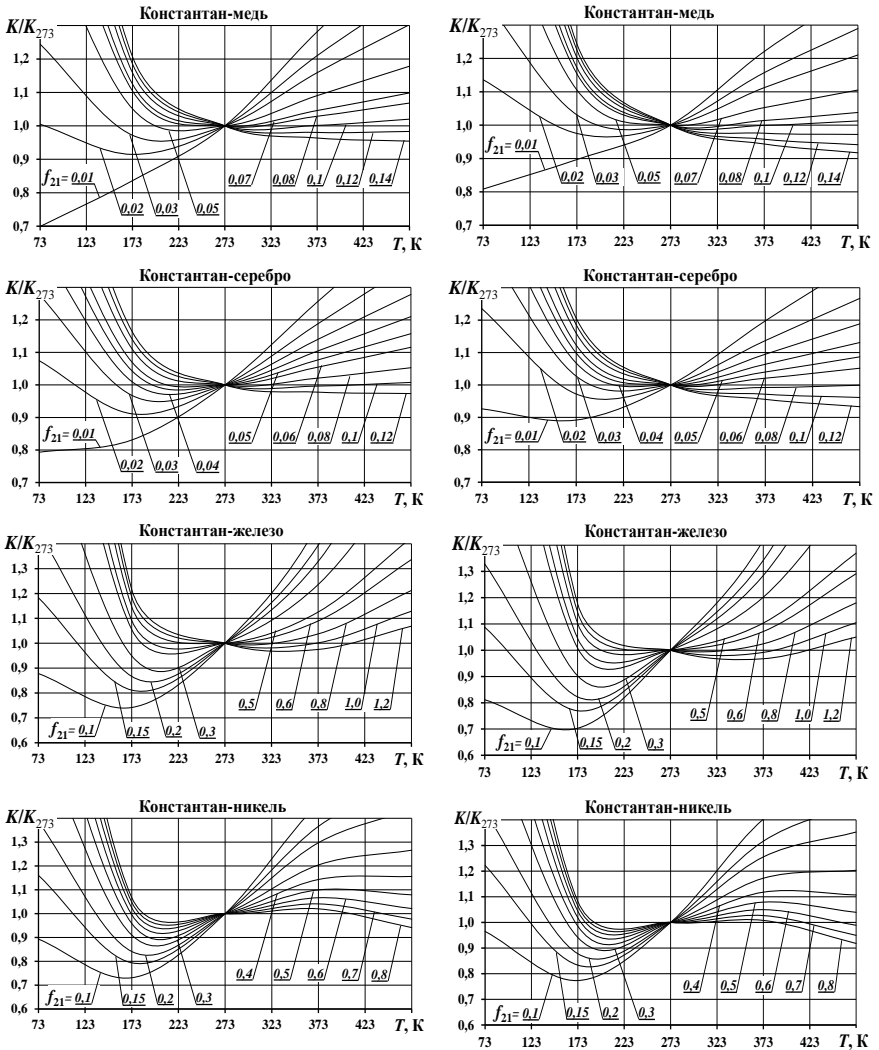


Рис. 4.13. Температурные зависимости коэффициента теплопроводности заливочного компаунда УП-610 при вариации объемной концентрации наполнителя (корунда)

Наблюдаемое уменьшение коэффициента теплопроводности компаунда с ростом температуры можно объяснить наличием контактов между частицами наполнителя и преобладающим влиянием его более высокого, но существенно уменьшающегося коэффициента теплопроводности при возрастании температуры на эффективную теплопроводность компаунда. В случае использования аморфного наполнителя, к каковым относится плавленый кварц, такого противоречия не обнаружено (см. рис. 4.12).

Таким образом, используя в качестве наполнителя смолы вышеуказанные материалы, можно получать заливочный материал для ПТП с коэффициентом теплопроводности χ_3 из диапазона значений (0,2 – 1,2) Вт/(м·К). При этом наполнение смолы корундом обеспечивает максимальный коэффициент теплопроводности при сохранении хороших электроизоляционных качеств, а плавленым кварцем – при удовлетворительной теплопроводности дает преимущества при подборе значения коэффициента линейного термического расширения (КТР) ПТП. Информация о КТР необходима для согласования с термическим расширением объекта, к поверхности которого приклеивают ПТП при его монтаже. Использование плавленого кварца, характеризующегося самым малым КТР, позволяет существенно выровнять КТР ПТП и материала объекта. Это особенно важно при работе в условиях изменяющейся температуры.

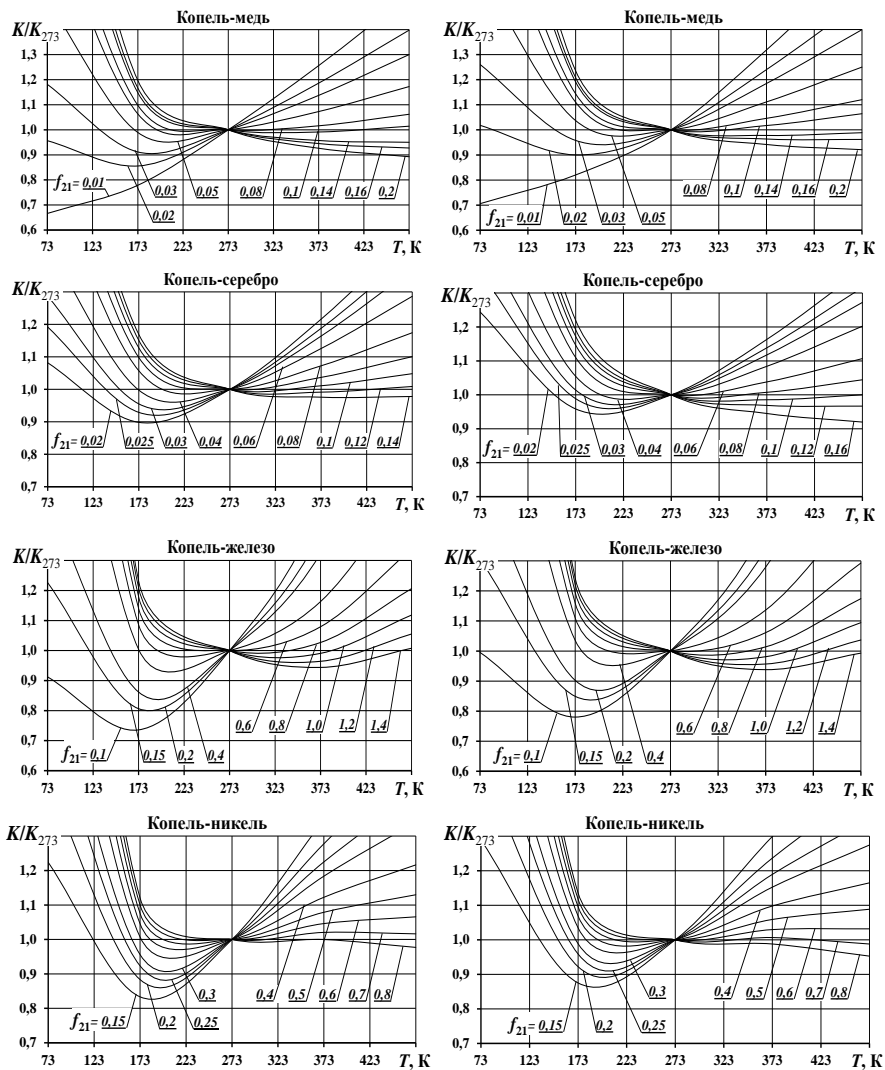
С использованием всех этих результатов по формуле (4.22) рассчитаны температурные зависимости коэффициентов преобразования, приведенных к их значениям при температуре 273 К ($K(T)/K_{273}$) для всех рассмотренных типов ПТП в заливочном компаунде с наполнителем из плавленого кварца и корунда при вариации возможных значений отношения f_{21} , представленные на рисунках 4.14 – 4.16.



a – плавный кварц

b – корунд

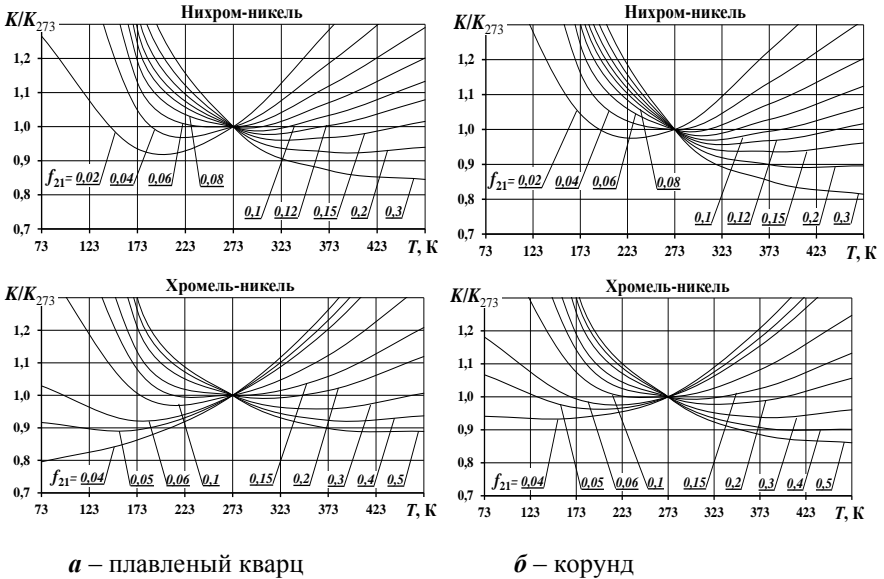
Рис. 4.14. Температурные зависимости относительных коэффициентов преобразования $K(T)/K_{273}$ для ПТП на основе константана при вариации приведенного сечения f_{21} и наполнителя заливочного компаунда



a – плавный кварц

$б$ – корунд

Рис. 4.15. Температурные зависимости относительных коэффициентов преобразования $K(T)/K_{273}$ для ПТП на основе копеля при вариации приведенного сечения f_{21} и наполнителя заливочного компаунда



а – плавненный кварц

б – корунд

Рис. 4.16. Температурные зависимости относительных коэффициентов преобразования $K(T)/K_{273}$ для нихром-никелевого и хромель-никелевого ПТП при вариации приведенного сечения f_{21} и наполнителя заливочного компаунда

Полученные результаты позволяют сделать вывод об области применения отдельных типов ПТП или произвести оптимальный выбор типа ПТП для поставленных условий эксплуатации. Так для измерений теплового потока на объектах при низких и криогенных температурах целесообразно применять константан-серебряные или копель-серебряные ПТП, так как чувствительность именно этих типов ПТП в указанной области имеет наименьшую температурную зависимость (см. соответствующие семейства графиков рис. 4.15 и 4.16). Для диапазона значений температуры от 273 К до 500 К наиболее перспективными парами являются пары с никелевым покрытием. С учетом технологических особенностей гальванического нанесения никелевого покрытия такими парами являются константан-никель и копель-никель.

4.1.3 Временная стабильность ПТП

Временная стабильность ПТП определяется устойчивостью его эксплуатационных параметров и, главным образом, метрологических характеристик. Стабильность метрологических характеристик ПТП зависит от множества факторов. Некоторые из них подобны воздействующим на термоэлектрические преобразователи температуры (далее – ПТ), но существует и ряд факторов, специфических для ПТП. В процессе эксплуатации ПТП подвергаются физическому старению, в результате чего изменяются метрологические свойства чувствительных элементов. Основные причины этих изменений – окисление и диффундирование металлов термоэлектродов, изменение структуры металлов и заливочного компаунда, диффузия примесей и загрязнение металлов.

Краткие обзоры работ, посвященных исследованию изменению ТЭДС термоэлектрических материалов и нестабильности термоэлектрических ПТ (термопар), приведены в [6*, 4.6, 4.8, 4.10, 4.15, 4.16].

Поскольку в процессе изготовления металлы ЧЭ ПТП подвергаются обработке (неравномерные нагрев и охлаждение при изготовлении проволоки, а также многократные ее изгибы при навивке спирали), они в связи с этим приобретают неустойчивое состояние, обусловленное появлением искажений в кристаллической решетке или образованием такой кристаллической структуры, которая в равновесных условиях не свойственна данному металлу. Процесс этот связан с атомными перемещениями, то есть с изменениями тонкой кристаллической структуры металла, происходящими при значениях комнатной температуры относительно медленно. При повышении температуры атомные перемещения облегчаются, а процесс протекает тем быстрее, чем выше температура. Изменение кристаллической структуры термоэлектродных металлов приводит к изменению коэффициента Зеебека и, соответственно, к изменению чувствительности ПТП. Окисление и диффундирование металлов термоэлектродов

приводят к уменьшению их сечения. Для термоэлектрических ПТ это ограничивает срок службы, а для ПТП значительно более критично, так как от площади сечения термоэлектродов и ее постоянства зависит коэффициент преобразования ПТП. При этом, чем меньше относительная толщина гальванического покрытия, тем больше влияние уменьшения его слоя вследствие окисления или диффундирования.

Например, наиболее распространенные традиционные ПТП, выполненные на базе термоэлектродной пары константан-медь, имеют весьма тонкий слой медного гальванического покрытия ($f_{21} \approx 0,06 \div 0,09$), а при температуре выше 380 К медь начинает активно окисляться, что приводит к изменению коэффициента преобразования, а также к невозможности эксплуатации ПТП при более высокой температуре. Серебро значительно меньше подвержено окислению, чем медь, однако необходимая толщина гальванически наносимого серебряного электрода также очень мала, а диффузия атомов серебра в металл проволоки также приводит к изменению ТЭДС.

Защитить биметаллический термоэлектрод от окисления можно путем гальванического осаждения поверх меди защитного слоя из коррозионно стойкого металла, то есть выполнить термобатарею с двухслойным гальваническим покрытием восходящих (или нисходящих) полувитков спирали. Качественное осаждение слоя серебра, железа или сурьмы на константан можно обеспечить предварительным нанесением промежуточного слоя перед осаждением основного гальванического покрытия. При этом технологическим подслоем может быть использована медь, поверх которой серебрение, железнение и сурьмлиение осуществляются более добротно.

Другим, не менее эффективным путем получения ПТП с большей стойкостью против коррозионных процессов является замена медного покрытия основного термоэлектрода другим, приводящим либо к повышению коррозионной стойкости, что способствует расширению температурного диапазона эксплуатации ПТП, либо к уменьшению температурной зави-

симости чувствительности ПТП. Частично решить эту проблему удастся заменой медного и серебряного покрытия никелевым. При этом в качестве основного термоэлектрода кроме константановой и копелевой проволок может быть использована нихромовая и хромелевая проволоки, которые хорошо поддаются никелированию. Необходимая толщина слоя никеля, наносимого на несущую проволоку для получения оптимальной чувствительности к измеряемому тепловому потоку, в несколько раз превышает толщину соответствующих слоев меди или серебра. Никель достаточно стабилен и коррозионностоек при значениях температуры до 500 К, технологически легко осаждается на константан, копель и другие металлические проволоки-основы, поэтому ПТП из пар с никелевым покрытием являются наиболее подходящими для получения ПТП со стабильными во времени характеристиками. Именно такими ПТП удалось поднять предел температуры эксплуатации от 400 К до 500 К. При этом увеличивается гарантированный срок эксплуатации ПТП с неизменяющимися характеристиками за счет постоянства толщины коррозионно устойчивого материала покрытия.

Однако, и никель не лишен отрицательных качеств. Он имеет нелинейную зависимость коэффициента Зеебека от температуры с экстремумом при 631 К (точка Кюри) [4.17], что не позволяет иметь ПТП с функцией преобразования теплового потока в ТЭДС, независимой от температуры в широком интервале. Актуальным это становится при эксплуатации ПТП в экстремальных условиях – при значениях температуры более 500 К и в широком диапазоне ее изменения. В этом случае приходится не только тщательно градуировать ПТП в диапазоне температуры, но и снабжать его встроенным ПТ для корректирования полученной информации в дальнейшем, что усложняет конструкцию ПТП и процедуру измерений.

Как показали результаты, приведенные на рис. 4.5, наименьшая температурная зависимость термоэлектрической чувствительности (коэффициента Зеебека) присуща парам

константан-никель и копель-никель, которые, исходя из рис. 4.5, являются парадоксальными в отличие от остальных изученных пар, поскольку константан, копель и никель имеют относительно платины одинаковые знаки коэффициента Зеебека и численные значения вдвое меньше, чем у традиционных пар константан-медь и копель-медь.

Для гальванических пар константан-никель, копель-никель, нихром-никель и хромель-никель расчетным путем установлены температурные зависимости их термоэлектрической чувствительности (см. рис. 4.7) и исследованы экспериментально [4.18]. При этом в качестве биметаллического термоэлектроды использована пара из основной проволоки (из числа перечисленных) и никелевой, свитых между собой. Рабочий спай такой специфической термопары помещали в цилиндр, выполненный из нержавеющей стали и заполненный песком. Это обеспечило равномерное температурное поле и исключило электрический контакт спая с поверхностью цилиндра. Результаты экспериментов систематизированы на рисунке 4.17. При этом установлено, что стабильной температурной зависимостью коэффициента Зеебека в диапазоне температуры от 300 К до 500 К обладают пары константан-никель и копель-никель при значении $(f_{21})_{opt} = 0,67$.

Изготовленные из таких пар ПТП имеют практически независимую от температуры функцию преобразования. На рисунке 4.18 показаны экспериментальные зависимости коэффициента преобразования в диапазоне температуры (300 – 500) К для двух ПТП эталонного уровня 1 и 2 (а) и двух ПТП 3 и 4 (б), использованных в системах измерения для ракетносителей типа «Днепр», выполненных, соответственно, на базе копель-никелевых (а) и константан-никелевых (б) термоэлементов. По результатам исследований установлено, что значения коэффициента преобразования каждого ПТП в диапазоне температуры от 300 К до 500 К отличаются от среднего арифметического по диапазону не более, чем на 3%.

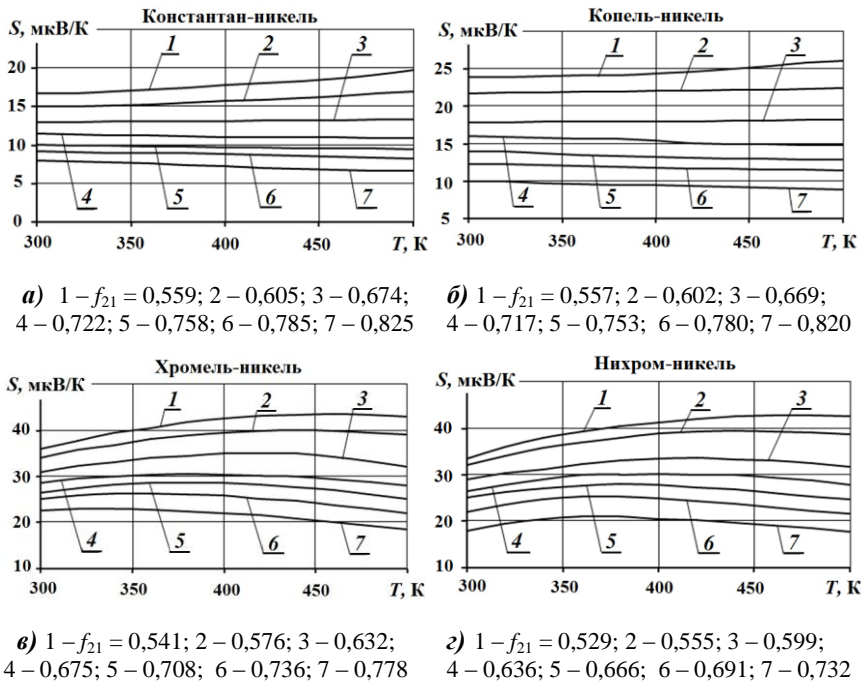
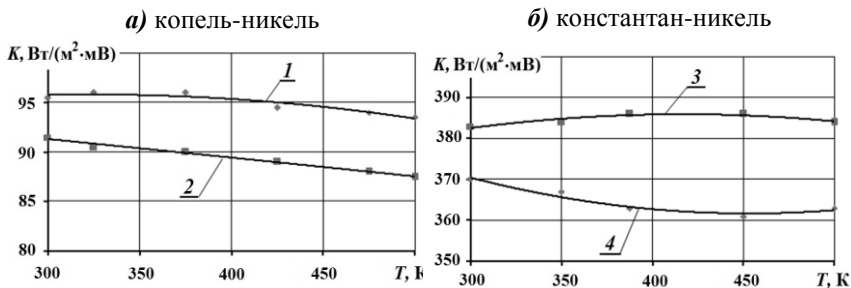


Рис. 4.17. Температурные зависимости чувствительности $S(T)$ различных пар термоэлектродов при вариации отношения $(f_{21})_{opt}$



1, 2 – эталонные ПТП;
 3, 4 – ПТП для применения в космических аппаратах

Рис. 4.18. Температурная зависимость коэффициентов преобразования ПТП на базе копель-никелевых (а) и константан-никелевых (б) термоэлементов

Стабильность во времени коэффициента преобразования ПТП зависит также от стабильности свойств заливочного компаунда. Начальная полимеризация эпоксидного компаунда при изготовлении ПТП происходит достаточно быстро, однако полная полимеризация может длиться несколько месяцев. Полимеризация сопровождается электрохимическими эффектами с выделением летучих компонентов, изменением теплового и электрического сопротивления компаунда. Особенно длительно протекает полимеризация в случаях, когда затруднен выход летучих компонентов, например, если ПТП клеивается в плохо проницаемый корпус.

Были проведены исследования полимеризации компаунда на базе смолы Т-111 в ПТП, выполненном в виде цилиндрической оболочки и клеенном между стаканом калориметрической ячейки и корпусом прибора – калориметра сгорания [2.148]. Для ускорения процесса полимеризации ПТП в сборе с ячейкой и корпусом подвергался термоциклическим нагрузкам путем ежедневного нагрева до (353–358) К в течение (6–8) часов. До окончания полимеризации компаунд обладает электрической проводимостью и электролитическими свойствами, которые удобно использовать для контроля процесса.

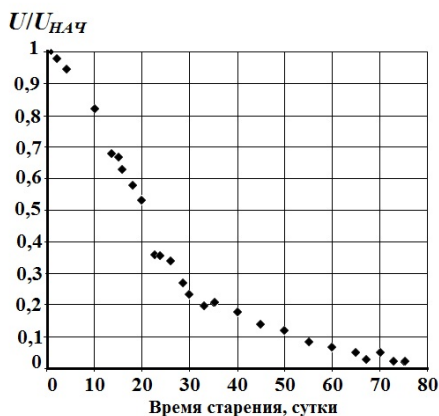


Рис. 4.19. Зависимость относительного изменения напряжения между ЧЭ ПТП и дюралюминиевым корпусом в процессе старения

На рисунке 4.19 показан характер изменения напряжения между чувствительным элементом ПТП и дюралюминиевым корпусом, которое возникает, благодаря электролитическим свойствам компаунда. Измерения проводились в стационарном

режиме при температуре (323 ± 5) К. Как следует из полученных данных, в указанных условиях полимеризация длится почти 80 суток.

Данные о временной стабильности метрологических характеристик термоэлектрических гальванических ПТП получены путем экспериментальных исследований стабильности коэффициентов преобразования трех групп ПТП.

I группу составили константан-медные ПТП с компаундом на основе смолы Т-111. Большую группу таких ПТП (порядка 200 штук) в течение (7-10) лет применяли в строительных сертификационных лабораториях Украины и Беларуси для контроля теплового сопротивления ограждающих конструкций. Эти ПТП проходили ежегодную метрологическую поверку, при которой устанавливалась пригодность для последующей эксплуатации путем определения погрешности измерения или степени отклонения коэффициента преобразования от значения, установленного при первичной поверке (метрологической аттестации).

Температурные условия эксплуатации этих ПТП достаточно мягкие: от минус 15°C до 50°C , однако при установке и особенно при снятии с контролируемого объекта ПТП подвергаются значительным механическим нагрузкам. Ежегодно выходит из строя около 2% ПТП этой группы, причем половина отказавших ПТП приходится на отказы типа механических – обрыв токосъемных проводников и (или) ЧЭ, трещины и сколы и т.п., а вторая половина – на метрологические отказы, вызванные изменением коэффициента преобразования и, соответственно, увеличением погрешности измерения выше установленного предела $\pm 4\%$. Аттестация и последующие поверки ПТП этой группы проводились на радиационном компараторе, у которого случайная составляющая погрешности 3%, поэтому медленные малые изменения коэффициента преобразования не могли быть обнаружены.

II группу составили константан-серебряные ПТП, которые в течение 20 лет использовались в отделе теплотметрии

ИТТФ в качестве рабочих эталонов. Эта группа малочисленна – изначально всего 3 образца, причем в процессе эксплуатации два из них вышли из строя вследствие механической поломки. ПТП этой группы подвергались регулярным поверкам на кондуктивной градуировочной установке КГУ-1-25 – исходном образцовом СИТ. В результате установлено, что изменения коэффициента преобразования не превысило 1,5%, то есть были не больше случайной составляющей погрешности воспроизведения и передачи размера единицы измерения теплового потока в установке (подробнее см. в главе 6).

III группу составили константан-никелевые ПТП с компаундом на базе полимера УП-610 с корундовым наполнителем. Группа из восьми ПТП после изготовления была подвергнута старению. Старение осуществлялось методом термоциклирования с ежедневным разогревом ПТП в зажатом состоянии (для исключения изгибов) до температуры 500 К и последующим охлаждением до комнатной температуры. После остывания ПТП определяли их коэффициенты преобразования. Результаты измерений в виде семейства графиков представлены на рисунке 4.20. Как видно из представленных



Рис.4.20. Относительные изменения коэффициентов преобразования константан-никелевых ПТП в процессе старения при термоциклировании

результатов, на фоне хаотических случайных изменений, составляющих (2,5–3)% и вызванных погрешностью измерений, наблюдается медленное изменение коэффициента преобразования, достигающее для некоторых ПТП 10%. Наблюдается как увеличение коэффициента преобразования, так и его уменьшение.

После 20÷25 термоциклов коэффициент преобразования стабилизируется и дальнейшие его проверки в течение полутора лет не выявили отклонений, превышающих погрешность аттестации. Таким образом данные обследования трех групп ПТП свидетельствуют, что среднее время наработки ПТП на метрологический отказ может достигать нескольких десятков лет. Для получения достоверных численных оценок характеристик стабильности и метрологической надежности ПТП необходимо продолжить длительный сбор статистических данных по большему количеству ПТП.

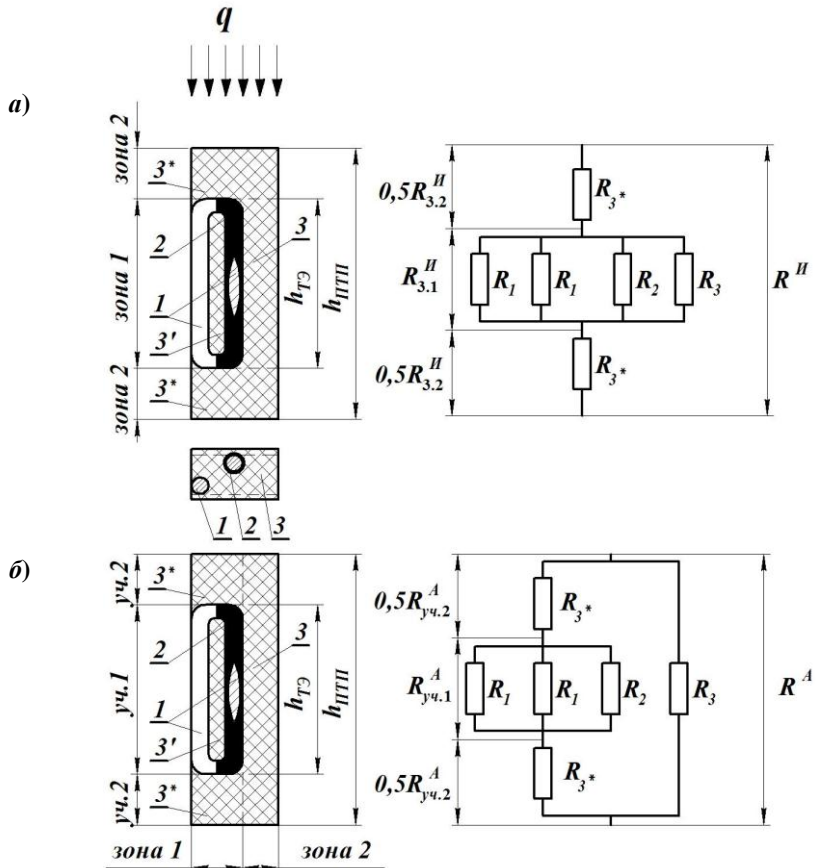
Результаты исследований подтвердили целесообразность изготовления стандартных ПТП с никелевым покрытием в биметаллическом термоэлектроде, с использованием компаунда на базе полимера УП-610 с корундовым или кварцевым наполнителем, с последующим старением путем термоциклирования. При этом верхнюю температуру в термоциклах надо задавать на (10–15) К выше ожидаемой максимальной температуры эксплуатации.

4.1.4 Теплопроводность и тепловое сопротивление стандартного ПТП

Корректность измерения теплового потока стандартным ПТП вида вспомогательной стенки, как показано в главе 3, зависит в значительной степени от эффективной теплопроводности или собственного теплового сопротивления ПТП и степени их согласованности с материалом объекта контроля и условиями теплообмена между поверхностью объекта и окружающей средой.

Формулы для расчета эффективного теплового сопротивления стандартного ПТП выведены, исходя из представления о ПТП как гетерогенном теле с замкнутыми, вытянутыми по направлению теплового потока включениями с контрастной теплопроводностью, методом изотермического и адиабатного дробления согласно рекомендациям [4.19–4.21].

На рисунке 4.21 даны схемы единичного термоэлемента традиционного биметаллического ПТП с указанием зон дробления на элементарные ячейки изотермическими и адиабатными плоскостями и эквивалентные схемы соединения компонентов теплового сопротивления соответствующих зон [2.112, 4.21].



1 – основной термоэлектрод; 2 покрытие; 3, 3', 3* – заливающий компаунд

Рис. 4.21. Схемы изотермического (а) и адиабатного (б) дробления единичного термоэлемента традиционного ПТП и соответствующие эквивалентные схемы соединения компонентов теплового сопротивления

При выводе расчетных формул использованы такие основные понятия и правила:

– формпараметр φ традиционного биметаллического ПТП в электроизоляционном заливочном компаунде, согласно формуле (4.5);

– тепловое сопротивление i -го компонента с учетом доли площади его сечения относительно суммарной площади рассматриваемой зоны, равное

$$R_i = (h_i/\chi_i)/(f_i/f_\Sigma) = h_i \cdot f_\Sigma / (\chi_i \cdot f_i), \quad (4.25)$$

где h_i – высота i -го компонента, соответствующая либо высоте термоэлемента $h_{ТЭ}$, либо высоте ПТП $h_{ПТП}$, либо их разности; f_i – площадь i -ого компонента; f_Σ – общая площадь рассматриваемой зоны дробления;

– тепловая проводимость i -го компонента, равная:

$$\Lambda_i = 1/R_i. \quad (4.26)$$

При **последовательном** расположении компонентов теплового сопротивления рассматриваемой зоны справедливо правило аддитивности значений теплового сопротивления:

$$R_{\text{зОН}} = \sum_{i=1}^n R_i, \quad (4.27)$$

где n – количество компонентов в зоне, R_i – согласно формуле (4.25), а при **параллельном** – правило аддитивности значений тепловой проводимости:

$$\Lambda_{\text{зОН}} = \sum_{i=1}^n \Lambda_i = \sum_{i=1}^n (1/R_i). \quad (4.28)$$

Тепловое сопротивление ПТП рассчитывают по формулам (4.27) и (4.28) в зависимости от выбранного способа их представления: по изотермической (R^H) или адиабатной (R^A) модели. При необходимости найти коэффициент эффективной теплопроводности, его вычисляют, исходя из равенства $\chi = h/R$.

Как видно на рис. 4.21, *a*, при дроблении термоэлемента изотермическими плоскостями получают три последовательно расположенные зоны: средняя (3.1) и две крайние (3.2). При этом, высота зоны 3.1 совпадает с высотой термоэлемента $h_{3,1} = h_{TЭ}$, а суммарная высота двух крайних зон $h_{3,2} = h_{III} - h_{TЭ}$. Площадь этих зон принята одинаковой: $f_{3,1} = f_{3,2} = f_{\Sigma} (= f_{TE})$.

Средняя зона (3.1) соответствует термоэлементу, содержащему четыре параллельно включенных тепловых сопротивления: двух основных термоэлектродов, гальванического покрытия и заливочного компаунда, заполняющего межвитковое пространство. Согласно правилу (4.28) имеем

$$R_{3,1}'' = \left(\frac{2 \cdot \chi_1 \cdot f_1}{h_{TЭ} \cdot f_{TЭ}} + \frac{\chi_2 \cdot f_2}{h_{TЭ} \cdot f_{TЭ}} + \frac{\chi_3 \cdot f_3}{h_{TЭ} \cdot f_{TЭ}} \right)^{-1} =$$

$$= \frac{h_{TЭ} \cdot f_{TЭ}}{2\chi_1 \cdot f_1 + \chi_2 \cdot f_2 + \chi_3 \cdot f_3} = \frac{h_{TЭ}}{\chi_1} \cdot \frac{\varphi}{\Lambda_{2,1,1} + \chi_{31} \cdot (\varphi - b)}, \quad (4.29)$$

где φ – по формуле (4.5);

$\Lambda_{2,1,1}$ – тепловая проводимость двух термоэлектродов термоэлемента (основного (1) и биметаллического (2)), приведенная к тепловой проводимости и площади сечения основного термоэлектрода, равная:

$$\Lambda_{2,1,1} = \left(2 \cdot \frac{\chi_1 \cdot f_1}{h_1} + \frac{\chi_2 \cdot f_2}{h_1} \right) / \left(\frac{\chi_1 \cdot f_1}{h_1} \right) = 2 + \chi_{21} \cdot f_{21}; \quad (4.30)$$

b – суммарная площадь сечения термоэлектродов термоэлемента, приведенная к площади основного термоэлектрода, равная:

$$b = (2f_1 + f_2) / f_1 = 2 + f_{21}. \quad (4.31)$$

Две крайние зоны, соответствующие наружным защитным слоям из заливочного компаунда термоэлемента, имеют суммарное эффективное тепловое сопротивление $R_{3,2}''$, равное:

$$R_{3,2}'' = (h_{III} - h_{TЭ}) / \chi_3. \quad (4.32)$$

Таким образом, расчетная формула для эффективного теплового сопротивления изотермической модели ПТП с использованием формул (4.29) и (4.32) имеет вид:

$$R_{III}'' = R_{3,1}'' + R_{3,2}'' = \frac{h_{III}}{\chi_3} \cdot \frac{\Lambda_{2,1} \cdot (1 - h_{TЭ}/h_{III}) + \chi_{31} \cdot (\varphi - b(1 - h_{TЭ}/h_{III}))}{\Lambda_{2,1} + \chi_{31} \cdot (\varphi - b)}. \quad (4.33)$$

При адиабатном дроблении ПТП, как показано на рис. 4.21, б, получаются две параллельные зоны с тепловым сопротивлением $R_{3,1}^A$ и $R_{3,2}^A$. Зона 3.1 состоит из трех последовательных участков: среднего (уч.1) и двух крайних (уч.2). Суммарное тепловое сопротивление крайних участков находится по формуле (4.32).

Средний участок охватывает параллельно расположенные два основных термоэлектрода (1), гальваническое покрытие (2) и тонкую вертикальную электроизоляционную прослойку между ними (3'). Наличие прослойки можно не учитывать из-за существенно меньшей тепловой проводимости по сравнению с проводимостью близлежащих металлических термоэлектродов. Согласно правилу (4.28) тепловое сопротивление среднего участка вычисляется по формуле:

$$R_{уч.1} = h_{TЭ} \cdot b \cdot (\chi_1 \cdot \Lambda_{2,1})^{-1}. \quad (4.34)$$

Таким образом, эффективное тепловое сопротивление зоны 3.1, согласно правилу (4.27) и исходя из формул (4.32) и (4.34), равно:

$$R_{3,1}^A = \frac{h_{III} - h_{TЭ}}{\chi_3} + \frac{h_{TЭ}}{\chi_1} \cdot \frac{b}{\Lambda_{2,1}} = \frac{h_{III}}{\chi_3} \cdot \frac{\Lambda_{2,1} \cdot (1 - h_{TЭ}/h_{III}) + \chi_{31} \cdot b \cdot h_{TЭ}/h_{III}}{\Lambda_{2,1}}. \quad (4.35)$$

Учитывая, что тепловое сопротивление 2-й зоны равно h_{III}/χ_3 , расчетная формула для теплового сопротивления адиабатной модели согласно правилу (4.28) имеет вид:

$$R_{III}^A = \frac{h_{III}}{\chi_3} \cdot \frac{\varphi \cdot (\Lambda_{2,1} \cdot (1 - h_{TЭ}/h_{III}) + \chi_{31} \cdot b \cdot h_{TЭ}/h_{III})}{\Lambda_{2,1} \cdot (\varphi \cdot (1 - h_{TЭ}/h_{III}) + b \cdot h_{TЭ}/h_{III}) + \chi_{31} \cdot b \cdot (\varphi - b) \cdot h_{TЭ}/h_{III}}. \quad (4.36)$$

В [4.20] сформулировано правило, по которому для максимального приближения к истинным значениям коэффициента эффективной теплопроводности системы с замкнутыми включениями необходимо брать среднее арифметическое значение результатов, полученных по моделям адиабатного и изотермического дробления на элементарные ячейки. Согласно этому, эффективное тепловое сопротивление ПТП равно

$$R_{ПТП} = 0,5 \cdot (R_{ПТП}^H + R_{ПТП}^A), \quad (4.37)$$

где $R_{ПТП}^H$ – при формуле (4.33), а $R_{ПТП}^A$ – по формуле (4.36).

Однако, указанное правило рекомендовано для систем с невытянутыми замкнутыми включениями. Как показали экспериментальные исследования применительно к структуре батарейного ПТП [2.112], оно хорошо работает для ПТП, выполненных из спирали с высотой термоэлементов не более 1 мм, каковыми и является большинство производимых ПТП.

Если ПТП выполнен из спирали термоэлементов высотой $h_{ТЭ} > 1$ мм, его эффективное тепловое сопротивление может быть расчетным путем оценено по указанному алгоритму с учетом правил (4.27) и (4.28) для последовательного и параллельного расположения компонентов его теплового сопротивления. При этом полезно воспользоваться виртуальным представлением исходного ПТП как совокупности двух ПТП, суммарная высота которых равна высоте исходного ПТП. Один из них (ПТП₁) является преобразователем высотой $h_{ПТП}$, состоящим из спирали высотой в 1 мм с двумя наружными защитными слоями заливочного компаунда, суммарная высота которых равна суммарной высоте наружных заливочных слоев исходного ПТП. Преобразователь ПТП₁ можно считать композицией с невытянутыми замкнутыми включениями и для него справедливо равенство (4.37), основанное на формулах (4.33) и (4.36), в которые при расчетах теплового сопротивления $R_{ПТП,1}$ следует подставлять в каче-

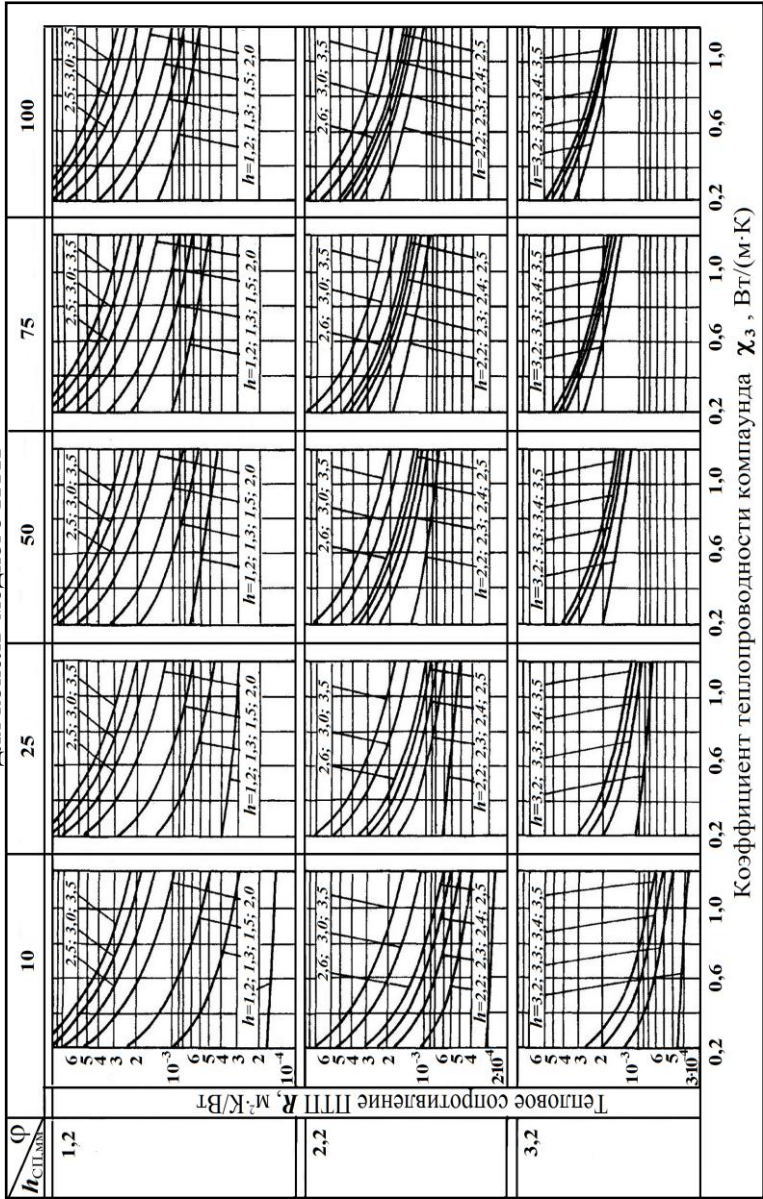
стве высоты термоэлемента значение $h_{ПТП} = 0,001$ м, а высоты ПТП₁ значение $h_{ПТП.1} = h_{ПТП} - h_{ТЭ} + 0,001$.

Другой преобразователь ПТП₂, расположенный в средней части исходного ПТП, состоит только из батареи термоэлементов без наружных защитных слоев заливочного компаунда, то есть с высотой $h_{ПТП.2} = h_{ТЭ} - 0,001$. Его тепловое сопротивление $R_{ПТП.2}$ рассчитывается по формуле (4.29), а для определения теплового сопротивления исходного ПТП следует воспользоваться правилом (4.27) в силу последовательного включения компонентов $R_{ПТП.1}$ и $R_{ПТП.2}$.

Однако, надежнее определять эффективное тепловое сопротивление ПТП с высотой термоэлементов более 1 мм экспериментальным путем на образцах ПТП в приборе для измерения теплопроводности или теплового сопротивления. При этом можно получить зависимости теплового сопротивления от формпараметра, высоты термоэлементов, общей высоты ПТП и коэффициента теплопроводности заливочного компаунда.

Как видно из расчетных формул, тепловое сопротивление (или коэффициент эффективной теплопроводности) биметаллического ПТП в электроизоляционном компаунде существенно зависит от тепловой проводимости защитных наружных слоев заливочного компаунда. Это открыло пути создания ПТП с требуемым тепловым сопротивлением за счет варьирования типом наполнителя, его концентрацией и толщиной слоев заливочного компаунда по обоим торцам ПТП. Оценочные расчеты, выполненные для константан-медного ПТП, позволили получить зависимости теплового сопротивления от теплопроводности заливочного компаунда χ_3 при вариациях формпараметра ($\varphi = 10; 25; 50; 75; 100$) и высоты ПТП (от 1,2 мм до 3,5 мм) для трех фиксированных значений высоты термоэлементов $h_{ТЭ} = 1,2; 2,2$ и 3,2 мм, в графическом виде систематизированные в таблице 4.2 [4.12].

Таблица 4.2 – Зависимости теплового сопротивления при вариации параметров для копель-медного ПТП



На рисунке 4.22 отражены температурные зависимости коэффициента теплопроводности (α) и теплового сопротивления (δ) копель-никелевого ПТП. Графики построены для таких значений параметров: $\varphi = 31,5$; $f_{21} = 0,60$; $d_1 = 0,9$ мм; $n = 5$ шт/мм и $h_{ТЭ} = 1,2$ мм при вариации высоты ПТП $h_{ПТП}$ в диапазоне от 1,2 мм до 2,2 мм с шагом 0,2 мм, за счет изменения толщины защитных слоев из заливочного компаунда по обе стороны термобатареи.

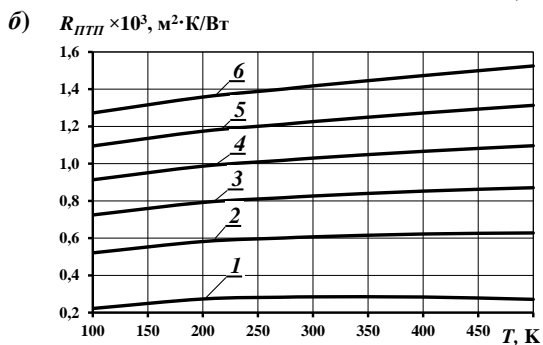
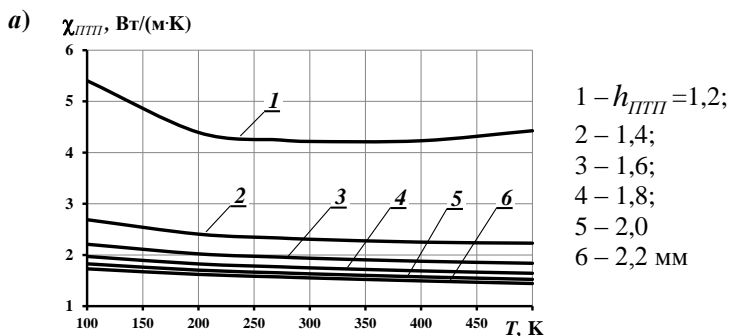


Рис. 4.22. Расчетные температурные зависимости коэффициента теплопроводности (**a**) и теплового сопротивления (**б**) копель-никелевого ПТП

Необходимый диапазон значений коэффициента теплопроводности заливочного компаунда обеспечивается использованием различных эпоксидных компаундов и их наполнителей, таких например, как корунд и плавленный кварц. При этом наполнение смолы корундом обеспечивает максимальный коэффициент теплопроводности при сохранении хороших электроизоляционных качеств, а плавленным кварцем –

при удовлетворительной теплопроводности дает преимущества при подборе значения коэффициента линейного термического расширения (КТР) ПТП.

Согласование КТР ПТП и соответствующих узлов объекта контроля, например, прибора, является не менее важным моментом, чем достижение требуемого теплового сопротивления. Например, при необходимости установки ПТП на поверхности детали, выполненной из алюминия либо его сплавов, заливочный компаунд ПТП должен содержать на 1,0 в. ч. эпоксидной смолы 1,5 в. ч. наполнителя из плавленного кварца, а при монтаже ПТП на поверхностях из меди или нержавеющей стали – (2,1–2,3) в. ч. Подбором соотношения качеств связующего и наполнителя удастся получить ПТП с различными КТР для обеспечения равенства значений этого коэффициента ПТП и подложки, то есть материала объекта, где устанавливают ПТП. На рисунке 4.23 приведены средние значения КТР (α_p) за-

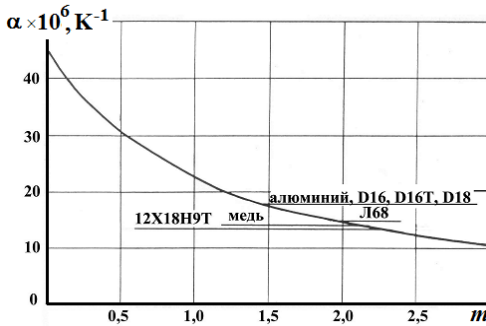


Рис. 4.23. Средние значения КТР эпоксидного компаунда при вариации массовой концентрации m наполнителя в диапазоне температуры от 77 К до 300 К

ливающего компаунда в зависимости от массовой концентрации m наполнителя – плавленного кварца при температуре от 77 К до 300 К. Этот график позволяет определить значение КТР проектируемого ПТП и соответствующую концентрацию наполнителя для нескольких видов матери-

алов, на которые приходится клеить ПТП при эксплуатации.

Для получения ПТП, удовлетворяющего одновременно требованиям по тепловому сопротивлению и коэффициенту линейного КТР целесообразно использовать при формовании ПТП неодинаковые компаунды для термобатареи и наружных

защитных слоев, например, компаунд с плавленным кварцем для термобатареи, а компаунд, наполненный нитридом бора (β -NB) – наружных покрытий.

Существенное уменьшение эффективного теплового сопротивления ПТП может быть достигнуто путем размещения между тепловоспринимающей и теплоотдающей поверхностями ПТП шунтов с высокой теплопроводностью. При этом шунты должны быть равномерно распределены в теле ПТП, а наружные поверхности термобатареи снабжены температуровыравнивающими покрытиями, что реализовано в специальных моделях ПТП, отличающихся от стандартного ПТП наличием указанных элементов (подробнее см. 4.2).

4.1.5 Теплоемкость стандартного батарейного биметаллического ПТП

С развитием теплометрических приборов и установок, предназначенных для проведения исследований в динамическом тепловом режиме [2.15, 2.28, 4.6, 4.22, 4.23], актуальным становится учет теплоемкости применяемых ПТП. Теплоемкость единичного термоэлемента стандартного батарейного биметаллического ПТП, исходя из его структуры (см. рис. 2.38 и рис. 4.1) и приведенной на рисунке 4.24 схемы поперечного сечения ПТП, а также законов аддитивности, описывается следующей зависимостью [2.111, 4.23]:

$$(c \cdot \rho)_{TЭ} \cdot V_{TЭ} = 2 \cdot (c \cdot \rho)_1 \cdot V_1 + (c \cdot \rho)_2 \cdot V_2 + (c \cdot \rho)_3 \cdot V_3 + (c \cdot \rho)_4 \cdot V_4 + (c \cdot \rho)_5 \cdot V_5, \quad (4.38)$$

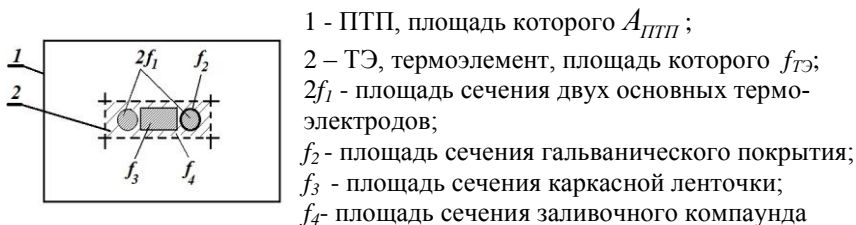


Рис. 4.24. Схема поперечного сечения ПТП и единичного термоэлемента

где $(c \cdot \rho)_i$ – объемная теплоемкость i -го компонента ПТП, при этом обозначения с индексами 1 и 2 – как и в предыдущих параграфах; $i = 3$ – каркасной ленточки, на которую навита термоэлектродная проволока (в отдельных модификациях ПТП ленточка может быть заменена заливочным компаундом); $i = 4$ – заливочного компаунда в межвитковом пространстве; $i = 5$ – наружных слоев компаунда; $V_{TЭ} = f_{TЭ} \cdot h_{ПТП}$ – объем единичного термоэлемента с высотой $h_{ПТП}$, при этом площадь термоэлемента равна:

$$f_{TЭ} = 2f_1 + f_2 + f_3 + f_4. \quad (4.39)$$

По аналогии с выражением (4.5) безразмерный геометрический параметр ПТП в данном случае равен:

$$\varphi^* = f_{TЭ} / f_1 = 2 + f_{21} + f_{31} + f_{41} \quad (4.40)$$

Объем V_i каждого компонента ПТП, соответственно, равен:

$$V_1 = f_1 \cdot h_{ЭФ}, \quad (4.41)$$

$$V_2 = f_2 \cdot h_{ЭФ}, \quad (4.42)$$

$$V_3 = f_3 \cdot (h_{ЭФ} - 2 \cdot d_1), \quad (4.43)$$

$$V_4 = f_4 \cdot h_{ЭФ} = f_{\Sigma} - (2 \cdot f_1 + f_2 + f_3), \quad (4.44)$$

$$V_5 = f_5 \cdot (h_{ПТП} - h_{ЭФ}) = f_{TЭ} \cdot (h_{ПТП} - h_{ЭФ}), \quad (4.45)$$

где $h_{ЭФ}$ – эффективная высота термоэлемента, не совпадающая с высотой ПТП, которая может быть вычислена по формуле:

$$h_{ЭФ} = 0,5\pi(a + d_1) + \sqrt{b^2 + 0,5p^2}, \quad (4.46)$$

где d_1 – диаметр основной термоэлектродной проволоки; p – шаг навивки проволоки в спираль; a и b – толщина и высота каркасной ленточки.

С использованием формул (4.40) – (4.45) и отнесения площади сечения компонентов f_i к площади сечения основ-

ного термоэлектрода f_1 выражение (4.38) для теплоемкости единичного термоэлемента преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} (c\rho)_{TЭ} = & 2 \cdot (c\rho)_1 \cdot \frac{1}{\varphi^*} \cdot \frac{h_{ЭФ}}{h_{ППП}} + (c\rho)_2 \cdot \frac{f_{21}}{\varphi^*} \cdot \frac{h_{ЭФ}}{h_{ППП}} + (c\rho)_3 \cdot \frac{f_{31}}{\varphi^*} \cdot \frac{h_{ЭФ} - 2d_1}{h_{ППП}} + \\ & + (c\rho)_4 \cdot \frac{f_{41}}{\varphi^*} \cdot \frac{h_{ЭФ}}{h_{ППП}} + (c\rho)_5 \cdot \left(1 - \frac{h_{ЭФ}}{h_{ППП}} \right) \end{aligned} \quad (4.47)$$

или

$$\begin{aligned} (c\rho)_{TЭ} = & (c\rho)_4 \cdot \left[\frac{h_{ЭФ}}{h_{ППП} \cdot \varphi^*} \cdot \left(2(c\rho)_{14} + (c\rho)_{24} \cdot f_{21} + (c\rho)_{34} \cdot \left(f_{31} - \frac{2d_1}{h_{ЭФ}} \right) \right) \right] + \\ & + (c\rho)_{54} \cdot \left(1 - \frac{h_{ЭФ}}{h_{ППП}} \right) + f_{41} \end{aligned} \quad (4.48)$$

где $(c\rho)_{i4} = (c\rho)_i / (c\rho)_4$ - теплоемкость компонентов термоэлемента, приведенная к теплоемкости заливочного компаунда.

Полученные соотношения (4.47) или (4.48) позволяют рассчитать объемную теплоемкость ПТП с учетом формпараметра и геометрических размеров с привлечением справочных данных о свойствах его компонентов [4.4, 4.6–4.10, 4.14–4.16, 4.19, 4.20]. Полученные таким образом расчетные значения объемной теплоемкости ПТП являются приближенными, так как включают в себя погрешности определения исходных данных, входящих в формулы (4.47), (4.48). Здесь и погрешности справочных данных по теплоемкости [4.24–4.26], и неадекватность значений расчетных параметров f_2/f_1 и φ^* их реальным значениям из-за сложной технологии изготовления ПТП, и несоответствие истинного диаметра термоэлектродной проволоки его значению по сертификату, и погрешности вычисления эффективной высоты термоэлемента, и прочие погрешности, источниками которых являются технологические несовершенства изготовления.

В связи с этим наиболее достоверными результатами являются полученные экспериментально. На рисунке 4.25 представлены результаты экспериментального исследования теплоемкости компонентов и готового копель-медного ПТП в диапазоне температуры (100 – 425) К.

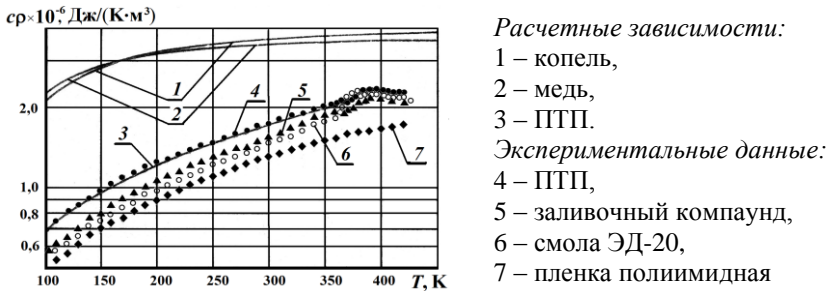


Рис. 4.25. Зависимость объемной теплоемкости ПТП и его компонентов от температуры

ПТП был изготовлен из копелевой проволоки диаметром 0,09 мм, навитой на каркасную ленточку высотой 1,5 мм из полиимидной пленки толщиной 0,1 мм. В качестве электроизоляционного заливочного материала использован компаунд из эпоксидной смолы, наполненной молотым плавляемым кварцем в отношении 1:2,1. Из компонентов ПТП отдельно исследованы образцы отвердевшего заливочного компаунда, чистой эпоксидной смолы ЭД-20, отвержденной ПЭПА, и полиимидной пленки, экспериментальные данные по объемной теплоемкости которых на рис. 4.25 представлены графиками 5-7, соответственно. Графики 1 и 2 для копеля и меди построены по справочным данным [4.6], а температурная зависимость объемной теплоемкости готового ПТП представлена графиком 3, построенным по формуле (4.48), и экспериментальным данным 4 (точки на графике 3). Экспериментальные данные получены с погрешностью, не превышающей трех погрешностей образцовой меры теплоемкости (лейкосапфира), то есть не более 1,5 % [2.28].

Анализ этих результатов показывает, что ПТП, заформованный в эпоксидный компаунд с наполнителем из молотого плавленого кварца, устанавливаемый в теплотрический прибор, обеспечивает верхний предел диапазона рабочей температуры 370 К. Это следует из того, что при высоких значениях температуры происходит процесс перехода в эластичное состояние, сопровождающееся ступенчатым увеличением теплоемкости (кривая 3). Кроме того, сравнение графиков 5 и 6 показывает, что теплоемкость эпоксидного компаунда с кварцевым наполнителем незначительно отличается от теплоемкости чистой эпоксидной смолы, отвержденной ПЭПА. Однако присутствие данного наполнителя увеличивает температуру перехода в эластичное состояние и повышает теплоемкость ПТП.

Кроме того, экспериментально были исследованы температурные зависимости объемной теплоемкости конкретных ПТП, заформованных в различные эпоксидные компаунды. Полученные результаты показали, что отличия между экспериментальными данными и полученными для однотипных образцов разными методами, меньше, чем инструментальная погрешность примененного прибора.

При сравнении объемной теплоемкости ПТП, выполненных в полимерной заливке, и наиболее распространенных строительных и конструкционных материалов видно, что значения их теплоемкости соизмеримы. Это позволяет применять ПТП в теплотрических приборах, предназначенных для исследования динамических тепловых процессов. При этом необходимо ПТП, проектируемые для теплотрических приборов (калориметров, приборов и устройств для комплексного определения теплофизических характеристик), подвергать тщательному калориметрическому анализу на предмет выявления фазовых превращений с целью более точного определения допускаемого диапазона рабочих значений температуры прибора, для которого предназначен ПТП.

4.2 ПТП с тепловыми шунтами и температурывравнивающими наружными покрытиями

В связи с тем, что измеренное с помощью ПТП значение плотности теплового потока $q_{ИЗМ}$ отличается от действительного q_0 , требуется внесение корректирующей поправки δ^q , учитывающей суммарный вклад погрешностей, обусловленных влиянием размеров ПТП, ТФХ и ТРХ ПТП и объекта контроля (далее – ОК), а также теплообменом с ОС. При этом, согласно формуле (3.14) и методике [3.20] действительное значение плотности измеряемого теплового потока равно:

$$q_0 = q_{ИЗМ} \cdot (1 + \delta^q)^{-1}, \quad (4.49)$$

где δ^q – корректирующая поправка, которую определяют по специальному алгоритму с использованием номограммы, приведенной в работах [3.20, 4.28, 4.29], при наличии достоверной информации о параметрах как ПТП, так и ОК.

Однако, этот путь весьма трудоемкий и требующий большого объема дополнительных измерений и информации по применяемому ПТП (значения радиусов ПТП и чувствительного элемента, высоты ПТП и термобатареи, коэффициента теплопроводности или теплового сопротивления и степень черноты его поверхности) и обследуемому объекту, а именно: о виде ОК (пол, стена или потолок; стена или крыша), эффективной теплопроводности и (или) тепловом сопротивлении, излучательной способности ее поверхности, а также температуре ОС и скорости ветра.

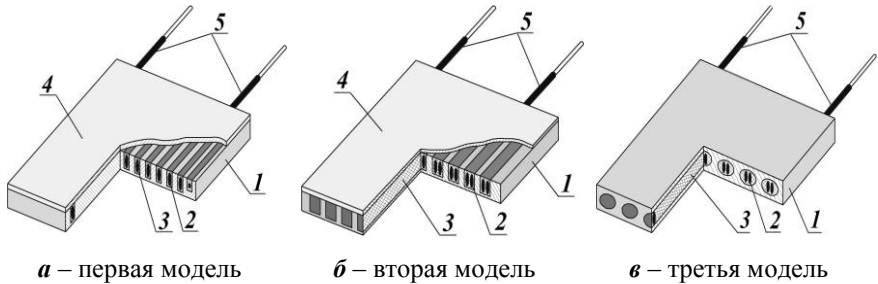
В случае отсутствия или неполноты необходимой информации, а также, когда условия эксплуатации не являются постоянными, целесообразно применять ПТП, характеристики которого согласованы с особенностями ОК и условиями проведения измерений. Основное внимание при этом должно быть обращено на тепловое сопротивление ПТП, значение которого, как показано в 4.1.4, зависит от высоты ПТП, термобатареи и защитных слоев заливочного компаунда по обе

стороны спирали термоэлементов, а также формпараметра ПТП и теплопроводности его компонентов, главным образом, заливочного компаунда. Следует учитывать, что именно сопротивление наружных слоев компаунда вносит заметный вклад в эффективное сопротивление ПТП, а использование неодинаковых по теплопроводности компаундов для заливки спирали и защитных слоев (см. 4.1.4), хотя и позволяет изменять тепловое сопротивление ПТП, но в узком диапазоне.

Другим способом технологического изменения теплового сопротивления ПТП является изготовление ПТП с тепловыми шунтами из высокотеплопроводного материала [4.29], расположенными между тепловоспринимающей и теплоотдающей поверхностями ПТП. Основное назначение тепловых шунтов заключается в уменьшении тепловой нагрузки на ЧЭ ПТП. Такие ПТП необходимы для измерения плотности теплового потока при высокоинтенсивном теплообмене. Именно введение в конструкцию ПТП тепловых шунтов, равномерно распределенных в теле ПТП и связывающих между собой рабочие поверхности ПТП, приводит к существенному изменению эффективного теплового сопротивления ПТП. Для обеспечения оптимальных условий работы шунтов используется температуровыравнивающее покрытие обеих плоских поверхностей ПТП. Эффективная теплопроводность таких ПТП близка по значению к теплопроводности металлов, что позволяет обеспечить корректность измерений на поверхности ОК из высокотеплопроводного материала при больших значениях коэффициента теплообмена.

4.2.1 Варианты конструкций ПТП с тепловыми шунтами

ПТП с шунтами имеют различное конструктивное исполнение в зависимости от поставленной задачи, условий измерения и требований к значению теплового сопротивления. На рисунке 4.26 показаны три конструктивных решения ПТП с тепловыми шунтами в металлическом корпусе.



1 – металлический корпус; 2 – ленточная батарея термоэлементов;
 3 – электроизоляционный заливочный компаунд; 4 – крышка; 5 – выводы

Рис. 4.26. Варианты моделей ПТП с тепловыми шунтами, изготовленных в металлическом корпусе

Одной из первых моделей ПТП с тепловым шунтом, используемых в приборах для исследования ТФХ материалов, тепловых труб и других объектов новой техники, явилась конструкция ПТП с фрезерованным металлическим корпусом (см. рис. 4.26, *а*), в параллельных пазах которого размещена ленточная термобатарея, залитая электроизоляционным компаундом. После полимеризации компаунда к корпусу припаивается крышка. Через два отверстия в боковой поверхности корпуса выведены потенциалосъемные проводники от термобатареи. Недостатком такой конструкции является то, что термоэлементы и заливочный компаунд во время пайки крышки к корпусу претерпевают воздействие высокой температуры, что выдвигает жесткие технологические требования к свойствам заливочного компаунда и гальванического покрытия.

От этого недостатка избавлена вторая модель ПТП (см. рис. 4.26, *б*), технология изготовления которой предусматривает припаивание крышки к корпусу сразу после фрезерования пазов. При этом пазы выполняют вдвое большей ширины и в них вкладывают сложенную вдвое ленточную спираль, предварительно обвитую нитью, пропитанной заливочным

компаундом. Излишки компаунда удаляются через открытые торцы пазов корпуса.

При необходимости размещения ПТП на исследуемой поверхности с высокой температурой надежный тепловой контакт обеспечивают обычно с использованием легкоплавкого припоя или галлий-индиевой эвтектики. Но при этом есть опасность попадания этих веществ на паяные швы корпуса и взаимодействия их с припоем. Исключить такую вероятность позволяет изготовление ПТП с цельнометаллическим корпусом в виде пластины, в которой высверлены параллельные каналы для размещения в них ленточной термобатареи (см. рис. 4.26, в). Если корпус изготовлен из дюралюминиевой пластины, контакт соприкасающихся поверхностей ПТП и ОК обеспечивают, используя смазку, содержащую нитрид бора. В случае изготовления ПТП в нержавеющей корпусе используют легкоплавкие припои или галлий-индиевые эвтектики.

Описанные модели ПТП, хотя и обеспечивают снижение теплового сопротивления, характеризуются низкой технологичностью и, как следствие, высокой себестоимостью. В связи с этим разработана конструкция ПТП, при изготовлении которой максимально использованы технологическое оборудование и процессы, традиционные для ПТП в обычном исполнении. Схема четвертой модели ПТП с тепловыми шунтами показана на рисунке 4.27.

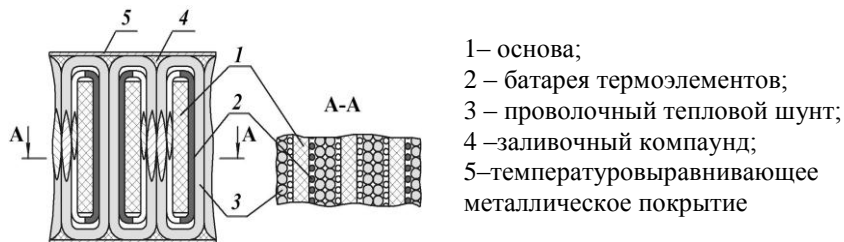


Рис. 4.27. Принципиальная схема ПТП с проволочным тепловым шунтом (четвертая модель)

Главная особенность этой модели ПТП состоит в том, что исключен металлический корпус. В качестве тепловых шунтов, размещенных параллельно термоэлементам, использована электроизолированная проволока, которой обвивают ленточную термобатарейку. Варианты исполнения термобатарейки с проволочным тепловым шунтом представлены на рисунке 4.28.

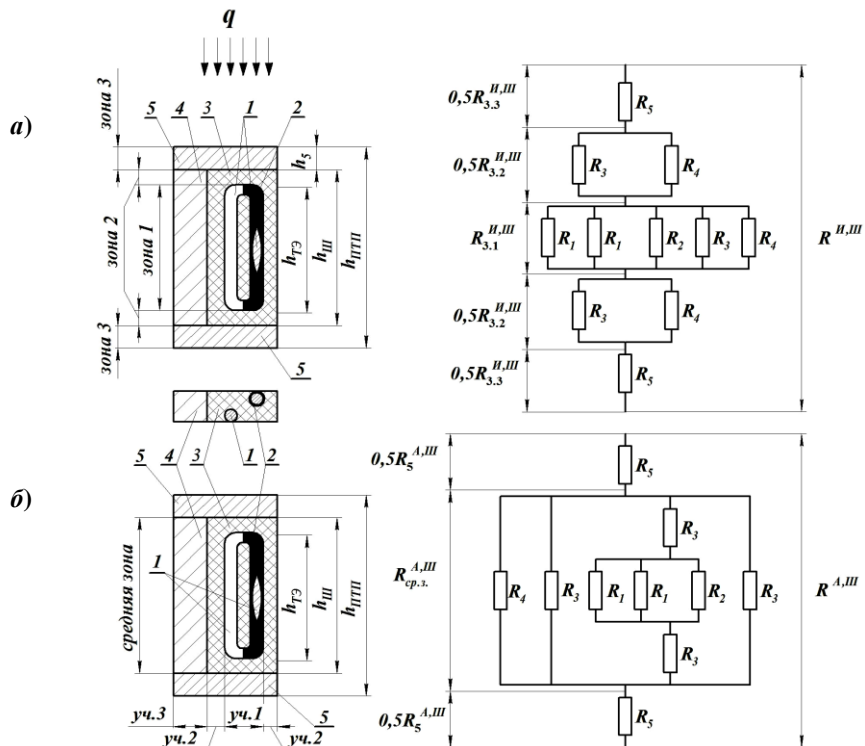


Рис. 4.28. Внешний вид термобатарейки: *а* – без теплового шунта; *б* – с тепловым шунтом в лаковой изоляции; *в* – с тепловым шунтом без лаковой изоляции

Ленточная термобатарейка с нанесенным гальваническим покрытием обвита дополнительно электроизолированной проволокой, медной или константановой, диаметр и плотность навивки которой выбирают, исходя из расчета требуемого значения эффективного теплового сопротивления ПТП. Дальнейшая технология изготовления ПТП не отличается от традиционной. После получения заготовки ПТП вида вспомогательной стенки, состоящей из гальванических термоэлементов, заформованных вместе с проволочными шунтами в заливочном компаунде, рабочие поверхности ПТП сошлифовывают до появления в срезе сечений шунтирующей проволоки и, при необходимости, металлизуют, образуя тем самым наружное температуровыравнивающее покрытие теплопринимающей и теплоотдающей поверхностей ПТП.

4.2.2 Тепловое сопротивление ПТП с шунтами и покрытиями

Для расчета эффективного теплового сопротивления ПТП с проволочными шунтами применен также способ представления ПТП в виде элементарных ячеек, получаемых при изотермическом и адиабатном дроблении. На рисунке 4.29 представлены схемы единичного термоэлемента и соответствующие эквивалентные схемы соединения компонентов теплового сопротивления.



1 – основной термоэлектрод; 2 – гальваническое покрытие; 3 – заливочный компаунд; 4 – тепловой шунт; 5 – температуровыравнивающее покрытие

Рис. 4.29. Схемы изотермического (а) и адиабатного (б) дробления единичного термоэлемента ПТП с тепловым шунтом и температуровыравнивающими покрытиями и соответствующие эквивалентные схемы соединения компонентов теплового сопротивления ПТП

Расчетные формулы для определения эффективного теплового сопротивления получены по аналогии с изложенным в 4.1.4, но при этом площадь единичного термоэлемента равна сумме:

$$f_{TЭ}^{III} = 2f_1 + f_2 + f_3 + f_4, \quad (4.50)$$

где индекс 4 – соответствует тепловому шунту, откуда формула для формпараметра ПТП с тепловыми шунтами φ^{III} , в отличие от формулы (4.5) для формпараметра традиционного ПТП φ , имеет вид:

$$\varphi^{III} = 2 + f_{21} + f_{31} + f_{41} = \varphi + f_{41}. \quad (4.51)$$

Как видно на рис. 4.29, а, при изотермическом дроблении термоэлемента получается модель с тремя последовательно расположенными зонами: 3.1, 3.2 и 3.3. Исходя из правила (4.27), тепловое сопротивление изотермической модели ПТП с шунтами и наружными покрытиями рассчитывается по формуле:

$$R_{ПТП}^{II,III} = R_{3.1}^{II,III} + R_{3.2}^{II,III} + R_{3.3}^{II,III}, \quad (4.52)$$

где $R_{3.1}^{II,III}$, $R_{3.2}^{II,III}$, $R_{3.3}^{II,III}$ – тепловое сопротивление зон 3.1, 3.2 и 3.3 изотермической модели ПТП с шунтами.

Тепловое сопротивление $R_{3.1}^{II,III}$ зоны 3.1 высотой, равной высоте термоэлемента $h_{TЭ}$, состоит из четырех параллельных компонентов, тепловое сопротивление которых: R_1 – основного термоэлектрода (дважды), R_2 – гальванического покрытия, R_3 – заливающего компаунда и R_4 – теплового шунта. Согласно правилу (4.28) тепловое сопротивление зоны 3.1 равно:

$$R_{3.1}^{II,III} = \left(2/R_1 + 1/R_2 + 1/R_{3.1,3} + 1/R_{3.1,4}\right)^{-1}, \quad (4.53)$$

при этом значения теплового сопротивления четырех компонентов зоны 3.1 с учетом формулы (4.25) для R_i и обозначения (4.51) для φ^{III} равны:

$$R_{3.1,1} = f_{TЭ}^{III} \cdot h_{TЭ} / (\chi_1 \cdot f_1) = \varphi^{III} \cdot h_{TЭ} / \chi_1, \quad (4.54)$$

$$R_{3.1,2} = f_{TЭ}^{III} \cdot h_{TЭ} / (\chi_2 \cdot f_2) = \varphi^{III} \cdot h_{TЭ} / (\chi_2 \cdot f_{21}), \quad (4.55)$$

$$R_{3.1,3} = f_{TЭ}^{III} \cdot h_{TЭ} / (\chi_3 \cdot f_3) = \varphi^{III} \cdot h_{TЭ} / (\chi_3 \cdot f_{31}), \quad (4.56)$$

$$R_{3.1,4} = f_{TЭ}^{III} \cdot h_{TЭ} / (\chi_4 \cdot f_4) = \varphi^{III} \cdot h_{TЭ} / (\chi_4 \cdot f_{41}). \quad (4.57)$$

После подстановки выражений (4.54) – (4.57) в формулу (4.46) она принимает вид:

$$R_{3.1}^{II,III} = \frac{\varphi^{III} \cdot h_{TЭ}}{\chi_1 \cdot (2 + \chi_{21} \cdot f_{21} + \chi_{31} \cdot f_{31} + \chi_{41} \cdot f_{41})} = \frac{h_{TЭ}}{\chi_1} \cdot \frac{\varphi^{III}}{\Lambda_{21,1} + \chi_{31} \cdot \Lambda_{43,1}}, \quad (4.58)$$

где $\Lambda_{21,1} = 2 + \chi_{21} \cdot f_{21}$ (см. формулу (4.30)),

$$\Lambda_{43,1} = (\chi_{31} \cdot f_{31} + \chi_{41} \cdot f_{41}) / \chi_{31} = f_{31} + \chi_{43} \cdot f_{41} \quad (4.59)$$

– приведенная тепловая проводимость заливочного компаунда и шунта (относительно заливочного компаунда и площади сечения основного термоэлектрода).

Тепловое сопротивление $R_{3.2}^{II,III}$ зоны 3.2 суммарной высоты $h_{3.2} = h_{III} - h_{TЭ}$ (см. рис. 4.29, а), состоящей из двух параллельных компонентов, тепловое сопротивление которых: $R_{3.2,3}$ – суммарное сопротивление двух слоев заливочного компаунда по обе стороны термоэлемента с общей площадью сечения, равной $f_{TЭ}^{III}$, и $R_{3.2,4}$ – двух отрезков теплового шунта с площадью сечения f_4 , согласно правилу (4.28) равно:

$$R_{3.2}^{II,III} = \left(1/R_{3.2,3} + 1/R_{3.2,4} \right)^{-1}, \quad (4.60)$$

где $R_{3.2,3} = (h_{III} - h_{TЭ}) \cdot f_{TЭ}^{III} / (\chi_3 \cdot f_{TЭ}) = (h_{III} - h_{TЭ}) \cdot \varphi^{III} / (\chi_3 \cdot \varphi)$, (4.61)

$$R_{3.2,4} = (h_{III} - h_{TЭ}) \cdot f_{TЭ}^{III} / (\chi_4 \cdot f_{41}) = (h_{III} - h_{TЭ}) \cdot \varphi^{III} / (\chi_4 \cdot f_{41}), \quad (4.62)$$

с учетом выражений (4.61) и (4.62) и обозначений (4.31) для $b = 2 + f_{21}$ и (4.59) для $\Lambda_{43,1}$ формула (4.60) принимает вид:

$$R_{3.2}^{II,III} = \frac{h_{III} - h_{TЭ}}{\chi_3} \cdot \frac{\varphi^{III}}{b + \Lambda_{43,1}}. \quad (4.63)$$

Тепловое сопротивление $R_{3.3}^{II,III}$ зоны 3.3, соответствующей двум слоям наружного температуровыравнивающего покрытия 5 по обеим поверхностям ПТП суммарной высоты $h_5 = h_{ПТП} - h_{III}$, равно

$$R_{3.3}^{II,III} = h_5 / \chi_5 = (h_{ПТП} - h_{III}) / \chi_5. \quad (4.64)$$

Исходя из формул (4.58), (4.63) и (4.64) формула для расчета эффективного теплового сопротивления изотермической модели ПТП, снабженного тепловыми шунтами и наружными температуровыравнивающими покрытиями, согласно правилу (4.29) имеет вид:

$$R_{ПТП}^{II,III} = \frac{h_{ТЭ}}{\chi_1} \cdot \frac{\varphi^{III}}{\Lambda_{2,1} + \chi_{31} \cdot \Lambda_{43,1}} + \frac{h_{III} - h_{ТЭ}}{\chi_3} \cdot \frac{\varphi^{III}}{b + \Lambda_{43,1}} + \frac{h_{ПТП} - h_{III}}{\chi_5}. \quad (4.65)$$

Наличие двухстороннего температуровыравнивающего покрытия 5 создает изотермические условия на поверхностях ПТП, поэтому адиабатный способ дробления применим только для средней зоны ПТП, расположенной между температуровыравнивающими покрытиями. Комбинированное изотермично-адиабатное дробление единичного термоэлемента привело к схеме, показанной на рис. 4.29, б.

Исходя из последовательного расположения двух зон покрытия с тепловым сопротивлением R_5^A и средней зоны с тепловым сопротивлением $R_{cp.3}^{A,III}$, тепловое сопротивление ПТП $R_{ПТП}^{A,III}$, согласно правилу 4.27, равно:

$$R_{ПТП}^{A,III} = R_5^A + R_{cp.3}^{A,III}. \quad (4.66)$$

Тепловое сопротивление температуровыравнивающего покрытия суммарной высоты $h_5 = h_{ПТП} - h_{cp.3} = h_{ПТП} - h_{III}$ равно:

$$R_5 = (h_{ПТП} - h_{III}) / \chi_5. \quad (4.67)$$

Средняя зона высотой $h_{cp.3} = h_{III}$ состоит из трех параллельных участков уч.1, уч.2 и уч.3 (см. рис. 4.29, б) с площадью сечения, соответственно $f_{уч.1} = 2f_1 + f_2$; $f_{уч.2} = f_3$;

$f_{уч.3} = f_4$. Ее тепловое сопротивление $R_{cp.3}^{A.III}$ определяется с учетом правила (4.28) по формуле:

$$R_{cp.3}^{A.III} = \frac{h_{III} \cdot \varphi^{III}}{\chi_3} \cdot \frac{\Lambda_{2,1,1} \cdot (h_{III} - h_{TЭ}) + \chi_{31} \cdot b \cdot h_{TЭ}}{\Lambda_{2,1,1} \cdot (\Lambda_{43,1} \cdot (h_{III} - h_{TЭ}) + b \cdot h_{III}) + \Lambda_{43,1} \cdot \chi_{31} \cdot b \cdot h_{TЭ}}. \quad (4.68)$$

С учетом (4.67) и (4.68) формула (4.66) для теплового сопротивления адиабатной модели ПТП_{III} принимает вид:

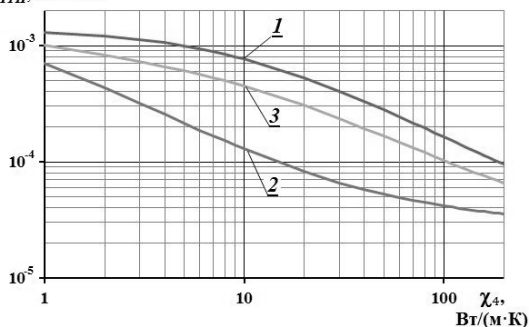
$$R_{ПТП}^{A.III} = \frac{h_{ПТП} - h_{III}}{\chi_5} + \frac{h_{III} \cdot \varphi^{III}}{\chi_3} \cdot \frac{\Lambda_{2,1,1} \cdot (h_{III} - h_{TЭ}) + \chi_{31} \cdot b \cdot h_{TЭ}}{\Lambda_{2,1,1} \cdot b \cdot h_{III} + \Lambda_{43,1} \cdot (\Lambda_{2,1,1} \cdot (h_{III} - h_{TЭ}) + \chi_{31} \cdot b \cdot h_{TЭ})}, \quad (4.69)$$

где φ^{III} , $\Lambda_{2,1,1}$, b и $\Lambda_{43,1}$ – по формулам (4.51), (4.30), (4.31) и (4.59) соответственно.

Тепловое сопротивление термоэлектрических ПТП с тепловыми шунтами и температуровыравнивающими наружными покрытиями рассчитывается как среднее арифметическое значений $R_{ПТП}^{A.III}$ и $R_{ПТП}^{II.III}$ аналогично (4.37).

На рисунке 4.30 приведены результаты расчетов эффективного теплового сопротивления константан-медных ПТП с проволочными шунтами в зависимости от теплопроводности шунтирующего материала при фиксированном значении отношения $f_4/f_{TЭ}^{III}$, равном 0,5, выполненных по формуле (4.65) (кривая 1), формуле (4.69) (кривая 2) и по формуле среднего арифметического: $0,5 \cdot (R_{ПТП}^{II.III} + R_{ПТП}^{A.III})$ (кривая 3).

$R_{ПТП}$, м²·К/Вт

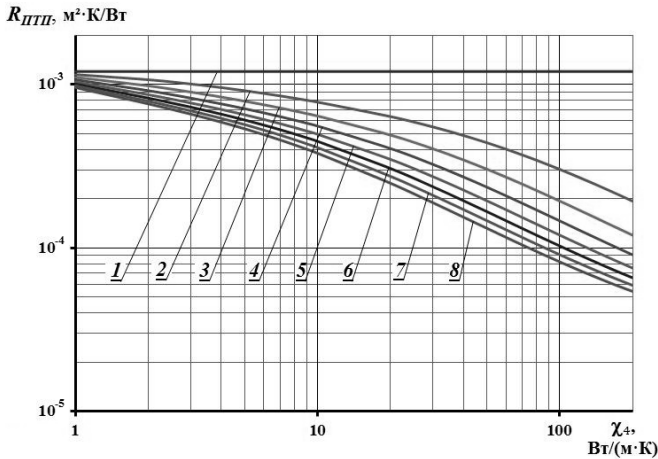


- 1 – изотермическая модель дробления (см. формулу (4.65));
- 2 – адиабатная модель дробления (см. формулу 4.69);
- 3 – среднеарифметическое значение

Рис. 4.30. Зависимости эффективного теплового сопротивления ПТП с тепловыми шунтами от теплопроводности шунта

Как видно, с увеличением коэффициента теплопроводности материала шунта кривые 1 и 2 сближаются, что подтверждает справедливость расчета действительного значения эффективного теплового сопротивления ПТП как среднего арифметического значений, соответствующих изотермическому и адиабатному способам дробления.

На рисунке 4.31 представлены результаты теоретического исследования зависимости эффективного теплового сопротивления ПТП от отношения площадей сечения шунта и единичного термоэлемента $f_4/f_{TЭ}^{III}$.



1 – $f_4/f_{TЭ,III} = 0$; 2 – 0,1; 3 – 0,2; 4 – 0,3; 5 – 0,4; 6 – 0,5; 7 – 0,6; 8 – 0,7

Рис. 4.31. Зависимость эффективного теплового сопротивления ПТП с тепловыми шунтами R_{III} от теплопроводности шунта при вариации отношения $f_4/f_{TЭ}^{III}$

Как видно, с увеличением доли шунтов в сечении ПТП, тепловое сопротивление уменьшается больше, чем на порядок, а примененные для шунтов материалы с более высокой теплопроводностью, чем теплопроводность заливочного компаунда ($\lambda_{III} \gg 0,5$ Вт/(м·К)), уменьшает эффективное тепловое сопротивление ПТП больше, чем на порядок. Наличие же

температуровыравнивающего покрытия обеих поверхностей зашунтированного ПТП обеспечивает равномерность поля теплового потока на входе и выходе из него.

Таким образом, введение тепловых шунтов в конструкцию ПТП позволяет изготовить измерительный ПТП с требуемым тепловым сопротивлением, обеспечивающим минимальную погрешность измерения теплового потока в широком диапазоне значений его плотности.

4.2.3 Чувствительность ПТП с тепловыми шунтами

ПТП с тепловыми шунтами, схемы которых рассмотрены в 4.2.2, характеризуются тем, что наличие тепловых шунтов значительно изменяет эффективное тепловое сопротивление. Это не может не сказаться на его чувствительности по сравнению с традиционным ПТП.

Расчет чувствительности традиционного ПТП с биметаллическим термоэлектродом выполняется по формулам (4.13) – (4.15), полученным в предположении, что все изотермические поверхности в чувствительной зоне являются плоскостями, параллельными рабочим поверхностям ПТП и перпендикулярными направлению поступающего теплового потока, то есть в отсутствие перетоков теплоты между ветвями термоэлементов и зоной, занятой заливочным компаундом. На самом деле, вследствие значительной разности коэффициентов теплопроводности материалов, такие перетоки существуют. На практике это приводит к тому, что расчеты по указанным формулам дают лишь общий характер зависимости чувствительности ПТП от параметров конструкции и свойств материалов, а характеристики изготовленных ПТП могут заметно отличаться от расчетных.

Для прогнозных расчетов чувствительности ПТП с тепловыми шунтами предназначена уточненная методика [4.30], которая в отличие от методики, изложенной в 4.1.1, основана на физической модели ПТП в виде гетерогенного тела с замкнутыми включениями с контрастной теплопроводностью,

как это сделано в 4.2.2 (см. рис. 4.29). Элементарной ячейкой в ПТП является единичный термоэлемент вместе с приходящими на него зонами заливочного компаунда, тепловых шунтов и температуровыравнивающих покрытий.

Для получения необходимых расчетных формул использованы ранее указанные обозначения и формулы: (4.25) для теплового сопротивления отдельных (i -х) компонентов R_i ; (4.5) и (4.51) – для формпараметров ПТП φ и φ^{III} ; (4.30) – для тепловой проводимости $\Lambda_{2,1,1} = 2 + \chi_{21} \cdot f_{21}$ двух термоэлектродов (основного и биметаллического), приведенной к тепловой проводимости и площади сечения основного термоэлектрода; (4.59) – для тепловой проводимости теплового шунта $\Lambda_{4,3,1} = f_{31} + \chi_{43} \cdot f_{41}$, приведенной к тепловой проводимости заливочного компаунда и площади сечения основного термоэлектрода, и (4.31) – для приведенной к площади основного термоэлектрода площади сечения термоэлемента $b = 2 + f_{21}$, а также еще одно обозначение для тепловой проводимости основного и биметаллического термоэлектродов, приведенной к тепловой проводимости заливочного компаунда и площади основного термоэлектрода:

$$\Lambda_{1,2,3} = 2\chi_{13} + \chi_{23} \cdot f_{21}. \quad (4.70)$$

С учетом введенных обозначений, выражение разности температуры между спаями термоэлемента, возникающей в ПТП при воздействии теплового потока с плотностью q , имеет вид:

- при изотермическом способе дробления:

$$\Delta T_{TЭ}^{H,III} = q \cdot \frac{h_{TЭ}}{\chi_3} \cdot \frac{\varphi^{III}}{\Lambda_{2,1,1} + \Lambda_{4,3,1}}; \quad (4.71)$$

- при адиабатно-изотермическом способе дробления:

$$\Delta T_{TЭ}^{A,III} = q \cdot \frac{h_{TЭ}}{\chi_3} \cdot \frac{\varphi^{III} \cdot b}{\Lambda_{1,2,3} \cdot (\Lambda_{4,3,1} + b) - \Lambda_{4,3,1} \cdot (\Lambda_{1,2,3} - b) \cdot h_{TЭ} / h_{III}}. \quad (4.72)$$

Исходя из (4.71) и (4.72), приведенная чувствительность S_V для рассматриваемых способов дробления равна:

$$S_V^{H,III} = \frac{\alpha_{1-2}}{\chi_3 \cdot f_1 \cdot (1 + \rho_{21}/f_{21}) \cdot (\Lambda_{2,1,1} + \Lambda_{4,3,1})}, \quad (4.73)$$

$$S_V^{A,III} = \frac{\alpha_{1-2} \cdot b}{\chi_3 \cdot f_1 \cdot (1 + \rho_{21}/f_{21}) \cdot (\Lambda_{1,2,3} \cdot (\Lambda_{4,3,1} + b) - \Lambda_{4,3,1} \cdot (\Lambda_{1,2,3} - b) \cdot h_{TЭ}/h_{III})}. \quad (4.74)$$

Отметим, что эти формулы при отсутствии шунта и температуровывравнивающего покрытия эквивалентны формулам для традиционного ПТП. Уточненное значение приведенной чувствительности ПТП с тепловыми шунтами по аналогии с формулой (4.37) для теплового сопротивления находится как среднее значение чувствительностей для изотермического и адиабатно-изотермического дробления: $S_{V,ПТП}^{III} = 0,5 \cdot (S_{V,III}^H + S_{V,III}^A)$.

Для проверки корректности полученных соотношений специально изготовлен ряд ПТП из константановой проволоки с никелевым покрытием с такими характеристиками: диаметр ПТП – 60 мм; диаметр проволоки-основы $d_1 = 0,1$ мм; плотность укладки термоэлементов $n = 3,6$ шт/мм²; формпараметр $\varphi \approx 35$; высота термобатареи $h_{ТБ} = 1,25$ мм; высота ПТП $h_{ПТП} = 1,4$ мм.

Приведенная площадь сечения f_{21} никелевого покрытия варьировалась от 0,12 до 1,1. Для формования монолитного ПТП использован компаунд на базе эпоксидного полимера УП-610 с содержанием 350% наполнителя – порошкообразного корунда.

Чувствительность изготовленных ПТП и коэффициент эффективной теплопроводности компаунда определены экспериментально на эталонной установке УВТ (см. книгу 2) в диапазоне температуры от 323 К до 463 К. Результаты расчетов при изотермическом и адиабатно-изотермическом способе дробления уточненного среднего значения приведенной

чувствительности в соответствии с формулами (4.73) и (4.74) и экспериментальные данные представлены на рисунке 4.32 в виде графиков зависимостей приведенной чувствительности от относительной площади сечения никелевого покрытия f_{21} . Все результаты отнесены к средней температуре ПТП 323 К.

Как следует из приведенных графиков, экспериментальные значения приведенной чувствительности достаточно хорошо соответствуют значениям кривой 3, полученным расчетом по уточненной методике [4.30].

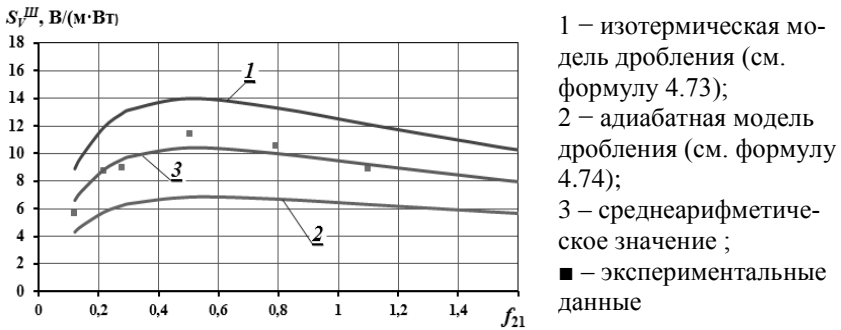


Рис. 4.32. Зависимости приведенной чувствительности S_V^{III} от отношения f_{21} константан-никелевого ПТП с тепловым шунтом

В силу существенной температурной зависимости коэффициентов теплопроводности и Зеебека, а также удельного электрического сопротивления материалов, из которых изготавливают ПТП приведенная чувствительность ПТП также имеет температурную зависимость. На рисунке 4.33 даны графики температурных зависимостей приведенной чувствительности ПТП для трех значений отношения f_{21} , полученные по уточненной методике с учетом температурных зависимостей свойств материалов. На этом же рисунке представлены экспериментально полученные значения чувствительности, которые достаточно хорошо соответствуют результатам расчетов. Как показано на рис. 4.33, чувствительность

ПТП с $f_{21} = 1,1$ (график 3) практически не зависит от температуры, что свидетельствует о возможности создания ПТП, чувствительных к тепловому потоку, но индифферентных к изменению температуры.

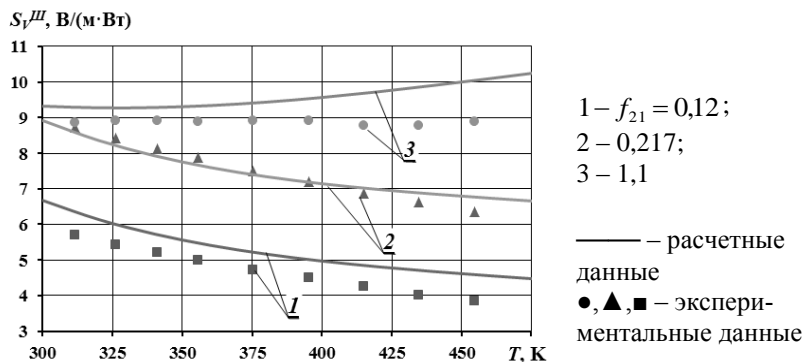


Рис. 4.33. Температурные зависимости приведенной чувствительности S_V''' ПТП с шунтами при варьировании значений приведенной площади сечения f_{21}

На практике замечено, что малая толщина защитного слоя компаунда, отделяющего спаи термобатарей от поверхности ПТП, влияет на его чувствительность. Это явление может негативно сказываться на точности измерений в случае, когда аттестация и эксплуатация ПТП происходят при различных условиях теплообмена, например, аттестация при кондуктивном способе подвода теплоты, а эксплуатация – при радиационно-конвективном.

В работе [3.19] для стабилизации чувствительности рекомендовано выполнять защитный слой толщиной (0,1 – 0,5) мм. В то же время традиционная формула (4.15) не учитывает зависимость чувствительности от толщины защитного слоя компаунда.

На рисунке 4.34 представлены расчетные зависимости приведенной чувствительности ПТП от относительной высо-

ты при вариации формпараметра ПТП из константан-никелевых и константан-медных термоэлементов.

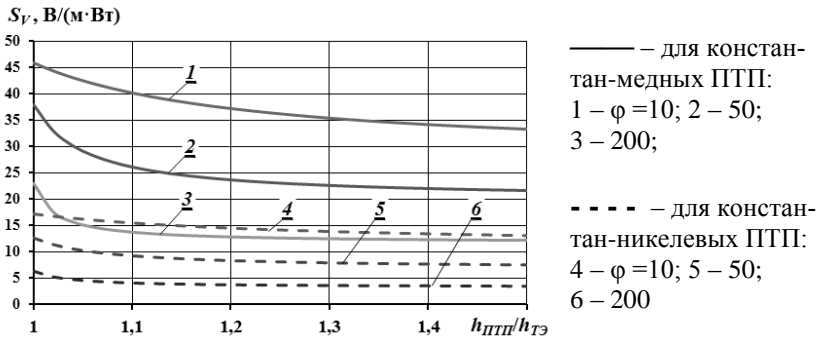


Рис. 4.34. Зависимости приведенной чувствительности от отношения $h_{ПТП}/h_{ТЭ}$ при вариации формпараметра ϕ для константан-медных (графики 1, 2 и 3) и константан-никелевых (графики 4, 5 и 6) термобатарей

Графики свидетельствуют, что в диапазоне значений $h_{ПТП}/h_{ТЭ}$ от 1,0 до 1,2 чувствительность существенно зависит от толщины защитного слоя, а при $h_{ПТП}/h_{ТЭ} \geq 1,2$ — стабилизируется, и дальнейшее увеличение толщины защитного слоя мало влияет на нее. Таким образом, можно рекомендовать для распространенных ПТП высотой $h_{ПТП} \approx (1-1,4)$ мм, выполнять защитные слои с двух сторон ПТП толщиной (0,1–0,4) мм.

4.3 Полиметаллические термоэлектрические ПТП

Наряду с существованием целого ряда стандартных ПТП широкого назначения, удовлетворяющих общим техническим условиям [2.150, 2.151], разработаны ПТП, характеристики которых удовлетворяют специальным требованиям, вытекающим из экстремальных условий эксплуатации. В частности, после аварии на Чернобыльской АЭС для текущего мониторинга теплового состояния аварийного реактора и диагностики топливосодержащих масс возникла потребность

в ПТП, сохраняющих свои метрологические характеристики в условиях сильной радиации [4.31, 4.32].

Как уже отмечалось в 4.1.3, временная стабильность чувствительности биметаллического ПТП зависит от его коррозионной стойкости, которую можно усилить нанесением защитного электролитического слоя поверх гальванически нанесенного парного термоэлектрода, или нанесением промежуточного гальванического подслоя, поверх которого осаждение требуемого парного термоэлектродного материала выполняется более качественно. Однако, двухслойное гальваническое покрытие полувитка несущей термоэлектродной проволоки приводит к изменению чувствительности. Соотношения для расчета оптимальных значений чувствительности такого ПТП и требуемых для этого значений толщины покрытий получены из рассмотрения эквивалентной электрической схемы термоэлемента ПТП, приведенной на рисунке 4.35, где индекс «1» соответствует несущему термоэлектроду, «2» и «3» – двум последовательным гальваническим

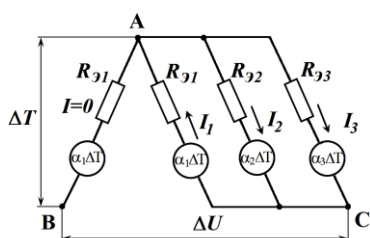


Рис. 4.35. Эквивалентная электрическая схема термоэлемента ПТП с двухслойным гальваническим покрытием

покрытиям, индекс «4» далее по тексту применен для заливочного компаунда.

На схеме видно, что полувиток с гальваническими покрытиями может рассматриваться как замкнутый контур, включающий в себя электрические сопротивления $R_{Э1}, R_{Э2}, R_{Э3}$ и источники электродвижущей силы $\alpha_1 \cdot \Delta T, \alpha_2 \cdot \Delta T, \alpha_3 \cdot \Delta T$.

При наличии разности температуры ΔT между узлами контура А и С появляются токи I_1, I_2, I_3 , а между узлами В и С возникает разность потенциалов ΔU . Непокрытый полувиток термоэлемента при этом выполняет коммутационную функцию.

Согласно правилам Кирхгофа для цепей постоянного тока система уравнений для контура полиметаллического термоэлектрода имеет вид:

$$\begin{cases} I_1 \cdot R_{\mathcal{E}1} + I_2 \cdot R_{\mathcal{E}2} = \Delta T \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \\ I_1 \cdot R_{\mathcal{E}1} + I_3 \cdot R_{\mathcal{E}3} = \Delta T \cdot (\alpha_1 - \alpha_3), \\ I_1 = I_2 + I_3 \end{cases} \quad (4.75)$$

из решения которой получается выражение для силы тока по несущему термоэлектродному проводнику:

$$I_1 = \Delta T \cdot (\alpha_{1-2} / R_{\mathcal{E}2} + \alpha_{1-3} / R_{\mathcal{E}3}) / (1 + R_{12} + R_{13}), \quad (4.76)$$

где $\alpha_{1-2} = \alpha_1 - \alpha_2$; $\alpha_{1-3} = \alpha_1 - \alpha_3$; $R_{12} = R_{\mathcal{E}1} / R_{\mathcal{E}2}$; $R_{13} = R_{\mathcal{E}1} / R_{\mathcal{E}3}$.

Исходя из выражения (4.76), термоэлектрическая чувствительность термоэлемента с двухслойным гальваническим покрытием равна

$$\Delta U / \Delta T = (\alpha_{1-2} \cdot R_{12} + \alpha_{1-3} \cdot R_{13}) / (1 + R_{12} + R_{13}), \quad (4.77)$$

а в безразмерной форме имеет вид:

$$\Delta U / (\alpha_{1-2} \cdot \Delta T) = (1 + R_{23} \cdot \alpha_{1-3} / \alpha_{1-2}) / (1 + R_{21} + R_{23}). \quad (4.78)$$

Перечень термоэлектродных проволок и возможные сочетания с гальваническими покрытиями в двухслойном гальваническом термоэлектроде, полярность и последовательность расположения гальванических слоев, а также расчетные соотношения, исходя из (4.77), для термоэлектрической чувствительности представлены в таблице 4.3.

Проанализировав соотношения (4.77) применительно к возможным сочетаниям несущего термоэлектрода и двух последовательных слоев гальванического покрытия, указанным в табл. 4.3, можно сказать, что наносимые слои должны быть выполнены из однополярных термоэлектродных материалов, чтобы чувствительность такого ПТП не снижалась по сравнению с биметаллическим ПТП. Именно при этом (см. позиции 1 – 9 и 18 табл. 4.3) происходит суммирование значений термоэлектродвижущей силы. В остальных случаях (позиции 10 – 17) чувствительность ПТП будет уменьшена.

Таблица 4.3 – Возможные сочетания несущей термоэлектродной проволоки («1») и термоэлектродных материалов («2» и «3») для гальванического покрытия при изготовлении ПТП с двухслойным гальваническим покрытием основного термоэлектрода

№ п/п	Сочетание материалов в гальваническом термоэлементе			Полярность и последова- тельность расположе- ния гальва- нических слоев	Расчетные соотношения для термоэлектрической чувствительности $\Delta U/\Delta T$, мВ/К (см. формулу (4.77))
	индекс материала				
	1	2	3		
1	Константан	Медь	Серебро		$\frac{(\alpha_1 + \alpha_2)R_{12} + (\alpha_1 + \alpha_3)R_{13}}{1 + R_{12} + R_{13}}$
2	Копель Е	Медь	Серебро		
3	Копель L	Медь	Серебро		
4	Константан	Медь	Железо		$\frac{(\alpha_1 + \alpha_2)R_{12} + (\alpha_1 + \alpha_3)R_{13}}{1 + R_{12} + R_{13}}$
5	Копель Е	Медь	Железо		
6	Копель L	Медь	Железо		
7	Константан	Медь	Сурьма		$\frac{(\alpha_1 + \alpha_2)R_{12} + (\alpha_1 + \alpha_3)R_{13}}{1 + R_{12} + R_{13}}$
8	Копель Е	Медь	Сурьма		
9	Копель L	Медь	Сурьма		
10	Константан	Медь	Никель		$\frac{(\alpha_1 + \alpha_2)R_{12} + (\alpha_1 - \alpha_3)R_{13}}{1 + R_{12} + R_{13}}$
11	Копель Е	Медь	Никель		
12	Копель L	Медь	Никель		
13	Константан	Висмут	Сурьма		$\frac{(\alpha_1 - \alpha_2)R_{12} + (\alpha_1 + \alpha_3)R_{13}}{1 + R_{12} + R_{13}}$
14	Копель Е	Висмут	Сурьма		
15	Копель L	Висмут	Сурьма		
16	Нихром	Висмут	Сурьма		$\frac{(\alpha_1 + \alpha_2)R_{12} + (\alpha_1 - \alpha_3)R_{13}}{1 + R_{12} + R_{13}}$
17	Нихром	Сурьма	Висмут		
18	Нихром	Висмут	Никель		
1 – основной термоэлектрод; 2, 3 – гальванические покрытия					

На рисунке 4.36, *a-d* приведены результаты аналитического исследования характера изменения термоэлектрической чувствительности в безразмерной форме, вычисленной по формуле (4.78), в зависимости от приведенного электрического сопротивления гальванического подслоя $R_{21} = R_{\mathcal{G}2}/R_{\mathcal{G}1}$ при вариации отношения электрического сопротивления обоих гальванических слоев $R_{23} = R_{\mathcal{G}2}/R_{\mathcal{G}3}$ от 0 до 10 с шагом, равным 1, для пяти фиксированных значений отношения коэффициентов Зеебека $\alpha_{1-3}/\alpha_{1-2} = 0; 1; -1; -2; -3$.

По аналогии с определением чувствительности биметаллического ПТП приведенная чувствительность ПТП, выполненного с двухслойным гальваническим покрытием одного полувитка несущей термоэлектродной проволоки, определяется следующей формулой:

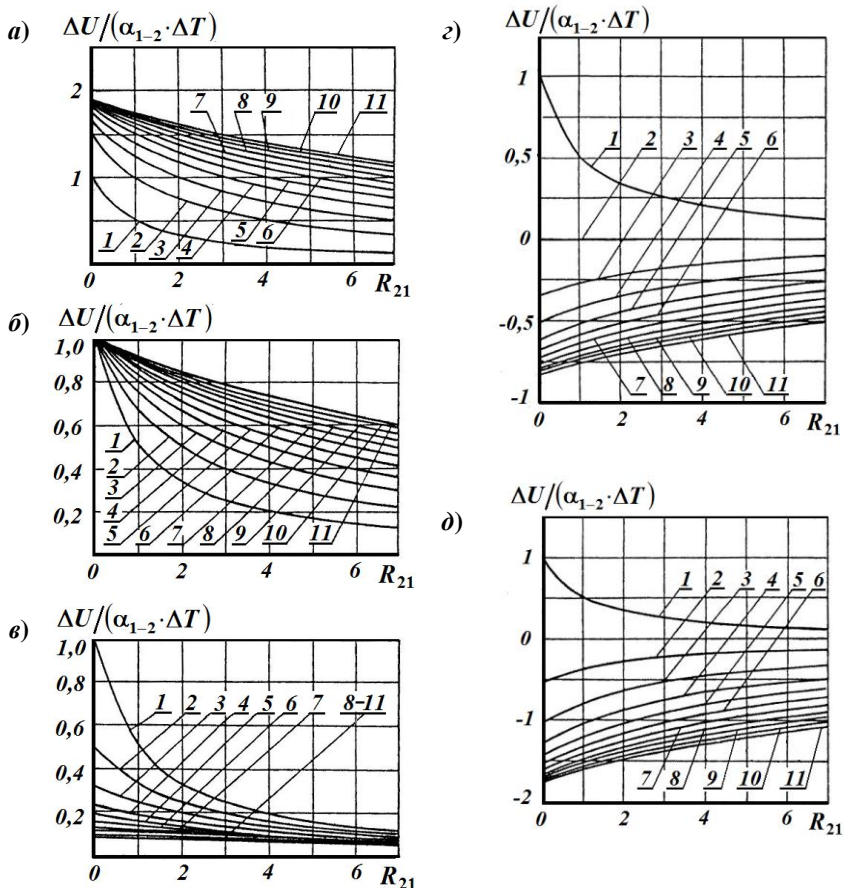
$$S_V = \frac{(\alpha_{1-2} \cdot \rho_{12} \cdot f_{21} + \alpha_{1-3} \cdot \rho_{11} \cdot f_{31}) / \chi_1 \cdot f_1}{(1 + \rho_{12} \cdot f_{21} + \rho_{13} \cdot f_{31}) \cdot (2 + \chi_{21} \cdot f_{21} + \chi_{31} \cdot f_{31} + \chi_{41} \cdot (\varphi' - 2 - f_{21} - f_{31}))}, \quad (4.79)$$

где $f_{i1} = f_i / f_1$, $i = 2; 3; 4$ – отношения площадей сечений гальванических покрытий f_2 и f_3 и заливочного компаунда f_4 к площади сечения основного несущего термоэлектрода f_1 ;

$$\varphi' = 2 + f_{21} + f_{31} + f_{41} \quad (4.80)$$

– формпараметр ПТП с двухслойным покрытием одного полувитка несущей термоэлектродной проволоки.

На рисунке 4.37 *a, б* представлены графики зависимостей приведенной чувствительности от отношения площадей сечения f_{21} при вариации отношения f_{31} для константан-серебряного и константан-сурьмяного ПТП с медным промежуточным подслоем. Как видно из этих графиков, максимальная чувствительность ПТП может быть достигнута в широком диапазоне варьирования толщинами наносимых слоев гальванического покрытия.



a – $\alpha_{1-3}/\alpha_{1-2} = 0$; *б* – 1; *в* – минус 1; *г* – минус 2; *д* – минус 3

Рис. 4.36. Характер изменения термоэлектрической чувствительности в безразмерной форме $\Delta U/(\alpha_{1-2} \cdot \Delta T)$ в зависимости от приведенного электрического сопротивления R_{21} при вариации отношения электрического сопротивления обоих гальванических слоев R_{23} для пяти значений отношения коэффициентов Зеебека $\alpha_{1-3}/\alpha_{1-2}$

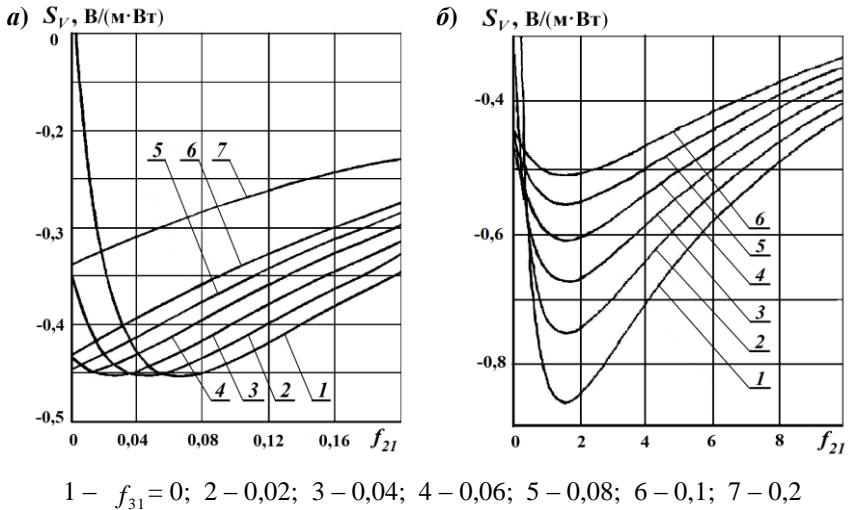


Рис. 4.37. Зависимости приведенной чувствительности константан-серебряного (а) и константан-сурьмяного (б) ПТП с медным подслоем

Улучшить характеристики многослойного ПТП по сравнению с известными конструкциями стандартного ПТП с однослойным гальваническим покрытием можно также путем гальванического нанесения парного термоэлектродного материала на оба полувитка несущей проволоки, при этом наносимые покрытия выполняют из неодинакового материала.

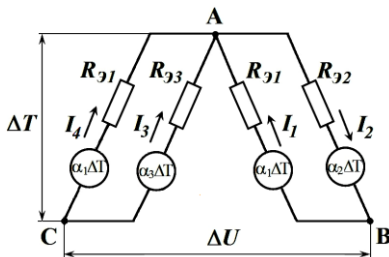


Рис. 4.38. Эквивалентная электрическая схема термоэлемента с гальваническим покрытием обоих полувитков

Эквивалентная электрическая схема термоэлемента такого типа ПТП приведена на рисунке 4.38. При изготовлении такого типа ПТП основная термоэлектродная проволока фактически является несущей арматурой, выполняя также коммутационную функцию. Полезный сигнал генерируют нанесенные гальванические покрытия. Это позволяет ис-

пользовать отработанную технологию производства стандартных биметаллических ПТП для изготовления ПТП из термоэлектродных материалов, которые не выпускаются в виде проволоки.

На схеме рис. 4.38 видно, что каждый полувиток с гальваническим покрытием является замкнутым контуром. При наличии разности температуры ΔT между узлами контуров А и С, А и В появляются токи I_1, I_2, I_3, I_4 , а между узлами В и С возникает разность потенциалов ΔU , для которой согласно правилам Кирхгоффа справедлива формула:

$$\Delta U = \left(\frac{\alpha_{3-1}}{1 + R_{31}} + \frac{\alpha_{1-2}}{1 + R_{21}} \right) \cdot \Delta T, \quad (4.81)$$

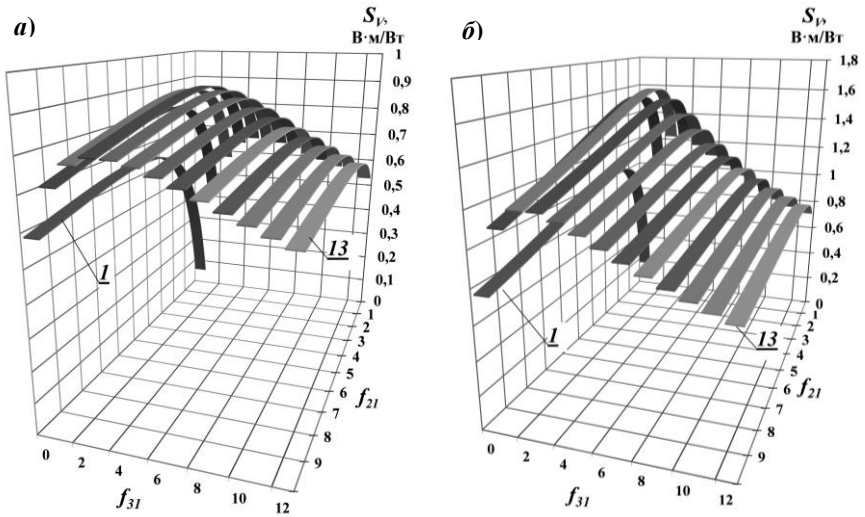
с использованием которой расчетное соотношение для приведенной чувствительности S_V этого типа ПТП имеет вид:

$$S_V = \frac{1}{\chi_1 \cdot f_1} \cdot \frac{\alpha_{1-2}/(1 + \rho_{21}/f_{21}) - \alpha_{1-3}/(1 + \rho_{31}/f_{31})}{2 + \chi_{21} \cdot f_{21} + \chi_{31} \cdot f_{31} + \chi_{41} \cdot (\varphi' - 2 - f_{21} - f_{31})}. \quad (4.82)$$

Результаты расчетов по формуле (4.82) представлены на рисунке 4.39 *а, б* в виде семейств графиков зависимости приведенной чувствительности от отношения площадей сечений f_{21} при вариации отношения f_{31} от 0 до 12 с шагом, равным 1, для пары висмут-сурьма с несущей термоэлектродной проволокой из константана (*а*) и нихрома (*б*), соответственно.

Из этих графиков можно сделать вывод о том, что путем вариации отношения f_{31} можно приведенную чувствительность увеличить в 1,5 раза при использовании константановой несущей проволоки и в 1,7 раза – нихромовой.

Полиметаллические ПТП позволяют исключить коррозию термоэлементов, использовать термоэлектродные материалы, не допускающие волочения, но обладающие более высоким значением коэффициента Зеебека. Это открывает путь для улучшения стабильности характеристик ПТП и повышения его чувствительности.



$$1, \dots, 13 - f_{21} = 0, \dots, 12$$

Рис. 4.39. Зависимости приведенной чувствительности ПТП из висмут-сурьмяной пары термоэлектродов на несущей проволоке из константана (а) и нихрома (б) от отношения f_{21} при вариации отношения f_{31}

4.4 Биспиральные термоэлектрические ПТП

По результатам исследования температурной зависимости чувствительности термоэлементов с биметаллическим термоэлектродом (см. 4.1.2) с покрытием из никеля [4.18] в практике теплоточных измерений появились ПТП, которые частично решили задачу расширения температурного диапазона с сохранением температурной независимости чувствительности. Дальнейшие поиски привели к созданию нового типа многоэлементного термоэлектрического ПТП вида вспомогательной стенки, получивший название «**биспиральный ПТП**» [4.33, 4.34], основанный на термоэлектродной проволоке с никелевым покрытием, позволяющим существенно расширить температурный диапазон. В связи нелинейной зависимостью коэффициента Зеебека никеля от тем-

пературы с экстремумом при 631 К (точка Кюри) [4.17] был проведен поиск термоэлектрических материалов, обеспечивающих термнезависимую чувствительность биспирального ПТП в расширенном диапазоне температуры эксплуатации.

На рисунке 4.40 систематизированы результаты экспериментальных исследований температурных зависимостей чувствительности термоэлементов, изготовленных из константановой, копелевой, хромелевой и нихромовой термоэлектродных проволок в паре с никелевой проволокой, которая является имитацией гальванического покрытия парного термоэлектродного материала, при вариации отношения площади сечения никелевой проволоки к площади сечения соответствующего основного термоэлектрода f_{21} [4.18, 4.33].



1 – $f_{21} = \infty$; 2 – 2; 3 – 1; 4 – 0,5; 5 – 0,33; 6 – 0,25; 7 – 0,20; 8 – 0,17

Рис. 4.40. Экспериментальные температурные зависимости термоэлектрической чувствительности S ряда термоэлементов при вариации отношения f_{21} площадей сечений парного и основного термоэлектродов

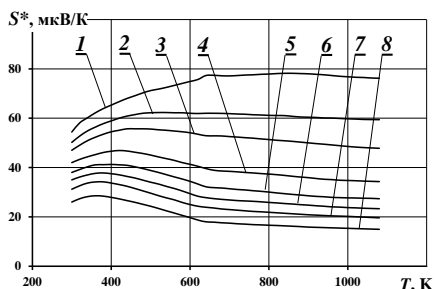
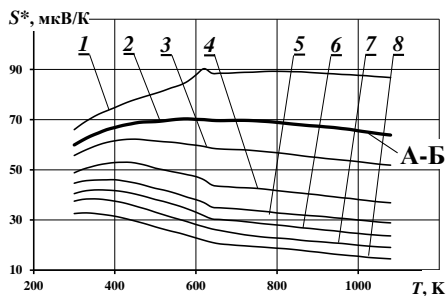
Как видно из представленных графиков (а также графиков рис. 4.17), для копель-никелевой (*a*) и константан-никелевой (*б*) пар термоэлектродов имеются участки с относительно термнезависимой чувствительностью в диапазоне значений рабочей температуры от 300 К до 500 К. Дальнейшее повышение температуры приводит к существенному изменению характера функции преобразования ПТП, включая пики при температуре, соответствующей точке Кюри для никеля, обусловленные фазовым переходом в никеле. Аналогичные изменения, включая пики в точке Кюри, наблюдаются для хромель-никелевой (*в*) и нихром-никелевой (*г*) пар.

Характер температурной зависимости термоэлектрической чувствительности термоэлементов с биметаллическим термоэлектродом с покрытием из никеля положен в основу разработки новых ПТП, обладающих чувствительностью, независимой или мало зависимой от температуры в широком температурном диапазоне. Для примера рассмотрим батарею, состоящую из двух разных термоэлементов: копель-никелевого (кривая А на рис. 4.40, *a*) и хромель-никелевого (кривая Б на рис. 4.40, *в*). Термоэлементы скомпонованы так, что они параллельны относительно теплового потока (между их спаями одинаковый перепад температуры), но электрически соединены последовательно и дифференциально.

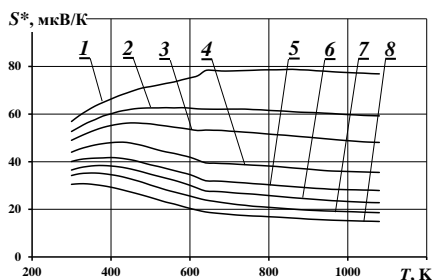
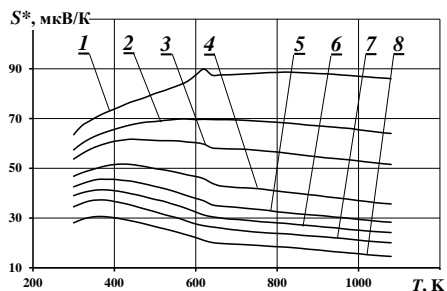
Графики, представленные на рисунке 4.41, отражают температурные зависимости суммарной чувствительности S^* батареи из двух термоэлементов исследованных пар термоэлектродов. Чувствительности ПТП из копель-никелевого и хромель-никелевого термоэлементов соответствует кривая (А-Б) на рис. 4.41, *a*. По аналогичному принципу могут быть созданы другие многоэлементные ПТП.

Главной особенностью биспирального ПТП [4.34] является то, что его батарея термоэлементов содержит две плоские лентовидные идентичные по конструкции спирали обычного исполнения. Их изготавливают из неодинаковых термоэлектродных проволок с площадью сечения f_1 в первой

а) (копель-никель) + (хромель-никель) **б)** (константан-никель) + (нихром-никель)



в) (копель-никель) + (нихром-никель) **г)** (константан-никель) + (хромель-никель)

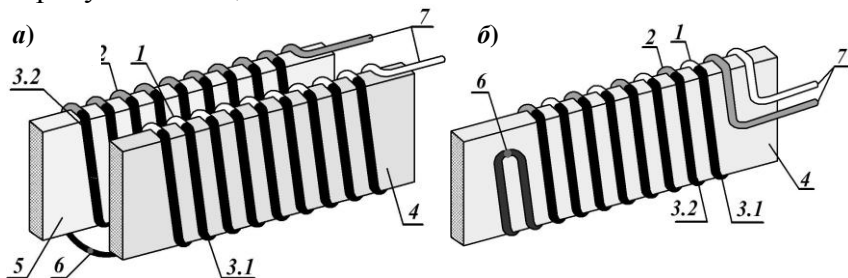


1 – $f_{21} = \infty$; 2 – 2; 3 – 1; 4 – 0,5; 6 – 0,33; 6 – 0,25; 7 – 0,20; 8 – 0,17

Рис. 4.41. Зависимости от температуры суммарной чувствительности S^* термоэлементов, включенных последовательно по электрическому сигналу при вариации отношения f_{21}

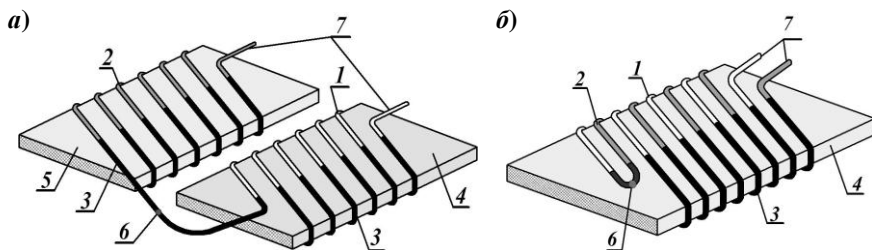
спирали и f_2 во второй, но с электролитическим покрытием соответствующих полувитков одинаковым термоэлектрическим материалом с приведенной площадью сечения f_{31} в первой спирали и f_{32} во второй. Для обеспечения большей чувствительности обе основные проволоки (1 и 2) должны составлять термоэлектродную пару, например, хромелевая и копелевая, хромелевая и константановая, нихромовая и копелевая, нихромовая и константановая, а покрытие с учетом ожидаемого диапазона температуры эксплуатации ПТП может быть выполнено из меди, серебра, никеля или железа.

При изготовлении биспирального ПТП возможны два принципиально различных конструктивных исполнения: обе спирали поставлены на «ребро», что схематически показано на рисунке 4.42, *а, б* и расположены «плашмя», как показано на рисунке 4.43 *а, б*.



1 – основная термоэлектродная проволока первой спирали; 2 – термоэлектродная проволока второй спирали; 3.1, 3.2 – электролитическое покрытие соответствующих полувитков каждой спирали; 4, 5 – каркасные изоляционные ленты; 6 – спай соединения спиралей; 7 – потенциалосъемные провода батарей термоэлементов

Рис.4.42. Варианты исполнения термобатареи биспирального ПТП из спиралей, поставленных на «ребро»



1 – основная термоэлектродная проволока первой спирали; 2 – термоэлектродная проволока второй спирали; 3 – электролитическое покрытие полувитков каждой спирали; 4, 5 – каркасные изоляционные ленты; 6 – спай соединения спиралей; 7 – потенциалосъемные провода батарей термоэлементов

Рис. 4.43 – Варианты исполнения батареи термоэлементов биспирального ПТП из спиралей расположенных «плашмя»

По первому варианту (см. рис.4.42, *a*) конструкции ПТП из спиралей на «ребре» обе основные термоэлектродные проволоки 1 и 2 (с электролитическим покрытием 3.1 и 3.2 соответствующих полувитков основных проволок) навиты на отдельные каркасные ленты 4 и 5. Эти ленты выполнены из полосок электроизоляционного материала одинаковой высоты и расположены параллельно так, что верхние спаи обеих спиралей находятся в одной плоскости, а нижние спаи – в другой. Плоскости спаев параллельны и разнесены на высоту термобатареи.

Обе спирали соединены последовательно в спае 6 и зафиксированы в виде пластины электроизоляционным заливочным компаундом (на рис. 4.42 не показан). Сигнал биспирального ПТП выводится через потенциалосъемные провода 7. Конструкция ПТП по второму варианту (см. рис.4.42, *б*) отличается тем, что обе спирали расположены на общей каркасной ленте 4, при этом термоэлектродные проволоки 1 и 2 навиты одна относительно другой со сдвигом на изолирующий промежуток, не допускающий электрического замыкания витков.

Конструкция ПТП, представленная на рис. 4.43, также может быть выполнена в двух вариантах, аналогичных уже описанным, то есть из двух спиралей на индивидуальной каркасной ленточке каждая (вариант *a*) и на общей (вариант *б*), но со сдвигом на промежуток для исключения касания витков одной спирали с витками второй спирали.

При прохождении теплового потока через биспиральный ПТП в стационарном тепловом режиме устанавливается разность температуры ΔT между верхней и нижней плоскостями, где размещены спаи батареи термоэлементов. Разность температуры пропорциональна поверхностной плотности теплового потока q и тепловому сопротивлению R слоя материала между плоскостями со спиями:

$$\Delta T = R \cdot q. \quad (4.83)$$

Первая спираль термоэлементов, состоящая из основной проволоки 1 с гальваническим покрытием 3.1 соответствующих полувитков (см. рис. 4.43, *a*), генерирует ТЭДС E_1 равную:

$$E_1 = Z_1 \cdot S_1 \cdot R \cdot q, \quad (4.84)$$

а вторая спираль, состоящая из основной проволоки 2 с покрытием 3.2, генерирует ТЭДС E_2 :

$$E_2 = Z_2 \cdot S_2 \cdot R \cdot q, \quad (4.85)$$

где Z_1 и Z_2 – количество термоэлементов в первой и второй спиральных соответственно; S_1 и S_2 – их термоэлектрическая чувствительность, каждая из которых рассчитывается по формуле:

$$S_1 = \alpha_{1-3} / (1 + \rho_{31} / (f_{3.1} / f_1)), \quad (4.86)$$

$$S_2 = \alpha_{2-3} / (1 + \rho_{32} / (f_{3.2} / f_2)), \quad (4.87)$$

где α_{1-3} , α_{2-3} – коэффициенты Зеебека термоэлементов в обеих спиральных соответственно (1 и 2 – основные термоэлектроды, 3 – гальваническое покрытие);

ρ_{31} и ρ_{32} – электрическое сопротивление покрытия в каждой спирали, приведенное к сопротивлению соответствующей основной проволоки,

f_1 , f_2 – площадь сечения основных проволок 1 и 2;

$f_{3.1}/f_1$ и $f_{3.2}/f_2$ – приведенная площадь сечения покрытий 3 основных проволок обеих спиральных.

Исходя из формул (4.84) – (4.87), суммарный сигнал включенных последовательно и дифференциально спиральных 1 и 2 термобатареи биспирального ПТП равен:

$$E_\Sigma = E_1 - E_2 = R \cdot q \cdot (Z_1 \cdot S_1 - Z_2 \cdot S_2) = R \cdot q \cdot S_\Sigma, \quad (4.88)$$

где S_Σ – суммарная чувствительность термобатареи, то есть биспирального ПТП, рассчитываемая по формуле:

$$E_{\Sigma} = \frac{Z_1 \cdot \alpha_1}{1 + \rho_{31}/(f_{31}/f_1)} - \frac{Z_2 \cdot \alpha_2}{1 + \rho_{32}/(f_{32}/f_2)} + \left(\frac{\alpha_3 \cdot Z_2}{1 + \rho_{32}/(f_{32}/f_2)} - \frac{\alpha_3 \cdot Z_1}{1 + \rho_{31}/(f_{31}/f_1)} \right). \quad (4.89)$$

Третий член в формуле (4.89) учитывает влияние коэффициента Зеебека материала покрытия на чувствительность ПТП. Увеличить или уменьшить это влияние можно выбором параметров конструкции, в том числе можно полностью исключить этот фактор путем подбора такого сочетания параметров ПТП, при котором выполняется равенство:

$$\frac{Z_1}{1 + \rho_{31}/(f_{31}/f_1)} = \frac{Z_2}{1 + \rho_{32}/(f_{32}/f_2)}, \quad (4.90)$$

благодаря чему оптимизированная чувствительность биспирального ПТП равна:

$$S_{\Sigma, opt} = Z_1 \cdot \frac{\alpha_1}{1 + \rho_{31}/(f_{31}/f_1)} - Z_2 \cdot \frac{\alpha_2}{1 + \rho_{32}/(f_{32}/f_2)}. \quad (4.91)$$

Исходя из выражений (4.90) и (4.91), можно утверждать, что специальным подбором параметров биспирального ПТП обеспечивается независимость его чувствительности от термоэлектрических свойств материала покрытия. Однако, из-за того, что даже у специально подобранной пары термоэлектрических материалов для основных термоэлектродных проволок (например, хромель и копель) имеется некоторая температурная зависимость коэффициентов Зеебека α_1 и α_2 , чувствительность $S_{\Sigma, opt}$ остается в какой-то степени термозависимой величиной.

Проведенные исследования показали, что если изменение чувствительности копель-никелевого термоэлемента в диапазоне температуры от 300 К до 1070 К составляет $\pm 18\%$ (см. график А рис. 4.40), а хромель-никелевого термоэлемента $\pm 13\%$ (см. график Б рис. 4.40), то изменение чувствитель-

ности биспирального ПТП из этих термоэлементов составляет всего $\pm 4\%$ (см. график А-Б рис. 4.41).

Результаты исследований температурной зависимости чувствительности термоэлементов из различных термоэлектродных материалов, представленные на рис. 4.40 и рис. 4.41, открывают возможность подбора пар термоэлектродных проволок в качестве основных для биспирального ПТП, а так же определения толщины покрытия и других параметров батарей термоэлементов, которые обеспечат минимальную температурную зависимость чувствительности биспирального ПТП.

4.5 Стандартные ПТП специального исполнения

К стандартным ПТП, имеющим самое широкое распространение в измерительной практике, относятся ПТП, условное обозначение моделей которых согласно стандартам [2.150, 2.151] записывается следующим образом:

ПТП–1Б.ХХ¹.2.1.11.Д(П)².ХХ³.00.0 – ДСТУ 3756 (ГОСТ 30619),

где ¹ – любая пара термоэлектродов; ² – конструктивное исполнение (11; 12; 13; 21; 22; 23); ³ – вид заливочного материала, обеспечивающий требуемый предел термостойкости (см. Приложение А, таблицы А.1, А.2 и А.3).

Характеристики и параметры этих ПТП, являющихся биметаллическими батарейными вида вспомогательной стенки, изготовленными по традиционной технологии, удовлетворяют общим техническим требованиям указанных стандартов. Однако, имеются ПТП, выполненные по специальным требованиям, сформулированным, исходя из специфических условий эксплуатации [2.147]. Как правило, таких ПТП бывает изготовлено от одного-двух штук до нескольких десятков. Далее представлены наиболее интересные модели.

А – ПТП, выполненный по требованиям ЗАО «Техника. Тепловидение. Медицина» (г. С.-Петербург, Россия), для применения в составе аппаратуры, функционирующей в ЗАО, предназначенной для задания и поддержания температуры и

плотности теплового потока в контролируемом объекте в условиях радиационного теплообмена. Схема конструкции такого специализированного ПТП показана на рисунке 4.44.

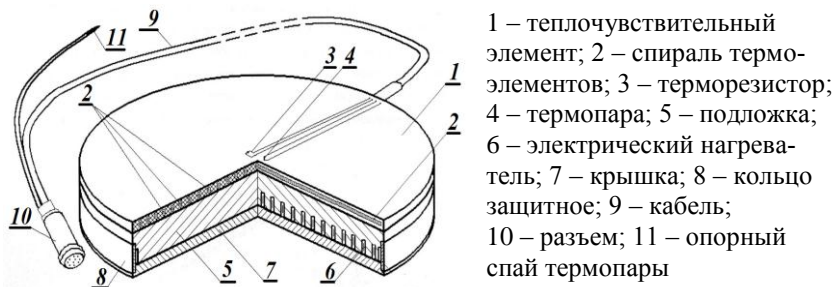


Рис. 4.44. Схема специализированного ПТП, применяемого в условиях радиационного теплообмена

Преобразователь конструктивно выполнен в виде диска размером $\varnothing 100 \times 15$ мм, внутри которого расположены теплочувствительный элемент 1 и электрический нагреватель 7. Теплочувствительный элемент содержит стандартную термобатарею 2 вида вспомогательной стенки из константан-медных термоэлементов с охранной зоной по ее периметру. При этом охранный элемент выполнен из того же материала, что и спираль термобатарей и по той же технологии. Это обеспечило однородную теплопроводность теплочувствительного элемента. По центру свободной поверхности теплочувствительного элемента установлены рабочий спай термоэлектрического ПТ 5 (термопара ТХА) и терморезистор 4 модели Т1-18. Эти ПТ служат для поддержания и контроля температуры поверхности ПТП на заданном уровне из диапазона значений от 0°C до 70°C .

Электронагреватель 7 вмонтирован в кольцевую проточку подложки 6. Он предназначен для задания температуры ПТП на требуемом уровне из диапазона рабочих значений и плотности теплового потока при выполнении аттестации и метрологических проверок путем определения коэффициента

преобразования ПТП в диапазоне измерения плотности потока от 10 Вт/м^2 до 1000 Вт/м^2 с пределом допускаемой основной относительной погрешности $\pm 4\%$. Характеристиками этого ПТП являются: коэффициент преобразования $4,01 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})$; коэффициент поглощения ИК-излучения рабочей поверхности $0,94$; электрическая мощность, подаваемая на электронагреватель, в постоянном режиме до 17 Вт и в импульсивном режиме до 35 Вт .

Этот специализированный ПТП применяют в комплекте со стандартными измерителями постоянного напряжения и электрического сопротивления, источником постоянного тока и регулятором электрической мощности.

Б – ПТП, предназначенный для эксплуатации на высокотемпературных объектах с металлическими поверхностями при условии нежелательности приклеивания к объекту. Наиболее удачным способом крепления ПТП является использование магнитов, что позволяет легко переустанавливать один и тот же ПТП на различные участки поверхности объекта контроля. Схема ПТП с магнитным способом крепления показана на рисунке 4.45.

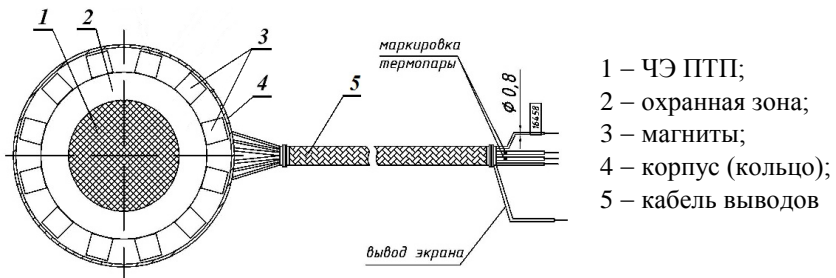
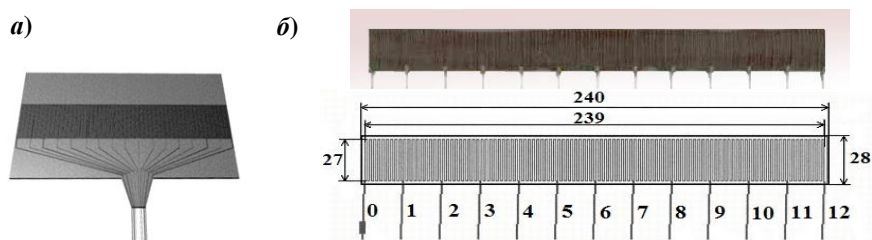


Рис. 4.45. ПТП с магнитными держателями для крепления на металлических поверхностях

В данной конструкции ПТП малогабаритные магнитные элементы равномерно распределены по периметру кольца (или рамки) за пределами охранной зоны ЧЭ. Такой ПТП, выполненный с габаритами $\phi (80 \pm 0,2) \times (3 \pm 0,2)$ мм и диамет-

ром ЧЭ Ø40 мм, позволяет измерять плотность теплового потока до 5 кВт/м^2 в диапазоне рабочей температуры от 20°C до 200°C с пределом допускаемой основной относительной погрешности 5%. Постоянная времени ПТП не превышает 10 с. Коэффициент эффективной теплопроводности составляет $(1 \pm 0,1) \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

В – Многосекционные ПТП, изготовленные на базе стандартной батареи биметаллических термоэлементов, предназначены для измерения плотности теплового потока через поверхность ОК с целью определения распределения ее значений по поверхности ОК. Внешний вид двух моделей многосекционного ПТП и схема конструкции одной из них представлены на рисунке 4.46.



a – модель ПТП – 1Б.11.2.6(8).11.П.00.0.13.00.0

б – модель ПТП – 1Б.11.2.12.11.П-21.0.13.11.0

Рис. 4.46. Многосекционные ПТП

Многосекционные ПТП состоят из нескольких идентичных секций, представляющих собой каждая стандартную биметаллическую термобатарею. Секции в ПТП расположены параллельно относительно измеряемого теплового потока либо в общем слое заливочного компаунда, либо в корпусе в виде рамки, чаще – пластиковой. Суммарный сигнал многосекционного ПТП соответствует интегральной плотности теплового через поверхность контролируемого объекта, а сигналы отдельных секций – локальным значениям плотности теплового потока, что дает возможность определить распределение теплового потока по поверхности объекта.

При необходимости контроля температуры поверхности в каждую секцию ПТП вращивают термопару и снабжают ПТП термопарой для измерения температуры воздуха вблизи поверхности объекта. Характеристики таких ПТП приведены в Приложении А (табл. А.4). Применяют в комплекте со стандартным измерителем напряжения постоянного тока класса точности не более 1,0 с разрешением 10 мкВ.

Г – Многосекционный двухпараметрический ПТП, внешний вид и схема конструкции отдельной секции которого приведены на рис. 4.47.

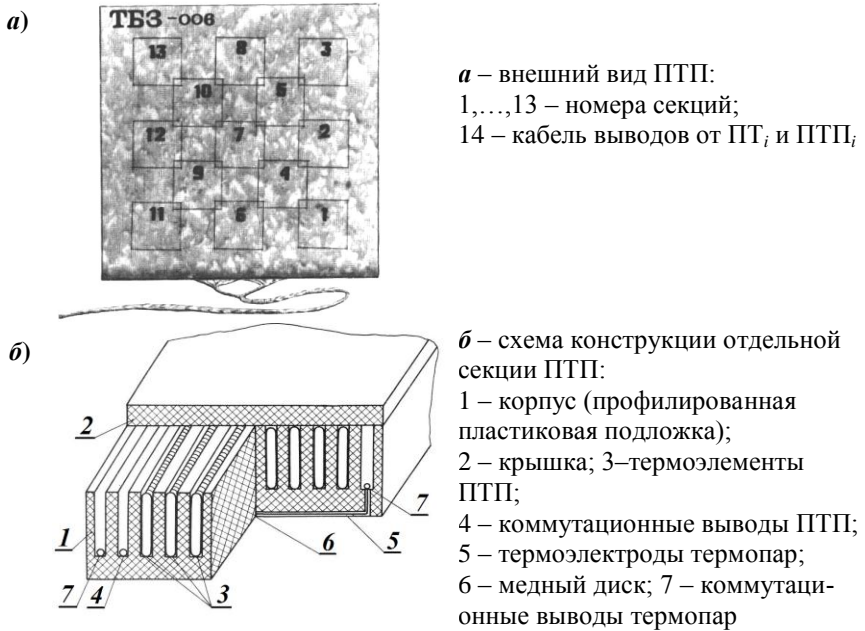


Рис. 4.47. Многосекционный двухпараметрический ПТП – 1Б.1.2.11.П.41.1.53.12.0

Этот ПТП представляет собой теплотрический блок, предназначенный для измерения плотности теплового потока и температуры и распределения их значений по поверхности образца исследуемого материала. Был применен в составе

установки для измерения теплофизических характеристик при испытании на термическую однородность матов теплоизоляции, предназначенной для обшивки космического корабля «Буран». ПТП обеспечивал измерения плотности теплового потока в диапазоне от 1 Вт/м^2 до 100 Вт/м^2 при температуре эксплуатации от 1°C до 150°C с пределом допускаемой основной относительности погрешности 3%. Габариты теплотметрического блока $400 \times 400 \times 3$ мм, отдельной секции – $70 \times 70 \times 3$ мм, установленного в каждой секции теплочувствительного элемента – $40 \times 40 \times 43$ мм. Другие технические характеристики см. в Приложении А (табл. А.4).

Д – Специальные ПТП для оснащения теплотметрических средств измерения коэффициента теплопроводности теплоизоляционных и строительных материалов, выполненных согласно стандарту ДСТУ БВ.2.7–105 (ГОСТ 7076) [4.35], удовлетворяющие сформулированным в стандарте требованиям. Они являются представителями модели ПТП–1Б.11.2.1.11.П(Д).00.1.16(56).12.0, содержат батарею биметаллических термоэлементов и не менее двух термопар. Схемы конструкции приведены на рисунке 4.48, а основные технические характеристики – в Приложении А (табл. А.4).

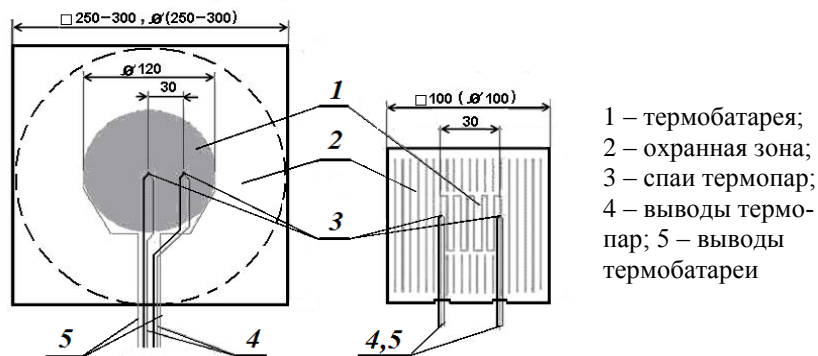


Рис. 4.48. Схемы ПТП для оснащения приборов для измерений теплопроводности согласно ДСТУ БВ.2.7–105 (ГОСТ 7076)

Е – ПТП для теплотрирования высокотемпературных объектов на предприятиях энергетики, в научно-исследовательских организациях и фирмах, специализирующихся на теплофизическом приборостроении.

Схемы моделей ПТП–1Б.18.2.1.11.Д.00.1.56.00.0 (а) и ПТП–1Б.18.2.1.11.Д.43.1.56.11(12).0 (б) приведены на рисунке 4.49, а, б, основные характеристики – в Приложении А (табл. А.4).

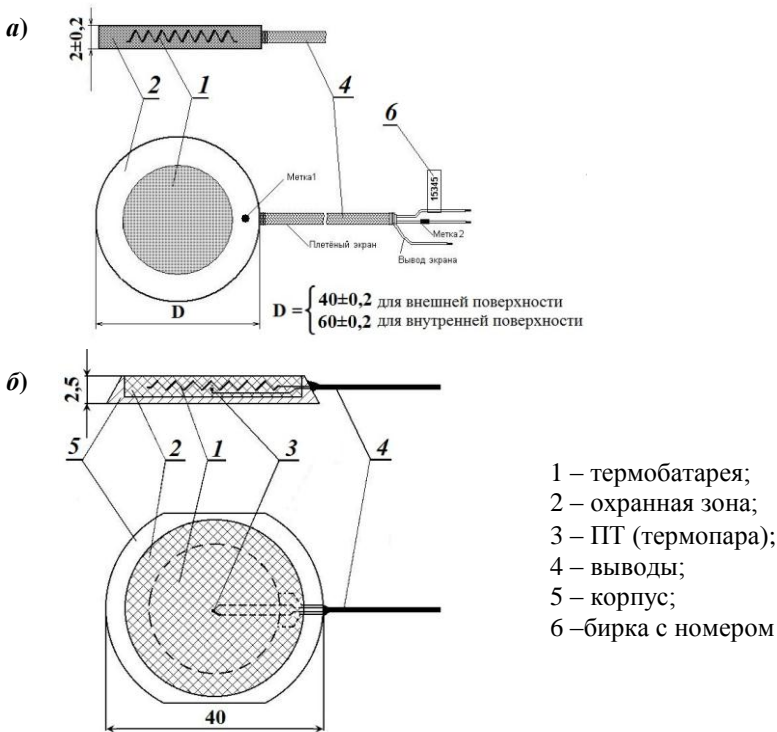
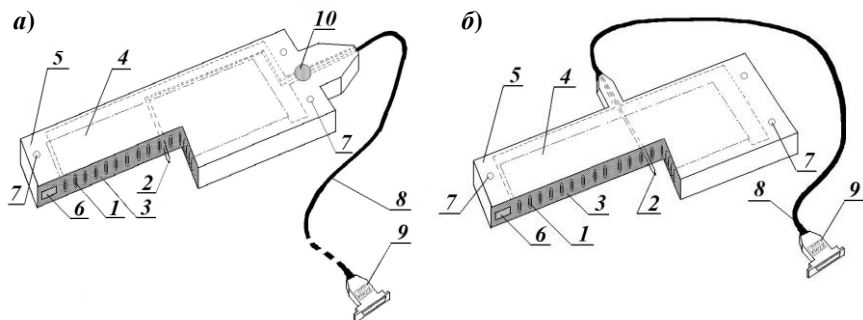


Рис. 4.49. Специализированные высокотемпературные ПТП

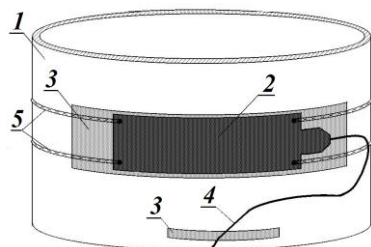
Ж – ПТП в гибком исполнении для измерения плотности теплового потока и температуры на криволинейных поверхностях при исследовании теплообмена на объектах энергетики и строительной индустрии. Предусмотрена возмож-

ность подключения к многоканальной измерительно-регистрирующей системе. Схемы конструкций гибкого преобразователя ПТП–1Б.11.2.1.12.П.00.1.30.11(12).0 в двух исполнениях с термопарой показаны на рисунке 4.50, а способ его монтажа на объекте цилиндрической формы (например, трубопроводе) – на рисунке 4.51. Характеристики см. в Приложении А (табл. А.4).



1 – термобатарея; 2 – термопара; 3 – заливочный компаунд (герметик, силикон); 4 – теплочувствительная зона; 5 – охранный зона; 6 – крепежная пластина; 7 – крепежные отверстия; 8 – выводы; 9 – разъем; 10 – метка

Рис. 4.50. Схемы конструкций гибкого ПТП



1 – объект (труба); 2 – ПТП;
3 – отрезки скотча, крепящего ПТП,
ПТ и их выводы к поверхности;
4 – выводы ПТП и термопары;
5 – шнуры крепления

Рис. 4.51. Способ крепления гибкого ПТП на криволинейной поверхности

Литература к главе 4

4.1 *Коровин Н. В.* Новые покрытия и электролиты в гальванотехнике / Н. В. Коровин. – М. : Металлургиздат, 1962. – 135 с.

4.2 *Ямпольский А. М.* Меднение и никелирование / А. М. Ямпольский // Библиотечка гальванотехника. – Л. : Машиностроение, 1971. – 136 с.

4.3 *Ямпольский А. М.* Гальванотехника драгоценных и редких металлов / А. М. Ямпольский ; Под общ. ред. канд. хим. наук доц. П. М. Вячеславова. – М.; Л. : Машгиз. [Ленингр. отд-ние], 1958. – 44 с.

4.4 *Рогельберг И. Л.* Сплавы для термопар : Справочное издание / И. Л. Рогельберг, В. М. Бейлин. – М. : Metallurgia, 1983. – 360 с.

4.5 *Куритный И. П.* Новые номинальные статические характеристики преобразователя термопар / И. П. Куритный // Измерительная техника. – 1985. – № 12. – С. 23-26.

4.6 *Лариков Л. Н.* Тепловые свойства металлов и сплавов. Серия структура металлов и сплавов : справочник / Л. Н. Лариков, Ю. Ф. Юрченко ; ред. В. В. Скороход. – Киев : Наукова Думка, 1985. – 438 с.

4.7 Теплопроводность твердых тел : справочник / Р. П. Боровикова, Т. В. Нечаева, А. С. Пушкарский ; пер. с англ. ред. А. С. Охотин. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 321 с.

4.8 *Кэй Дж.* Таблицы физических и химических постоянных / Дж. Кэй, Т. Лэби ; перевод с англ. – М. : Гос. изд-во физ. мат. лит., 1962. – 248 с.

4.9 Справочник по физико-техническим основам криогеники : справочник / [ред. М. П. Малков]. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.

4.10 Приборы для измерения температуры контактным способом : справочник / [ред. Р. В. Бычковский]. – Львов : Вища школа, Изд-во при Львов. ун-те, 1978. – 206 с.

4.11 *Батищев А. Н.* Пособие гальваника-ремонтника : учеб. / А. Н. Батищев. – М. : Агропромиздат, 1986. – 192 с.

4.12 *Грищенко Т. Г.* Теплотрические мосты для теплофизических исследований : дис. ... доктора технических наук : 05.11.04./ Татьяна Георгиевна Грищенко. – Львов, 1992. – 60 с. : ил.

4.13 *Вайсбанд М. Д.* Техника выполнения метрологических работ / М. Д. Вайсбанд, В. И. Проненко. – К. : Техніка, 1986. – 168 с.

4.14 Справочник по теплообменникам : справочник: в 2 т. Т. 2 / пер. с англ. ; ред. О. Г. Мартыненко [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.

4.15 *Самсонов Г. В.* Датчики для измерения температуры в промышленности / Г. В. Самсонов, А. И. Киц, О. А. Кюздени [и др.]. – К. : Наукова думка, 1972. – 224 с.

4.16 *Гук О. П.* Метрологічна надійність кабельних перетворювачів температури / О. П. Гук // Вимірювальна техніка та метрологія. – Львів, 2003. – № 62. – С. 120-125.

4.17 Физический энциклопедический словарь / [гл. ред. Прохоров А. М.] ; ред. кол. Д. М. Алексеев, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов [и др.] – М. : Сов. энциклопедия, 1983. – 928 с.

4.18 *Шмаров Е. В.* Конструирование преобразователей теплового потока на базе константан-никелевых и копель-никелевых гальванических термоэлементов / Е. В. Шмаров, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2012. – Т. 34, № 2. – С. 87-94. – ISSN 0204-3602.

4.19 *Миснар А.* Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций / А. Миснар ; пер. с фр. М. Г. Беда. – М. : Мир, 1968. – 464 с.

4.20 *Дульнев Г. Н.* Теплопроводность смесей и композиционных материалов : справочная книга / Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк. – Л. : Энергия, 1974. – 264с.

4.21 *Герашенко О. А.* Теплопроводность термоэлектрических преобразователей теплового потока / О. А. Герашенко, Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша [и др.] // Проблемы энергосбережения : Респ. межвед. сб. науч. тр. – К. : Наук. думка, 1990. – Вып. 4. – С. 37-42. – ISSN 0236-4077.

4.22 *Пахомов В. Н.* Теплотерические приборы для комплексного определения теплофизических характеристик лабильных материалов / В. Н. Пахомов, А. Г. Мазуренко, Л. В. Декуша, В. Г. Федоров. – Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 1981. – Т. 3, № 1. – С. 96-102. – ISSN 0204-3602.

4.23 *Герашенко О. А.* Теплоемкость термоэлектрических преобразователей теплового потока / О. А. Герашенко, Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, В. П. Сало // Проблемы энергосбережения : Респ. межвед. сб. науч. тр. – К. : Наук. думка, 1990. – Вып. 5. – С. 43-48. – ISSN 0236-4077.

4.24 *Кожевников И. Г.* Теплофизические свойства материалов при низких температурах : Справочник / И. Г. Кожевников, Л. А. Новицкий. – М. : Машиностроение, 1982. – 328 с.

4.25 *Пивень А. Н.* Теплофизические свойства полимерных материалов : справочник / А. Н. Пивень, Н. А. Гречаная, И. И. Чернобыльский. – К. : Вища школа, 1976. – 180 с.

4.26 *Сичкарь Т. Г.* Использование модифицирующих добавок для направленного изменения коэффициента теплопроводности эпоксидных композиций / Т. Г. Сичкарь, Н. И. Шут, В. П. Дущенко // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 1983. – Т. 54, № 5. – С. 87-92. – ISSN 0204-3602.

4.27 Энергосбережения. Будівлі та споруди. Методи вимірювання поверхневої густини теплових потоків та визначення коефіцієнтів теплообміну між огорожувальними конструкціями та доквіллям : ДСТУ 4035-2001 [Введ. в дію 01.01.2002]. – К. : Держстандарт України, 2001. – 44 с.

4.28 Энергосбережение. Здания и сооружения. Методы измерения поверхностной плотности тепловых потоков и определения коэффициентов теплообмена между ограждающими конструкциями и окружающей средой : ГОСТ 25380-2001 [Введ. в действие 01.01.2002] – К. : Госстандарт Украины, 2002. – 44 с. – (Межгосударственный стандарт).

4.29 *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.

4.30 *Воробйов Л.* Уточнений розрахунок чутливості термоелектричних перетворювачів теплового потоку / Л. Воробйов, Л. Декуша, Т. Грищенко, С. Ковтун, Є. Шмаров // Метрологія та прилади. – Харків, 2015. – № 3 (53). – С. 13-17.

4.31 *Декуша Л. В.* Многослойные гальванические преобразователи теплового потока / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Л. И. Воробьев // Міжвідомчий наук.-техн. збірник : Вимірювальна техніка та метрологія. – Вип. 64. – Львів : «Львівська політехніка», 2003. – С. 48-52. – ISSN 0368-6418.

4.32 *Декуша Л. В.* Специализированные преобразователи теплового потока / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Л. И. Воробьев // Промышленная теплотехника: Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2003. – Том 25, Приложение к журналу № 4. – С. 464–466. – ISSN 0204-3602.

4.33 *Шмаров Е. В.* Биспиральный преобразователь теплового потока / Е. В. Шмаров, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2012. – Т. 34, № 6 – С. 86-93. – ISSN 0204-3602.

4.34 Патент 102475 UA, МПК G01K 17/08 Перетворювач теплового потоку / Декуша Л. В., Шмаров Є. В., Грищенко Т. Г., Воробйов Л. Й. ; заявник Інститут технічної теплофізики НАН України. – Опубл 10.07.2013. – Бюл. № 13. – 2013.

4.35 Будівельні матеріали. Матеріали і вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності і термічного опору при стандартному тепловому режимі : 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).

ГЛАВА 5 ПТП ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССАХ

Функционирование технического оборудования энергетических и строительных объектов нередко сопровождается нестационарными тепловыми процессами. При натурных теплотехнических обследованиях состояния теплозащиты строящихся и поставленных на ремонт зданий постройки 60-х – 80-х годов появилась проблема, связанная с методической погрешностью измерения теплового потока, с одной стороны, малой плотности (от 3 Вт/м^2 до 10 Вт/м^2), с другой – постоянно изменяющегося. Для энергетического оборудования характерны, как правило, высокие значения температуры и плотности теплового потока и динамичные тепловые режимы. Эти обстоятельства потребовали создания измерительных первичных преобразователей и измерительных систем, которые способны давать адекватную информацию о параметрах быстротекущих тепловых процессов.

В настоящее время изготовление первичных ПТП и другой необходимой измерительной аппаратуры освоено рядом фирм и организаций в различных странах (см. главу 2, п. 2.3 и приложение А). Широкое применение они получили в связи с решением задач энергосбережения для определения ТФХ теплоизоляционных и других материалов ОК, измерения тепловых потерь от оборудования, зданий и сооружений, а также при сертификации по теплотехническим показателям. Для решения перечисленных задач, как правило, активно применяют ПТП и другие приборы, но преимущественно в условиях стационарных и близких к ним режимах.

Однако, в настоящее время становятся актуальными измерения теплотехнических параметров тепловых нестационарных процессов, в частности, быстроменяющегося тепло-

вого потока. Ранее всего широкое распространение получили методы и приборы для измерения потока теплового излучения в нестационарных тепловых условиях в связи с интенсивным развитием импульсной лазерной техники. Для измерения нестационарного теплового потока применяют, главным образом, приемники теплового излучения, реже – измерительные ПТП. Наряду с термоэлектрическими, болометрическими, пондеромоторными СИТ применяют пирометрические и анизотропные приемники, а также фотоэлектрические приборы, усовершенствованные с целью расширения рабочего диапазона в сторону инфракрасной области (см. 2.3).

5.1 Временные характеристики ПТП и приемников теплового излучения

Для любого первичного преобразователя (ПТИ и ПТП), предназначенного для исследования нестационарных процессов, весьма важными являются временные характеристики.

Взаимосвязь между значениями выходного сигнала и измеряемой плотностью нестационарного теплового потока зависит не только от свойств ПТП, но и от условий теплообмена на его поверхностях [5*, 2.49]. Различные типы преобразователей целесообразно сравнивать по временным характеристикам, определенным в одинаковых условиях теплообмена. Наиболее удобными являются условия, характерные для ПТИ: одна поверхность (или ее часть) термостатирована, а на другую воздействует измеряемый тепловой поток. Для описания быстродействия (или инерционности) средства измерения наиболее часто используемыми характеристиками являются **время реакции** [2.150, 2.151] и **постоянная времени** [2.105]. Время реакции – это время от начала воздействия ступенчато изменившегося теплового потока до момента достижения выходным сигналом некоторого заданного значения N , например, 0,99 от установившегося значения ($\tau_{0,99}$). Постоянная времени – это время, отсчитанное от начала пе-

реходного процесса, в течение которого приращение (изменение) выходного сигнала достигает $63,21\% \approx 63\%$ от его установившегося значения ($\tau_{0,63}$). Постоянная времени характеризует быстродействие ПТП и ПТИ весьма условно, так как нестационарные процессы в них описываются, как правило, значительно более сложно, чем простое экспоненциальное изменение во времени.

Инерционность ПТИ наиболее полно описывается его амплитудно-частотной характеристикой (далее – АЧХ), так как большинство приемников не обладает одной постоянной времени. Однако, постоянную времени можно ввести как параметр, аппроксимируя АЧХ данного ПТИ другой АЧХ, описываемой одной постоянной времени ($\tau_{0,63}$) [2.105], то есть постоянная времени ПТИ определена как интервал времени после прекращения воздействия излучения, в течение которого сигнал уменьшается в e раз. Этот интервал времени может быть также измерен от начала воздействия излучения до момента, когда нарастающее напряжение достигнет значения, равного $(1 - e^{-1})$ от своего максимального значения.

Собственная постоянная времени ПТИ $\tau_{ПТИ}$ определяется по граничной частоте $\nu_{ГР}$:

$$\tau_{ПТИ} = 1/(2\pi \cdot \nu_{ГР}) = \sqrt{3}/(2\pi \cdot \nu_{0,5}),$$

где $\nu_{ГР}$ – граничная частота; $\nu_{0,5}$ – частота, при которой чувствительность ПТИ падает вдвое по сравнению с чувствительностью на немодулированном потоке излучения. Граничную частоту $\nu_{ГР}$ ПТИ можно определить как частоту синусоидально модулированного потока излучения, при которой чувствительность ПТИ падает до значения 0,707 от чувствительности при немодулированном излучении. Определить АЧХ ПТИ, обладающего малой постоянной времени (около $10^{-8} - 10^{-7}$ с), трудоемко и не всегда возможно из-за низкой чувствительности ПТИ и малой мощности излучения непре-

рывных излучателей по сравнению с импульсными. Временные параметры таких ПТИ целесообразно определять по импульсным и переходным характеристикам, как это делается в импульсной фотометрии [5.1].

Длительность импульсной характеристики ПТИ определяется параметром $\tau_{0,1}$ как интервал времени, в течение которого значение функции, описывающей изменение сигнала приемника под воздействием импульсного излучения в виде дельта-функции, превышает уровень на 0,1 от максимального значения. Время нарастания переходной характеристики ПТИ определяется параметром $\tau_{0,1-0,9}$ как интервал времени, в течение которого изменение его сигнала под воздействием импульса излучения в виде единичного скачка нарастает от уровня 0,1 до 0,9 максимального значения. Постоянная времени $\tau_{0,63}$, определяемая по экспоненциальной переходной характеристике, связана с $\tau_{0,1-0,9}$ следующим образом: $\tau_{0,1-0,9} = 2,2 \cdot \tau_{0,63}$.

Время реакции по уровню 0,99 (время установления показаний) для преобразователей с экспоненциальной переходной характеристикой связано с постоянной времени соотношением: $\tau_{0,99} = 5 \cdot \tau_{0,63}$.

Таким образом, для исследования нестационарных тепловых процессов постоянная времени применяемого преобразователя должна быть в (5–10) раз меньше, чем характерное время изменения теплового потока.

Реально достигнутые значения постоянной времени ПТИ имеют порядок 10^{-9} с, но имеются сведения о разработках приборов с принципиальной возможностью получения постоянной времени на уровне 10^{-12} с. Однако, при измерении теплового потока в условиях сложного теплообмена, когда существенная часть подводимой энергии передается путем конвекции и теплопроводности, большинство известных малоинерционных устройств, предназначенных для измерения потоков теплового излучения, оказываются малоэффективными. В то же время непрерывно нарастает неудовлетворен-

ный спрос на простые и надежные средства для этого вида измерения. Это связано с развитием авиационной и космической техники, использованием динамических режимов работы в технологическом и энергетическом оборудовании, а также с развитием нестационарных методов измерения ТФХ.

Для ПТП временными характеристиками также являются время реакции [2.150, 2.151] и постоянная времени $\tau_{0,63}$, которая характеризует его быстроедействие весьма условно.

Диапазон временных интервалов, характерных для тепловых процессов в природе и технике, весьма широк – от сезонного изменения температуры воздуха до наносекундных лазерных импульсов. Условно диапазон временных интервалов может быть разбит на поддиапазоны, характерные для различных технических средств, причем для оценки этих интервалов применяется комплексный параметр $\tau_x = h^2 / a$ в секундах, где h – толщина теплопроводящей стенки, a – температуропроводность материала стенки. Например, для теплоизоляторов $a \approx 0,1 \cdot 10^{-6}$ м²/с, а для металлов $a \approx 100 \cdot 10^{-6}$ м²/с. По сути параметр τ_x идентичен постоянной времени.

1-ый поддиапазон: $\tau_x > 10^5$ с установлен для тепловых процессов, происходящих в объектах с хорошей теплоизоляцией, толщина которой превышает 0,1 м, к которым можно отнести стены зданий и сооружений, изолированные поверхности котлов, магистральных теплотрасс и другое хорошо изолированное оборудование.

2-ой поддиапазон: $10 \text{ с} < \tau_x < 10^5$ с установлен для процессов, происходящих в объектах с теплоизоляцией, толщина которой составляет от 1 мм до 10 мм, к которым относятся различное защищенное тонким слоем теплоизоляции технологическое оборудование, приборы и т.п.

3-ий поддиапазон: $10^{-2} \text{ с} < \tau_x < 10 \text{ с}$ установлен для процессов, происходящих в объектах с металлическими неизолированными стенками и разделительными перегородка-

ми толщиной более 1 мм – радиаторах, разделительных перегородках теплообменников, технологическом оборудовании с импульсным вводом энергии, приборах с динамическими режимами работы, двигателях, корпусах машин, судов и летательных аппаратов, а также при конвективном теплообмене в газах при дозвуковых скоростях.

4-ый поддиапазон: $\tau_x < 10^{-2}$ с охватывает тепловые процессы, происходящие в объектах, в которых используется импульсное излучение (лазеры, СВЧ-техника), а также при конвективном теплообмене в жидкостях и газах при околозвуковых и сверхзвуковых скоростях.

Таким образом, для объектов 1-й группы характерная длительность теплового процесса может составлять несколько часов и более; для объектов 2-й группы характерное время лежит в секундном диапазоне; объектов 3-й группы – в миллисекундном (или субсекундном) диапазоне, а объектов 4-ой группы – в микро- и наносекундном диапазонах. Как отмечалось выше, для большинства объектов последней группы характерна передача энергии импульсами излучения и, соответственно, для их исследования применяют ПТИ. Для целей энергосбережения и энергетики наиболее интересны объекты первых трех групп.

Измерение теплового потока на объектах первой группы полностью обеспечено ПТП и многоканальными измерительными системами, выпускаемыми в ИТТФ и других организациях [2.138 – 2.148, 5.2, 5.3]. Эти ПТП имеют собственную постоянную времени от 3 с до 5 с, а время измерения и передачи информации по одному каналу измерительной системы (0,5 – 1) с. При этом полный цикл опроса 100-канальной системы составляет (50 – 100) с, что на несколько порядков меньше характерной длительности теплового процесса на объектах этой группы.

Значительная доля объектов второй группы также может быть исследована с помощью указанной аппаратуры. Однако, для процессов с характерным временем 100 с и менее,

динамические погрешности ПТП могут быть довольно велики, а быстродействие измерительной системы недостаточно для получения необходимого объема информации.

Объекты третьей группы относятся, как правило, к наиболее интенсивно развивающимся отраслям науки и техники, и именно они практически не обеспечены быстродействующими СИТ для исследования сложного теплообмена.

Таким образом, создание первичных преобразователей и измерительно-регистрирующих систем, обеспечивающих измерение теплового потока в процессах, длительность которых лежит в субсекундном диапазоне, является очень актуальным. Обзоры различных типов ПТП для исследования нестационарных тепловых процессов и способов динамической коррекции их характеристик даны в ряде работ [2.78–2.82, 2.111, 2.126, 5.4–5.11] и др.

5.2 Малоинерционные ПТП вида вспомогательной стенки

Среди малоинерционных преобразователей, пригодных для измерения нестационарного теплового потока, наиболее перспективными оказались ПТП, выполненные в виде вспомогательной стенки (см. 2.3.2) [5*, 6*, 2.81, 2.82, 2.11, 2.127, 5.12–5.18].

При измерении установившегося теплового потока с помощью ПТП вида вспомогательной стенки его плотность определяется согласно закону Фурье разностью температуры двух его изотермических сечений, как правило, наружных поверхностей. Упрощенное уравнение теплового баланса для простейшей модели ПТП в виде пластины как системы с сосредоточенными параметрами (тепловым сопротивлением R (в $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$) и теплоемкостью единицы поверхности C_A (в $\text{Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)$), которая расположена одной стороной на термостатированном основании, а другой воспринимает тепловой поток, имеет вид:

$$q(\tau) = C_A \cdot dT/d\tau + (T_2 - T_1)/R, \quad (5.1)$$

где $q(\tau)$ – изменяющаяся во времени плотность теплового потока, входящего в пластину через тепловоспринимающую поверхность ($x=0$);

$dT/d\tau$ – скорость изменения средней температуры пластины; T_1 и T_2 – значения температуры ее поверхностей.

В стационарных условиях скорость $dT/d\tau = 0$, а измеренная ПТП вида вспомогательной стенки плотность теплового потока описывается уравнением:

$$q = (T_2 - T_1)/R = (\chi/h) \cdot \Delta T, \quad (5.2)$$

то есть для ее определения в стационарных условиях достаточно измерительной информации об одном перепаде температуры между двумя сечениями. Однако, такие измерения сопровождаются методической погрешностью, обусловленной конечной толщиной и теплопроводностью ПТП.

Наиболее значительной погрешность становится при нестационарных граничных условиях теплообмена, особенно при измерении теплового потока малой плотности (порядка $10 - 30$ Вт/м²).

В нестационарном тепловом состоянии, как видно из уравнения (5.1), кроме разности температуры необходимо учитывать еще производную средней температуры по времени. Из уравнения (5.1) также следует, что постоянная времени ПТП вида вспомогательной стенки пропорциональна произведению теплового сопротивления и теплоемкости на единицу поверхности:

$$\mu = R \cdot C_A = \frac{h}{\chi} \cdot C_A = \frac{h^2}{a}, \quad (5.3)$$

откуда следует, что постоянная времени ПТП вида вспомогательной стенки пропорциональна квадрату толщины и обратно пропорциональна теплопроводности ПТП.

Таким образом, для измерения быстроменяющегося теплового потока с помощью стандартного ПТП необходимо

уменьшать его толщину и (или) увеличивать температуропроводность. Оба пути приводят к уменьшению чувствительности, а уменьшение толщины к тому же ухудшает механическую стойкость ПТП.

Для повышения быстродействия ПТП, работающих по принципу вспомогательной стенки, есть три основных способа: уменьшение толщины, увеличение температуропроводности и использование дополнительной информации, позволяющей учесть производную температуры.

В настоящее время для измерения, нестационарного теплового потока часто пользуются быстродействующими преобразователями, построенными на пирозлектрическом эффекте, либо эффекте возникновения поперечной ТЭДС в анизотропном слое (см. 2.32). Постоянная времени пирозлектрических ПТИ может достигать (10^{-6} – 10^{-5}) с при продольном исполнении и (10^{-8} – 10^{-7}) с – при поперечном [2.72–2.74, 2.105–2.109]. ПТП на основе анизотропных и искусственно анизотропных термоэлементов в зависимости от толщины могут иметь различную постоянную времени. Так наиболее тонкий и быстродействующий приемник на основе CdSb при толщине термоэлемента 2,85 мкм имеет постоянную времени $2,2 \cdot 10^{-6}$ с, а традиционный приемник с толщиной термоэлемента 2,85 мм – 2,2 с [2.77, 2.79, 2.82].

Резистивные ПТП вида вспомогательной стенки, выполненные по технологии изготовления печатных плат на подложке из тонкой полиимидной пленки толщиной не более 0,05 мм, имеют постоянную времени (5–10) мс [2.99].

Среди ПТП вида вспомогательной стенки наиболее распространенными являются термоэлектрические [2.112, 2.150, 2.151], а также см. Приложение А. Одним из первых отечественных термоэлектрических ПТП вида вспомогательной стенки является металлический одиночный преобразователь (ОДТП) (см. 2.3.2 и [2*, 4*]). При толщине среднего слоя порядка 1 мм его постоянная времени не превышала 1 с.

Термоэлектрические батарейные ПТП вида вспомогательной стенки, выполненные из проволочной спирали с гальванически нанесенными покрытиями парного термоэлектрического материала, изготавливают толщиной от 0,5 до 6 мм. Наиболее востребованы ПТП толщиной (1,85–2,5) мм с постоянной времени (3–5) с.

При уменьшении толщины ПТП до 0,5 за счет расположения спирали «плашмя» постоянная времени снижается примерно до 1 с. Близкие по конструкции и характеристики ПТП выпускают в России, Нидерландах, Германии и США (см. Приложение А, табл. А.5) и [2.138, 3.18].

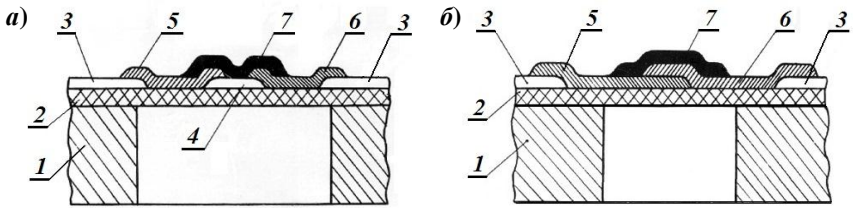
Существенное уменьшение постоянной времени достигается в ПТП с пленочными термоэлементами. Например, фирма «RdF Corporation» (США) [5.19] выпускает пленочные термоэлектрические батарейные ПТП. Внешний вид ПТП се-



Рис.5.1. Термоэлектрический ПТП серии «Micro-Foil» фирмы «RdF Corporation» (США)

рии «Micro-Foil» показан на рисунке 5.1. Он имеет при размерах в плане $12 \times 47 \text{ мм}^2$ и толщине 0,2 мм постоянную времени до 0,1 с, а чувствительность $0,82 \text{ мкВ}/(\text{Вт} \cdot \text{м}^2)$. В то же время для проволочных спиральных ПТП при толщине термобатареи 2 мм при такой же площади чувствительность больше почти на два порядка, а инерционность хуже лишь на порядок.

Значительный прогресс в разработке тонких (пленочных) термоэлектрических преобразователей достигнут при создании ПТИ. В пленочных термоэлементах типичной конструкции [2.76, 5.11, 5.20–5.22] термопары, приемная площадка и контакты – это тонкие пленки металла или полупроводника. Схемы двух возможных конструкций пленочных ПТИ показаны на рисунке 5.2 [5.22].



1 – охлаждаемый каркас; 2 – подложка из диэлектрика; 3 – контакты;
4 – приемная площадка; 5, 6 – ветви термопары; 7 – зачерняющее покрытие

Рис. 5.2. Схемы конструкции пленочных приемников потока теплового излучения: *а* – с приемной площадкой; *б* – без приемной площадки

Пленки наносят методом термического испарения в вакууме на тонкую подложку из диэлектрика (нитроцеллюлоза, формвар, майлар, окись кремния и т.п.), которая, в свою очередь, для придания механической прочности термоэлементу укрепляется на каркасе преимущественно из диэлектрика (стекло, слюда, сапфир), реже – металла. В каркасе на участке, приходящемся на приемную площадку и горячие спаи, имеется центральное отверстие, уменьшающее отток теплоты от горячих спаев, вследствие чего чувствительность термоэлементов повышается. Некоторые экземпляры термоэлементов имеют чернящее покрытие для увеличения поглощательной способности.

Необходимо отметить, что хотя часто пленочные термоэлементы рассматриваются как приборы типа вспомогательной стенки, во многих конструкциях ПТИ происходит изменение направления распространения теплового потока. В конструкциях, показанных на рис. 5.2, поток в самой пленке распространяется вдоль нее от приемной площадки с горячими спаями к холодным спаям, размещенным на охлаждаемом каркасе. При этом направление потока в пленке перпендикулярно направлению измеряемого теплового потока. Такие ПТИ являются преобразователями с поперечным растеканием потока (см. 2.3.1), их временные характеристики определя-

ются не только толщиной пленки и термоэлектродов, но и расстоянием между горячими и холодными спаями.

Существует большое разнообразие пленочных термоэлементов, различающихся по способу соединения термоэлектродов (прямоугольные и концентрические), размещению холодных и горячих спаев, подсоединению внешних контактных выводов, напыляемым материалам, подложкам [2.76, 5.11, 5.20]. Среди них следует особо отметить быстродействующие, постоянная времени которых лежит в микросекундном диапазоне. В 1968 году впервые было сообщено о термопаре с постоянной времени 10^{-6} с, созданной К. Чопрой [5.23] на основе пленок меди и константана. Термопара регистрировала импульсы излучения от неодимового лазера с выходной мощностью 12 Вт/см^2 .

В ИТТФ также были разработаны и исследованы пленочные приемные элементы [5.11], в которых батарея металлических термоэлементов напылялась в вакууме на тонкую пленку, а затем эта пленка наклеивалась на медную «гребенку» так, что «холодные» спаи оказывались на выступах «гребенки» и хорошо охлаждались, а «горячие» спаи размещались над впадинами «гребенки» и их нагрев был пропорционален падающему радиационному тепловому потоку. ПТИ, созданный на базе такого термоэлемента, имел постоянную времени не более 0,3 с, диапазон плотности измеряемого радиационного теплового потока от 100 Вт/м^2 до $300 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$, чувствительность $0,01 \text{ (мВ} \cdot \text{м}^2)/\text{Вт}$.

Как уже отмечалось, ПТИ неэффективны при исследовании сложного конвективно-кондуктивного теплообмена и поэтому как правило, непригодны для решения задач энергосбережения.

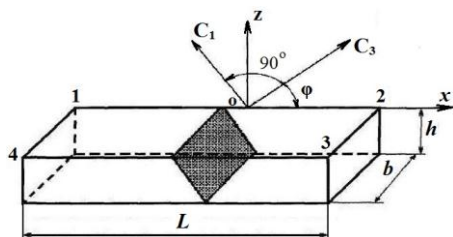
Из резистивных ПТП (см. 2.3.2) вида вспомогательной стенки уместно упомянуть пленочные ПТП, изготовленные по технологии печатных плат [2.99, 2.100]. Быстродействие их определяется в основном толщиной и ТФХ подложки, на которую наносят термометры сопротивления, а также защит-

ных слоев и черненых покрытий. При использовании полиимидной подложки толщиной 0,05 мм, постоянная времени составляет (5 – 10) мс, однако, следует учитывать, что в тонких резистивных ПТП проявляется значительный паразитный тензорезистивный эффект, вызываемый механическими нагрузками.

Существенное снижение инерционности имеет место в теплотметрических преобразователях, основанных на пироэлектрическом эффекте (см. 2.2.8 и 2.3.2) [2.71–2.74, 2.105–2.109, 2.111]. В зависимости от направления вектора поляризации P_c при облучении имеются конструкции пироэлектрических приемников продольного и поперечного типов (см. рис. 2.26). Хотя, чувствительность ПТИ продольного типа выше, чем поперечного, быстродействие ПТИ продольного типа хуже, так как емкость, определяемая площадью электродов, больше, чем у ПТИ поперечного типа. Постоянные времени этих двух типов ПТИ составляют $\tau_{\text{ПРОД}} = (10^{-5} - 10^{-6})$ с и $\tau_{\text{ПОПЕР}} = (10^{-7} - 10^{-8})$ с, соответственно.

Много различных типов ПТИ и ПТП создано на пироэлектрическом эффекте. Наиболее распространены одноэлементные ПТИ. Наилучшая чувствительность достигнута на основе триглицинсульфата, легированного $L - \alpha$ – аланином. Их обнаружительная способность равна $2 \cdot 10^9$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹, максимальное быстродействие получено на монокристаллах тантала лития порядка 170 пс.

Более широкое распространение для измерения теплового потока в быстротекущих процессах получили так называемые **анизотропные** теплотметрические элементы (далее – АТЭ) (см. 2.3.2) [5*, 2.76, 2.79], действие которых основано на возникновении поперечной компоненты электрического поля в кристалле с анизотропным коэффициентом термоэдс при прохождении теплового потока в направлении, не совпадающем с главными осями кристалла [100].



L – длина; b – ширина; h – толщина;
 C_1, C_3 – кристаллографические оси

Рис.5.3. Схема АТЭ (анизотропного термоэлемента)

На рисунке 5.3 изображен АТЭ – прямоугольный параллелепипед, вырезанный из анизотропного монокристалла. Заштрихованную на рисунке плоскость называют тригональной [2.76, 2.79, 2.127–2.132]. Поскольку АТЭ обладает анизотропией теплопроводности, вектор теплового потока во

всех сечениях, кроме плоскости 1-2-3-4, будет отклоняться от оси z . Это означает, что в АТЭ разность температуры возникает как в направлении оси z , так и в направлении оси x , а вектор теплового потока в каждом сечении поворачивается относительно первоначального направления на некоторый угол. Под воздействием внешнего теплового потока в АТЭ возникает электрическое поле, которое из-за анизотропии теплопроводности и коэффициентов ТЭДС не совпадает по направлению не только с внешним тепловым потоком, но и тепловым потоком внутри АТЭ. В направлении оси x действует поперечный эффект Зеебека и возникает ТЭДС, которая пропорциональна плотности теплового потока:

$$E_x = \frac{(\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11}) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi}{b \cdot (\chi_{33}^2 \cdot \sin^2 \varphi + \chi_{11}^2 \cdot \cos^2 \varphi)^{1/2}} \cdot A \cdot q_{CP}, \quad (5.4)$$

где $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{33}$ – компоненты тензора дифференциальной ТЭДС;

χ_{11}, χ_{33} – компоненты тензора теплопроводности;

$A = L \cdot b$ – площадь АТЭ в плане;

q_{CP} – средняя плотность внешнего теплового потока (в направлении z);

φ – угол между кристаллографической осью и поверхностью АТЭ.

Таким образом, ТЭДС E_x в направлении оси x линейно связана с плотностью внешнего теплового потока q_{CP} и рабочей площадью АТЭ, а ее значение зависит от выбора угла φ . Например, для висмута оптимальное значение $\varphi_{opt} = 53,4^\circ$.

Вольт-ваттная чувствительность АТЭ равна

$$S_\varphi = E_x / (q_{CP} \cdot A). \quad (5.5)$$

В тех случаях, когда АТЭ применяют как ПТП, пользуются рабочим коэффициентом преобразования, равным $K_q = q_{CP} / E_x$.

Одиночная пластинка висмута может иметь малую ширину, ее площадь в плане A и сигнал E_x оказываются весьма малыми. Поэтому анизотропные ПТП, подобно преобразователям «продольного типа», собирают в батареи. Реальные площади батарейных анизотропных ПТП от $1 \times 1 \text{ мм}^2$ до $10 \times 10 \text{ мм}^2$ и более, толщина батарей из монокристалла – от 1 мкм до нескольких миллиметров.

На основе анизотропных монокристаллов создан ряд ПТИ, рассмотренных в [2.76, 2.79, 2.82, 2.127]. Наиболее тонкий и быстродействующий приемник на основе CdSb имеет толщину АТЭ 2,85 мкм и постоянную времени $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

В конструкции ПТП Н.П. Дивина [2.137], использованы анизотропные монокристаллы висмута чистоты 0,9999. Висмут относится к материалам с ярко выраженной анизотропией коэффициентов ТЭДС и теплопроводности.

На рисунке 5.4 изображен батарейный ПТП, изготовленный из АТЭ на основе висмута. Пространственное расположение тригональных плоскостей в двух соседних АТЭ обеспечивает суммирование ТЭДС, возникающей в результате воздействия на них нормального теплового потока плотностью q_z . Чувствительные элементы монтируют на подложке 2 из слюды, изолируя друг от друга тонкими (5 мкм) прокладками из лавсана 5, и приклеивают к подложке 2.

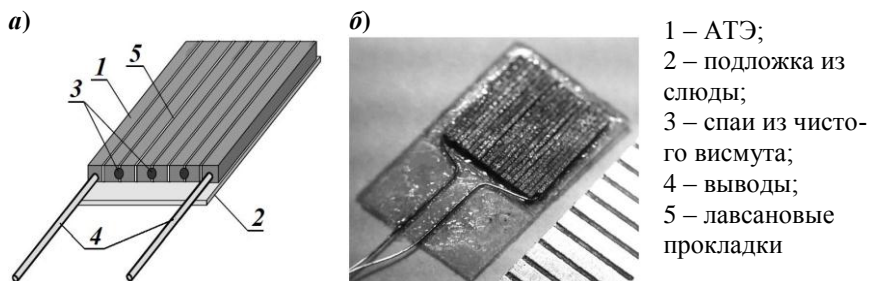


Рис.5.4. Схема (а) и общий вид (б) ПТП конструкции Н.П. Дивина

Спаи из чистого висмута 3 соединяют термоэлементы в последовательный контур. Крайние термоэлементы снабжают выводами 4. Технологические трудности не позволили авторам сделать АТЭ из висмута тоньше 0,1 мм. Батарейные ПТП на основе висмута применяются для исследования процессов нестационарного теплообмена [2.81].

До настоящего времени, к сожалению, обнаружено ограниченное количество природных веществ, обладающих существенной анизотропией ТЭДС, немногим более десятка полупроводников и полуметаллов. Однако, не все эти вещества могут быть использованы для изготовления достаточно эффективных АТЭ не только из-за малой анизотропии ТЭДС, но также из-за большой теплопроводности, снижающей их термоэлектрическую добротность. Для возникновения значительной анизотропии ТЭДС в материале последний должен обладать рядом особенностей в энергетическом спектре носителей тока и в симметрии кристалла, редко встречающихся в природе. Из известных материалов обращает на себя внимание висмут с точки зрения выбора наибольшего значения термоэлектрической добротности и антимонид кадмия как вещество с максимально выраженной анизотропной ТЭДС.

Несмотря на большие потенциальные возможности анизотропные термоэлементы пока не получили повсеместного распространения, главным образом, из-за ограниченного числа известных природных веществ, обладающих анизотропией

ТЭДС. При этом, как правило, они имеют низкую термоэлектрическую добротность и слабо выраженную анизотропию свойств, что лимитирует их использование. Только АТЭ из антимонида кадмия, висмута и его некоторых сплавов [2.76] нашли практическое применение в нестационарной теплотриии. У используемых в настоящее время анизотропных монокристаллов антимонида кадмия наблюдается резко выраженная нелинейная температурная зависимость вольт-ваттной чувствительности, обусловленная тем, что коэффициент ТЭДС имеет максимум при комнатных значениях температуры, а коэффициенты теплопроводности и электропроводности тоже значительно зависят от температуры.

Другая причина малого использования АТЭ заключается в том, что они не удовлетворяют главному требованию измерительной техники – временной и температурной стабильности. Исследования температурной стабильности термоэлементов из антимонида кадмия [2.76, 2.82] показали, что его характеристики могут необратимо меняться при переходе от одного теплового режима к другому. В работе [5.24] установлено, что причиной этой невоспроизводимости, или так называемой «тепловой памяти», является зависимость анизотропии ТЭДС термочувствительного элемента от термической предыстории материала.

Еще одним недостатком АТЭ является сильно выраженный процесс старения, приводящий к временной нестабильности свойств анизотропных ПТП [5.25].

Затруднения в использовании природных анизотропных материалов были преодолены созданием устройств с чувствительными элементами, представляющими собой такие комплексные системы из изотропных материалов, которые обладали анизотропией свойств всей системы в целом.

Впервые **искусственно-анизотропный** чувствительный термоэлемент был предложен Л. Гайлингом [2.125]. Он представляет собой пластинку, состоящую из последовательно чередующихся слоев парных термоэлектродных материалов

(например, меди с константаном), расположенных под углом 20° – 45° к базовой поверхности, на которой устанавливается ПТП (см. рис. 2.34), получивший название косослойного. Протекание теплового потока в системе чередующихся слоев двух материалов с различным коэффициентом ТЭДС, теплопроводностью и электропроводностью, расположенных под углом к внешнему тепловому потоку, вызывает нормальную к этому вектору ТЭДС. В работах [5*, 2.76, 2.125, 5.26] показана принципиальная возможность создания малоинерционного ПТП из искусственных анизотропных термоэлектрических материалов, при этом возможно снизить инерционность ПТП путем уменьшения толщины ПТП без потери вольт-ваттной чувствительности.

Когда измеряемый тепловой поток пронизывает такой ПТП, между верхней и нижней его плоскостями возникает разность температуры, возбуждающая ТЭДС, способную накапливаться вдоль ленточки преобразователя, благодаря чему устройство пригодно для измерения теплового потока [5*, 2.131]. Так как в горизонтальном направлении (вдоль базовой поверхности) одиночные элементы ПТП включены последовательно, происходит суммирование их сигналов. Этот ПТП также может быть отнесен к группе батарейных.

Теоретическое обоснование работы батарейного косослойного искусственно-анизотропного ПТП выполнено в работах [5*, 2.78], где показано, что вследствие наклонного расположения слоев в системе линии термоэлектрического тока представляют собой короткозамкнутые контуры. Такая циркуляция тока приводит к возникновению поперечной относительно градиента температуры составляющей электрического сигнала. Причиной возникновения поперечной ТЭДС является различие коэффициентов ТЭДС вдоль и поперек слоев. Детальный анализ параметров искусственно-анизотропных сред выполнен авторами работы [5.29].

Развитие теории искусственно-анизотропных термоэлементов стимулировало разработку реальных малоинерцион-

ных ПТП с использованием различных конструкций и технологий [2.78, 2.80, 2.81, 2.126, 5.27–5.28].

Для создания быстродействующих ПТП наибольший интерес представляют тонкопленочные конструкции. Разработаны пленочные искусственно-анизотропные ПТП со ступенчатой структурой, с наклонно-стержневой макроструктурой, полупроводниковый из бинарных эвтектических сплавов и другие [2.76, 2.79].

Схема чувствительного элемента ПТП со ступенчатой структурой показан на рисунке 5.5 [2.132].

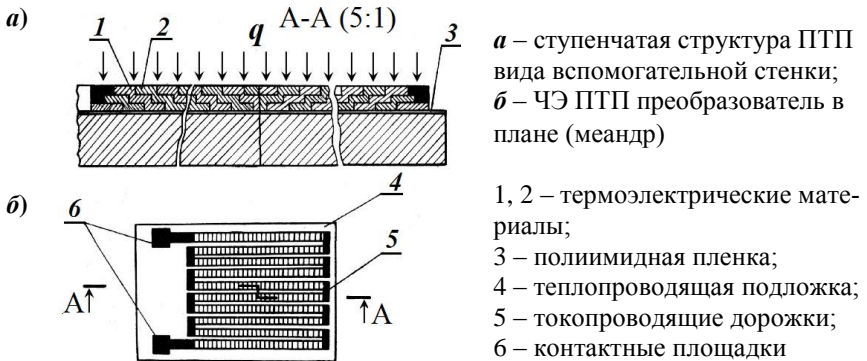


Рис. 5.5. Чувствительный элемент искусственно-анизотропного ПТП со ступенчатой структурой

Он представляет собой расположенную на подложке вспомогательную стенку, состоящую из находящихся в электрическом контакте и наложенных друг на друга чередующихся слоев двух термоэлектрических материалов в форме прямоугольных ступеней, причем каждый последующий слой смещен относительно предыдущего на ширину ступени (см. рис.5.5, *a*).

Для увеличения эффективной длины ЧЭ ПТП он выполнен в виде меандра, отдельные ветви которого соединены токопроводящими дорожками (см. рис.5.5, *б*). В соседних ветвях меандра ступенчатые слои ниспадают в противополо-

ложные стороны, что обеспечивает генерирование ТЭДС различного знака. Благодаря этому достигается последовательное накопление электрического сигнала.

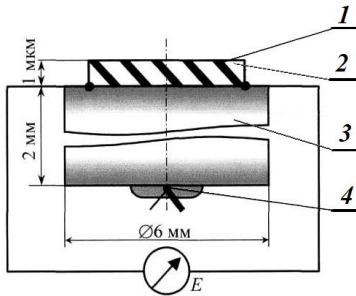
Под действием теплового потока, пронизывающего ЧЭ ПТП, в ступенчатых слоях возникают вихревые термоэлектрические токи, которые вследствие ниспадающего ступенчатого профиля слоев приобретают наклонную ориентацию. Это приводит к появлению относительно градиента температуры поперечной составляющей ТЭДС, накапливающейся вдоль ветвей меандра. Об интенсивности теплового потока судят по значению генерируемого электрического сигнала, снимаемого с контактных площадок меандра.

Для изготовления описанного термоэлемента наиболее приемлемым оказался метод вакуумного термического напыления на изоляционную теплоотводящую подложку. В качестве подложек, служащих одновременно основой и теплоотводящим изоляционным слоем, использована полиимидная пленка толщиной 6 мкм, хорошо зарекомендовавшая себя в производстве пленочных термоэлементов. Достоинство метода в его универсальности и возможности получения пленок толщиной от долей до сотен микрометров.

В настоящее время идея ПТП поперечного типа продолжает развиваться по пути создания новых искусственно-анизотропных термоэлектрических материалов [2.81, 2.134].

Фирма FORTECH HTS GmbH рекламирует свой преобразователь для исследования сверхзвуковых течений ALTP (Atomic Layer Thermo Pile – атомарная термоэлектрическая батарея) [2.82, 2.135], приведенный на рисунке 5.6, действие которого основано на поперечном эффекте Зеебека. Косослойная пленка толщиной 1 мкм, выполненная из чередующихся слоев $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ (1) и CuO_2 (2), нанесена на подложку 3 из SrTiO_3 толщиной 2 мм. Вся сборка имеет форму цилиндра диаметром 6 мм. Постоянная времени этих ПТП составляет, по данным фирмы, 10^{-6} с, что соответствует частоте изменения теплового потока 300 кГц.

Первоначально при создании анизотропных и искусственно-анизотропных термоэлементов считалось, что они могут быть сколь угодно тонкими и обладать соответствующим высоким быстродействием.



- 1, 2 – чередующиеся материалы из CuO_2 и $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$;
- 3 – подложка из SrTiO_3 ;
- 4 – контрольная термопара

Рис. 5.6. Преобразователь ALTP фирмы FORTECH HTS GmbH

Однако, помимо свойственных всем тонкопленочным преобразователям проблем стойкости к механическим перегрузкам для тонких пленок существует размерный эффект [5.20], согласно которому, начиная с некоторого значения толщины пленки, ее термоэлектрические свойства значительно ухудшаются. Нижний предел толщины чувствительного элемента ограничен значением, начиная с которого термоэлектрические параметры пленки не соответствуют свойствам материала. В соответствии с данными работ [5.20, 5.30] минимальная рекомендуемая толщина для пленок $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Sb}_2\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$ составляет 1,2 мкм, а для Bi и $\text{Sb} - 0,1$ мкм. Однако, с учетом оптимального соотношения толщин слоев этот размер должен быть увеличен.

Исходя из формулы (5.1), при измерении нестационарного теплового потока методом вспомогательной стенки необходимо иметь информацию о разности температуры поверхностей стенки и о производной ее средней температуры. Именно это подсказало идею создания **комбинированного** ПТП, который содержит два или более чувствительных элемента преобразования, объединенных в единую конструкцию. При этом один элемент формирует сигнал, пропорцио-

нальный разности температуры, то есть тепловому потоку, а другой (другие) – производной средней температуры либо самой средней температуре с последующим дифференцированием.

В комбинированном термоэлектрическом ПТП реализована возможность получения дополнительной информации, позволяющей учитывать производную температуры (см. формулу (5.1)) за счет введения в конструкцию ПТП дополнительной корректирующей термобатареи, спаи которой расположены в сечениях между холодными и горячими спаями основной термобатареи. Сигнал корректирующей термобатареи пропорционален скорости изменения температуры. Постоянная времени при этом может быть уменьшена на порядок. Такой ПТП получил название **преобразователя с корректирующей термобатареей – ПТП_{КБ}**.

В [5.31] предложен комбинированный ПТП в виде трехслойной конструкции, состоящей из приемной стенки, тонкого газонаполненного зазора и тонкой пластины – основания. Приемная вспомогательная стенка, выполнена из металла, имеет малое тепловое сопротивление и конечную теплоемкость. Она еще служит термометром сопротивления для измерения средней объемной температуры. В такой конструкции основная теплоемкость сосредоточена в приемной металлической стенке, а тепловое сопротивление – в газонаполненном зазоре. Среднюю объемную температуру получают, измеряя температуру приемной стенки, а плотность теплового потока, – по разности температуры приемной стенки и пластины–основания.

К комбинированным малоинерционным СИТ можно отнести термопирозэлектрические ПТИ [2.111] и термоэлектрические ПТП с корректирующими термобатареями.

Заложенный в термопирозэлектрический ПТИ метод взаимной параллельной коррекции динамических характеристик относится к преобразованию входного нестационарного потока теплового излучения в ПТИ, содержащем два чув-

ствительных элемента: термо- и пироэлектрический. Однако, термопироэлектрический прибор применяется только для измерения нестационарного потока теплового излучения, в частности, импульсного и импульсно-моделированного излучения средней мощности, и для одновременного измерения мощности энергии коротких лазерных импульсов.

Авторами [5.32] предложено с целью уменьшения инерционности снабдить ПТП вида вспомогательной стенки двумя корректирующими термобатарейми, включенными последовательно с основной термобатареей и установленными так, что каждая из тепловоспринимающих поверхностей ПТП находится в тепловом контакте с одной из корректирующих термобатарей и теплоизолирована от другой.

На рисунке 5.7 *а, б* изображена конструкция такого ПТП_{КБ} и графики сигналов термобатарей при скачкообразном изменении теплового потока.

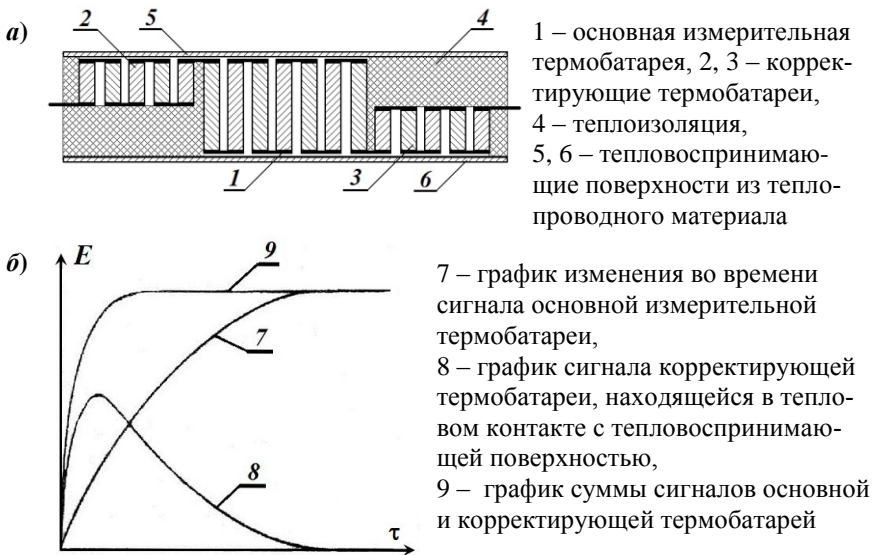


Рис. 5.7. Преобразователь с корректирующими термобатарейми: *а* – схема конструкции, *б* – графики сигналов термобатарей при скачкообразном изменении теплового потока

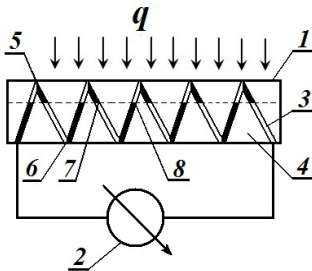
Преобразователь данного типа содержит основную измерительную термобатарею 1, корректирующие термобатареи 2, 3, теплоизоляцию 4, тепловоспринимающие поверхности 5, 6 из теплопроводного материала. Вследствие теплоизоляции спаев корректирующей термобатареи, непосредственно невоспринимающей тепловой поток, она не реагирует на воздействие стационарного теплового потока, при котором температура по всей толщине корректирующей термобатареи одинакова и ее ТЭДС равна нулю.

При изменении теплового потока температура по толщине корректирующей термобатареи уже не будет одинаковой и на электрических выводах возникнет электрический сигнал, обусловленный наличием ТЭДС. Таким образом, корректирующая батарея дает сигнал только при изменении теплового потока. Если этот сигнал сложить с сигналом основной измерительной термобатареи, то суммарный сигнал будет воспроизводить характер изменения теплового потока с гораздо меньшей инерционностью, чем отдельно сигнал от основной термобатареи.

На рис. 5.7, б кривая 7 показывает изменение во времени сигнала основной измерительной термобатареи при скачкообразном изменении теплового потока. Он изменяется по закону, близкому к экспоненциальному до стационарного значения, соответствующего значению теплового потока. Одновременно сигнал корректирующей термобатареи, находящейся в тепловом контакте с тепловоспринимающей поверхностью (кривая 8), сначала возрастает, достигает максимального значения и затем убывает до нуля. Вторая корректирующая термобатарея при этом не дает сигнала, так как не испытывает воздействия теплового потока. Поскольку основная и корректирующая термобатареи соединены в последовательную электрическую цепь, то сигнал $\Pi\Pi\Pi_{\text{КБ}}$ представляет собой сумму сигналов основной и корректирующей термобатарей. Изменение во времени суммарного сигнала имеет постоянную времени гораздо меньшую, чем сигнал основной

термобатареи. В случае воздействия теплового потока одновременно на обе тепловоспринимающие поверхности суммарный сигнал ПТП_{КБ} будет состоять из сигнала основной измерительной термобатареи и сигналов от обеих корректирующих термобатарей.

В [5.33] для измерения нестационарного теплового потока предложено устройство вида вспомогательной стенки, схематически показанное на рисунке 5.8, в котором батарея термоэлементов кроме основных спаев – горячего 5 и холодного 6, содержит дополнительные спаи 7 и 8, расположенные в плоскости, параллельной поверхностям стенки и находящейся от них на расстояниях, пропорциональных их тепловым сопротивлениям.



- 1 – тепловоспринимающая поверхность ПТП_{КБ};
- 2 – регистрирующий прибор;
- 3 – несущая проволока;
- 4 – заливочный компаунд
- 5 и 6 – основные горячие (5) и холодные (6) спаи термобатареи;
- 7 и 8 – дополнительные спаи

Рис. 5.8. Схема преобразователя с дополнительными корректирующими спаями

При стационарном тепловом потоке сигнал, вырабатываемый между спаями 8–5–7, и сигнал, генерируемый спаями 7–6–8, имеют противоположные знаки и вычитаются. В момент прихода импульса теплового потока на спай 5 батарея генерирует ТЭДС пропорционально градиенту температуры между горячими спаями 5 и дополнительными спаями 7 и 8, которые в начальный момент являются холодными. Через некоторое время передний фронт теплового импульса достигает дополнительных спаев 7 и 8, в результате чего ТЭДС батареи уменьшается. Таким образом, устройство генерирует электрический сигнал при воздействии нестационарного теплового потока.

В [5.34, 5.35] для измерения нестационарного теплового потока предложено использовать основную и корректирующие термобатареи, расположенные следующими один за другим слоями и имеющими одинаковую толщину. Размещенные рядом корректирующие термобатареи электрически включены встречно, количество содержащихся в каждой батарее дифференциальных термопар (т.е. чувствительность батареи) подобрано так, чтобы оптимально осуществлять коррекцию суммарного сигнала при измерении нестационарного теплового потока. Уменьшение постоянной времени за счет введения дополнительных слоев с термобатареями в значительной степени нивелируется увеличением общей толщины многослойного ПТП и уменьшением его эффективной теплопроводности, что происходит из-за появления дополнительных контактных сопротивлений при склейке набираемых в пакет термобатарей. Тем не менее, такой способ уменьшения динамической погрешности нашел применение в приборах для комплексного определения теплофизических характеристик при квазистационарном режиме [5.36].

В [2.33, 5.37] предложено в ПТП со спиральной термобатареей вводить спиральные корректирующие термобатареи, в которых парным термоэлектродом покрывается не половина витка спирали (как показано на рис. 2.38), а меньшая его часть. Это позволяет формировать корректирующий сигнал, пропорциональный скорости изменения температуры определенного слоя вспомогательной стенки.

5.3 Измерение нестационарного теплового потока с применением специальных измерительных устройств и методик обработки экспериментальных данных

Достоверная количественная оценка динамической погрешности любого измерительного преобразователя предполагает анализ его инерционных свойств. В теории измерительных преобразователей [5.2, 5.38] есть два основных подхода к решению этой проблемы. Первый предполагает прове-

дение подробного физико-математического анализа процессов, лежащих в основе работы конкретного преобразователя. Применительно к приборам для измерения тепловых величин задача установления однозначного соответствия между выходными сигналами и входными воздействиями формулируется как граничная задача для системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс теплообмена в ПТП с заданием всех граничных и начальных условий. При этом входное (измеряемое) воздействие задается в граничных условиях, а закон изменения отклика есть некий функционал от получаемого решения.

Второй подход, не предполагающий изучения конкретных физических особенностей явлений, происходящих в процессе тепловых измерений, основан на анализе некоторых общих свойств широкого класса ПТП. Для идентификации инерционных свойств конкретного ПТП используется информация о его реакции или измерительной системы в целом (если соблюдено условие ее линейности) на некоторые нормированные входные воздействия. Применяемый в рамках этого метода формальный математический аппарат позволяет однозначно связать входное воздействие на преобразователь, для которого известен отклик на пробный сигнал, с его выходным сигналом.

Первый подход основан, как правило, на аналитическом или численном решении прямых задач теплопроводности, а для второго подхода целесообразно использовать преобразования Лапласа.

Решение ряда прямых нестационарных задач, связанных с преобразователями температуры и теплового потока, описано в [5*, 5.39]. Для улучшения динамических характеристик ПТП постановка задачи иная: необходимо по известному сигналу – отклику ПТП на входное воздействие восстановить значения самого воздействия, – нестационарного теплового потока. Решение такой задачи базируется на решении прямой задачи теплопроводности. Однако, при этом необходимо про-

водить экстраполяцию и дифференцирование поля температуры, что принципиально изменяет постановку задачи, переводя ее из класса прямых задач теплопроводности в класс обратных. Важно отметить, что задача восстановления плотности теплового потока на границе по результатам измерения температуры во внутренних точках тела (именно такие измерения оказываются единственно возможными в большинстве практических случаев) является обратной граничной задачей. Трудности, возникающие при ее решении, обусловлены характерной для большинства обратных задач неустойчивостью результата относительно возмущений исходных данных.

Обзор методов, посвященных восстановлению нестационарного теплового потока по выходным сигналам ПТП, дан в работах [5.4, 5.5, 5.40].

В [5.4] для восстановления нестационарного теплового потока, действующего на батарейный термоэлектрический ПТП, использован интегральный метод Дородницина [5.40]. Тепловая модель ПТП представлена в виде трехслойного тела. Интегральный метод Дородницина является эффективным способом решения задачи как в силу удобства его применения для многослойных тел, так и благодаря использованию кусочно-полиномиального представления искомого решения, что улучшает «вязкостные» качества метода, то есть уменьшает упомянутую неустойчивость. Применение метода предполагает разбиение каждого из входящих в модель ПТП однородных слоев на некоторое число N дополнительных слоев и представление профиля температуры внутри каждого слоя в виде произведения полинома второй степени (для случая трехслойной модели ПТП) от относительной координаты и средней температуры слоя. При реализации метода на электронно-вычислительных машинах (далее – ЭВМ) количество слоев разбиения выбирается автоматически, исходя из условия, что последующее прибавление слоя изменит решение меньше, чем на заданное значение. Коэффициенты упомянутых полиномов определяют из уравнений, учитывающих гра-

нические условия, условия равенства на границах слоев температуры и производных температуры и интегральное условие, полученное усреднением решения уравнения теплопроводности по толщине слоя. Эти условия составляют систему из $3N$ линейных алгебраических уравнений для коэффициентов полиномов и N обыкновенных дифференциальных уравнений для средних значений температуры слоев.

Таким образом, алгоритм, реализующий метод Дороницина, предполагает последовательные решения на каждом временном шаге системы линейных алгебраических уравнений и задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. По реализованному на ЭВМ алгоритму восстановления значений нестационарного теплового потока был проведен ряд численных экспериментов, в результате которых установлено, что использование исходных данных с погрешностями (возмущениями) приводит к росту их относительного значения в 6 – 7 раз в случае, когда толщина поверхностного слоя ПТП равна нулю, и почти в 1000 раз, когда отношение этой толщины к толщине среднего слоя равно 0,5.

Для устранения влияния роста амплитуды случайных возмущений предложена эффективная процедура аппроксимации со сглаживанием исходных данных, что позволяет практически полностью устранить явление неустойчивости.

На рисунке 5.9 показано изменение разности температуры плоскостей, в которых расположены спаи дифференциальной термобатареи, которой пропорционален выходной сигнал ПТП. На этом же рисунке показаны границы области возмущенных значений в выходном сигнале и результаты аппроксимации по методу наименьших квадратов.

На рисунке 5.10 показаны графики изменения плотности входного нестационарного потока, границы области значений плотности теплового потока при использовании возмущенных значений и результаты вычислений плотности теплового потока по сглаженным значениям.

В работе [5.41] рассмотрен ПТП в виде составного двухслойного диска с теплоизолированной боковой поверхностью и заданным отношением толщины каждого из двух слоев к диаметру.

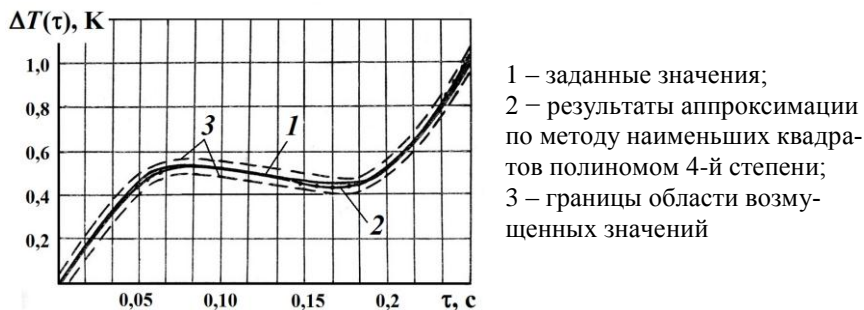


Рис. 5.9. Изменение разности значений температуры плоскостей, в которых расположены спаи дифференциальной термобатареи

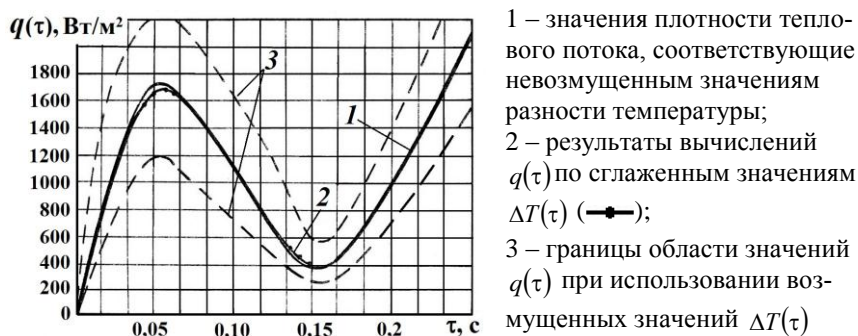


Рис. 5.10. Результаты восстановления плотности теплового потока по температурным данным рис. 5.9

Один из слоев служит теплометрическим элементом, на торцах которого измеряется температура, а тонкий второй слой обеспечивает заданную степень черноты и защищает первый слой от воздействия теплоносителя. На основании решения задачи о распространении теплоты в бесконечной двухслойной пластине получены достаточно сложные рекуррентные формулы для расчета плотности теплового потока по

измеренным значениям температуры на границах пластины и между слоями, например по показаниям ПТП восстановлены значения плотности нестационарного теплового потока, наблюдавшиеся при запуске энергетической установки.

В работе [5.6] рассмотрена в линейном приближении задача восстановления нестационарного входного воздействия на ПТП по данным измерения его выходного сигнала с применением операционного метода Лапласа. Динамические свойства ПТП описываются операционной моделью, заданной передаточной функцией $X(s)$:

$$X(s) = Q^*(s)/Q(s), \quad (5.6)$$

где $Q(s)$ – изображение Лапласа плотности входного нестационарного теплового потока $q(\tau)$; $Q^*(s)$ – изображение Лапласа функции плотности теплового потока $q^*(\tau)$, полученной по выходному сигналу ПТП и его статическому коэффициенту преобразования.

Входное воздействие в области изображений записывается в виде уравнения:

$$Q(s) = X^{-1}(s) \cdot Q^*(s), \quad (5.7)$$

где $X^{-1}(s)$ – обратная передаточная функция ПТП, определяемая соотношением: $X^{-1}(s) \cdot X(s) = 1$.

Для синтеза алгоритмов восстановления использованы дробно-рациональные приближения обратной передаточной функции ПТП вида:

$$\tilde{X}^{-1}(s) = \left(1 + \sum_{n=1}^M a_n \cdot s^n \right) / \left(1 + \sum_{n=1}^k b_n \cdot s^n \right) = A_M(s)/B_k(s). \quad (5.8)$$

Приближенное решение для плотности входного теплового потока $\tilde{q}(t)$ можно представить в виде:

$$\tilde{q}(t) = q_1(t) + \sum_{n=1}^M a_n \cdot \frac{d^n q_1(\tau)}{d^n \tau}, \quad (5.9)$$

где $q_1(\tau) = \int_0^{\infty} \beta(\tau_1) \cdot q^*(\tau - \tau_1) \cdot d\tau$ – свертка, в которой функция

$$\beta(\tau_1) = L^{-1}(1/B_k(s)), \quad (5.10)$$

где L^{-1} – оператор обратного преобразования Лапласа.

Верхний предел интегрирования при вычислении свертки фактически ограничен длительностью исследуемого процесса или импульсной функции $\beta(\tau)$.

В качестве примера рассмотрено применение описанного алгоритма для коррекции показаний стандартного термоэлектрического ПТП. Рациональное приближение передаточной функции указанного ПТП представлено в виде:

$$\tilde{X}(s) = \frac{1 + 0,5 \cdot \mu^\alpha \cdot s}{(1 + \mu^\Lambda \cdot s) \cdot (1 + \mu^\alpha \cdot s)}, \quad (5.11)$$

где μ^Λ и μ^α – постоянные времени, характеризующие, соответственно, инерционность переходных процессов по уровню 0,63 в ПТП при адиабатной тыльной поверхности и конвективном теплообмене на ней.

Отмечено, что величина μ^α связана с интегральными характеристиками системы соотношением:

$$\mu^\alpha \approx C \cdot (0,5 \cdot R + 1/\alpha), \quad (5.12)$$

где C – теплоемкость, отнесенная к единице площади ПТП; R – тепловое сопротивление ПТП; α – коэффициент теплообмена на тыльной поверхности.

Обратная передаточная функция имеет вид:

$$\tilde{X}^{-1}(s) = 1 + \mu_1 \cdot s + \mu_2 \cdot s / (1 + 0,5 \cdot \mu^\alpha \cdot s), \quad (5.13)$$

где $\mu_1 = 2\mu^\Lambda$; $\mu_2 = 0,5 \cdot \mu^\alpha - \mu^\Lambda$.

Приближенное выражение для определения плотности нестационарного входного теплового потока имеет вид:

$$\tilde{q}(\tau) = q^*(\tau) + \mu_1 \cdot \frac{dq^*(\tau)}{d\tau} + \mu_2 \cdot \frac{dq_1(\tau)}{d\tau}, \quad (5.14)$$

где $q_1(\tau)$ – результат свертки функции плотности теплового

потока $q^*(\tau)$, полученной по выходному сигналу ПТП и его статическому коэффициенту преобразования, с импульсной функцией

$$\beta(\tau) = 2 \cdot \exp(-2 \cdot \mu^\alpha) / \mu^\alpha, \quad (5.15)$$

где τ – длительность процесса.

При численной реализации алгоритма для случая процесса длительностью τ использован дискретный аналог интеграла свертки:

$$q_1(\tau) \approx \Delta\tau \cdot \left(0,5 \cdot \beta(0) \cdot q^*(\tau) + \sum_{k=1}^N \beta(k \cdot \Delta\tau) \cdot q^*(\tau - k \cdot \Delta\tau) \right), \quad (5.16)$$

где $\Delta\tau$ – шаг дискретизации по времени; $\tau = N \cdot \Delta\tau$.

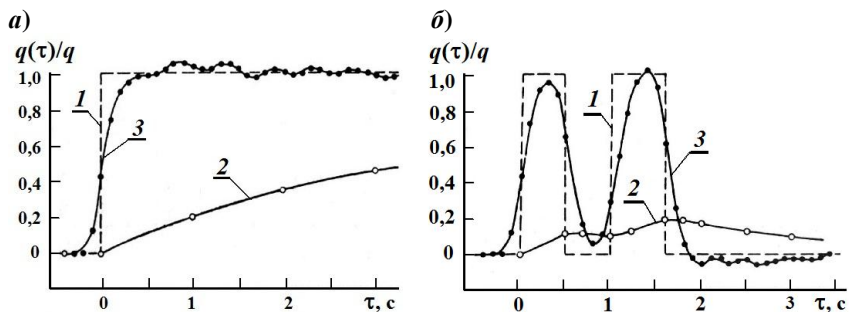
Для численного дифференцирования в уравнении (5.14) использована формула:

$$\frac{dq(\tau)}{d\tau} \approx \frac{q(\tau + \Delta\tau) - q(\tau - \Delta\tau)}{2\Delta\tau}. \quad (5.17)$$

Проверка эффективности предложенного алгоритма выполнена на стандартном ПТП, имеющем постоянную времени $\mu^A = 1,8$ с; $\mu^\alpha = 19$ с. Для уменьшения влияния помех исходные данные сглажены при помощи регрессионного фильтра.

На рисунке 5.11 *а, б* представлены результаты восстановления плотности входного теплового потока для случаев ступенчатого воздействия и воздействия в виде двух прямоугольных импульсов.

В работах [5.6, 5.7] рассмотрены динамические погрешности восстановления и даны рекомендации по пределам применимости алгоритма в зависимости от постоянных времени, скорости изменения сигнала ПТП и уровня помех измерения. Ряд задач по оцениванию динамических погрешностей и восстановлению нестационарного входного воздействия для разных типов ПТП рассмотрен в работах О.А. Герашенко, Шумакова Н.В. Н.А. Ярышева, Г.Н. Дульнева, Н.В. Пилипенко и других исследователей [5*, 2.8, 2.10, 2.13, 5.8–5.10, 5.12–5.18].



1 – исходное воздействие, 2 – измеренные значения, 3 – восстановленные значения теплового потока.

Рис. 5.11. Результаты восстановления входного теплового воздействия на ПТП: *а* – входное воздействие ступенчатого вида; *б* – входное воздействие в виде двух прямоугольных импульсов

Значения плотности нестационарного теплового потока так же, как и нестационарной температуры, могут быть восстановлены путем подключения к инерционному преобразователю специальных электрических корректирующих цепей [2.9, 5.42, 5.43]. Идея метода состоит в том, что последовательно с инерционным преобразователем, имеющим передаточную функцию $X(s)$, включают корректирующую цепь с передаточной функцией $1/X(s)$. При этом обобщенная передаточная функция, равная произведению передаточных функций последовательно включенных звеньев, корректируется и АЧХ такой измерительной системы становится равномерной в широкой полосе частот. Несмотря на простоту и принципиальную ясность основной идеи синтеза аналоговых корректирующих устройств, многолетний опыт их практического создания показал невозможность технического осуществления идеальной коррекции инерционности. Лучшие образцы аналоговых корректоров инерционности позволяют уменьшить постоянную времени преобразователей на один – два порядка. Можно выделить следующие основные причины практических трудностей:

а) невыполнение идеализированных условий, предполагавшихся при выводе дифференциальных уравнений ПТП (получение передаточной функции);

б) параметрические влияния, то есть влияния изменений коэффициентов дифференциального уравнения реального ПТП вследствие изменения характеристик теплообмена с окружающей средой;

в) нелинейность реальных преобразователей;

г) ограничения на физическую реализуемость структурных единиц с передаточной функцией $1/X(s)$, связанные, в основном, с устойчивостью реальных схем.

Таким образом, следует отметить, что, как численные методы восстановления нестационарного теплового потока, ориентированные на реализацию с помощью ЭВМ, так и аналоговые корректирующие устройства обеспечивают увеличение быстродействия ПТП на один, максимум два порядка.

5.4 Особенности измерения нестационарного теплового потока преобразователями с корректирующими термобатарейми (ПТП_{КБ})

Как показала практика наиболее перспективными быстродействующими ПТП оказались термоэлектрические комбинированные ПТП вида вспомогательной стенки, выполненные с корректирующей(ими) термобатарей(ями) – ПТП_{КБ}.

Согласно закону Фурье [1.10] при измерении стационарного теплового потока с помощью ПТП вида вспомогательной стенки его плотность определяется по измеренной разности температуры наружных поверхностей ПТП, если они совпадают с плоскостями расположения холодных и горячих спаев термобатареи. Этому соответствует метод численного дифференцирования [2.6, 5.44] между двумя узлами дифференцирования ($n = 2$). Однако таким измерениям сопутствует методическая погрешность, обусловленная толщиной и теплоемкостью ПТП. Особенно значительной она ста-

новится в условиях нестационарного теплового процесса и при измерении теплового потока малой плотности (на уровне (1–30) Вт/м²). В этих случаях целесообразно увеличить количество узлов дифференцирования, например, за счет сечений ПТП, равномерно распределенных по его высоте.

Основополагающие соотношения для определения плотности теплового потока через тепловоспринимающую поверхность ПТП (координата $x = 0$), получаются методами вычислительной математики согласно работам [3.19, 5.45–5.47] и имеют вид:

– для количества узлов дифференцирования $n = 3$:

$$q(x=0; \tau) = -\frac{\chi}{h} \cdot (3 \cdot T(0; \tau) - 4 \cdot T(0,5; \tau) + T(1; \tau)) + r(\xi) \quad (5.18)$$

или $q(x=0; \tau) = -\frac{\chi}{h} \cdot (3 \cdot (T(0; \tau) - T(0,5; \tau)) - (T(0,5; \tau) - T(1; \tau))) + r(\xi); (5.19)$

– для количества узлов $n = 4$:

$$q(x=0; \tau) = -\left(\frac{\chi}{3h}\right) \cdot \left(11 \cdot T(0; \tau) - 18 \cdot T(1/3; \tau) + 9 \cdot T(2/3; \tau) - 2 \cdot T(1; \tau)\right) + r(\xi) \quad (5.20)$$

или $q(x=0; \tau) = -\frac{\chi}{3h} \cdot \left(11 \cdot (T(0; \tau) - T(1/3; \tau)) - 7 \cdot (T(1/3; \tau) - T(2/3; \tau)) + 2 \cdot (T(2/3; \tau) - T(1; \tau))\right) + r(\xi); (5.21)$

– для количества узлов $n = 5$:

$$q(x=0; \tau) = -\frac{\chi}{6h} \cdot (25 \cdot T(0; \tau) - 48 \cdot T(0,25; \tau) + 36 \cdot T(0,5; \tau) - 16 \cdot T(0,75; \tau) + 3 \cdot T(1; \tau)) + r(\xi) \quad (5.21)$$

ИЛИ

$$q(x=0; \tau) = -\frac{\chi}{6h} \cdot (25 \cdot (T(0; \tau) - T(0,25; \tau)) - 23 \cdot (T(0,25; \tau) - T(0,5; \tau)) + 13 \cdot (T(0,5; \tau) - T(0,75; \tau)) - 3 \cdot (T(0,75; \tau) - T(1; \tau))) + r(\xi), \quad (5.23)$$

где $r(\xi)$ – остаточный член.

Эти соотношения использованы для анализа теплообмена в ПТП, подверженном внешнему тепловому воздействию при различных краевых условиях. При этом ПТП представлен бесконечной пластиной с толщиной, равной высоте ПТП (то есть $h = h_{ПТП}$).

Первая задача решена для случая теплообмена в ПТП при стационарных начальном и граничных условиях, когда теплоотдающая поверхность ПТП, имеющего постоянную начальную температуру T_0 , термостатирована при этой же температуре, а на тепловоспринимающую поверхность ($x = 0$) поступает тепловой поток постоянной плотности, что соответствует таким краевым условиям:

$$\begin{cases} T(x; \tau = 0) = T_0 = const, \\ -\chi \cdot \frac{\partial T(x=0; \tau)}{\partial x} = q_0 = const, \\ T(x = h; \tau) = T_0 = const. \end{cases} \quad (5.24)$$

Решение этой задачи в безразмерных координатах ($\eta = x/h$ и $F_0 = a \cdot \tau/h^2$) для текущей температуры, безразмерная форма которой принята равной отношению $\theta(\eta; F_0) = (T(x, \tau) - T_0)/(T_\infty - T_0)$, имеет вид:

$$T(x, \tau) = T_0 + (h/\chi) \cdot q_0 \cdot \theta(\eta; F_0), \quad (5.25)$$

где функция $\theta(\eta; F_0)$ согласно [2.6] равна:

$$\theta(\eta, F_0) = 1 - \eta - \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \sin(\mu_k \cdot (1 - \eta)) \cdot \exp(-\mu_k^2 \cdot F_0), \quad (5.26)$$

где $A_k = (-1)^{k+1} \cdot 2/\mu_k^2$ и $\mu_k = 0,5(2k - 1) \cdot \pi$.

Исходя из (5.25), разность значений температуры двух различных сечений по высоте ПТП_{КБ} (с координатами η_i и η_j), пропорциональная измеряемому преобразователем тепловому потоку, равна:

$$T(\eta_i; Fo) - T(\eta_j; Fo) = q_0 \cdot h/\chi \cdot (\theta(\eta_i, Fo) - \theta(\eta_j, Fo)), \quad (5.27)$$

откуда с использованием формул (5.19), (5.21) и (5.23) получены необходимые для математического моделирования при варьировании количества узлов дифференцирования ($n = \text{var}$) следующие расчетные зависимости приведенной плотности теплового потока от времени:

– для $n = 2$, то есть для традиционного ПТП:

$$q_{ИЗМ}(0; \tau)/q_0 = \theta(0; Fo) - \theta(1; Fo); \quad (5.28)$$

– для $n = 3$ (ПТП_{КБ} с одним сечением по средней линии с координатой $\eta_1 = 0,5$):

$$q_{ИЗМ}(0; \tau)/q_0 = 3 \cdot \left((\theta(0; \tau) - \theta(0,5; \tau)) - \frac{1}{3} \cdot (\theta(0,5; \tau) - \theta(1; \tau)) \right) + r^*(\xi); \quad (5.29)$$

– для $n = 4$ (ПТП_{КБ} с двумя сечениями с координатами $\eta_1 = h_1/h_{ПТП} = 1/3$ и $\eta_2 = h_2/h_{ПТП} = 2/3$):

$$q_{ИЗМ}(0; \tau)/q_0 = \frac{11}{3} \cdot \left((\theta(0; \tau) - \theta(1/3; \tau)) - \frac{7}{11} \cdot (\theta(1/3; \tau) - \theta(2/3; \tau)) + \frac{2}{11} \cdot (\theta(2/3; \tau) - \theta(1; \tau)) \right) + r^*(\xi); \quad (5.30)$$

– для $n = 5$ (ПТП_{КБ} с тремя сечениями с координатами $\eta_1 = h_1/h_{ПТП} = 0,25$; $\eta_2 = h_2/h_{ПТП} = 0,50$; $\eta_3 = h_3/h_{ПТП} = 0,75$):

$$q_{ИЗМ}(0; \tau)/q_0 = \frac{25}{6} \cdot \left((\theta(0; \tau) - \theta(0,25; \tau)) - \frac{23}{25} \cdot (\theta(0,25; \tau) - \theta(0,50; \tau)) + \frac{13}{25} \cdot (\theta(0,50; \tau) - \theta(0,75; \tau)) - \frac{3}{25} \cdot (\theta(0,75; \tau) - \theta(1; \tau)) \right) + r^*(\xi), \quad (5.31)$$

где $r^*(\xi)$ – остаточный член;

h_1, h_2, h_3 – координаты сечений по высоте ПТП_{КБ}, начиная от тепловоспринимающей поверхности ($\eta = 0$);

$\theta(\eta, Fo)$ – текущая температура (см. формулу (5.26)).

Для ПТП_{КБ}, в котором происходит генерирование термоэлектрических сигналов, соответствующих разности температуры последовательных пар сечений ПТП_{КБ}, и их алгебраическое сложение в пропорции, задаваемой коэффициентами в формулах (5.29) – (5.31), значения измеренного приведенного выходного сигнала ПТП $q_{ИЗМ}(\tau)/q_0$ отличаются от расчетных значений отношения $q(\tau)/q_0$, полученных по формулам (5.29) – (5.31), на значение остаточного члена $r^*(\xi)$.

На рисунке 5.12 графически представлены результаты математического моделирования с использованием указанных формул (5.29)–(5.31) при условии $r^*(\xi) = 0$ (графики, соответственно, 2, 3 и 4).

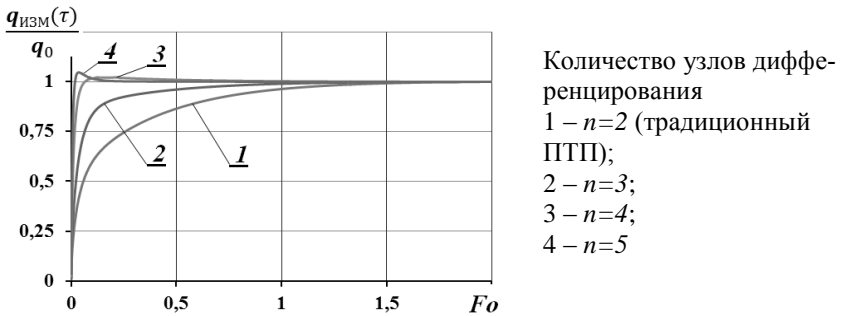


Рис. 5.12. Зависимости приведенной плотности теплового потока через сечение $\eta = 0$ от безразмерного времени (критерия Фурье Fo) при вариации количества узлов дифференцирования n для случая с постоянным внешним тепловым воздействием $q_0 = const$ при стационарных краевых условиях (5.24)

Кроме графиков 2, 3 и 4 на рис. 5.12 для сравнения дан график 1 по результатам счета для стандартного ПТП, то есть при двух узлах дифференцирования, при этом счет выполнен

по формуле (5.28). Из анализа полученных графиков изменения во времени плотности измеренного теплового потока относительно плотности заданного теплового воздействия q_0 , поступающего на тепловоспринимающую поверхность ПТП, следует, что при увеличении количества узлов дифференцирования существенно уменьшается время реакции ПТП на внешнее тепловое воздействие.

Уменьшение инерционности ПТП вида вспомогательной может быть стенки реализовано увеличением в составе ПТП количества измерителей разности температуры между соответствующими сечениями при выбранном их количестве. Наиболее очевидным техническим решением увеличения количества сечений, между которыми измеряется разность температуры, является изготовление ПТП_{КБ} из нескольких стандартных ПТП, набранных в столбик, то есть расположенных относительно теплового потока последовательно и соединенных дифференциально по электрическому сигналу. Однако, уменьшение постоянной времени при таком исполнении ПТП_{КБ} в значительной степени нивелируется увеличением общей толщины многослойного ПТП и уменьшением его эффективных коэффициентов теплопроводности и температуропроводности из-за появления контактного сопротивления при склейке набираемых в пакет стандартных ПТП. В связи с этим этот способ является бесперспективным для получения малоинерционного ПТП.

Целесообразно ПТП_{КБ} изготавливать с одной или несколькими корректирующими термобатареями, которые входят в конструкцию ПТП и соединены с основной термобатареёй дифференциально. Однако, как показали исследования, ПТП_{КБ} достаточно выполнять с одной корректирующей термобатареёй, то есть с количеством узлов дифференцирования $n = 3$, при этом результат по уменьшению инерционности достигается не хуже, чем при большем количестве узлов ($n = 4, 5$ и более) (см. рис. 5.12) [5.45].

Исходя из этого, ПТП_{КБ} чаще всего выполняют из двух спиральных термобатарей, как показано на рисунке 5.13, основной 1, на тепловоспринимающую поверхность которой приходит тепловой поток, подлежащий измерению, и корректирующей 2, горячие спаи которой размещены вблизи (см. *а* и *в*) или ниже (см. *б* и *г*) сечения холодных спаев основной термобатареи и которая включена с основной дифференциально.

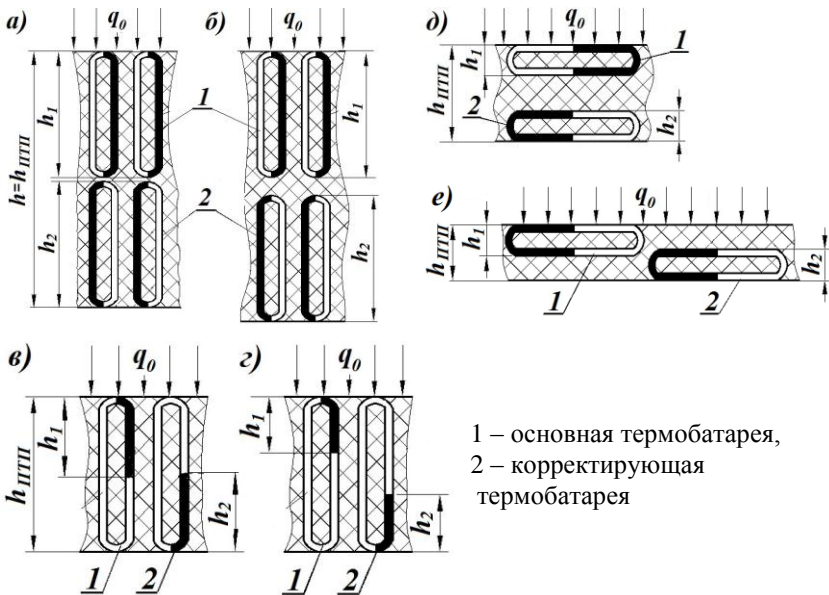


Рис. 5.13. Схема конструкции ПТП_{КБ} с вертикальным (*а, б, в, г*) и горизонтальным (*д, е*) расположением термобатарей

Наиболее просто изготавливать ПТП_{КБ} из двух участков стандартной спирали, включенных встречно по электрическому сигналу с соблюдением отношения их длины 3:1, или из спирали, все витки которой покрыты парным термоэлектрическим материалом на 0,5 высоты полувитка, как показано на схемах рисунка 5.14. Места перехода от покрытых участков проволоки к непокрытым расположены в параллельных плоскостях, разнесенных на высоту термобатареи.

Разрезав спираль на две части с учетом отношения их длины 3:1, коммутируют оба отрезка по дифференциальной схеме и формируют ПТП по известной технологии.

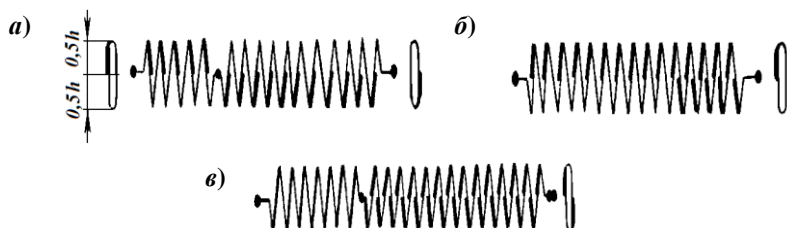


Рис. 5.14. Варианты схем исполнения ПТП_{КБ} с вертикально расположенными батареями термоэлементов

Если на площадь готового ПТП_{КБ} установлено ограничение, то пользуются вариантом схемы, приведенным на рис. 5.14, б, по которой покрытие участков корректирующей термобатареи выполняют на нижних половинках вторых полувитков основной термобатареи. При этом на каждые три термоэлемента основной термобатареи приходится один элемент корректирующей.

По схеме рис. 5.14, в основная батарея выполнена по обычной технологии, а все полувитки термоэлектродной проволоки корректирующей термобатареи прерывисто покрыты парным термоэлектродным материалом так, что для каждого полувитка расстояния между плоскостями, в которых расположены места переходов от непокрытого участка к покрытому, одинаковы. При этом отношение длины основной и корректирующей термобатарей примерно 1:2. Это обусловлено тем, что половина спаев нижней части корректирующей термобатареи работает на нейтрализацию сигнала нижней части основной термобатареи. Преимущество последней конструкции в том, что, включая корректирующую термобатарею аддитивно или дифференциально с основной, можно измерять тепловой поток либо на тепловоспринимающей, либо на теплоотдающей поверхностях ПТП_{КБ} соответственно.

По технологии изготовления батарейных ПТП с вертикальным расположением термоэлементов трудно изготовить спираль высотой $h < 0,6$ мм. Поэтому следующим шагом по пути снижения инерционности ПТП стало использование спирали с горизонтальным расположением термоэлементов (см. рис.2.38, б и 5.13 д, е), что позволяет изготавливать ПТП толщиной (0,2–0,3) мм.

Ступенчатое размещение горизонтальных основной и корректирующей термобатарей позволяет выполнить ПТП_{КБ} с толщиной меньше удвоенной толщины спирали. Схемы конструкции и коммутации основной и корректирующей термобатарей в таком ПТП_{КБ} показаны на рисунке 5.15.

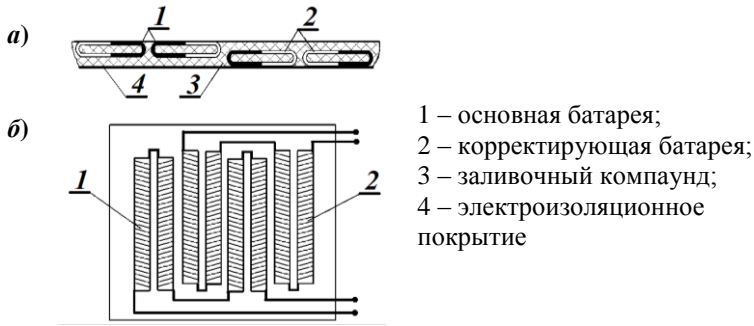










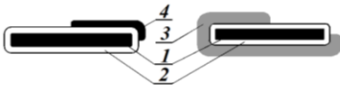


Рис. 5.15. Схемы конструкции (а) и коммутации (б) горизонтального ПТП_{КБ}

Технология изготовления корректирующих термобатарей в отличие от хорошо освоенной технологии изготовления биметаллических стандартных ПТП, обеспечивает нанесение слоя парного термоэлектрического материала не на всю высоту полувитка спирали, а частично: на 3/4, 1/3 или 1/4 высоты спирали. Возможные варианты нанесения парного материала на несущую термоэлектрическую проволоку для изготовления корректирующей термобатареи ПТП_{КБ} показаны в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Варианты	А	Б	В	Г	Д
Гальваническое покрытие					
Лаковое покрытие					
Примечания					
	<p>1 – электроизоляционная каркасная пленка; 2 – основная термоэлектродная проволока; 3 – лаковое защитное покрытие; 4 – гальваническое покрытие парным термоэлектрическим материалом</p>				

Как следует из выражений (5.29) – (5.31), для увеличения быстродействия ПТП необходимо алгебраически суммировать в определенной пропорции сигналы, соответствующие разностям температуры в слоях пластины. В общем случае соотношение сигналов может быть различным. По аналогии с выражением (5.29) уравнение, соответствующее приведенному результирующему сигналу ПТП_{КБ} $q_{ИЗМ}(\eta; \tau)/q_0$, измеренному двухслойным ПТП_{КБ}, содержащим основную и корректирующую термобатареи, спаи которых расположены в сечениях с координатами 0, η_1 , η_2 ; 1, имеет вид:

$$q_{ИЗМ}(\tau)/q_0 = (\theta(0; Fo) - \theta(\eta_1; Fo)) + m \cdot [(\theta(0; Fo) - \theta(\eta_1; Fo)) - ((\theta((1 - \eta_2); Fo) - \theta(1; Fo)))] \quad (5.32)$$

где $\eta_1 = h_1/h_{ПТП}$; $\eta_2 = 1 - h_2/h_{ПТП}$; h_1 и h_2 – значения высоты основной и корректирующей термобатарей;

m – параметр, учитывающий долю в результирующем сигнале ПТП_{КБ} сигнала корректирующей термобатареи, равную отношению чувствительности корректирующей термобатареи к чувствительности основной батареи.

Характер зависимости от времени результирующего сигнала ПТП_{КБ} $q_{ИЗМ}(\tau)/q_0$, соответствующего приведенной

плотности входного теплового воздействия, измеренного двухслойным ПТП_{КБ} в частном исполнении, при котором значения высоты основной и корректирующей термобатарей одинаковые ($h_1 = h_2$) и равны половине высоты ПТП_{КБ}, то есть $\eta_1 = \eta_2 = 0,5$, показан на рисунке 5.16.

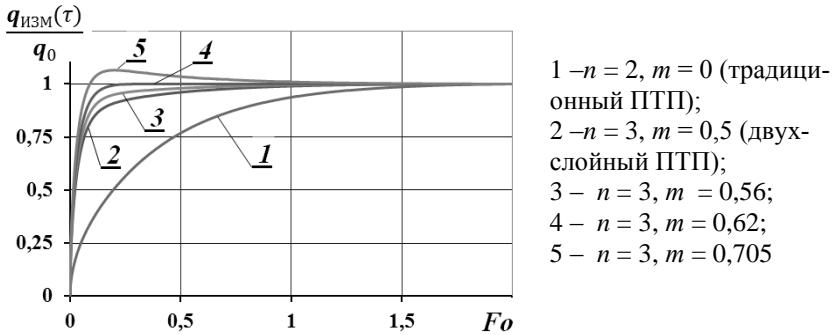


Рис. 5.16. Зависимости измеренного двухслойным ПТП_{КБ} приведенного сигнала $q_{изм}(\tau)/q_0$ от числа Фурье Fo для координаты $\eta = 0,5$ при вариации параметра m (задача при постоянном входном тепловом воздействии)

Расчеты выполнены по формуле (5.32) при вариации параметра m : 0,50; 0,56; 0,62 и 0,705, которым соответствуют графики 2, 3, 4 и 5, а также дан график 1, показывающий выход на установившиеся показания стандартного ПТП, то есть при $m = 0$. Из анализа этих графиков следует, что при наличии только трех узлов дифференцирования, между которыми измеряется разность температуры, подбором числа m возможно получить результат по снижению инерционности ПТП_{КБ}, не уступающий результатам, полученным для случаев, соответствующих количеству узлов дифференцирования $n = 4; 5$ и более (см. рис. 5.12). Таким образом, применение корректирующей термобатареи позволяет существенно уменьшать время реакции ПТП на постоянную тепловую нагрузку.

Однако, следует учитывать, что увеличение значения η приводит к снижению чувствительности ПТП за счет того, что при этом уменьшается доля основной термобатареи, участвующей в выработке полезного сигнала ПТП.

Кроме применения ПТП_{КБ} для измерений нестационарного теплового потока при стационарных условиях (см. задачу с краевыми условиями (5.24)), оказывается вполне оправданным их применение в случаях, характеризующихся нестационарными условиями.

Рассмотрим применение ПТП_{КБ} для измерения внешней тепловой нагрузки на объект, температура поверхности которого изменяется по линейному закону со скоростью b , что часто встречается в практике измерений с применением мобильного измерителя плотности теплового потока [5.48] в полевых условиях. При этом решена задача с такими нестационарными краевыми условиями:

$$\begin{cases} T(x; \tau) = T_0 = const; \\ T(x = 0; \tau) = T_0 + b \cdot \tau; \\ -\chi \cdot \partial T(x = h; \tau) / \partial x = q_0 = const. \end{cases} \quad (5.33)$$

Решение этой задач относительно температуры ПТП_{КБ} согласно [2.6] имеет вид:

$$T(\eta; \tau) = T_0 + \theta_1(\eta; E_0) \cdot q_0 \cdot h / \chi + \theta_2(\eta; F_0) \cdot b \cdot h^2 / a, \quad (5.34)$$

где

$$\theta_1(\eta; F_0) = \frac{\chi \cdot (T(\eta; \tau) - T_0)}{q_0 \cdot h} = \eta - \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \sin(\mu_k \eta) \cdot \exp(-\mu_k^2 \cdot F_0), \quad (5.35)$$

$$\begin{aligned} \theta_2(\eta; F_0) &= \frac{a \cdot (T(\eta; \tau) - T_0)}{b \cdot h^2} = F_0 - \eta - 0,5\eta^2 + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{B_k}{\mu_k^2} \cdot \cos(\mu_k \cdot (1 - \eta)) \cdot \exp(-\mu_k^2 \cdot F_0), \end{aligned} \quad (5.36)$$

где $A_k = 2 \cdot (-1)^{k+1} / \mu_k^2$; $B_k = 2 \cdot (-1)^{k+1} / \mu_k$; $\mu_k = 0,5 \cdot (2k - 1) \cdot \pi$.

Исходя из (5.35) для ПТП_{КБ} ($n = 3$) при условии

$\eta_1 = \eta_2 = 0,5$ расчетная формула для приведенной плотности теплового потока через сечение $\eta = 1$ имеет вид:

$$q_{изм}(1; \tau)/q_0 = \left((\theta_1(1; \tau) - \theta_1(0,5; \tau)) - \frac{1}{3}(\theta_1(0,5; \tau) - \theta_1(0; \tau)) \right) + \left((\theta_2(1; \tau) - \theta_2(0,5; \tau)) - \frac{1}{3}(\theta_2(0,5; \tau) - \theta_2(0; \tau)) \right) \cdot b \cdot c \cdot \rho \cdot h/q_0, \quad (5.37)$$

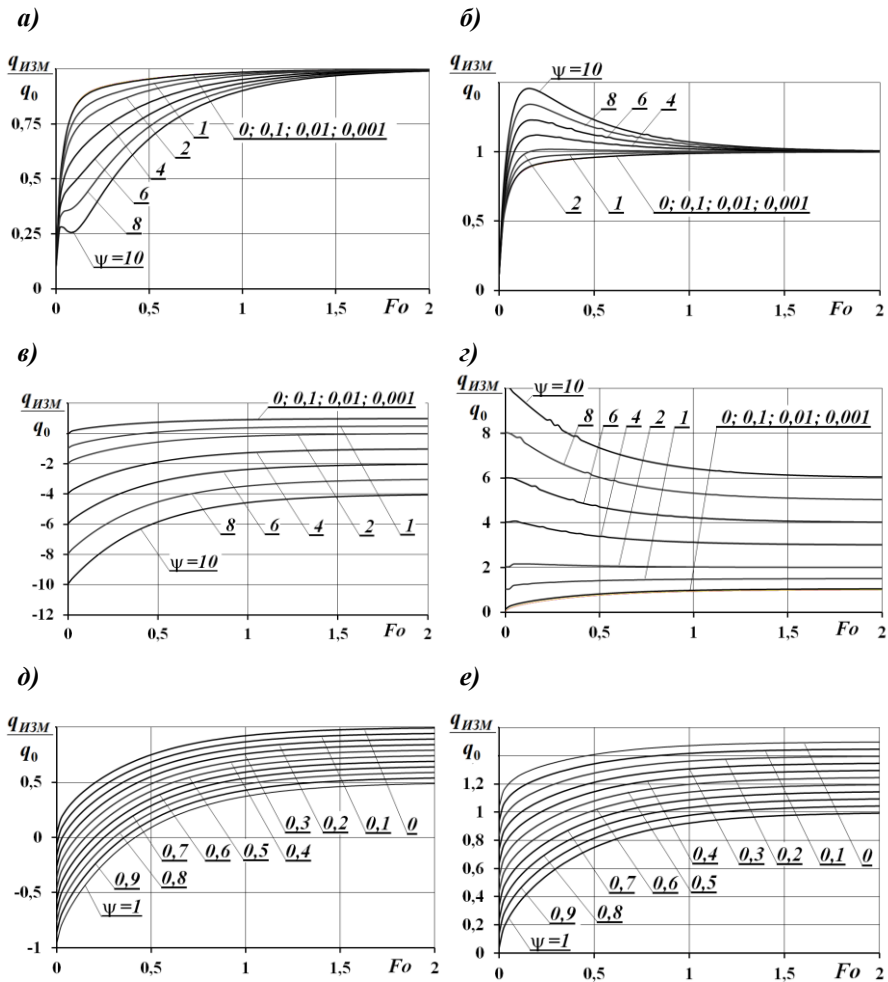
а для стандартного ПТП ($n = 2$) следующий:

$$q(1; \tau)/q_0 = (\theta_1(1; \tau) - \theta_1(0; \tau)) + (\theta_2(1; \tau) - \theta_2(0; \tau)) \cdot b \cdot c \cdot \rho \cdot h/q_0. \quad (5.38)$$

Результаты расчета по формулам (5.37) и (5.38) приведены на рисунке 5.17.

На графиках рис. 5.17, *a* и *б* видно, что при измерении теплового потока значение динамической погрешности ПТП_{КБ} зависит не только от числа Фурье Fo , но и от комплекса $\psi = b \cdot c \cdot \rho \cdot h/q_0$, значения которого проварьированы от 0 до 10. Если регистрация теплового потока должна быть выполнена в первые секунды процесса, то следует применять ПТП_{КБ}, для которых $\psi < 1$. При допускаемых бóльших временах измерения ($Fo > 2$) при любом значении ψ ПТП_{КБ} будет работать корректно, ибо в этом случае его динамическая погрешность стремится к нулю. При этом не имеет значения, сопровождается ли процесс нагревом ($b > 0$) или охлаждением ($b < 0$) поверхности объекта контроля.

Результаты, полученные для ПТП без корректирующей термобатарей (см. графики *в* и *г*), свидетельствуют, что при всех значениях числа Фурье присутствует значительная динамическая погрешность. Поэтому даже при исследовании тепловых процессов с медленно меняющейся температурой поверхности необходимо применять ПТП_{КБ} для которого комплекс $\psi < 0,1$. У таких ПТП_{КБ} динамическая погрешность, хотя и присутствует, но соответствует обычным требованиям к техническим измерениям и может быть при необходимости учтена.



a, в, д – графики при нагреве контролируемой поверхности ($b > 0$);
б, г, е – то же при охлаждении ($b < 0$);
a, б – графики для ПТП с корректирующей термобатареей (ПТП_{КВ});
в, г, д, е – графики для стандартного ПТП

Рис. 5.17. Зависимости приведенной плотности теплового потока от числа Фурье Fo при вариации комплекса ψ (для задачи с крайними условиями (5.33))

Динамические характеристики ПТП_{КБ}, применяемого для измерения нестационарного теплового потока, исследованы путем решения задачи при таких краевых условиях (сравни с краевыми условиями (5.24)):

$$\begin{cases} T(x; \tau = 0) = T_0, \\ -\chi \frac{\partial T(x=0; \tau)}{\partial x} = q_0^* \cdot \tau, \\ T(x = h; \tau) = T_0 \end{cases} \quad (5.39)$$

где q_0^* – постоянная скорость изменения плотности теплового потока.

В этом случае решение для температуры имеет вид [2.6]:

$$T(\eta; \tau) = T_0 + q_0^* \cdot \tau \cdot \frac{h}{\chi} \cdot \theta(\eta; Fo), \quad (5.40)$$

где безразмерная функция температуры $\theta(\eta; Fo)$ равна:

$$\begin{aligned} \theta(\eta; Fo) = & \frac{4}{3} \sqrt{Fo} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(1 + \frac{(2 \cdot k - 2 + \eta)^2}{4 \cdot Fo} \right) \cdot \exp \left(-\frac{(2k - 2 + \eta)^2}{4 \cdot Fo} \right) - \right. \\ & - \frac{2 \cdot k - 2 - \eta}{4 \cdot \sqrt{Fo}} \cdot \left(3 + \frac{(2 \cdot k - 2 + \eta)^2}{2 \cdot Fo} \right) \cdot \operatorname{erfc} \frac{2 \cdot k - 2 + \eta}{2 \cdot \sqrt{Fo}} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(1 + \frac{(2k - \eta)^2}{4Fo} \right) \times \\ & \times \exp \left(-\frac{(2k - p)^2}{4 \cdot Fo} \right) + \frac{2 \cdot k - p}{4 \cdot \sqrt{Fo}} \cdot \left(3 + \frac{(2 \cdot k - \eta)^2}{2 \cdot Fo} \right) \cdot \operatorname{erfc} \frac{2 \cdot k - \eta}{2 \cdot \sqrt{Fo}} \left. \right). \end{aligned} \quad (5.41)$$

С учетом функции (5.41) расчетная формула для приведенной плотности измеренного теплового потока, имеет вид:

$$\frac{q_{ИЗМ}(\eta=0; \tau)}{q_0^* \cdot \tau} = 3 \cdot ((\theta(0; \tau) - \theta(0,5; \tau) - m \cdot (\theta(0,5; \tau) - \theta(1; \tau))), \quad (5.42)$$

а для ПТП без корректирующей термобатарей совпадает с (5.28).

Результаты данного математического моделирования приведены на рисунке 5.18, при этом кривая 1 получена вы-

числениями по формуле (5.28), кривые 3 и 4 – по формуле (5.42), а кривая 2 – по формуле (5.43):

$$\frac{q(\eta=0; \tau)}{q_0^* \cdot \tau} = 2 \cdot (\theta(0; \tau) - \theta(0,5; \tau)), \quad (5.43)$$

которая соответствует ПТП_{КБ} с основной термобатареей половиной высоты.

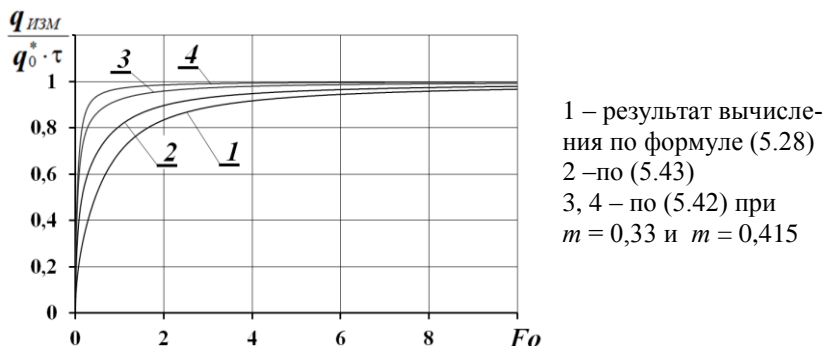


Рис. 5.18. Зависимости приведенной плотности теплового потока от числа Фурье Fo для различных ПТП при линейно изменяющемся входном тепловом воздействии (для задачи с краевыми условиями (5.51))

Графики рис. 5.18 показывают, что наименьшей динамической погрешностью обладают ПТП, выполненные с корректирующей термобатареей, параметр m которой взят равным 0,415. Для времени измерения, соответствующего числам Фурье $Fo > 5$, эта погрешность стремится к нулю. Несколько позже ($Fo > 8$) полученный результат измерения адекватен входному тепловому воздействию на ПТП_{КБ} при $m = 0,33$. В то же время ПТП без корректирующей термобатареи имеет динамическую погрешность даже при $Fo \rightarrow \infty$.

Первичную калибровку ПТП_{КБ} следует проводить в режиме установившейся поверхностной плотности теплового потока. Так же следует производить проверку полученных данных в квазистационарном режиме по методикам, изложенным в [5.49, 5.50].

5.5 Общие требования к структуре и программному обеспечению многоканальной измерительной системы на базе ПТП_{КБ}

В настоящее время в странах СНГ существуют измерительные многоканальные системы, ориентированные на решение задач энергосбережения. Так в России во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева (г. Санкт-Петербург) разработан ряд модификаций автоматизированной системы измерений СИСТОК [5.51], а на Омском заводе "Эталон" созданы многоканальные измерители ИТ-2-16 и ИТ-2-96 [2.145]. В ИТТФ НАНУ также разработаны аналогичные измерительные системы ИТС-1, ИТС-2, «Ресурс-32», «Ресурс-96», которые применяют на предприятиях Украины и Беларуси [4.27, 4.28, 5.3, 5.52].

Все эти системы имеют близкие технические характеристики и примерно одинаковую структуру, в их состав входят комплекты первичных ПТП, ПТ и других физических величин, а также вторичная аппаратура – многоканальные коммутаторы (от 16 до 96 каналов), АЦП и интерфейсы, управляемые контроллером и др. Управление всей системой, обработка данных и их сохранение осуществляются персональным компьютером (ПК) с соответствующим программным обеспечением (ПО). Поскольку упомянутые измерительные системы предназначены для обследования инерционных объектов (зданий, сооружений, стеновых конструкций, теплоизоляции котлов и т.п.), быстрдействие как первичных преобразователей, так и вторичной измерительной аппаратуры весьма низкое. Как правило, постоянная времени используемых традиционных ПТП составляет (3–10) с, а длительность измерения по одному каналу (0,5–1) с и при этом опрос всех каналов выполняются за несколько десятков секунд.

Передача информации в ПК осуществляется по последовательному интерфейсу RS-232, что также ограничивает быстрдействие системы. Хотя вторичная аппаратура известных измерительных систем имеет запас по быстрдействию и возможно ускорение опроса в (5–10) раз, однако, это все рав-

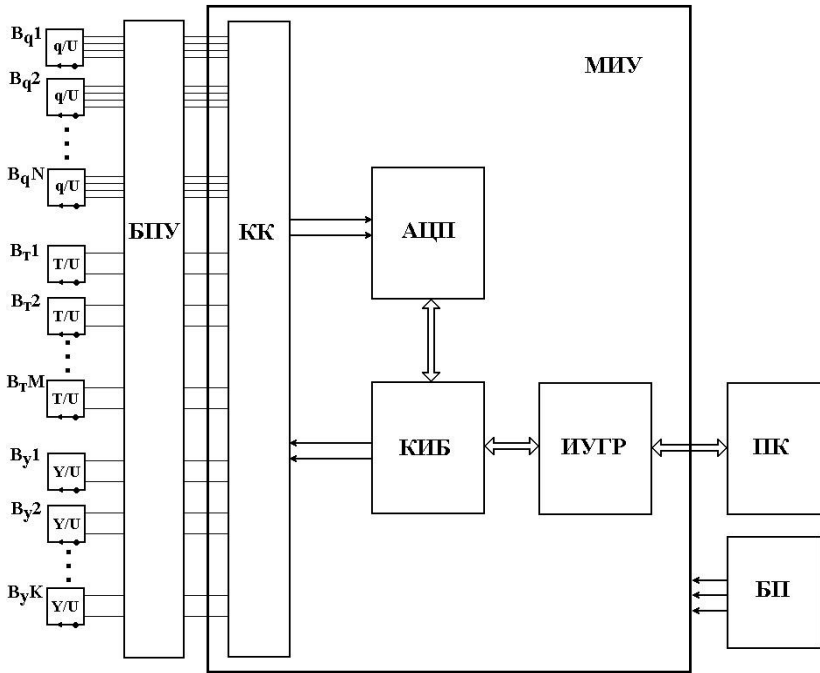
но недостаточно для работы многоканальной системы с быстродействующими ПТП для исследования нестационарных тепловых процессов миллисекундного диапазона.

При исследовании процесса длительность или характерное время составляют единицы миллисекунд, поэтому за это время надо выполнять не менее 10 замеров. В случае последовательного опроса нескольких десятков каналов длительность одного замера должна быть на уровне единиц или десятков микросекунд. Такое быстродействие само по себе не является уникальным для измерительной техники [5.53, 5.54]. Ряд фирм предлагают модули многоканальных АЦП необходимого и большего быстродействия. Однако, первичные преобразователи, рассмотренные выше, имеют, как правило, весьма небольшие выходные сигналы микро- и милливольтового диапазона, а большинство из предлагаемых на рынке быстродействующих измерительных систем имеют вольтовый диапазон измерения. Поэтому по каждому измерительному каналу необходимо предусматривать наличие предварительного усилителя.

Для уменьшения влияния импульсных помех целесообразно иметь независимое питание аналоговой и цифровой частей и гальваническую развязку между измерительным блоком и ПК. Интерфейс связи между измерительным блоком и ПК должен обеспечивать скорость передачи, достаточную для передачи и накопления данных в реальном масштабе времени. Структурная схема компьютеризированной измерительной системы, соответствующей изложенным требованиям, представлена на рисунке 5.19.

При использовании в системе комбинированных ПТП, содержащих два разнотипных ЧЭ, необходимо иметь соответствующие предварительные усилители и каналы коммутатора для сигналов обоих ЧЭ. Поскольку предварительные усилители подключают индивидуально по входу соответствующего ЧЭ и по выходу на каждый канал коммутатора, их характеристики могут быть установлены индивидуально для

осуществления первичной обработки сигналов – фильтрации и динамической коррекции, усиления и нормирования.



V_q , V_T , V_y – первичные преобразователи (различные); БПУ – блок усилителей; КК – коммутатор каналов; АЦП – аналого-цифровой преобразователь, КИБ – контролер измерительного блока; ИУТР – интерфейсное устройство с гальванической развязкой; БП – блок питания; МИУ – многоканальное измерительное устройство

Рис. 5.19. Структурная схема компьютеризированной многоканальной измерительной системы на базе ПТП_{КБ}

Поскольку сигналы первичных ПТП и ПТ лежат в микровольтовом диапазоне, предварительные усилители должны быть построены на базе микросхем операционных или инструментальных усилителей с малым смещением нуля и малым температурным и временным дрейфом, например,

LTC 1047, LTC 1049, LTC 2053, AD 8551 – AD 8554 или им подобных.

Коммутатор каналов должен обеспечивать поочередное подключение выходов предварительных усилителей ко входу АЦП с минимальным искажением сигналов. Критическими в смысле обеспечения метрологических характеристик параметрами коммутатора каналов являются электрическое сопротивление утечек закрытого канала, коэффициент взаимного влияния каналов и напряжение смещения открытого канала. Погрешности, вносимые коммутатором в измерительный сигнал, приведенные ко входу предварительного усилителя, не должны превышать (1–2) мкВ. АЦП системы должен удовлетворять таким требованиям: разрядность не менее 14 двоичных разрядов; частота измерений (10–200) кГц в зависимости от числа каналов и быстродействия применяемых ПТП; желательно иметь встроенный в АЦП усилитель с программно управляемым коэффициентом усиления.

Контролер измерительного блока осуществляет управление коммутатором каналов, АЦП и интерфейсным устройством, а также принимает информацию от АЦП, осуществляет ее первичную обработку и передачу на интерфейс. В настоящее время на рынке представлен широкий спектр периферийных микропроцессоров, способных осуществлять эти функции. Интерфейсное устройство ИУГР должно обеспечивать высокую скорость передачи данных и гальваническую развязку измерительной и компьютерной частей системы.

В зависимости от задач, для решения которых предназначена измерительная система, для управления процессами измерения, обработки и хранения информации могут быть использованы различные средства вычислительной техники – настольный ПК, ноутбук, специализированные и встроенные контроллеры. В частности, для создания приборов, в состав которых входит многоканальная измерительная система, представляется удобным использование PC-контроллеров серий I-8000 и W-8000 фирмы ICP DAS или аналогичных

устройств. Эти контроллеры имеют базовые блоки с набором интерфейсов и возможностью легкого наращивания системы с помощью модулей расширения, среди которых имеется I-8017H – 8-канальный АЦП с разрядностью 14 бит и частотой преобразования 100 кГц [5.55].

Многоканальное измерительное устройство (МИУ), объединяющее такие функциональные узлы как коммутатор каналов, АЦП, контролер измерительного блока и интерфейс, является функционально законченным, достаточно универсальным блоком. Такие устройства выпускаются рядом фирм как самостоятельные узлы, так и в виде плат, встраиваемых в ПК. Примерами таких встраиваемых устройств являются модули SDI-ADC16-32 компании Saturn Data International [5.56] и платы PCI-1602, L-761 [5.57].

В качестве примеров внешних измерительных модулей можно привести устройства E14-140 и E14-440 фирмы «Л-Кард», Россия [5.58, 5.59]. Модуль E14-140 может проводить измерения по 16 дифференциальным и 32 каналам с ”общей землей”; разрядность 14 бит, частота дискретизации в одноканальном режиме 100 кГц, в многоканальном – 20 кГц.

В последние годы активно внедряются быстродействующие измерительные приборы для измерения потока теплового излучения в совокупности с первичными преобразователями на основе фотоэлектрического эффекта с постоянными времени на уровне 10^{-9} с, так называемые трап-детекторы на базе кремниевых фотодиодов с внутренней квантовой эффективностью, близкой к 100% [5.60]. Таким образом, в продаже имеется широкий спектр разнообразных устройств, на базе которых может быть создана многоканальная измерительная система с необходимыми характеристиками по диапазону измеряемых сигналов и быстродействию.

Важным аспектом создания такой системы является разработка ПО, которое предназначено как для управления процессом собственно измерений, так и для передачи данных, их обработки, хранения и документирования. ПО системы

условно может быть разделено на три взаимосвязанных блока, соответствующих трем уровням.

Первый уровень должен осуществлять собственно процесс аналого-цифрового преобразования, управление элементами коммутатора, преобразование кодов данных и управление передачей по интерфейсу. При применении готовых измерительных модулей желательно использовать для первого уровня ПО, поставляемое с такими модулями.

На *втором уровне* осуществляется прием информации по интерфейсу и ее первичная обработка (например, преобразование в значения плотности теплового потока и температуры), а также заполнение информации. Блок второго уровня может быть достаточно универсальным и конфигурироваться в зависимости от структуры и задач, решаемых измерительной системой.

Блок *третьего уровня* является специфическим, так как ориентирован на конкретную задачу системы. Он осуществляет общее управление системой через первый и второй блоки программы и обрабатывает полученные данные о температуре, тепловом потоке и других измеренных величинах, а также информацию, введенную оператором с клавиатуры ПК в соответствии с назначением и структурой конкретной измерительной системы. Поскольку система оснащена достаточно мощными вычислительными средствами, при решении ряда задач целесообразно использовать рассмотренные выше вычислительные алгоритмы для восстановления значений нестационарного теплового потока.

Основываясь на прогнозируемых характеристиках ПТП_{КБ} (см. 5.4) и учитывая анализ общей структуры компьютеризированной измерительной системы, общие требования ко вторичной измерительной аппаратуре и ПО системы состоят в следующем:

1 – вторичная измерительная аппаратура должна осуществлять последовательные измерения сигналов всех первичных преобразователей системы и передачу результатов

измерений в ПК. В состав аппаратуры должны входить предварительный усилитель по каждому из каналов измерения, коммутатор каналов, АЦП, интерфейс и блок питания. При этом:

а) должна быть обеспечена гальваническая развязка между электрическими цепями измерительной аппаратуры и цепями ПК,

б) приведенные ко входу предварительного усилителя суммарные аддитивные погрешности, вносимые по каждому измерительному каналу вторичной аппаратурой, не должны превышать (3–5) мкВ, а суммарные мультипликативные – 0,2%,

в) разрядность АЦП должна быть не менее 14 двоичных разрядов, частота измерений от 10 до 200 кГц в зависимости от числа измерительных каналов;

2 – ПО системы должно осуществлять решение следующих задач трех взаимосвязанных уровней:

а) аналого-цифрового преобразования, управления элементами коммутатора, преобразования кодов данных и управления передачей по интерфейсу,

б) приема данных по интерфейсу, их первичной обработки и сохранения информации,

в) общего управления системой через первый и второй уровни ПО и обработки информации в соответствии с назначением и структурой конкретной измерительной системы.

5.6 Преобразователи ПТП_{КБ} для измерительной системы ракеты-носителя «Днепр»

При разработке ракет-носителей (далее – РН), выводящих на орбиту космические аппараты, среди многих, требующих внимания факторов, большое место занимает проблема защиты головной части ракеты от перегрева в плотных слоях атмосферы. Эта проблема решается изготовлением головного обтекателя из термостойких материалов и нанесением на его наружную поверхность низкотеплопроводного теплозащит-

ного покрытия [5.61]. Достаточность тепловой защиты является определяющим условием для предотвращения разрушения несущей конструкции и сохранения теплового режима в зоне размещения полезного груза, например, искусственных спутников Земли, необходимого для их нормального дальнейшего функционирования. Для расчета параметров теплозащитных покрытий необходима информация об аэродинамической тепловой нагрузке на головную часть РН, значение которой традиционно определяют методами математического моделирования на основании показаний ПТ, установленных под теплозащитой несущей конструкции с учетом турбулентно-ламинарного перехода режима течения в пограничном слое [5.62, 5.63].

Однако, ввиду сложности таких расчетов и неоднозначности данных о моменте смены аэродинамического режима в полете, теплозащитное покрытие головного обтекателя РН выполняют с запасом по толщине, что приводит к вынужденному уменьшению массы полезного груза. Кроме того, такой подход не дает полной информации о динамике термонапряженных состояний элементов конструкций во многих случаях и ограничивает возможность снижения предусмотренного запаса прочности.

В Украине в рамках исследования полетной надежности РН типа «Днепр» по тепловой нагрузке на головной аэродинамический обтекатель в реальных условиях космического полета с 2004 г. предусмотрен контроль теплового потока к наружной поверхности головной части космического аппарата и теплового потока от оболочки несущей конструкции обтекателя внутрь, в зону размещения полезного груза. С этой целью ранее, как правило, в качестве средства измерения применяли ПТ, по показаниям которых вычисляли значения контролируемого теплового потока при выведении ракеты на космическую орбиту. По мнению автора [5.63] это обусловлено тем, что якобы не существует приборов, способных измерять непосредственно тепловой поток в реальных условиях

космического полета. Такое утверждение, по крайней мере, кажется странным, ибо уже более пятидесяти лет, как существуют измерительные термоэлектрические ПТП вида вспомогательной стенки [3*-5*], разработанные и выпускаемые ИТТФ, а также ПТП, выпускаемые иностранными производителями [2.139–2.144]. ПТП имеют широкое распространение в самых различных областях науки и техники, в том числе в аэрокосмической отрасли. Сначала при наземных испытаниях, а с 2004 года в реальных полетных условиях при запусках РН с полезным грузом – космическими аппаратами наряду с традиционными измерителями температуры [5.64] стали применяться термоэлектрические ПТП разработки ИТТФ [2.150, 2.151].

По техническому заданию ГKB «Южное» в ИТТФ были разработаны, изготовлены и испытаны две модели термоэлектрических ПТП. Первая модель, имеющая условное обозначение ПТП-1Б.18.2.1.11.Д.00.1.56.00.0-20 согласно [2.150, 2.151] и предназначенная для установки на внешней поверхности обтекателя, имеет предел измерения плотности теплового потока 20 кВт/м^2 . Она получила краткое обозначение «ПТП...-20». Вторая модель, предназначенная для установки на внутренней поверхности обтекателя, имеет предел измерения 5 кВт/м^2 и обозначение ПТП-1Б.11.2.2.11.Д.00.1.56.00.0-5, кратко – «ПТП...-5».

Сигналы разработанных ПТП, установленных на РН, поступают на вторичный измерительный прибор системы телеметрии РН. В связи с этим параметры ПТП выбраны так, чтобы обеспечить совместную работу с системой телеметрии РН, в частности так, что коэффициент преобразования ПТП обеспечивал на пределе максимально возможной плотности теплового потока получение сигнала порядка 50 мВ.

На активном участке полета РН обтекатель подвергается воздействию температуры порядка 500 К в течение 280 с, а затем отдельные участки обтекателя подвергаются воздействию теплового потока от двигателя управления, корректив-

рующего орбиту корабля. В связи с этим ПТП...-20, размещенные на внешней поверхности обтекателя, выполняют термостойкими при температуре до 523 К, долговечными (до 15 лет) и с временной стабильностью характеристик. Хотя термоэлектрические батарейные ПТП применяют в широком диапазоне температуры [5.65], однако, при высоких значениях температуры наблюдается временной уход коэффициента преобразования, обусловленный изменением соотношения сечений покрытия и основного термоэлектрода из-за окисления покрытия и частичной диффузии его в основной термоэлектрод.

В связи с этим, учитывая результаты систематических исследований характеристик ПТП, выполненных из различных пар термоэлектрических материалов и заливочных электроизоляционных компаундов, для ПТП...-20 были выбраны копель-никелевые и константан-никелевые пары и заливочный компаунд УП-610 с порошкообразным корундом в качестве наполнителя.

После оптимизации параметров по методике (см. 4.1.1 и [2.149]) ПТП...-20 были изготовлены в виде дисков диаметром 40 мм, толщиной 2 мм, внутри которых размещена термобатарея с охранной зоной по периметру. Эта зона с учетом рекомендаций, приведенных в главе 2, заполнена такой же спиралью термоэлементов, что и в ЧЭ, для создания однородной по теплофизическим свойствам структуры. Для дополнительной защиты ЧЭ от воздействия высокой температуры, толщина защитного слоя компаунда на рабочей поверхности ПТП...-20 составляет 0,4...0,5 мм, а время реакции по уровню 0,63 преобразователя на теплоизолированной или термостатированной поверхности не превышало 10 с.

В связи с высокими требованиями по точности и надежности измерения в космических условиях функция преобразования ПТП...-20 определена на эталонной установке УВТ -1 (см. книгу 2), в диапазоне температуры от 300 до 500 К. Результаты для четырех ПТП...-20 приведены на рисунке 5.20.

Как видно, при строгом соблюдении технологии изготовления температурная зависимость коэффициентов преобразования сведена к минимуму, а их численные значения для каждого ПТП...-20, прошедшего исследование и аттестацию в диапазоне температуры от 300 К до 500 К, отличаются от среднеарифметического по диапазону не более, чем на $\pm 2\%$.

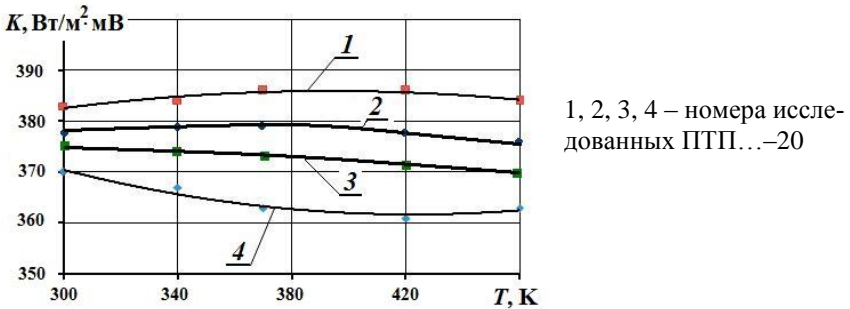
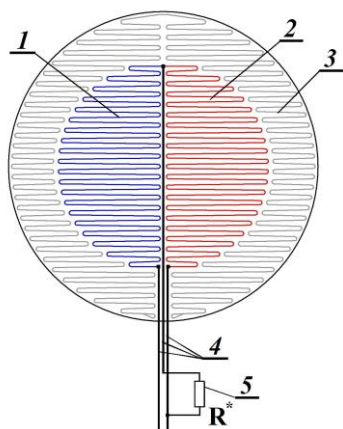


Рис. 5.20 – Температурная зависимость коэффициентов преобразования четырех ПТП...-20

Лабораторные исследования подтвердили термостойкость модели ПТП...-20 при воздействии температуры до 523 К, а механическое разрушение образцов наблюдалось при достижении температуры, близкой 573 К.

Для измерения теплового потока, направленного в зону размещения полезного груза использован преобразователь модели ПТП...-5, размещаемый на внутренней поверхности металлической несущей конструкции, температура которой на активном участке полета достигает 370 К (97°C) и изменяется со скоростью порядка (1 – 2) К/с. По показаниям ПТ было установлено, что максимальное значение температуры не превышало 350 К (77°C), при этом длительность наиболее быстрых изменений составила около 50 с. В таких нестационарных условиях теплообмена традиционный ПТП с толщиной около 2 мм и временем реакции 10 с, имеет большую динамическую погрешность, которая зависит не только от конструкции ПТП, но и условий теплообмена и свойств поверх-

ности, на которой он размещен. Поэтому для измерения теплового потока от внутренней поверхности обтекателя на космические аппараты был использован ПТП...-5 с уменьшенной на порядок инерционностью (до 1 с) за счет того, что он был выполнен с корректирующей термобатареей, включенной дифференциально с основной. На рисунке 5.21 показана схема укладки спиральных батарей термоэлементов перед заливкой компаундом.



- 1 – основная термобатарея;
- 2 – дополнительная корректирующая термобатарея;
- 3 – охранная зона;
- 4 – выводы;
- 5 –шунтирующий резистор

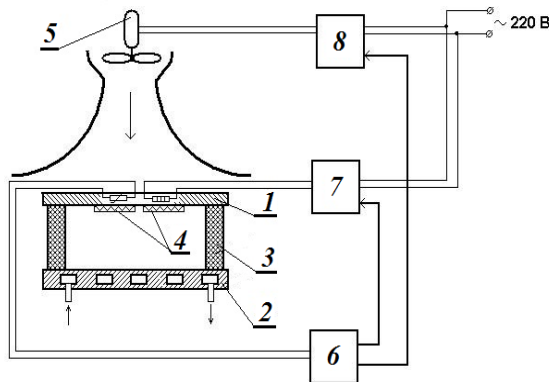
Рис. 5.21. Схема укладки термобатарей и подключения шунтирующего резистора

В центральной части заготовки ПТП...-5 расположены две полукруглые теплочувствительные зоны, соответственно, с основной 1 и корректирующей 2 термобатареями. Батареи термоэлементов выполнены, как показано на рис. 5.13, с нанесенным гальваническим покрытием на одну четвертую витка спирали. По периферии оба ЧЭ окружены охранной зоной, в которой уложена такая же спираль термоэлементов. Сигналы основной и корректирующей термобатарей снимают с помощью выводов 4, к которым подключен подстроечный резистор, с сопротивлением R_3^* .

ПТП...-5, выполненный на базе константан-медной спирали термоэлементов и компаунда из смолы УП-610 с наполнением порошкообразным корундом, имеет форму дис-

ка диаметром 60 мм, толщиной 1,8 мм и эффективным коэффициентом теплопроводности 1,5 Вт/(м·К). Кроме того, эти ПТП сохранили свои метрологические характеристики при температуре до 373 К, были термостойкими при температуре 423 К, стойкими к механическим нагрузкам и легко монтировались на поверхности обтекателя.

Следует учитывать, что для эффективной работы ПТП_{КБ} необходим тщательный подбор соотношения коэффициентов преобразования основной и корректирующей термобатарей, для чего использован шунтирующий резистор, включенный параллельно корректирующей батарее. Номинал резистора подбирают при настройке ПТП_{КБ} на специальном стенде с программируемым изменением температуры. На стенде задают изменение температуры поверхности, на которую устанавливают ПТП, примерно соответствующее изменению температуры внутренней поверхности обтекателя РН за время полета. Функциональная схема стенда представлена на рисунке 5.22.



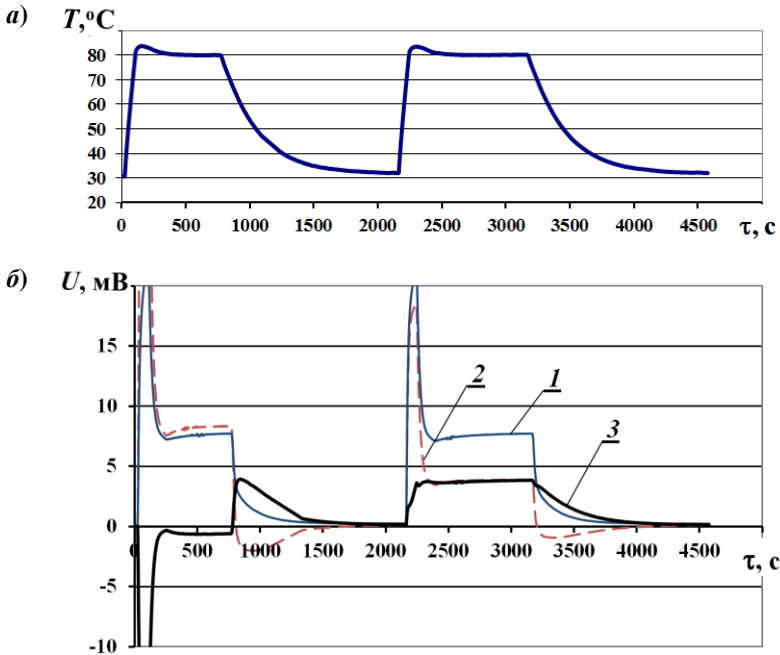
1 – пластина основания с электронагревателем и термометром сопротивления; 2 – водоохлаждаемый экран; 3 – теплоизоляция; 4 – испытываемые ПТП...-5; 5 – вентилятор; 6 – электронный регулятор температуры; 7 – усилитель мощности; 8 – выключатель вентилятора

Рис. 5.22. Функциональная схема испытательного стенда для подбора шунтирующего резистора ПТП...-5

Основным элементом стенда является тонкая (толщиной 4 мм) пластина основания 1, имитирующая поверхность обтекателя РН, с встроенными равномерно распределенным нагревателем и термометром сопротивления. Напротив расположен водоохлаждаемый экран 2, температура которого поддерживается постоянной благодаря прокачке воды из водяного термостата. ПТП... -5 располагают на внутренней стороне пластины, температуру которой изменяют по заданной программе с помощью электронного регулятора типа «Поликон 814/С», управляющего нагревом и охлаждением посредством нагревателя и вентилятора 5 через симисторные усилитель мощности 7 и выключатель 8. Применение программируемого регулятора позволяет воспроизводить разнообразные режимы изменения температуры основания, проверяя при этом реакцию ПТП.

Два ПТП, имитирующие основную и корректирующие термобатреи, на теплопроводной смазке устанавливают на пластину, включают установку и задают программу изменения температуры так, что на начальном участке температура быстро нарастает от 300 К до 355 К, затем следует участок стабильной температуры, а затем остывание. Запись выходных сигналов термометра сопротивления, основной и корректирующей термобатарей, выводят на монитор ПК в виде графиков изменения сигналов, показанных на рисунке 5.23.

На основании полученных данных составляются уравнения баланса, учитывающие значения сигналов и искомое соотношение коэффициентов преобразования для различных участков температурной кривой. Находят из этих уравнений искомое соотношение коэффициентов преобразования, рассчитывают сопротивление подстроечного резистора, шунтируют им корректирующую термобатарею и в дальнейшем сложение сигналов термобатарей производится с использованием весовых коэффициентов, обеспечивающих найденное соотношение.



1 – сигнал основной термобатареи; 2 – сигнал корректирующей термобатареи; 3 – разностный сигнал термобатарей (сигнал ПТП_{КБ})

Рис. 5.23. Графики изменения температуры пластины стенда (а) и сигналов термобатарей ПТП... -5 (б)

На рис. 5.23 в промежутке времени от 0 до 2000 секунд показаны записи сигналов термобатарей без введения весовых коэффициентов. Видно, что при быстром изменении температуры основания, как при нагреве, так и при остывании, сигналы термобатарей и их разностный сигнал имеют значительные выбросы, динамическая погрешность измеряется несколькими сотнями процентов. На втором участке в промежутке времени от 2000 с до 4500 с сложение сигналов проводится с использованием найденных весовых коэффициентов: 1,0 – для основной термобатареи (график 1) и 0,456 – для корректирующей термобатареи (график 2). В этом случае сигнал каждой из термобатарей также имеет значительные

выбросы при быстром изменении температуры, однако, их разностный сигнал (график 3) достаточно корректно описывает изменение теплового потока при изменении температуры, а динамическая погрешность не превышает 15%.

После подбора соотношения сигналов термобатарей каждый ПТП...-5 отградуирован в стационарном режиме на радиационной установке. Все ПТП, предназначенные для использования в составе измерительной системы РН, проходили Государственную метрологическую аттестацию, по результатам которой установленная погрешность измерения в стационарном режиме не превышала $\pm 4\%$.

На рисунке 5.24 в качестве примера показано полученное по данным телеметрической измерительной системы РН «ДНЕПР» изменение теплового потока в местах установки ПТП при выведении искусственных спутников на околоземную орбиту, состоявшемся 17 апреля 2007 г.

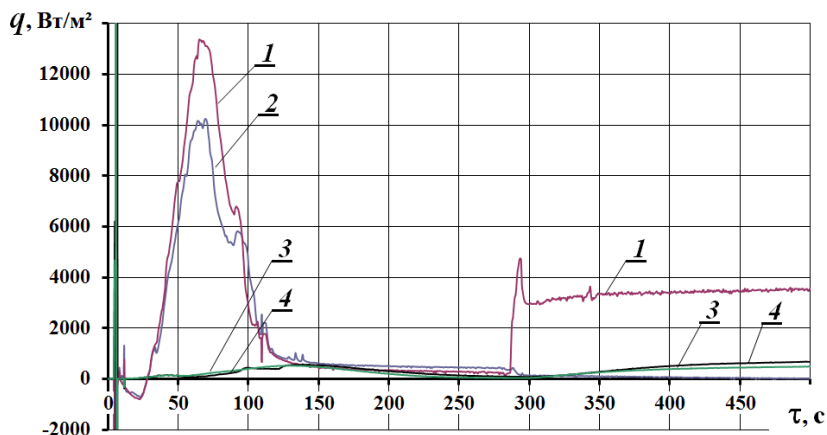


Рис. 5.24. Графики изменения плотности теплового потока на наружной поверхности обтекателя (ПТП 1 и 2) и в зоне размещения полезного груза (ПТП 3 и 4) при выведении космического аппарата на орбиту

Графики 1 и 2 – тепловые потоки на внешнюю поверхность платформы Б на расстоянии 100 мм от нижнего края платформы, а графики 3 и 4 – тепловые потоки от внутренней

поверхности головного аэродинамического обтекателя в зону размещения полезного груза, выводимого на определенную орбиту.

По показаниям преобразователей ПТП...-20 (1 и 2), наблюдается несколько характерных временных интервалов. На первом интервале максимальная плотность теплового потока, падающего на внешнюю поверхность головной части РН, на 69-й секунде полета достигает почти 13 кВт/м^2 и соответствует разгонному участку (выход на орбиту через плотные слои атмосферы). Затем со 120 по 280 секунды поток на наружной поверхности невелик (движение в разреженных слоях и вне атмосферы), а начиная с 280 с, на один из ПТП (1) начинает воздействовать постоянный тепловой поток от двигателя управления, корректирующего орбиту корабля. Эти данные согласуются с расчетными значениями тепловой нагрузки, полученными на этапе подготовки РН к запуску.

Судя по показаниям ПТП...-5 (3 и 4), установленных на внутренней стороне обшивки головной части РКН, тепловой поток в зоне расположения полезного груза достаточно мал и изменяется незначительно, что свидетельствует о надежности тепловой защиты головной части ракеты.

За годы сотрудничества с предприятиями аэрокосмической отрасли Украины было создано, исследовано и внедрено более 100 штук ПТП повышенной точности и уменьшенной инерционности [5.66]. Надежность и практичность использования разработанных в ИТТФ ПТП двух моделей в составе измерительной системы ракеты-носителя типа «ДНЕПР» подтверждена 18-ю запусками, хронология которых приведена в таблице 5.2.

Все ПТП безотказно отработали в условиях космических полетов, что позволило впервые в космических исследованиях получить уникальную измерительную информацию о реальных тепловых нагрузках на головную часть ракеты-носителя во время полета.

Таблица 5.2 – Хронология запусков РН типа «ДНЕПР», на которых были установлены преобразователи теплового потока ИТТФ (ПТП...-20 и ПТП...-5)

№	Дата	Полезный груз	Космодром
1	29 июня, 2004	DEMETR, SaudiComSAT-1, SaudiComSAT-2, SaudiSAT-2, LatinSAT-C, LatinSAT-D, AMSAT-Echo, UniSAT-3	Байконур
2	24 августа, 2005	OISETS, INDEX	Байконур
3	12 июля, 2006	Genesis Pathfinder 1	Ясный
4	17 апреля, 2007	EgyptSat-1, Saudisat-3, Saudicomsat-3,4,5,6,7	Байконур
5	15 июня, 2007	TerraSAR-X	Байконур
6	28 июня, 2007	Genesis-2	Ясный
7	29 августа, 2008	RapidEye	Байконур
8	1 октября, 2008	THEOS	Ясный
9	29 июля, 2009	DubaiSat-1, Deimos-1, NanoSat-1B, UK DMC-2, AprizeSat-3, AprizeSat-4	Байконур
10	8 апреля, 2010	Криосат-2	Байконур
11	15 июня, 2010	PRISMA, PICARD	Ясный
12	21 июня, 2010	TanDEM-X (KA)	Байконур
13	17 августа, 2011	Сич-2, БПА-2, NigeriaSat-2, NigeriaSat-X, Rasat, EduSat, Space Quest AprizeSat-5, AprizeSat-6	Ясный
14	22 августа, 2013	KOMPSAT-5	Ясный
15	21 ноября, 2013	DubaiSat-2, SkySat-1, GOMX-1, WNISat, BRITE-Poland, контейнеры ISIPod	Ясный
16	20 июня, 2014	33 КА из 17 стран, в том числе: КазЕОСат, Деймос-2, ТаблетСат-Аврора, БагСат-4, УниСат-6, Брайт-Торонто, Брайт-Монреаль, Ходоеши-3, Ходоеши-4, СаудиСат-4, контейнеры «КвадПак» с аппаратами КубСат	Ясный
17	6 ноября, 2014	Asnaro-1, ChubuSat 1, Hodoyoshi 1, QSAT-EOS, TSUBAME	Ясный
18	26 марта, 2015	«КомпСат-3А»	Ясный

Литература к главе 5

5.1 *Волькенштейн А. А.* Фотоэлектрическая импульсная фотометрия / А. А. Волькенштейн, Э. В. Кувалдин. – Л. : Машиностроение, 1975. – 191 с.

5.2 *Краус М.* Измерительные информационные системы / М. Краус, Э. Вошни. – М. : Мир, 1975. – 310 с.

5.3 *Декуша Л.* Інформаційно-обчислювальний комплекс для забезпечення теплових випробувань будівельних матеріалів, виробів та конструкцій / Л. Декуша, Л. Воробйов, В. Зайцев, О. Декуша, В. Шаповалов // Вимірювальна техніка та метрологія. – Вип. 68. – Львів : «Львівська політехніка», 2008. – С. 72-78. – ISSN 0368-6418.

5.4 *Черинько В. Н.* Методы нестационарной теплотриии : дис. ... канд. техн. наук / Черинько Виктор Николаевич. – Киев, 1982. – 159 с.

5.5 *Кузьмин В. А.* Методы и устройства для создания измерения нестационарных тепловых потоков : дисс. ... канд. техн. наук : 05.11.04 / В. А. Кузьмин. – Л. : ЛИТМО, 1984. – 136 с.

5.6 *Ярышев Н. А.* Восстановление входного воздействия для операционной модели измерительного преобразователя теплового потока / Н. А. Ярышев, С. В. Уточкин // Промышленная теплотехника – Киев, 1983. – Т. 5, № 1. – С. 3-9. – ISSN 0204-3602.

5.7 *Уточкин С. В.* Методы расчета динамических характеристик преобразователей теплового потока : дисс ... канд. техн. наук / С. В. Уточкин – Л., 1985. – 216 с.

5.8 *Верлань А. Ф.* Цифровое моделирование интегрального метода компенсации динамической погрешности системы измерения потоков теплового излучения / А. Ф. Верлань, О. А. Геращенко, Б. Б. Абдусатаров, В. Н. Черинько // Электронное моделирование. – 1981. – № 4. – С. 8-13.

5.9 *Геращенко О. А.* Измерение нестационарных тепловых потоков градиентными тепломерами / О. А. Геращенко, В. Н.

Черинько // Тепло-массообмен-6, Минск. – Методы экспериментальных исследований. – К. : Наук. думка, 1980. – С. 165-169.

5.10 *Пилипенко Н. В.* Нестационарная теплотметрия на основе параметрической идентификации дифференциально-разностных моделей теплопереноса в одномерных приемниках : дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.01 / Николай Васильевич Пилипенко. – СПб, 2009. – 263 с.

5.11 *Сажина С. А.* Теплотметрические приборы для измерения лучистой эпергии : дис. ... канд. техн. наук / Светлана Алексеевна Сажина. – Киев, 1978. – 177 с.

5.12 *Дульнев Г. Н.* Измерение нестационарных тепловых потоков датчиками «вспомогательная стенка» / Г. Н. Дульнев, В. М. Завгородний, В. А. Кузьмин, Н. В. Пилипенко // ИФЖ. – 1979. – Т. 37, № 1. – С. 99-104.

5.13 *Дульнев Г. Н.* Об инерционности измерении с помощью теплотмеров «вспомогательная стенка» / Г. Н. Дульнев, Н. В. Пилипенко, В. А. Кузьмин // ИФЖ. – 1980. – Т. 39, № 2. – С. 298-305.

5.14 *Ярышев Н. А.* Динамические свойства измерителей теплового потока типа вспомогательной стенки / Н. А. Ярышев, С. В. Уточкин // Изв. ВУЗов. – Приборостроение. – 1978. – № 7. – С. 113-118.

5.15 *Уточкин С. В.* Компенсация динамической погрешности дискового теплотмера / С. В. Уточкин // Изв. ВУЗов. – Приборостроение. – 1980. – № 9. – С. 85-90.

5.16 *Ярышев Н. А.* Приближенные динамические модели тепловых объектов с распределенными параметрами / Н. А. Ярышев, А. С. Столяров, С. В. Уточкин, Н. Н. Заровная // Тепло-массообмен-6, Минск. – 1980. – Т.9. – С.3-8.

5.17 *Ярышев Н. А.* Операционный подход к восстановлению граничных условий в тепловом эксперименте / Н. А. Ярышев, С. В. Уточкин // Методы и средства машинной диагностики ГТД и их элементов : тезисы докл. Всесоюзной конференции. – Ленинград, 1981. – С. 102-105.

5.18 *Ярышев Н. А.* Влияние теплоотвода на динамические свойства дискового теплопреобразователя / Н. А. Ярышев, С. В. Уточкин // Контрольно-измерительная техника. – Вып. 33. – Львов, 1983. – С. 98-101.

5.19 Industrial/Commercial Micro-Foil Heat Flux Sensors [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.rdfcorp.com/products/hflux/hfs-c_01.shtml.

5.20 *Хребтов И. А.* Быстродействующие термоэлементы и болометры / И. А. Хребтов // Оптико-механическая промышленность. – № 11. – М., 1974. – С.55-64.

5.21 *Chase S. C.* Infrared radiometer for the 1969 Mariner mission to Mars / S. C. Chase. – Appl. Opt., 1969. – V. 8, No. 3. – P. 639-643.

5.22 *Васильев Б. В.* Пленочные радиационные термоэлементы с подложкой из оксидной пленки на алюминии / Б. В. Васильев. – Вып. 142, ч. 7. – Изв. ЛЭТИ, 1974. – С. 8-11.

5.23 *Chopra K. L.* Thermopower in thin-film copper-constantan couples / K. L. Chopra, S. K. Bahl, M. R. Randfelt. – J. Appl. Phys., 1968. – V. 39, No. 3. – P. 1525-1528.

5.24 *Андроник И. К.* О тепловой диссоциации кристаллов сурьмянистого кадмия и цинка / И. К. Андроник, М. В. Кот, Н. В. Крецу // Ученые зап. Кишиневского Гос. ун-та. – 1961. – № 49. – С. 105-111.

5.25 *Анатычук Л. И.* Вихревые термоэлектрические токи и возможности их практического использования : автореферат дис. ... д-ра физ.-мат. наук / Л. И. Анатычук. – Черновцы, 1973. – 28 с.

5.26 *Иорданишвили И. К.* Нестационарные процессы в термоэлектрических и термомагнитных системах преобразования энергии / И. К. Иорданишвили, В. П. Бабин. – М. : Наука, 1983. – 216 с.

5.27 *Бабин В. П.* Искусственно-анизотропные термоэлементы и их предельные возможности / В. П. Бабин, Т. С. Гудкин, З. М. Дашевский [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 1974. – Т. 8, № 4. – С. 748-753.

5.28 *Карпенко В. Г.* Термоэлектрический приемник излучения искусственно-анизотропного эвтектического материала InSb-NiSb / В. Г. Карпенко, Ж. Л. Погурская. – Тепловые процессы в МГД и термоэлектрических генераторах. – Киев, 1982. – С. 133-135.

5.29 *Knauss H.* Calibration experiments of a new active fast response heat flux sensor to measure total temperature fluctuations. Pt I. Introduction to the problem / H. Knauss, U. Gaisbauer, S. Wagner, D. Buntin, A. Maslov, B. Smorodsky, J. Betz // Intern. Conf. On the Methods of Aerophys. Research: Proc. Pt. III. – Novosibirsk, 2002. – P. 632-643.

5.30 *Кондратов А. В.* Технологические аспекты влияния толщины на параметры пленок термоэлектрических материалов, изготовленных «взрывным» испарением внутри замкнутого объема / А. В. Кондратов, Ю. В. Тимофеев [и др.] – Материалы Всесоюзн. совещ. по деформационным и размерным дефектам в термоэлектрических материалах и пленках. – Л., 1976. – С. 68-72.

5.31 *Дульнев Г. Н.* Об измерении нестационарных тепловых потоков с помощью тепломеров / Г. Н. Дульнев, Н. В. Пилипенко // ИФЖ. – 1975. – Т. 29, № 5. – С. 814-820.

5.32 А. с. 397785 (СССР), МКИЗ G 01 K 17/08. Датчик теплового потока / Э. Я. Веселов, М. А. Каганов, М. Р. Привин. – № 1706458/18-10 ; завл. 15.10.1971. ; опубл. 17.09.1973. – Бюл. № 37. – 3 с.

5.33 А. с. 502242 (СССР), МКИЗ G 01 K 17/08. Устройство для измерения нестационарных тепловых потоков / Ю. В. Гавинский. – № 2057078/18-10 ; заявл. 04.09.1974 ; опубл. 05.02.1976. – Бюл. № 5.

5.34 А. с. 1093914 (СССР), МКИЗ G 01 K 17/08. Датчик теплового потока / Ю. А. Пшеничнов. – № 3440778/18-10 ; заявл. 20.05.1982 ; 23.05.1984, Бюл. № 19. – 4 с.

5.35 А. с. 1290102 (СССР), МКИЗ G 01 K 17/08. Датчик теплового потока / Ю. А. Пшеничнов. – № 3961640/24-10 ; заявл. 09.10.1985 ; опубл. 15.02.1987, Бюл. № 6. – 3 с.

5.36 А. с. 1357813 (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.] – № 4054242/31-25 ; заявл. 23.04.1986 ; опубл. 07.12.1987, Бюл. № 45. – 7 с.

5.37 875222 (СССР), МКИЗ G 01 K 17/06. Датчик теплового потока / Л. В. Декуша, А. Г. Мазуренко, В. Г. Федоров [и др.] – № 2878032/18-10 ; заявл. 19.02.80 ; опубл. 23.10.81, Бюл. № 39. – 7 с.

5.38 *Азизов А. М.* Точность измерительных преобразователей / А. М. Азизов, А. Н. Гордов. – Л. : Энергия, 1975. – 256 с.

5.39 *Ярышев Н. А.* Теоретические основы измерения нестационарной температуры / Н. А. Ярышев. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

5.40 *Дородницын А. А.* Об одном методе решения уравнений ламинарного слоя / А. А. Дородницын // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1960. – № 3. – С. 111-118.

5.41 *Страдомский М. В.* Определение плотности теплового потока / М. В. Страдомский, Е. А. Максимов, О. В. Федорова // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 1984. – Т. 6, № 1. – С. 79-83. – ISSN 0204-3602.

5.42 *Шукушов В. Е.* Корректирующие звенья в устройствах измерения нестационарных температур / В. Е. Шукушов. – М. : Энергия, 1970. – 120 с.

5.43 *Вошны Е.* Динамика измерительных цепей / Е. Вошны ; пер. с нем. ; под ред. Р. Р. Харченко с доп. Г. Я. Сыропятовой и Р. Р. Харченко. – М. : Энергия, 1969. – 288 с.

5.44 *Березин И. С.* Методы вычислений : в 2-х томах/ И. С. Березин, Н. П. Жидков. – Т. 1. – М. : Наука, 1966. – 630 с.

5.45 *Декуша Л.* Особенности проектирования малоинерционных ПТП для исследования нестационарного тепло-

обмена. / Л. Декуша, Л. Воробьев, Т. Грищенко, О. Декуша, Г. Пархоменко // Вимірювальна техніка та метрологія ; за ред. Б. І. Стадника. Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2008. – Вип. 68. – С. 116-125. – ISSN 0368-6418.

5.46 *Декуша Л. В.* Преобразователь теплового потока с корректирующей термобатарей / Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, О. Л. Декуша, Т. Г. Грищенко // Метрологія та вимірювальна техніка (МЕТРОЛОГІЯ-2008) : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конф. – Харьков, 2008. – С. 333-339.

5.47 *Декуша Л. В.* Термоэлектрический преобразователь с корректирующей термобатарей для измерения нестационарного теплового потока малой плотности / Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, О. Л. Декуша, Т. Г. Грищенко // Проблеми обліку теплоти та води в Україні : збірник доповідей міжнародної науково-практичної конференції. – К., 2008. – С. 80-88.

5.48 *Герашенко О. А.* Прибор для измерения тепловых потоков через ограждающие конструкции / О. А. Герашенко, В. Т. Бузынюк, Т. Г. Грищенко, И. Г. Кожевников // Строительная теплофизика. Микроклимат и теплоизоляция: сб. трудов НИИСФ Госстроя СССР. – М., 1979. – С. 127-131.

5.49 *Буравой С. Е.* Нестационарные методы градуировки и поверки контактных тепломеров / С. Е. Буравой, Б. Г. Начкебия, Е. С. Платунов // Измерительная техника. – 1980. – № 5. – С. 69-72.

5.50 *Герашенко О. А.* Определение комплекса теплофизических свойств дифференциально-мостовым теплометрическим методом / О. А. Герашенко, Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 1988. – Т. 54, № 4. – С. 588-597.

5.51 *Соколов Н. А.* Система измерения сопротивления термического (теплопроводности) образцов конструкций

СИСТОК 7076 / Н. А Соколов. – Светопрозрачные конструкции. – 2004. – № 1. – С. 22-23.

5.52 *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.

5.53 *Федорков В. Б.* Микроэлектронные цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи / В. Б. Федорков, В. А. Телец, В. П. Дехтяренко. – М. : Радио и связь, 1984. – 109 с.

5.54 *Гельман М. М.* Системные аналого-цифровые преобразователи и процессоры сигналов / М. М. Гельман. – М. : Мир, 1999. – 559 с.

5.55 ICP DAS CO., LTD [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.icpdas.com – Название с экрана.

5.56 Компания SATURN® DATA INTERNATIONAL : комплексные решения промышленной автоматизации [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.saturn-data.com – Название с экрана.

5.57 ООО "ХОЛИТ Дэйта Системс" : измерения, контроль, диагностика, автоматизация [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.holit.ua – Название с экрана.

5.58 Компания L-CARD : разработка и производство электронной аппаратуры [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.lcard.ru – Название с экрана.

5.59 *Побигайло А. А.* Быстродействующий АЦП с USB / А. А. Побигайло. // Промышленные измерения, контроль автоматизация, диагностика. – 2006. – № 3. – С. 30-31.

5.60 *Красногоров А. Ю.* «Трап» детектор для измерения энергии лазерного излучения / А. Ю. Красногоров, Ю. П. Мачехин. // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2006) : наукові праці V Міжн. науково-техн. конф., в 2-х томах. – Харків, 2006. – Т. 2. – С. 20-22.

5.61 *Авдудевский В. С.* Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / В.С. Авдудевский, Б.М. Галицейский, Г.А. Глебов. – М.: Машиностроение, 1992. – 528 с.

5.62 *Юрченко И. И.* Экспериментально-аналитическая методика расчета тепловых потоков на поверхности космических головных частей в полете : дисс. ... канд. техн. наук : 05.07.02, 05.07.07 / Юрченко Ирина Ивановна ; Гос. косм. науч.-произв. центр им. М. В. Хруничева. – Москва, 2005. – 140 с.

5.63 *Омельченко К. Г.* Проведение серий расчетов по определению внешних тепловых и силовых нагрузок на поверхности элементов конструкции ГО и температурных режимов ТЗП на участке выведения РН «Рокот» / К. Г. Омельченко, В. Н. Шманенков. – НТО № 1-к/97-01. – 1997.

5.64 Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статистичні характеристики перетворення : ДСТУ 2837-94 (ГОСТ 3044-94). – [Введ. в дію 1997-01-01]. – К. : Держстандарт України, 1994. – 236 с. – (Міждержавний стандарт).

5.65 *Декуша Л. В.* Термоэлектрические преобразователи теплового потока для работы в широком диапазоне температур / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Л. И. Воробьев, С. И. Ковтун, В. А. Вергейчик // Проблемы промышленной теплотехники : тезисы IV межд. конф., 26-30 сентября 2005 г., г. Киев – Киев, 2005. – С. 328-330.

5.66 *Ковтун С. И.* Первичные преобразователи теплового потока для определения тепловой нагрузки на головной обтекатель РН типа «Днепр»: тез. докл. III межд. конф. [«Космические технологии : настоящее и будущее»], (Днепропетровск, 21–23 апреля 2011 г.) / С. И. Ковтун, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, О. Л. Декуша / КБ «Южное». – Днепропетровск: [Изд-во КБ «Южное»], 2011. – С. 54-55.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ВИДА ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ
СТЕНКИ (ПТП)**

**Таблица А.1 – Расшифровка позиций условного
обозначения ПТП согласно ДСТУ 3756-98
(ГОСТ 30619-98)**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Условное обозначение	ПТП–	XX.	XX.	X.	X.	XX.	X.	XX.	X.	XX.	XX.	X.
1	Подгруппа ПТП: 1А, 1Б, 2А, 2Б ¹⁾	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
2	Тип ПТП: по таблице А.2	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
3	Количество термоэлементов: одноэлементный – 1, батарейный – 2	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
4	Количество теплочувствительных зон: 1, 2, ...N	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
5	Вид и механическое состояние Вспомогательной стенки: по таблице А.3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
6	Форма: диск – Д, пластина – П, кольцо – К, цилиндрическая оболочка – Ц	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
7	Конструктивное исполнение: по таблице А.3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
8	Охранная зона: 0 – отсутствует, 1 – есть	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
9	Заливочный материал: по таблице А.3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
10	Преобразователь температуры: по таблице А.3	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
11	Электронагреватель: 0 – отсутствует, 1 – есть	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
¹⁾ Расшифровка подгрупп ПТП: 1А – ПТП, являющиеся эталонными средствами измерения; 1Б – ПТП, являющиеся рабочими средствами измерения; 2А – ПТП, не являющиеся средствами измерения, но имеющие точностные характеристики; 2Б – ПТП, не являющиеся средствами измерения и не имеющие точностных характеристик												

Таблица А.3 – Расшифровка позиций
5, 7, 9, 10 табл. А.1

5	7	9	10
Вид вспомогательной стенки	Конструктивное исполнение	Защитный материал	Преобразователь температуры (ПП)
11 – монолитная жесткая	00 – без корпуса	00 – без заливаемого компаунда	00 – без ПП
12 – монолитная гибкая	XX – в корпусе, а именно: 11 – кольцо пластиковое 12 – кольцо керамическое 13 – кольцо металлическое	10 – эпоксида смола (ЭС) без наполнителя 11 – ЭС с ангильновым красителем 12 – ЭС с алюминиевой пудрой 13 – ЭС с кварцем кристаллическим (порошком)	1X – с термопарой: 11 – хромель-алюмель 12 – хромель-копель 13 – медь-копель 14 – медь-константан 15 – платина-платино-родий
21 – перфорированная жесткая	21 – рамка пластиковая 22 – рамка керамическая 23 – рамка металлическая	14 – ЭС с кварцем плавленым (порошком) 15 – ЭС с нитридом бора (пудрой) 16 – ЭС с корундом (пудрой) 17 – ЭС с кварцевым песком и цементом Ц400	2X – с термометром сопротивления: 21 – медный 22 – никелевый 23 – платиновый 24 – германиевый
22 – перфорированная гибкая	31 – подложка плоская пластиковая 32 – подложка плоская керамическая 33 – подложка плоская металлическая	20 – цемент алюмосиликат-фосфатный 30 – герметик 40 – ролеван 50 – украинский полимер (УП) 51 – УП с ангильновым красителем 52 – УП с алюминиевой пудрой 53 – УП с кварцем кристаллическим (порошком) 54 – УП с кварцем плавленым (порошком) 55 – УП с нитридом бора (порошком) 56 – УП с корундом (порошком)	

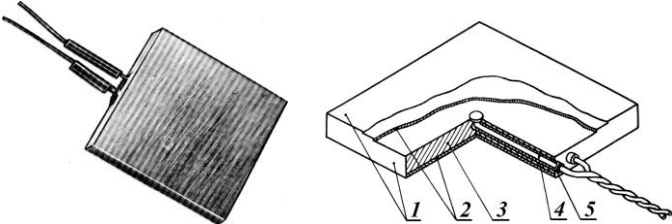
Таблица А.2 –
Расшифровка обозначения типа ППП
(к позиции 2 табл. А.1)

Тип ППП	Обозначение
константан-медный	11
константан-серебряный	12
константан-железный	13
константан-кадмиевый	14
константан-индиевый	15
константан-сурьмяный	16
константан-золотой	17
константан-никелевый	18
копель-медный	21
копель-серебряный	22
копель-железный	23
копель-кадмиевый	24
копель-индиевый	25
копель-сурьмяный	26
копель-золотой	27
копель-никелевый	28
нихром-никелевый	31
нихром-висмутовый	32
хромель-никелевый	41
хромель-висмутовый	42
алюмель-железный	51

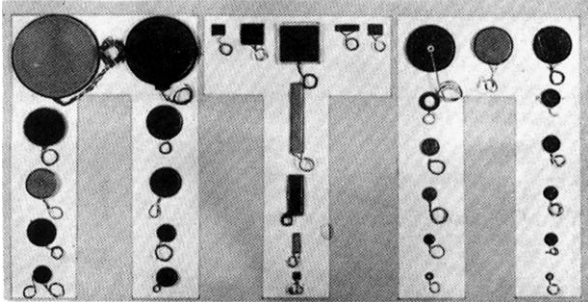
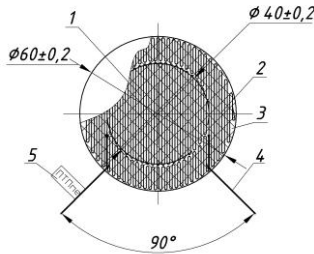
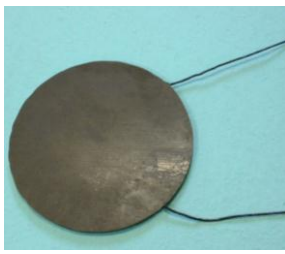
Примечание: первым указан материал основного термоэлектрода, через дефис – материал наносимого покрытия

Таблица А.4 – Преобразователи теплового потока Института технической теплофизики НАН Украины

http://itf.kiev.ua/wp-content/uploads/2016/02/catalog_priborov_sensorov.pdf

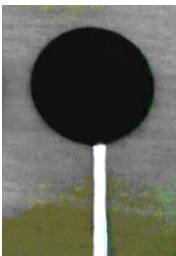
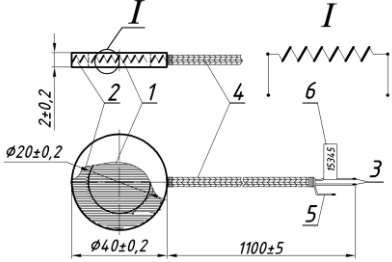
№ п/п	Назначение. Условное обозначение по ДСТУ 3756-98 (ГОСТ 30619-98). Внешний вид, схема конструкции Основные технические характеристики
1	2
1	<p>Одиночные металлические ПТП для измерения плотности теплового потока при интенсивном теплообмене и высокой температуре ПТП-1Б.11.1.1.00.П.00.0.00.0¹⁾</p>  <p>1 – никелевое покрытие; 2 – медные термоэлектроды; 3 – промежуточный термоэлектрод (константан); 4 – провода; 5 – электроизоляционные втулки</p> <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 10³ – 10⁵ Предел рабочей температуры, °С 700 Погрешность градуировки, % ±5 Коэффициент преобразования, Вт/(м²·мкВ).....450 – 1000 Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)25 Время реакции²⁾, с..... не более 1 Габаритные размеры, мм(5–10)×(5–10)×(1–1,2)</p> <p>¹⁾ – расшифровка позиций условного обозначения моделей ПТП приведена в табл. А.1 ²⁾ – здесь и далее – время реакции по уровню 0,63</p>
2	<p>Многоэлементные (батареиные) ПТП для измерения теплового потока или его плотности, сопровождающего различные физические, биологические и химические процессы, а также для применения в качестве высокочувствительных элементов в теплофизических приборах</p>

Продолжение таблицы А.4

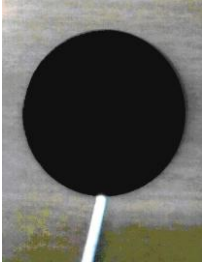
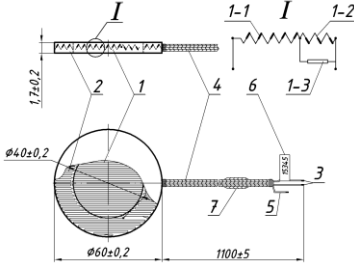
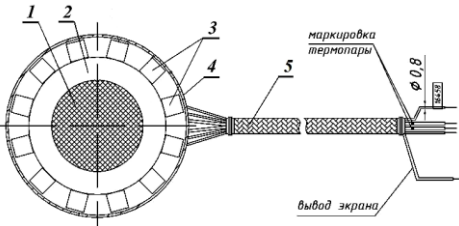
1	2
	 <p> Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 10 – 10⁴ Диапазон рабочей температуры, °С 20 – 150 Погрешность градуировки, % ±4 Коэффициент преобразования, Вт/(м²·мВ) 1 – 150 Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) 0,2 – 1,5 Время реакции, с 5 – 10 Габаритные размеры, мм Ø (10 – 80)×(1 – 2) (10 – 40)×(10 – 120)×(1 – 2,5) </p>
<p>2.1</p>	<p>ПТП-1А.18(28).2.1.11.Д.00.1.56.00.0 – эталонные преобразователи для хранения и передачи размера единицы поверхностной плотности теплового потока от Первичного эталона рабочим средствам измерительной техники (рабочим ПТП)</p>   <p>1 – батарея биметаллических элементов; 2 – охранный зона; 3 – залипный компаунд; 4 – потенциалосъемные выводы; 5 – бирка</p>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Продолжение таблицы А.4

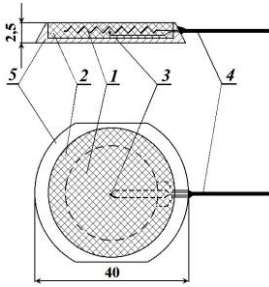
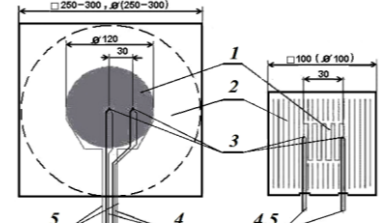
1	2
	<p> Диапазон плотности теплового потока, Вт/м²..... 100 – 2·10³ Пределы погрешности измерения, % ±1 Диапазон рабочей температуры, К 300 – 500 Коэффициент преобразования, Вт/(м²·мВ) 30±10 Коэффициент эффективной теплопроводности, Вт/(м·К) ...1,5 Время реакции, с не более 8 Термостойкость, К..... до 530 Габаритные размеры, мм Ø 60×2 </p>
<p>2.2</p>	<p> ПТП для прямого измерения плотности теплового потока в полетных условиях в составе измерительной системы ракетно-космических носителей типа «Днепр», «Днепр-Восток» при контроле достаточности тепловой защиты космического аппарата ПТП-1Б.18.2.1.11,Д.00.1.56.00.0-20 – для установки на наружной поверхности платформы РКН </p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <p> 1 – основная батарея термоэлементов; 2 – охранная зона; 3 – выводы ПТП; 4 – металлический экран; 5 – вывод экрана; 6 – бирка с номером ПТП </p> <p> Диапазон плотности теплового потока, Вт/м²..... 100 – 20·10³ Пределы погрешности измерения, %..... ±4 Диапазон рабочей температуры, °С 0 – 200 Коэффициент преобразования, Вт/(м²·мВ) 400±75 Время реакции, с не более 10 Термостойкость, °С до 250 Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) 1,0 ± 0,1 Коэф. поглощения ИК излучения поверхности 0,91 ± 0,05 </p>

Продолжение таблицы А.4

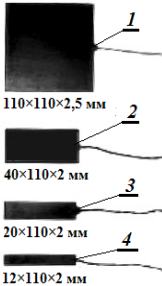
1	2
<p>2.3</p>	<p>ПТП-1Б.18.2.1.11.Д.00.1.56.00.0-5 – для установки на внутренней поверхности платформы РКН</p>   <p><i>I</i> – зона термоэлементов: 1-1 – основная термобатарея, 1-2 – корректирующая термобатарея, 1-3 – резистор подстроечный; 2 – охранный зона; 3 – выводы ПТП; 4 – металлический экран; 5 – вывод экрана; 6 – бирка; 7 – резистор</p> <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 10 – 5·10³ Пределы погрешности измерения, % ±4 Диапазон рабочей температуры, °С 0 – 150 Коэффициент преобразования, Вт/(м²·мВ) 160±20 Время реакции, с не более 1 Термостойкость, °С до 180 Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) 1,0 ± 0,1 Коэф. поглощения ИК излучения поверхности 0,91 ± 0,05</p>
<p>2.4</p>	<p>ПТП–1Б.28.2.1.11.Д.13.1.56.12.0 – с магнитными держателями для измерения плотности теплового потока и температуры на металлических поверхностях высокотемпературных объектов</p>  <p>1 – чувствительная зона ПТП; 2 – охранный зона; 3 – магниты по периметру; 4 – корпус (кольцо); 5 – выводы</p>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Продолжение таблицы А.4

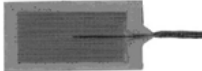

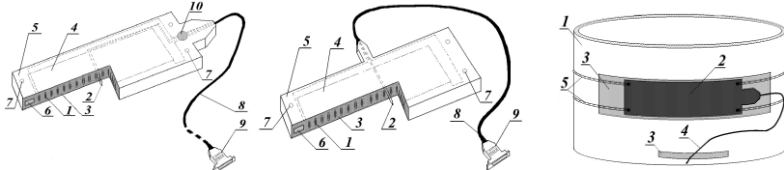
1	2
	<p> Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 100 – 5·10³ Погрешность градуировки, % ±5 Предел рабочей температуры, °С 200 Термостойкость, °С до 250 Время реакции, с не более 10 Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) 1,0 ± 0,1 Габаритные размеры, мм (80 ± 0,2) × (3 ± 0,2) Диаметр чувствительной зоны, мм 40 </p>
<p>2.5</p>	<p>ПТП-1Б.18.2.1.11.Д.43.1.56.11(12).0 – для измерения плотности теплового потока и температуры при исследовании параметров теплообмена на высокотемпературных объектах предприятий энергетики</p>  <p> 1 – батарея термоэлементов, 2 – охранная зона, 3 – термопара, 4 – выводы, 5 – корпус </p> <p> Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² (0,2 – 20) · 10³ Диапазон рабочей температуры, °С 0 – 200 Погрешность градуировки, % ±4 Термостойкость, °С до 250 Постоянная времени, с не более 20 Габаритные размеры, мм Ø 40 × (2 – 2,5) </p>
<p>2.6</p>	<p>ПТП-2Б.11.2.1.11.Д.00.1.16(56).12.0 – для установки в приборах для определения коэффициента теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов по ДСТУ Б В.2.7-105-2000 (ГОСТ 7076-99)</p>  <p> 1 – чувствительная зона; 2 – охранная зона; 3 – термопары; 4, 5 – выводы термопар и ПТП </p>

Продолжение таблицы А.4

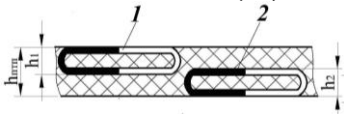
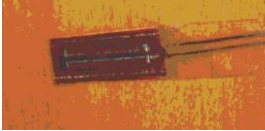
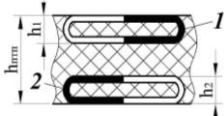

1	2
	<p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 1 – 1000 Диапазон измерения температуры, °С -60 – 140 Погрешность аттестации, % ±3 Термостойкость, °С до 250 Габаритные размеры, мм..... (100–300)×(100–300)×(2,5±0,3)</p>
<p>2.7</p>	<p>ПТП–1Б.11.2.1.11.П.00.0.13.00.0 – для измерения теплового потока при исследовании тепловых параметров электронной аппаратуры при низкой температуре с линеаризованной чувствительностью</p>  <p>1 – батарея термоэлементов; 2 – бирка с номером; 3 – выводы; 4 – компаунд</p> <p>Диапазон теплового потока, Вт..... 1 – 10 Диапазон рабочей температуры, °С -150 – 70 Погрешность градуировки, %..... ±5 Чувствительность, В·м²/Вт 0,05; ...; 0,1 Тепловое сопротивление, К/Вт..... не более 2 Время реакции, с..... не более 30 Габаритные размеры, мм 20×105×2</p>
<p>2.8</p>	<p>ПТП_{СТР} – для измерения плотности теплового потока и температуры при тепловых испытаниях строительных конструкций и изделий в лабораторных и натуральных условиях для контроля качества теплозащиты зданий и сооружений</p>  <p>1 – фрагмент кирпичной кладки и др. стен, 2 – оконные и дверные блоки, 3 – обвязку дверных рам, 4 – коробку оконных блоков</p> <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м²..... 10 – 1000 Диапазон температуры, °С -30 – 40 Погрешность градуировки, %..... ±4</p>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

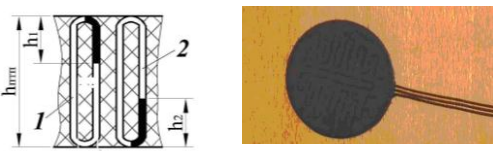
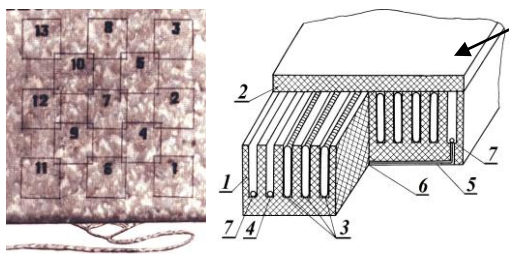
Продолжение таблицы А.4

1	2
<p>2.9</p>	<p>ПТП-1Б.11.2.1.11.П.21.1.13.11.0 устанавливают на стекло</p>  <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 10 – 1000 Диапазон рабочей температуры, °С -40 – 150 Погрешность градуировки, % ±4 Габаритные размеры, мм 30×60×1,8; 40×80×1,8</p>
<p>2.10</p>	<p>ПТП_Г (гибкие) – для измерения плотности теплового потока через криволинейные поверхности, например, при исследовании теплообмена на трубных конструкциях</p> <p>ПТП-1Б.11.2.1.12.П.00.0(1).40.00.0</p>  <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 100 – 2000 Диапазон рабочей температуры, °С 20 – 140 Погрешность градуировки, % ±4 Габаритные размеры, мм (10 – 60)×(40 – 120)×(1,5 – 2,5)</p>
<p>2.11</p>	<p>ПТП-1Б.11.2.1.12.П.00.1.30.00(11, 12).0</p>  <p>1 – батарея биметаллических элементов; 2 – преобразователь температуры; 3 – электроизоляционный компаунд; 4 – теплочувствительная зона; 5 – охранная зона; 6 – крепежная пластина; 7 – крепежные отверстия; 8 – кабель с выводами ПТП и ПТ; 9 – разъем; 10 – метка</p> <p>1 – труба; 2 – ПТП; 3 – лента липкая (для крепления ПТП и его выводов к поверхности трубы); 4 – выводы; 5 – шнур</p>

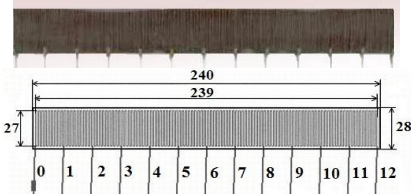
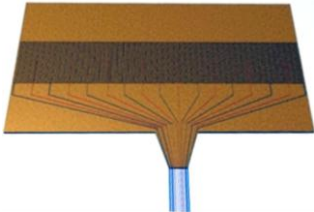
Продолжение таблицы А.4

1	2
	<p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 10 – 2000 Диапазон рабочей температуры, °С -40 – 150 Погрешность градуировки, %..... ±5 Поглощательная способность поверхности 0,91 – 0,98 Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) 0,05 – 0,10 Коэффициент преобразования, Вт/(м²·мВ) 2 – 5 Габаритные размеры, мм (20 – 75)×(80 – 250)×(2 – 3)</p>
<p>2.12</p>	<p>ПТП_{КБ} – преобразователи с корректирующей термобатареей для измерения плотности теплового потока при исследовании нестационарных тепловых процессов</p> <p>ПТП-1Б.11.2.2.11(12).П.00.0(1).13(16).00.0</p>   <p>1 – основная термобатарея; 2 – корректирующая термобатарея</p> <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 10 – 10³ Диапазон рабочей температуры, °С -30 – 100 (130) Пределы погрешности измерения, % ±4 Время реакции (по уровню 0,63), с не более 0,2 Габаритные размеры, мм 20×60×0,3</p>
<p>2.13</p>	<p>ПТП-1Б.11.2.2.11.Д.00.0.16.00.0</p>   <p>1 – основная термобатарея; 2 – корректирующая термобатарея</p> <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 10 – 10³ Диапазон рабочей температуры, °С -30 – 130 Пределы погрешности измерения, % ±4 Время реакции, с не более 0,3 Габаритные размеры, мм Ø (25 – 50)×1,5</p>

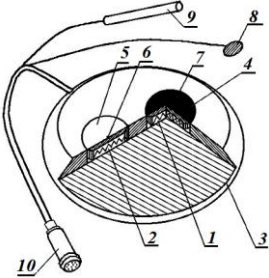
Продолжение таблицы А.4

1	2
<p>2.14</p>	<p>ПТП-1Б.28.2.2.11.Д.00.0.56.00(11, 12).0</p>  <p>1 – основная термобатарея; 2 – корректирующая термобатарея</p> <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 100 – 20·10³ Диапазон рабочей температуры, °С - 60 – 200 Пределы погрешности измерения, % ±4 Время реакции, с..... не более 0,5 – 1 Габаритные размеры, мм Ø (25 – 50)×2</p>
<p>2.15</p>	<p>ПТП многозонные для определения распределения плотности теплового потока и температуры по поверхности исследуемого объекта</p> <p>ПТП–2Б.11.2.13.11.П.41.1.53.12.0 для измерения и определения распределения теплового потока и температуры по поверхности исследуемого образца в установке для контроля термической однородности теплоизоляционных плиток, предназначенных для теплозащиты космического аппарата «Буран»</p>  <p>единичная секция (с чувствительным элементом и термопарой)</p> <p>1 – корпус; 2 – крышка; 3 – термоэлементы ПТП; 4 – выводы ПТП; 5 – термоэлектроды термопар; 6 – медный диск; 7 – выводы термопар</p>

Продолжение таблицы А.4

1	2
	<p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 1 – 100 Диапазон измерения температуры, °С - 10 – 150 Погрешность градуировки, %..... ±3 Габаритные размеры каждого чувствительного элемента, мм..... 40×40×1,3 Габаритные размеры ПТП, мм 400×400×3 Количество зон 13</p>
<p>2.16</p>	<p>ПТП-1Б.11.2.12.11.П.00.0.16.00.0</p>  <p>0; 1; ...; 12 – номера выводов от секций</p> <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м²6,5 – 3000 Диапазон рабочей температуры, °С -10 – 80 Погрешность градуировки, %..... ±5 Габаритные размеры, мм..... 240×28×1 Количество секций (зон)12</p>
<p>2.17</p>	 <p>для обнаружения зон термической неоднородности, при исследовании процесса сушки керамических плиток и пр.</p> <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 10 – 1000 Предел рабочей температуры, °С 60 Погрешность градуировки, %..... ±5 Габаритные размеры, мм..... (200 – 250)×(80 – 150)×(1 – 3) Количество зон.....6; 8</p>

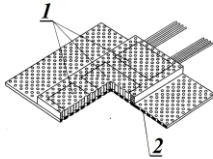
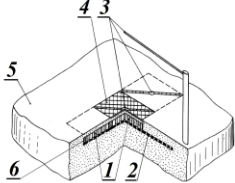
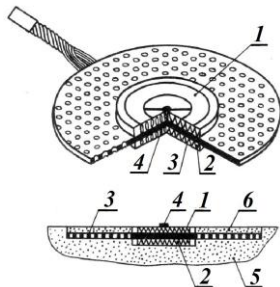
Продолжение таблицы А.4

1	2
2.18	<p>Черно-белые ПТП для измерения результирующей плотности теплового потока и его составляющих при сложном конвективно-радиационном теплообмене</p> <p>ПТП-1Б.11.2.2(3).11.Д.11(13).0(1).00(13).0</p>  <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 100 – 2·10³ Рабочая температура, °С 100 Интегральная полусферическая поглощательная способность поверхности: – «черной» (ε₁, ε₃) 0,93 – 95 – «белой» (ε₂) 0,05 – 0,20 Погрешность градуировки, % ±5 Габаритные размеры, мм Ø (25 – 40)×(1,2 – 1,5)</p>
2.19	<p>ПТП-1Б.11.2.2.11.Д.43.П.12.11(12, 13 14).0 – для исследования составляющих суммарного теплового потока при сложном конвективно-радиационном теплообмене</p>  <p>1, 2 – ПТП с контрастной поглощательной способностью; 3 – подложка температуровыравнивающая; 4, 5 – тепловоспринимающие пластинки («черная» и «белая»); 6, 7 – термопары; 8, 9 – выносные термопары для измерения температуры поверхности объекта и воздуха; 10 – разъем</p> <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 10 – 2000 Предел измерения температуры, °С 100 Погрешность градуировки, % ±5</p>


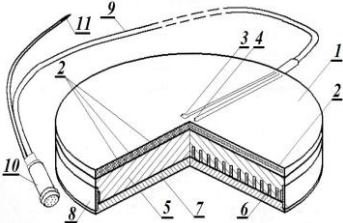
Продолжение таблицы А.4

1	2
	<p>Интегральная полусферическая поглотательная способность поверхности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – «черной».....0,80 – 90 – «белой»0,05 – 0,25 <p>Время выхода на установившийся режим, мин не более 2,5</p> <p>Габаритные размеры, мм..... Ø60×5</p>
<p>2.20</p>	<p>ПТП-1Б.11.2.3.11.П.13.0.13.12.0 – для измерения коэффициента теплообмена, адиабатной температуры стенки, действительного теплового потока и его составляющих при исследовании конвективно-радиационного теплообмена</p>  <p>$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ – поглотательная способность поверхностей ПТП</p> <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 100 – 1500</p> <p>Диапазон коэффициента теплообмена, Вт/(м²·К) 20 – 100</p> <p>Диапазон рабочей температуры, °С -40 – 130</p> <p>Интегральная полусферическая поглотательная способность 0,</p> <p>Погрешность градуировки, %.....±5</p> <p>Время реакции, с..... не более 10</p> <p>Эффективное тепловое сопротивление, м²·К/Вт 10⁻³ – 10⁻⁴</p> <p>Габаритные размеры, мм.....65×36×(2,5 – 2,8)</p>
<p>2.21</p>	<p>ПТП-1.Б.11.2.3.21.П.00.1.13.12.0 – для измерения при исследовании сложного теплообмена в технологических процессах пищевой и мясо-молочной промышленности при отрицательной температуре и теплообменом в горных выработках</p> 

Продолжение таблицы А.4

1	2
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>1 – ПТП; 2 – температуровыравнивающая перфорированная пластина; 3 – термопары; 4 – влагонепроницаемое покрытие; 5 – объект; 6 – слой капиллярно-пористого материала</p> <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 50 – 2000 Диапазон рабочей температуры, °С -30 – 130 Время реакции, с 3 – 50 Погрешность градуировки, % ±4 Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) 0,2 – 0,4 Чувствительность, мВ/(Вт·м²) 0,05 – 0,20 Габаритные размеры, мм (70 – 100)×(15 – 80)×(1 – 2)</p>
2.22	<p>ПТП-1Б.11.2.2.21.Д.00.0.12(13,14).11.0 – для отдельного определения «сухой» и массообменной составляющих плотности теплового потока при технологической обработке влажных материалов, сопровождающихся поверхностным испарением воды</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">  </div> <p>1, 2 – ПТП, 3 – частично перфорированная металлическая пластина; 4 – термопара; 5 – исследуемый объект; 6 – капиллярно-пористое покрытие, выполненное из материала исследуемого объекта</p> <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² Диапазон рабочей температуры, °С -20 – 100 Погрешность градуировки, % ±5 Время реакции, с 10 Габаритные размеры ПТП, мм: Ø (20 – 30)×(1 – 1,6) Пластина температуровыравнивающая: (80–100)×(0,5–1,5)</p>

Продолжение таблицы А.4


1	2
<p>2.23</p>	<p>ПТП-1Б.11.2.1.11.Д.51.0.55.11.0 – для измерения теплового потока высокой интенсивности, например, при огневых испытаниях материалов и изделий на огнестойкость в лабораториях предприятий авто-, вагоно-, авиастроительной промышленности, индустрии стройматериалов, а также службы пожарной безопасности. ПТП снабжен водоохлаждаемым корпусом, термостатируемым проточным хладагентом.</p>  <p>1 – тепловоспринимающая поверхность теплочувствительного элемента; 2 – корпус; 3 – фланец крепления</p> <p>Диапазон плотности теплового потока, кВт/м² 30 – 170 Погрешность аттестации, % ±2 Диапазон рабочей температуры, °С 20 – 95 Время непрерывной работы в пламени горелки, с 16 Назначенный ресурс работы в пламени горелки, ч 200 Площадь тепловоспринимающей поверхности ПТП, м² 4,89·10⁻⁴ Диаметр водоохлаждаемого корпуса, мм 50 Габаритные размеры, мм Ø 80×180</p>
<p>2.24</p>	<p>ПТП-1Б.11.2.1.11.Д.43.1.13.12.1 – специализированный преобразователь для применения в научных исследованиях в составе аппаратуры для задания и поддержания температуры рабочей поверхности или плотности теплового потока через нее</p>  <p>1 – чувствительный элемент; 2 – спираль термоэлементов; 3 – терморезистор; 4 – термопара; 5, 6 – подложка с электрическим нагревателем; 7 – крышка; 8 – кольцо; 9 – кабель; 10 – разъем; 11 – опорный спай термопары</p>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

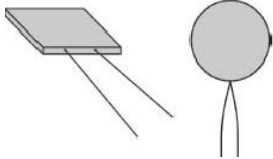


Окончание таблицы А.4

1	2
	Диапазон плотности теплового потока, кВт/м ² 10 – 1000 Погрешность измерения плотности теплового потока, %.....±4 Диапазон задаваемых значений температуры поверхности ПТП, °С 0 – 70 Коэффициент преобразования, Вт/(м ² ·мВ) 4,01 Поглощательная способность рабочей поверхности ПТП .. 0,94 Электрическая мощность, подаваемая на нагреватель, Вт: – в постоянном режиме до 17, – в импульсном режиме до 35 Габаритные размеры, мм Ø100×15 Длина кабеля, м..... 2 Длина термопары опорного спая, м..... 1


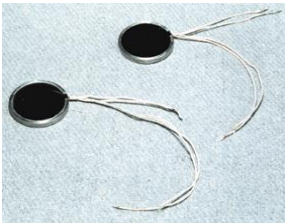
Таблица А.5 – Преобразователи теплового потока, выпускаемые за рубежом

№ п/п	Страна, фирма-производитель, модель, наименование. Внешний вид (схема). Применение Основные технические характеристики
1	2
1	РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ (РФ)
1.1	РФ, ОАО НПП «ЭТАЛОН», г. Омск ПТП-03 – преобразователь в жестком исполнении общего назначения. Применяют с многоканальным измерителем электрического напряжения ИТ-2  Предел плотности теплового потока, Вт/м ²500 Коэффициент преобразования, Вт/(м ² ·мВ) 20 – 80 Пределы относительной погрешности, %..... ±10 Диапазон рабочей температуры, °С -50 – 60 Время реакции, с.....60 Габаритные размеры, мм 110×30×4

Продолжение таблицы А.5

1	2
<p>1.2</p>	<p>Там же, ДТП 0924 – применяют для исследования тепловых физических и биологических процессов, а также при испытании строительных изделий в лабораторных и натуральных условиях</p>  <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 10 – 2000 Пределы относительной погрешности, % ±6 Диапазон рабочей температуры, °С -50 – 200 Время реакции, с 5 – 20 Габаритные размеры, мм Ø(27 – 250)×(2 – 10) (10 – 300)×(2 – 10)</p>
<p>1.3</p>	<p>РФ, ООО «ПромПрибор», г. Омск</p> <p>Датчик теплового потока в жестком и гибком исполнении – применяют с портативным микропроцессорным измерительным прибором с внутренней энергонезависимой памятью и возможностью связи с компьютером</p>  <p>Предел плотности теплового потока, Вт/м² 2000 Пределы относительной погрешности, % ±10 Диапазон рабочей температуры, °С -30 – 50 Габаритные размеры, мм Ø28×4 Заливочный материал гибкого ПТП – резина</p>
<p>1.4</p>	<p>РФ, ООО «Химик-Дизайн», г. Москва (с 1990 г. по 1995 г. – ПК «Фарада»)</p> <p>Датчик теплового потока общего назначения в жестком и гибком исполнении</p> 

Продолжение таблицы А.5

1	2
	<p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 50 – 10³ Диапазон рабочей температуры, °С -60 – 80 Коэффициент преобразования, Вт/(м²·мВ) 10 – 20 Время реакции, с.....60 Габаритные размеры, мм Ø(23;27;110)×(1,7;2); 52×10×1,7</p>
<p>1.5</p>	<p>РФ, Октябрьский филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета, г. Октябрьский, Башкортостан</p> <p>Преобразователи в жестком исполнении – применяют для измерения плотности теплового потока и температуры при тепловом контроле радиаторов отопления, теплоизоляции и ограждающих конструкций в комплекте с измерителем теплового потока «Тепломер-1»</p>  <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² -1100 – 1400 Относительная погрешность, %..... 2 – 5 Диапазон температуры поверхности, °С -30 – 120 Абсолютная погрешность измерения, К 0,01 Время реакции, с..... 50</p>
<p>1.6</p>	<p>РФ, ООО «Прибор», г. Смоленск</p> <p>Датчик теплового потока со встроенной термопарой – применяют в комплекте с приборами моделей ИТП и ИТАМ для обследования теплоэнергетических и строительных объектов. Датчики различаются по конструкции, размерам и техническим характеристикам (это гибкий датчик на резиновой основе или жесткий в виде диска)</p>  <p>Габаритные размеры, мм Ø (28×4)</p>

Продолжение таблицы А.5

1	2					
2	НИДЕРЛАНДЫ, «Hukseflux», www.hukseflux.com					
2.1	Преобразователи серии PUXX					
				<p>1 – теплочувствительная зона; 2 – охранный зона; 3, 4 – отсоединяемый кабель с миниразъемом; 5 – термопара</p>		
Модель	PU11	PU22	PU32	PU43	PU54	
Толщина, мм	3	3	3	3	3	
Диаметр, мм	2	50	75	100	150	
Тепловое сопротивление, м ² ·К/Вт	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	
Предел рабочей температуры, °С	100	100	100	100	100	
Размер теплочувствительной зоны, мм ²	10×10	20×20	25×25	30×30	50×50	
Чувствительность В·м ² /Вт	20	50	50	170	300	
Электрическое сопротивление, Ом	200	500	500	1500	3000	
Пределы погрешности, %	± 5	± 5	± 5	± 5	± 5	
Радиус изгиба (min), мм	∞	∞	∞	∞	∞	
2.2	<p>Преобразователи серии PUXXT – применяют для исследования теплообмена людей и животных с окружающей средой, на криволинейных поверхностях. Изготавливают с использованием полиуретана (PU), силикона и эпоксидного компаунда</p>					
		<p>1 – теплочувствительная зона, 2 – охранный зона, 3 – выводы (2 м), 4 – изгиб с радиусом R, 5 – термопара</p>				

ПРИЛОЖЕНИЕ А

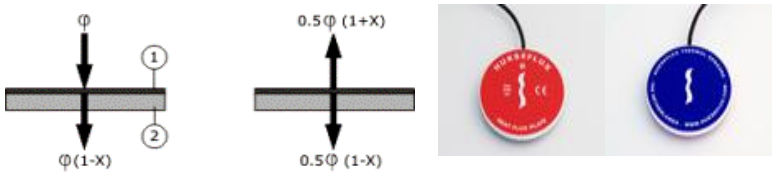
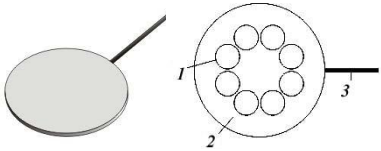
Продолжение таблицы А.5

1	2				
	Модель	PU11T	PU22T	PU32T	PU43T
	Толщина	1	1	1	1
	Диаметр, мм	25	50	75	10
	Тепловое сопротивление, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	0,004	0,004	0,004	0,004
	Предел рабочей температуры, $^{\circ}\text{C}$	-20 – 90	-20 – 90	-20 – 90	-20 – 90
	Размер теплочувствительной зоны, мм^2	$\text{Ø} 15$	$\text{Ø} 30$	$\text{Ø} 30$	$\text{Ø} 5$
	Чувствительность, $\text{мВ} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$	8	30	30	50
	Электрическое сопротивление, Ом	40	70	1700	7000
	Пределы погрешности, %	± 5	± 5	± 5	± 5
	Радиус изгиба (min), мм	1	25	4	50
2.3	Преобразователи общего назначения высокотемпературные, быстродействующие, с малым тепловым сопротивлением				
	Модель	EPHT 10		S41T	
	Габаритные размеры, мм	$\text{Ø}25 \times 1,5$		$\text{Ø}100 \times 1,2$	
	Размер чувствительной зоны, мм	1×10		40×40	
	Коэффициент преобразования, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})$	1000		20	
	Пределы погрешности, %	± 10		± 5	
	Тепловое сопротивление, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	0,0015		0,0050	
	Предел рабочей температуры, $^{\circ}\text{C}$	250		250	
2.4	Преобразователи моделей «Products Soil» – применяют для исследования теплообмена в грунтах. Преобразователи выполнены жесткими, водостойкими, с высокой чувствительностью				
	Модель	WS31 Soil		EP12	
	Габаритные размеры, мм	$\text{Ø}110 \times 5$		$\text{Ø}30 \times 3,5$	
	Размер чувствительной зоны, мм	$\text{Ø} 25$		$\text{Ø} 10$	
	Коэффициент преобразования, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})$	10		30	
	Пределы погрешности, %	± 5		± 5	
	Тепловое сопротивление, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	0,020		0,014	
	Предел рабочей температуры, $^{\circ}\text{C}$	70		70	

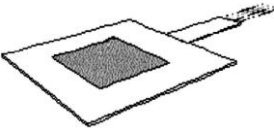
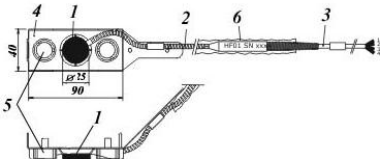

Продолжение таблицы А.5

1	2
<p>2.5</p>	<p>Преобразователи модели «Belt form» для применения на криволинейных поверхностях – ПТП высокой гибкости и чувствительности со встроенными ПТ</p>  <p>Габаритные размеры ПТП, мм380×100×1,2 Размеры чувствительной зоны55×40×1 Радиус изгиба, мм..... 30 Пределы относительной погрешности, %.....±2,5 Тепловое сопротивление, м²·К/Вт 3,5 Предел рабочей температуры, °С 100</p>
<p>2.6</p>	<p>Преобразователи серии НФР Модель НФР01 – применяют при теплотехнических испытаниях зданий и сооружений на внутренних стенах, а также внутри грунтов</p>  <p>1 – чувствительная зона, 2 – охранный зона, 3 – кабель</p> <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 2000 Диапазон рабочей температуры, °С -30 – 70 Тепловое сопротивление, м²·К/Вт 6,3·10⁻³ Чувствительность, мкВ·м²/Вт 50 Электрическое сопротивление, Ом..... 2 Пределы относительной погрешности, % – для большинства грунтов.....+5 – 15 – для стен.....±5 Материал заливки – керамико-пластмассовый компаунд Габаритные размеры, мм Ø 80×5 Длина кабеля, м..... до 5</p>

Продолжение таблицы А.5

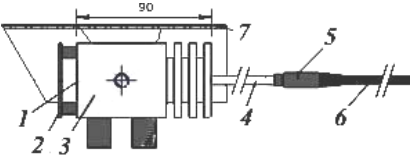

1	2
<p>2.7</p>	<p>Модель HFP01SC (self-calibrating) – применяют для высокоточных измерений малого теплового потока в грунтах за счет онлайн-калибровки (через каждые 3 или 6 часов в условиях эксперимента)</p>  <p>1 – нагреватель пленочный, 2 – ПТП</p> <p>Характеристики соответствуют модели HFP01 (см. 2.6)</p> <p>Ожидаемая погрешность, %±3</p> <p>Характеристики пленочного нагревателя:</p> <ul style="list-style-type: none"> – номинальное электрическое сопротивление, Ом..... 100 – напряжение «Вход/Выход», В (9 – 15)/(0 – 2) – потребляемая мощность, В·А 0,02–0,04 – габаритные размеры, мм Ø 80×5 – продолжительность калибровки при 1,5 Вт, мин 3
<p>2.8</p>	<p>Модель HFP03 – преобразователи ультрачувствительные, водостойкие. Применяют для измерения плотности малого теплового потока (менее 10 Вт/м²), например, в геотермальных установках, в грунтах</p>  <p>1 – чувствительные зоны, 2 – охранная зона, 3 – кабель</p> <p>Предел плотности теплового потока, Вт/м² ±2000</p> <p>Диапазон рабочей температуры, °С -30 – 70</p> <p>Тепловое сопротивление, м²·К/Вт 6,25·10⁻³</p> <p>Чувствительность, мкВ·м²/Вт..... 500</p> <p>Электрическое сопротивление, Ом 18</p> <p>Количество чувствительных зон..... 8</p>

Продолжение таблицы А.5

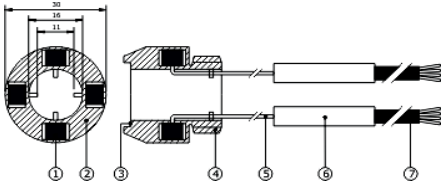
1	2
	<p>Пределы погрешности, % – для большинства грунтов.....5 – 15 – для стен..... ±5 Габаритные размеры, мм..... до Ø170×5 Длина кабеля, м..... до 5</p>
<p>2.9</p>	<p>Преобразователи модели VT предназначены для измерения теплового потока (в Вт)</p>  <p>Диапазон рабочей температуры, °С -50 – 160 Чувствительность к тепловому потоку, мВ/Вт от 7,4 до 10 Время реакции, с..... 90 Габаритные размеры, мм 25,5×25,5 Толщина, мм..... от 0,6 до 5</p>
<p>2.10</p>	<p>Модель HF01 – применяются для исследования теплообмена при плавлении алюминия, а также для измерения теплового потока и поверхностной температуры при исследовании балансов энергии промышленных печей, котлов, дистилляционных колонн и духовок</p>   <p>1 – ПТП, 2 – кабель выводов (в металлическом экране), 3 – кабель в тефлоновой изоляции, 4 – корпус, 5 – магниты, 6 – силиконовый рукав</p> <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м²50 – 50·10³ Коэффициент преобразования, Вт/(м²·мВ)..... 2000 Диапазон рабочей температуры, °С: – с кабелем в металлическом экране.....-30 – 800, – с кабелем в тефлоновой изоляции.....-30 – 240, – с системой магнитных держателей до 550</p>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Продолжение таблицы А.5

1	2
	<p>Предел относительной погрешности, %..... ± 3 Диаметр чувствительной зоны, мм..... 25 Габаритные размеры, мм $90 \times 40 \times 10$ Длина кабеля, м: – в металлическом экране 0,9 – в тефлоновой изоляции 3,5</p>
<p>2.11</p>	<p>Модель HF02 – применяют для исследования радиационного теплообмена при мониторинге процессов теплового излучения и активизации сигнальных систем</p>  <p>1 – сенсор теплового потока и температуры; 2 – радиационный экран; 3 – корпус; 4, 5, 6 – изолированные различными материалами участки кабеля</p> <p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м² 0 – 15 Чувствительность, мВ/(Вт м²) 0,5 Диапазон измерения температуры, °С -50 – 150 Предел рабочей температуры, °С: – с кабелем в минеральной изоляции 500 – с кабелем в пластиковой изоляции 70 Пределы относительной погрешности, %..... ± 3 Габаритные размеры корпуса, мм..... 90×50</p>
<p>2.12</p>	<p>Модель HF05 – применяют для измерения тепловых параметров в промышленных условиях, в пищевой промышленности, псевдосжиженных слоях и пр. ПТП выполнен с защитным покрытием из нержавеющей стали в водонепроницаемом корпусе, со встроенной термопарой.</p>  <p>1 – крепежный фланец, 2 – ПТП, 3 – кабель</p>

Продолжение таблицы А.5

1	2
	Предел плотности теплового потока, кВт/м ²6 Предел рабочей температуры, °С170 Чувствительность, мВ/(Вт·м ⁻²)15 Габаритные размеры, мм: – ПТП Ø40×5 – фланца 77×15×3 Длина кабеля, м.....не менее 3
2.13	<p>Преобразователи серии RHF Применяют в научных и практических экспериментах по изучению процессов загрязнения, в том числе и его направления. Эти ПТП бывают зондами осаждения, зондами всасывания и пр. Обязательно наличие охлаждения (воздушного или масляного)</p>  <p>1 – ПТП с ПТ (4 шт.); 2 – корпус из нержавеющей стали; 3 – плоский наконечник под сварочное соединение; 4 – штуцер для резьбового соединения; 5 – кабель в металлическом экране; 6 – термоусадочная трубка; 7 – кабель в тефлоновой изоляции</p> <p>Предел рабочей температуры (при наличии металлического экрана на кабеле), °С800 Чувствительность каждого ПТП, мкВ/(кВт·м⁻²)4 Время реакции (90%), с.....120 Габаритные размеры корпуса с ПТП и ПТ, мм: – наружный диаметр30 – внутренний диаметр16 – длина30</p>
2.14	<p>Преобразователи черно-белые RadCon – применяют для измерения плотности теплового потока и температуры при исследовании излучения и конвекции в печах, топках, процессах выпечки и сушки</p>

Продолжение таблицы А.5

1	2			
<p>Модель RC01</p>  <p>1 – конвективный тепловой поток, 2 – тепловое излучение, 3 – ПТП с зачеченной поглощающей поверхностью, 4 – термопара, 5 – ПТП с золоченой поглощающей поверхностью</p>				
RC01	RadCon-M	RadCon-R	RadCon-C	
				
Габаритные размеры, мм				
22×10×3	65×65×13	60×40×40	80×70×40	
Предел плотности теплового потока, кВт/м ² 10				
Погрешность калибровки, %..... 10				
Предел рабочей температуры °С, 250				
Время реакции, с 0,5				
Наличие преобразователя температуры (ПТ):				
внутренний	внутренний наружный	внутренний	внутренний	
Наличие принудительного теплоотвода:				
нет	нет	да	да	
2.15	<p>Преобразователи портативные модели HF03, HF03/L119 – применяют для измерения плотности теплового потока от пламени и огня при огневых испытаниях.</p>  <p>1 – тепловоспринимающая поверхность, 2 – металлический теплосток, 3 – пластмассовая рукоятка, 4 – разъем, 5 – кабель в полиуретановой изоляции</p>			

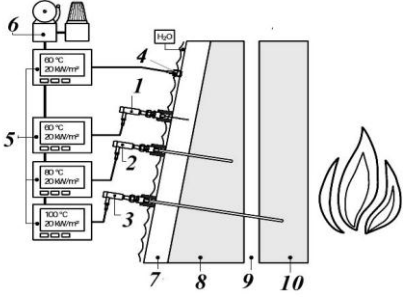
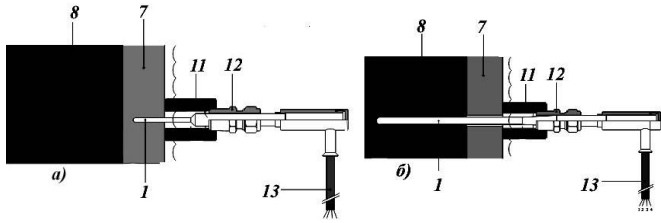
Продолжение таблицы А.5

1	2
	<p>Предел плотности теплового потока, кВт/м²10 Длительность воздействия пламени, max мин.....10 Длина кабеля, м.....3 Возможное удлинение, мдо 200</p> <p>Работают в комплекте с высокоточным индикатором L119 для ручного снятия показаний при мобильных измерениях или напрямую присоединен к ПК.</p>
<p>2.16</p>	<p>Преобразователи модели «BS01 Belt» (поясоподобный ПТП) – применяют для оценки качества теплоизоляции труб в натуральных условиях, в том числе труб подводных трубопроводов нефти. Изготовлены водонепроницаемыми и стойкими к высокому давлению</p> <div data-bbox="165 703 520 1050" data-label="Diagram"> </div> <div data-bbox="572 730 941 1034" data-label="Image"> </div> <p>1, 2, 3 – ПТП, 4 – кабель, 5 – «пояс» из 3-х ПТП, 6 – испытываемый трубопровод</p> <p>Чувствительность, мкВ / (кВт·м⁻²).....50 Диапазон рабочей температуры, °С0 – 100 Пределы ожидаемой погрешности (до 50 °С), %..... ±2,5 Интервал рабочего давления, бар 1 – 110 Габаритные размеры, мм – каждого ПТП..... 68×40×1,5 – изделия в целом..... 380×100×8,5</p>

Продолжение таблицы А.5

1	2																															
<p>2.17</p>	<p>Преобразователи зондовые модели серии СНФ – применяются для исследования малых тепловых эффектов химических реакций и фазовых переходов</p>  <p>1, 2 – ТТ, включенные встречно; 3 – трубка с ТТ; 4 – наконечник трубки; 5 – крепеж с пружиной; 6 – кабель в металлическом экране; 7 – кабель в тефлоновой изоляции; 8 – металлический корпус (или сосуд); 9 – среда, в которой происходит химическая реакция</p> <table border="1" data-bbox="211 646 1018 979"> <thead> <tr> <th>Модель</th> <th>СФН01</th> <th>СФН02</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Диапазон рабочей температуры:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>– с кабелем в тефлоновой изоляции, °С</td> <td>-55 – 260</td> <td>-55 – 450</td> </tr> <tr> <td>– с кабелем в экране, °С</td> <td>–</td> <td>-55 – 700</td> </tr> <tr> <td>Время реакции, с</td> <td>1</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Габаритные размеры, мм:</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>– диаметр трубки с ТТП и термопарой</td> <td>4</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>– длина трубки</td> <td>30</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>– длина кабеля в тефлоновой изоляции</td> <td>2500</td> <td>2500</td> </tr> <tr> <td>– длина кабеля в металлическом экране</td> <td>–</td> <td>100</td> </tr> </tbody> </table>		Модель	СФН01	СФН02	Диапазон рабочей температуры:			– с кабелем в тефлоновой изоляции, °С	-55 – 260	-55 – 450	– с кабелем в экране, °С	–	-55 – 700	Время реакции, с	1	4	Габаритные размеры, мм:			– диаметр трубки с ТТП и термопарой	4	2	– длина трубки	30	30	– длина кабеля в тефлоновой изоляции	2500	2500	– длина кабеля в металлическом экране	–	100
Модель	СФН01	СФН02																														
Диапазон рабочей температуры:																																
– с кабелем в тефлоновой изоляции, °С	-55 – 260	-55 – 450																														
– с кабелем в экране, °С	–	-55 – 700																														
Время реакции, с	1	4																														
Габаритные размеры, мм:																																
– диаметр трубки с ТТП и термопарой	4	2																														
– длина трубки	30	30																														
– длина кабеля в тефлоновой изоляции	2500	2500																														
– длина кабеля в металлическом экране	–	100																														
<p>2.18</p>	<p>Преобразователи игольчатые со встроенной термопарой моделей NF01, NF02 (уменьшенный вариант) – применяют для непрерывных и одновременных измерений плотности теплового потока и температуры на стенах печей при мониторинге доменных и плавильных печей, печей для выплавки титана, в системах безопасности печей</p>  <p>1 – ТТП и ТТ; 2 – крепление с пружиной; 3, 4 – кабель в металлическом экране и в тефлоновой изоляции</p>																															

Продолжение таблицы А.5

1	2
	<p>Схема установки на объекте:</p>  <p>1, 2, 3 – игольчатые ПТП модели NF01; 4 – съемный ПТП модели NF01; 5 – контрольно-измерительная система; 6 – система тревоги при неполадках; 7 – водоохлаждаемая стальная оболочка; 8 – графит (или кирпичная кладка); 9 – слой раствора; 10 – полуграфит</p>
	<p>Расположение ПТП модели NF01 (Ø 4мм):</p>  <p><i>а)</i> в водоохлаждаемой стальной оболочке; <i>б)</i> в графитовой (или кирпичной) части стенки печи: 11 – установочная трубка; 12 – резьбовое крепление; 13 – кабель в ПХВ-изоляции</p>
	<p>Диапазон плотности теплового потока, кВт/м² от 0,05 до 50 Диапазоны рабочей температуры, °С -30 – 700 Диапазон допускаемых значений температуры кабеля, °С от -30 до 85 Предусмотрена возможность повышения предела рабочей температуры, °С до 1000 Устойчивость к воздействию агрессивной химической среды Габаритные размеры трубки с ПТП и ПТ: – диаметр: 3 мм; 4 мм; 8 мм; – длина min 30 мм.</p>


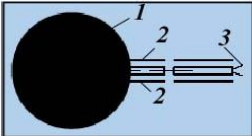
Продолжение таблицы А.5

1	2																		
3	<p>ФРАНЦИЯ, «Captec Enterprise», www.captecenterprise.com</p>																		
3.1	<p>Преобразователи ультратонкие модели SHF – применяют для измерения плотности потока теплового излучения при регулировании тепловых процессов, испытании теплоизоляции, выявлении замерзания, определении момента окончания полимеризации, фазовых переходов, отслеживании изменений равновесного состояния</p>  <p>Пределы плотности теплового потока, кВт/м² 500 Диапазон рабочей температуры, °С -180 – 200 Электрическое сопротивление, Ом до 500 Время реакции, с 0,3 Тепловое сопротивление, м²·К/Вт 0,15·10⁻³ Толщина, мм 0,4 – 1,0</p> <table border="1" data-bbox="210 887 1022 1094"> <thead> <tr> <th>Модель</th> <th>Размеры, мм</th> <th>Чувствительность, мкВ/(Вт·м⁻²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SHF 10</td> <td>10 × 10</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>SHF 50</td> <td>50 × 50</td> <td>7,5</td> </tr> <tr> <td>SHF 100</td> <td>100 × 100</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>SHF 150</td> <td>150 × 150</td> <td>67,5</td> </tr> <tr> <td>SHF 300</td> <td>300 × 300</td> <td>180</td> </tr> </tbody> </table>	Модель	Размеры, мм	Чувствительность, мкВ/(Вт·м ⁻²)	SHF 10	10 × 10	0,3	SHF 50	50 × 50	7,5	SHF 100	100 × 100	30	SHF 150	150 × 150	67,5	SHF 300	300 × 300	180
Модель	Размеры, мм	Чувствительность, мкВ/(Вт·м ⁻²)																	
SHF 10	10 × 10	0,3																	
SHF 50	50 × 50	7,5																	
SHF 100	100 × 100	30																	
SHF 150	150 × 150	67,5																	
SHF 300	300 × 300	180																	
3.2	<p>Стандартные радиационные гибкие ПТП из тонкой фольги с отражателями на поверхностях модели RHF – применяют для исследования радиационного теплообмена, как самостоятельный элемент, так и в конструкции радиометров</p> 																		

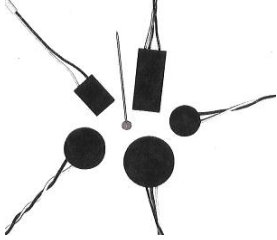
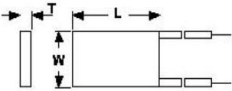
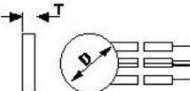

Продолжение таблицы А.5

1	2		
	Пределы плотности теплового потока, кВт/м ² ±500 Диапазон рабочей температуры, °С -180 – 200 Электрическое сопротивление, Ом до 500 Коэффициент эмиссии 0,48 Время реакции, с 0,05 Толщина, мм 0,4 Спектральный диапазон, мкм от 1 до 20 Коэффициент излучения от 0,3 до 0,7		
	Модель	Размеры, мм	Чувствительность, мкВ·м ² /Вт
	RHF 10	10×10×0,4	0,100
	RHF 25	25×25×0,4	0,625
	RHF 50	50×50×0,4	2,5
	RHF 100	100×100×0,4	10,0
	RHF 150	150×150×0,4	22,5
	RHF 300	300×300×0,4	90,0
	При наличии термопары к индексу модели прибавляют букву Т, например, RHF 25Т		
3.3	Преобразователи радиационные в водоохлаждаемом корпусе – применяют для эксплуатации в экстремальных условиях (имеют защитное покрытие)		
			
	Пределы плотности потока теплового излучения, кВт/м ² от 1 до 200 Номинальная чувствительность, мкВ·м ² /кВт 100 Пределы погрешности, % ±2 Тепловое сопротивление, К·м ² /Вт 0,006 Толщина чувствительного элемента, мм 0,4 Спектральный диапазон, мкм от 0,2 до 10		

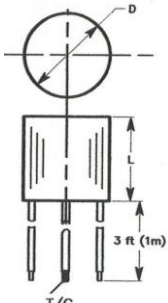
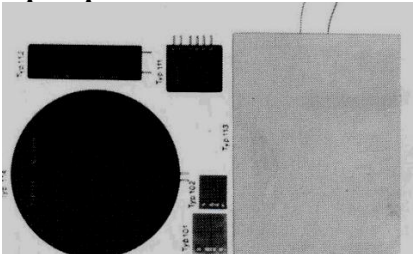
Продолжение таблицы А.5

1	2
4	ГЕРМАНИЯ
4.1	<p>WUNTRONIC GmbH, <i>www.wuntronic.de</i></p> <p>Преобразователи универсальные общего назначения серии F: F-040-4, F-020-4, F-010-4, F-005-2, F-002-4</p>  <p>Предел плотности теплового потока, Вт/м² 10⁴ Время реакции, с 14 Диапазон рабочей температуры, °С -50 – 150 Пределы относительной погрешности, % ±5 Линейность функции преобразования, % ±2 Габаритные размеры, мм (15,8–50,8) × (25,4–50,8) × 2,8</p>
4.2	<p>Преобразователи дисковые высокотемпературные с термопарой серии FCR: FCR-200, FCR-200M, FCR-200C, FCR-200K, FCR-200MK – применяют для измерения плотности теплового потока и температуры в научных лабораториях и на промышленных объектах с высокотемпературными средами</p>  <p>1 – ПТП, 2 – выводы ПТП, 3 – выводы термопары</p> <p>Предел плотности теплового потока, кВт/м² 15,8 Пределы относительной погрешности, % ±5 Коэффициент теплопроводности, Вт(м·К) 0,95 Пределы относительной погрешности, % ±5 Термостойкость, °С 260 – 550 Габаритные размеры, мм Ø15,9×3,6</p>


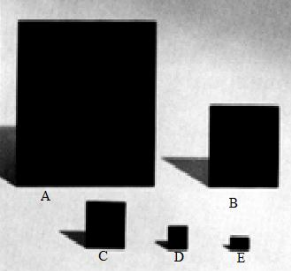
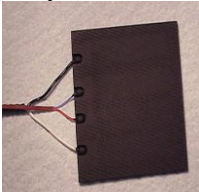


Продолжение таблицы А.5

1	2
<p>4.3</p>  <p>Модели FM-060, FM-120</p> 	<p>Преобразователи миниатюрные серии FM и FRM – применяют в энергетике, сельском хозяйстве, медицине, аэрокосмической отрасли, океанологии и при исследовании теплофизических свойств теплоизоляционных материалов. Стойкие к атмосферным воздействиям, могут работать при высоком давлении и в вакууме</p> <p>Модели с термопарой FRM-060 (К; Т), FRM-090 (К; Т), FRM-200 (К; Т)</p>  <p>Предел плотности теплового потока, кВт/м² 9,5 Диапазон рабочей температуры, °С -50 – 150 Пределы относительной погрешности, % ±5 Линейность функции преобразования, % ±2 Коэффициент теплопроводности, Вт(м·К) 0,32 Время реакции, с 3 Степень черноты поверхности 0,94 Габаритные размеры, мм: – серии FM 7,4×10,7×1,5; 8,6×19,1×2,3 – серии FRM Ø(9,5;12,7;16)×1,8</p>
<p>4.4</p> 	<p>Преобразователи дисковые с термометром сопротивления/термопарой (типа Т или К) серии FR-75-D: FR-75D-6 (К, Т), FR-0,25-6 (К, Т) – применяют для общих и медико-биологических исследований</p>

Продолжение таблицы А.5

1	2
	<p>Предел плотности теплового потока, Вт/м² 10⁴ Диапазон рабочей температуры, °С -30 – 150 Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) 0,31 Время реакции, с 10 Габаритные размеры, мм Ø19×2</p>
<p>4.5</p>	<p>Преобразователи плоские с углом обзора 180° серии CR – применяют для измерения конвективной составляющей теплообмена при наличии радиационной или без нее в промышленности, на трубопроводах, нефтеперегонных заводах и реакторах, подводных лодках, в аэрокосмической отрасли, при исследовании материалов. Снабжены ПТ (термопарой Т или К) или термометром сопротивления</p>  <p>Предел плотности теплового потока, кВт/м² 15 Предел рабочей температуры, °С 150 Габаритные размеры, мм Ø(12,5–25,5) × (15; 19) Время реакции, с 2</p>
<p>4.6</p>	<p>«Ahlborn Meß Und Regelungstechnik», www.ahlborn.com Преобразователи общего назначения</p>  <p>Максимальная рабочая температура, °С 250 Размеры ПТП, мм от 24×18 до 500×500 Коэффициент преобразования ПТП, Вт/(м²·мВ) от 5</p>

Продолжение таблицы А.5

1	2
<p>4.7</p>	<p>Преобразователи с термопарами – применяют для измерения плотности теплового потока и температуры при обследовании теплоизоляции ограждающих конструкций зданий и сооружений</p>  <p>Пределы измерения плотности теплового потока: – тип А 2 кВт/м² – тип В 20 кВт/м² Диапазон рабочей температуры, °С -100 –1370 Габаритные размеры ПТП, мм 30×25×1,5</p>
<p>5</p>	<p>СОЕДИНЕННЫЕ ШТАТЫ АМЕРИКИ (США)</p>
<p>5.1</p>	<p>«International Thermal Instrument Company» (ITI), www.thermalinstrumentcompany.com</p> <p>Преобразователи моделей А, В, С, D, Е – применяют для определения теплозащитных характеристик зданий, включая коэффициенты теплообмена, а также для измерения плотности теплового потока и температуры в авиационной и космической технике, в микрометеорологии, почвоведении, медицине, физиологии, в кондиционировании и холодильной технике</p>  <p>модель В</p> <p>образцовый с термопарой типа К водоохлаждаемый изогнутый</p>   

Продолжение таблицы А.5

1	2					
	Модели ПТП	А	В	С	D	E
	Предел плотности теплового потока, Вт/м ²	до 3,3·10 ⁵				
	Диапазон рабочей температуры, °С	-254 – 288				
	Коэффициент преобразования, Вт/(м ² ·мВ)	22	22	157	630	630
	Пределы погрешности	±1	±3	±5	±10	±10
	Время реакции	1	1	1	1	1
	Материалы заливки	полиимид-стекло				
	Толщина, мм	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
	Поперечные размеры, мм	102×10× 2	51× 51	25,4× 25,4	12,7× 12,7	12,7× 6,8
5.2	<p>Преобразователи высокотемпературные модели НТ-50 – применяют при исследовании теплообмена в трубопроводах, а также в печах, котлах, двигателях, в аэрокосмической отрасли при высокотемпературном теплообмене и для определения теплофизических свойств материалов.</p>  <p>Предел плотности теплового потока, Вт/м² 3,3·10⁵ Диапазон рабочей температуры, °С до 980 Пределы погрешности, % ±5 Время реакции, с 0,1 Чувствительность к линейной плотности теплового потока, Вт/м 6,7 Габаритные размеры, мм Ø(125 – 200)×2,5 Материал корпуса – нержавеющая сталь</p>					
5.3	<p>«RdF Corporation», www.rdfcorp.com</p> <p>Преобразователи серии «Micro-Foil» - тонкопленочные, быстродействующие, высокочувствительные с малым тепловым сопротивлением</p> 					

Продолжение таблицы А.5

1	2
	 <p>0.007 INCHES NOMINAL</p> <p>LEAD WIRES OPTIONAL: 30 AWG SOLID COPPER TEFLON INSULATED, COLOR CODED RED (-), WHITE (+)</p> <p>Предел плотности теплового потока, Вт/м² 560 Предел рабочей температуры, °С 150 – 260 Время реакции, с 0,05 – 0,4 Чувствительность мкВ/(Вт·м²) 0,02 – 2 Номинальная толщина, мкм 76 – 330</p> <p>Применяют для определения ТФС материалов; исследования теплообмена на борту летательных аппаратов при наземных и летных испытаниях; при огневых испытаниях аэрокосмических материалов; при контроле процессов термообработки, работы прокатных станов, производства стекла; исследования в аэродинамических трубах; определения аэробной деятельности человека; при испытании систем отопления, вентиляции и кондиционирования, а также при модернизации систем энергетического мониторинга и контроля</p>
<p>5.4</p>	<p>«Reading thermal systems», www.readingthermal.com</p> <p>Устройство SCORPION® 2 с двумя ПТП («черным» и «золотым») – применяют для измерения плотности суммарного теплового потока, его радиационной и конвективной составляющих и коэффициента теплообмена в пищевой промышленности</p>  <p>Диапазон рабочей температуры, °С -50 – 450 Пределы погрешности, % ±5 Время реакции (при скорости движения воздуха 1 м/с), с 3</p>

Продолжение таблицы А.5

1	2																																					
<p>5.5</p>	<p>«Vatell Corporation», www.vatell.com</p> <p>Преобразователи серии НFM – радиационные тонкопленочные малоинерционные высокотемпературные с преобразователем температуры. Изготовлены по запатентованной технологии из тонкой пленки, нанесенной на керамическую подложку. Применяют при исследовании сложного и радиационного теплообмена</p>																																					
<p>Внешний вид</p>	<table border="1"> <tbody> <tr> <td data-bbox="253 497 393 632"></td> <td data-bbox="393 497 516 632">HFM-8 E-L</td> <td data-bbox="516 497 622 632">500</td> <td data-bbox="622 497 678 632">300</td> <td data-bbox="678 497 734 632">15</td> <td data-bbox="734 497 801 632">4500</td> <td data-bbox="801 497 857 632">17</td> <td data-bbox="857 497 1021 632" rowspan="5">Нихром/Константан</td> </tr> <tr> <td data-bbox="253 647 393 782"></td> <td data-bbox="393 647 516 782">HFM-8 E-H *</td> <td data-bbox="516 647 622 782">500</td> <td data-bbox="622 647 678 782">700</td> <td data-bbox="678 647 734 782">15</td> <td data-bbox="734 647 801 782">4500</td> <td data-bbox="801 647 857 782">17</td> </tr> <tr> <td data-bbox="253 798 393 932"></td> <td data-bbox="393 798 516 932">HFM-7 E-L</td> <td data-bbox="516 798 622 932">500</td> <td data-bbox="622 798 678 932">300</td> <td data-bbox="678 798 734 932">15</td> <td data-bbox="734 798 801 932">3500</td> <td data-bbox="801 798 857 932">17</td> </tr> <tr> <td data-bbox="253 948 393 1082"></td> <td data-bbox="393 948 516 1082">HFM-7 E-H *</td> <td data-bbox="516 948 622 1082">500</td> <td data-bbox="622 948 678 1082">700</td> <td data-bbox="678 948 734 1082">15</td> <td data-bbox="734 948 801 1082">3500</td> <td data-bbox="801 948 857 1082">17</td> </tr> <tr> <td data-bbox="253 1098 393 1232"></td> <td data-bbox="393 1098 516 1232">HFM-6 D-H *</td> <td data-bbox="516 1098 622 1232">500</td> <td data-bbox="622 1098 678 1232">850</td> <td data-bbox="678 1098 734 1232">0,8</td> <td data-bbox="734 1098 801 1232">1000</td> <td data-bbox="801 1098 857 1232">17</td> <td data-bbox="857 1098 1021 1232">Платина/Платина-Родий</td> </tr> </tbody> </table> <p>*) – поставляется с адаптером водяного охлаждения</p> <p>**) – max температура приведена для ППП без покрытия. Для ППП с покрытием max температура 650 °С.</p> <p>Max температура для задней части ППП 650 °С и 200 °С для высоко- и низкотемпературных элементов</p> <p>***) – значения чувствительности определены для ППП с покрытиями по радиационному источнику</p>		HFM-8 E-L	500	300	15	4500	17	Нихром/Константан		HFM-8 E-H *	500	700	15	4500	17		HFM-7 E-L	500	300	15	3500	17		HFM-7 E-H *	500	700	15	3500	17		HFM-6 D-H *	500	850	0,8	1000	17	Платина/Платина-Родий
	HFM-8 E-L	500	300	15	4500	17	Нихром/Константан																															
	HFM-8 E-H *	500	700	15	4500	17																																
	HFM-7 E-L	500	300	15	3500	17																																
	HFM-7 E-H *	500	700	15	3500	17																																
	HFM-6 D-H *	500	850	0,8	1000	17		Платина/Платина-Родий																														
<p>Характеристики моделей</p>	<p>Предел плотности теплового потока, кВт/м²</p> <p>Предел рабочей температуры, °С</p> <p>Чувствительность, мкВ·м²/Вт</p> <p>Электрическое сопротивление, Ом</p> <p>Время реакции, мкс</p> <p>Термобатарея</p> <p>Тип преобразователя температуры</p>																																					

Продолжение таблицы А.5

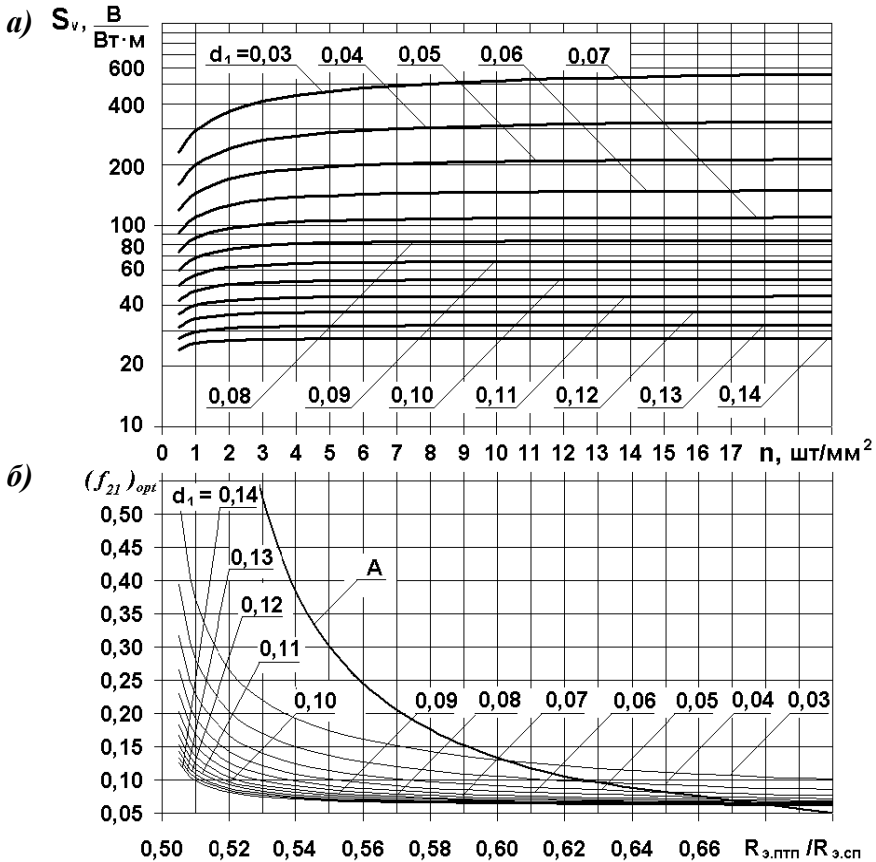
1	2				
5.6	Преобразователи радиационные модели Termogage				
	Серия	TG-1000	TG-2000	TGH-2000 TG-9000	
	Внешний вид				
	Тип охлаждения корпуса	водяное	кондуктивное		водяное
	Диапазон плотности теплового потока, Вт/см ²	5–5000	5–5000	300–5000	10–500
	Предел рабочей температуры, °С	200	200	600	200
	Чувствительность, мВ/(Вт·м ²)	2	2	0,033	1
	Воспроизводимость, %	1	1	1	1
	Размеры корпуса, min, мм	Ø6,35×12,7	Ø3,175×6,35		Ø12,1×19,1
	Погрешность калибровки ППП, %	±3	±3	±3	±3
Применяют для измерения	суммарного теплового потока			радиационной составляющей теплового потока	
6	ЯПОНИЯ				
6.1	«PREDE CO., LTD», www.prede.com				
	Преобразователи общего назначения модели RHF-02/03 (в жестком исполнении)	модели RHF-100/100L (в гибком исполнении)			
					
Применяют для обследования ограждающих конструкций при аудите теплового состояния теплоизоляции зданий и сооружений					

Продолжение таблицы А.5

1	2			
	Модель	PHF-02/03	PHF-100	PHF-100L
	Коэффициент преобразования, Вт/(м ² ·мВ)	40–60/ 7–9	72	36
	Электрическое сопротивление, Ом	2/5	до 200	до 400
	Диапазон рабочей температуры, °С	-30–70	-20–120	
	Заливочный материал	эпоксидная смола	черный силикон	
	Радиус изгиба, мм	–	до 15	
	Габаритные размеры, мм	Ø40×5/Ø76×6	40×30×2	80×30×2
	Длина кабеля, м	5	5	5
<p>6.2</p>	<p>«Kyoto electronics manufacturing», www.kyoto-kem.com</p> <p>Преобразователи общего назначения в жестком и гибком исполнении. Используют для определения энергопотребления при контроле печей, расхода (выделения) теплоты в домах и других помещениях, для оптимизации солнечных батарей и геотермальной энергии, для медицинских исследований и пр. Применяют в комплекте с электронными портативными измерителями теплового потока моделей HFM-201 или HFM-215 (многоканальный)</p> 			
<p>Модель</p>	<p>Диапазон плотности теплового потока, Вт/м²</p>	<p>Диапазоны значений рабочей температуры, °С</p>	<p>Тип установки</p>	
<p>TR2, 6; KR2, 6 TM1; KM1</p>	<p>12–3500</p>	<p>-40–150</p>	<p>на поверхности</p>	
<p>T500B, S; K500B, S</p>	<p>350–17000</p>	<p>70–500</p>	<p>на поверхности</p>	
<p>T500B, S-20 K500B, S-20</p>	<p>350–17000</p>	<p>70–500</p>	<p>на поверхности, Ø20 мм</p>	
<p>T750, T750S K750, K750S</p>	<p>580–58000</p>	<p>200–750</p>	<p>встраиваемый</p>	

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(к главе 4)

**НОМОГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПТП**

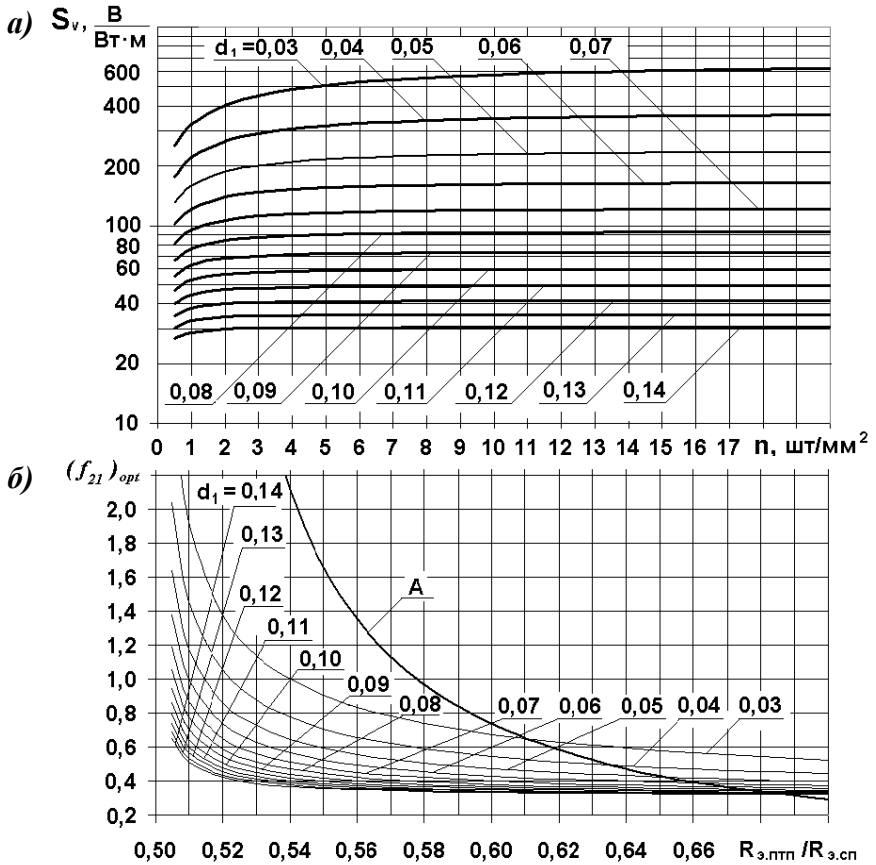


а – графики зависимости $S_v = f(n, d_1 = \text{var})$;

б – графики зависимости $(f_{21})_{opt} = f(n, d_1 = \text{var})$;

А – график зависимости значений $(f_{21})_{opt}$ от $R_{э.птт} / R_{э.сп}$

Рисунок Б.1. Номограмма для расчета
константан-медного и копель-медного ПТП.

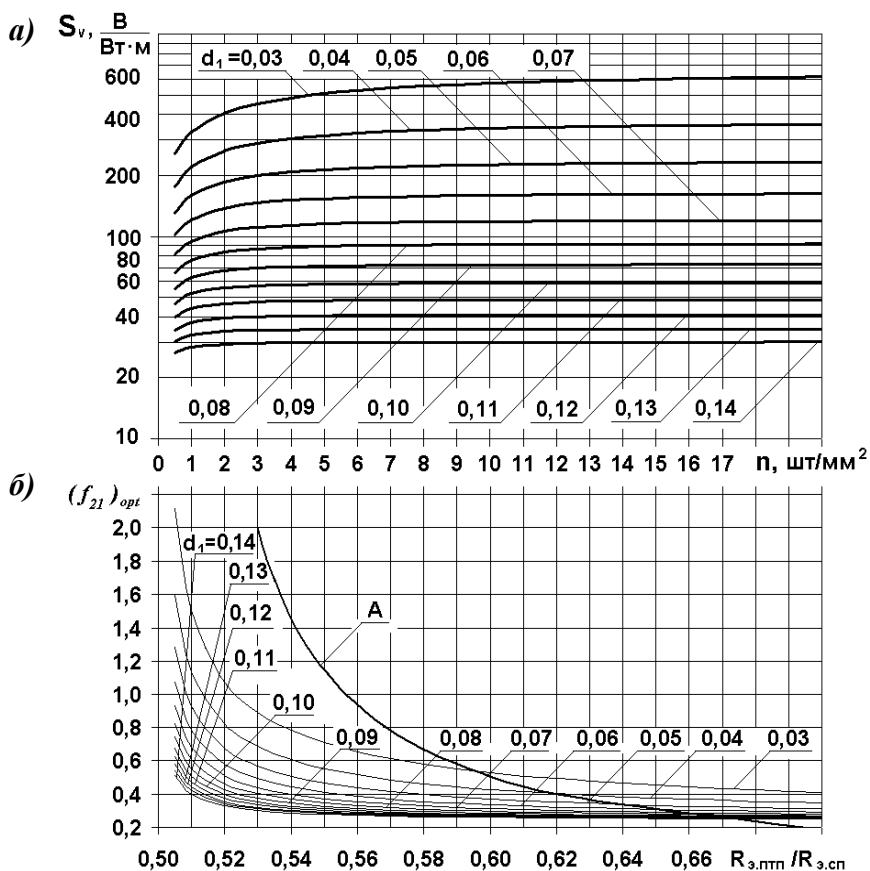


a – графики зависимости $S_v = f(n, d_1 = \text{var})$;

б – графики зависимости $(f_{21})_{opt} = f(n, d_1 = \text{var})$;

A – график зависимости значений $(f_{21})_{opt}$ от $R_{э,птп} / R_{э,сп}$

Рисунок Б.2. Номограмма для расчета константан-железного ПТП.

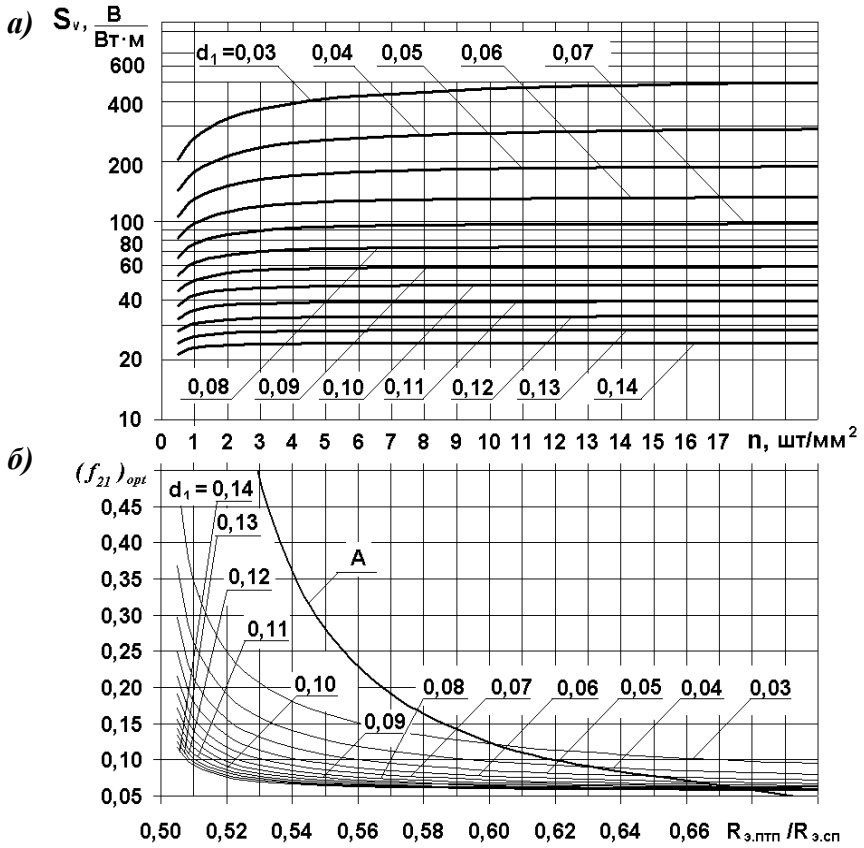


a – графики зависимости $S_v = f(n, d_1 = \text{var})$;

б – графики зависимости $(f_{21})_{opt} = f(n, d_1 = \text{var})$;

A – график зависимости значений $(f_{21})_{opt}$ от $R_{Э.ПТП} / R_{Э.СП}$

Рисунок Б.3. Номограмма для расчета константан-никелевого ПТП.

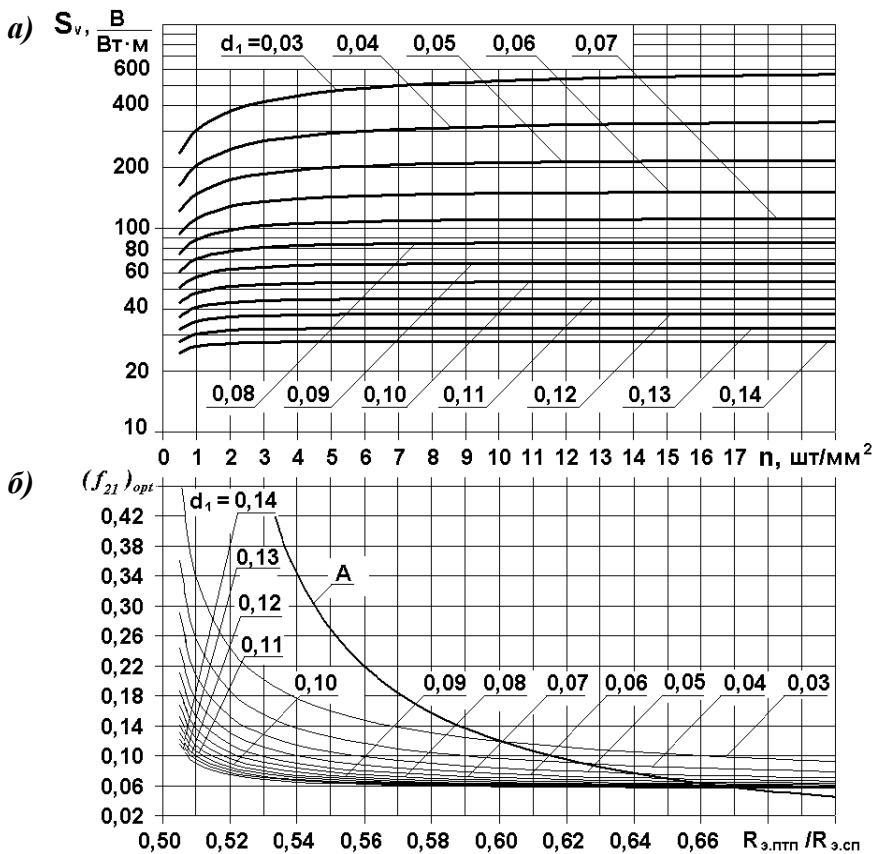


a – графики зависимости $S_v = f(n, d_1 = \text{var})$;

б – графики зависимости $(f_{21})_{opt} = f(n, d_1 = \text{var})$;

A – график зависимости значений $(f_{21})_{opt}$ от $R_{э,ПТП} / R_{э,СП}$

Рисунок Б.4 – Номограмма для расчета константан-серебряного ПТП.



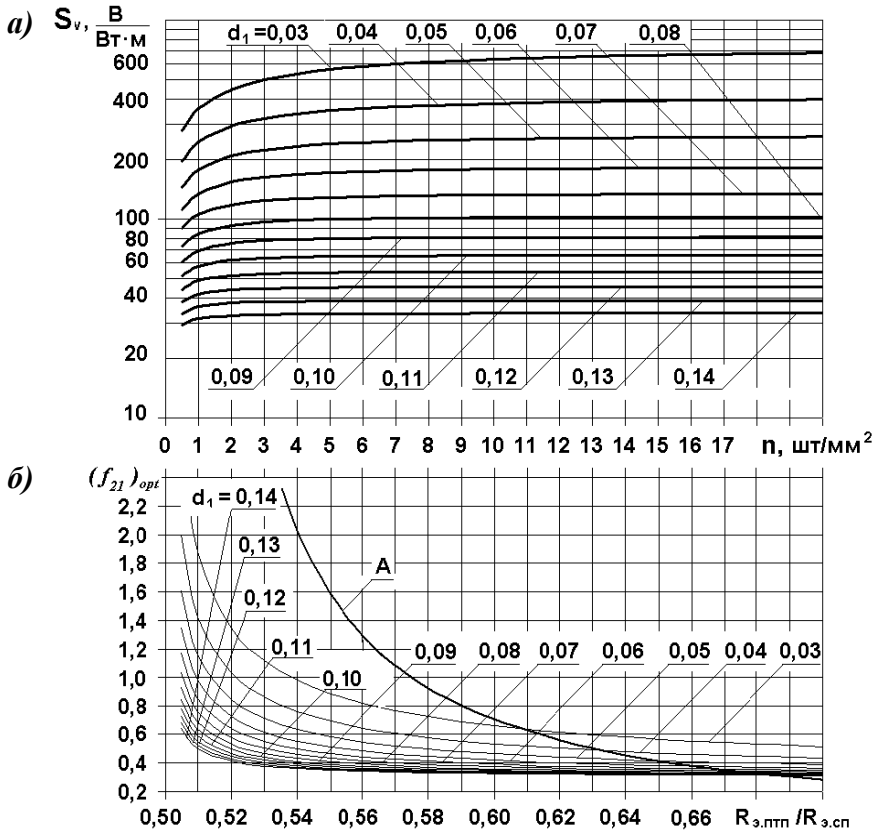
a – графики зависимости $S_v = f(n, d_1 = var)$;

б – графики зависимости $(f_{21})_{opt} = f(n, d_1 = var)$;

A – график зависимости значений $(f_{21})_{opt}$ от $R_{э.птт} / R_{э.сп}$

Рисунок Б.5. Номограмма для расчета
копель-серебряного ПТП.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

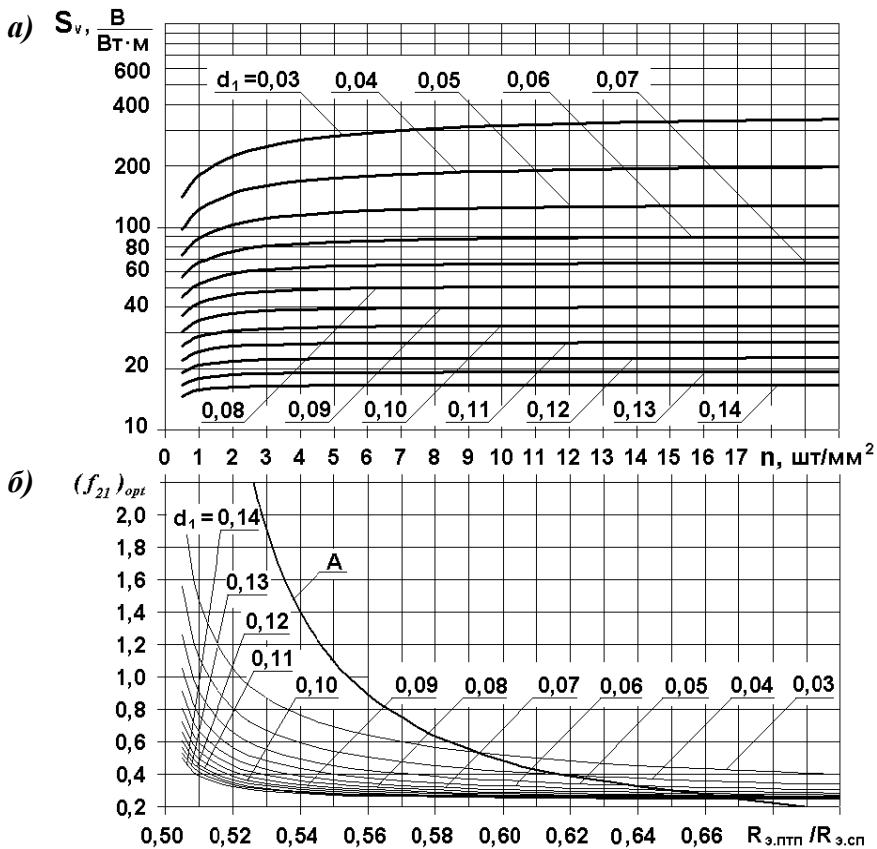


a – графики зависимости $S_v = f(n, d_1 = \text{var})$;

б – графики зависимости $(f_{21})_{opt} = f(n, d_1 = \text{var})$;

A – график зависимости значений $(f_{21})_{opt}$ от $R_{э.птт} / R_{э.сп}$

Рисунок Б.6. Номограмма для расчета
копель-железного ПТП.

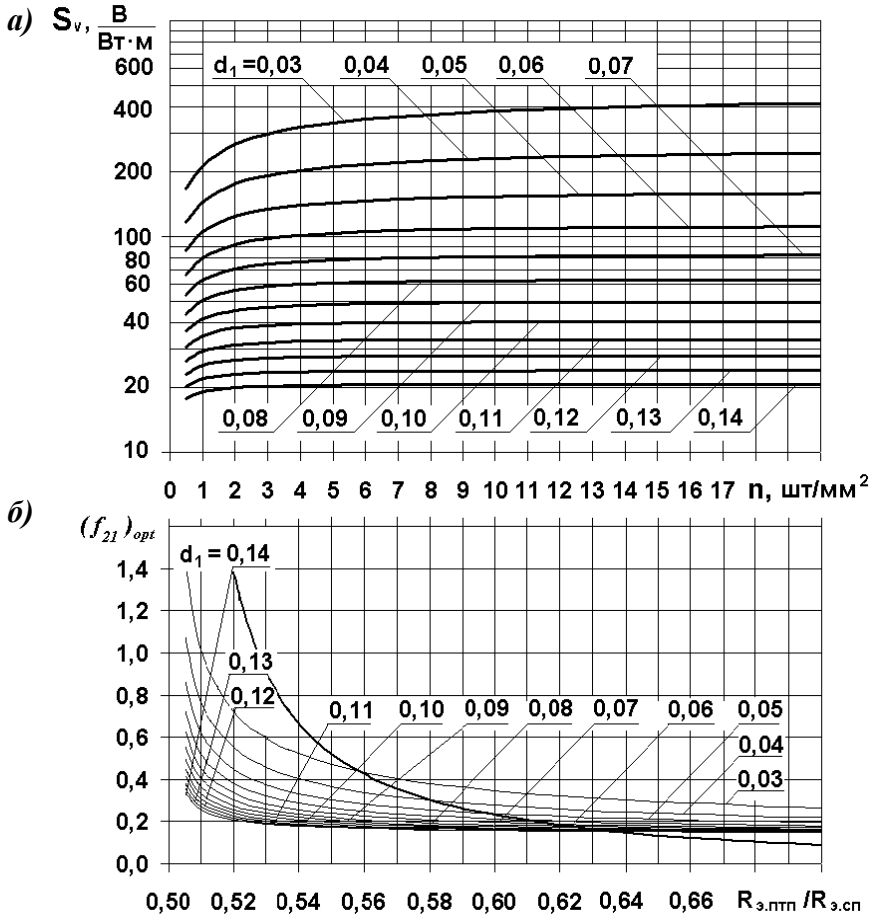


a – графики зависимости $S_v = f(n, d_1 = \text{var})$;

б – графики зависимости $(f_{21})_{opt} = f(n, d_1 = \text{var})$;

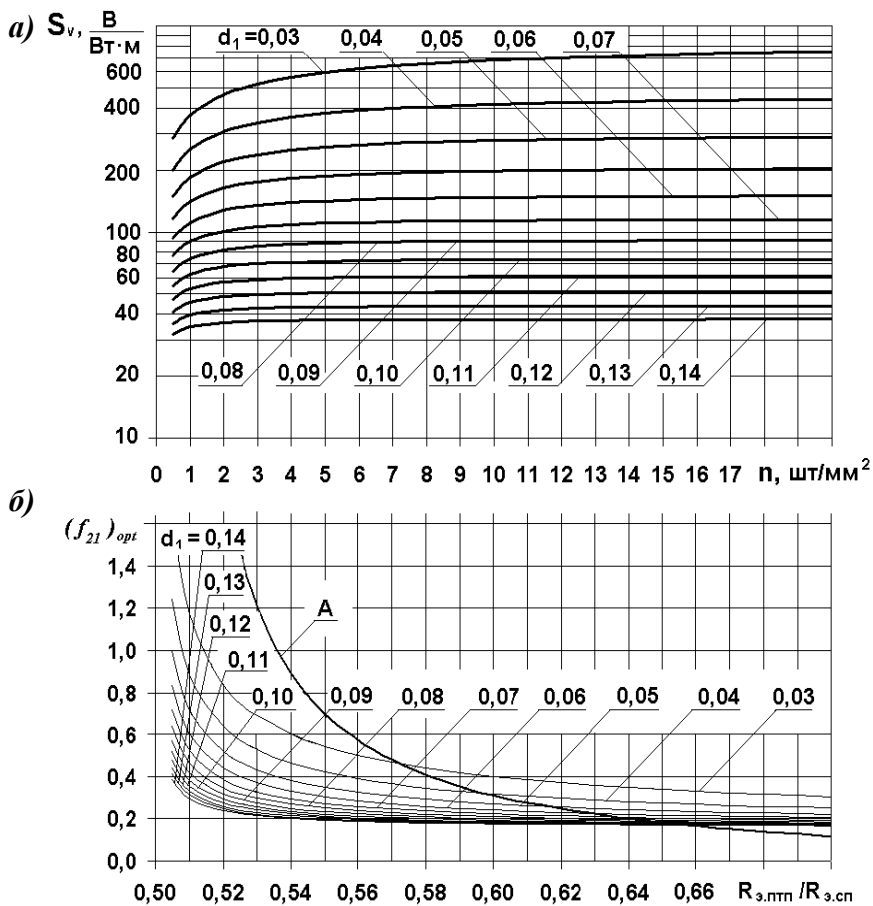
A – график зависимости значений $(f_{21})_{opt}$ от $R_{э.птп} / R_{э.сп}$

Рисунок Б.7. Номограмма для расчета
копель-никелевого ПТП.



- а – графики зависимости $S_v = f(n, d_1 = \text{var})$;
- б – графики зависимости $(f_{21})_{opt} = f(n, d_1 = \text{var})$;
- А – график зависимости значений $(f_{21})_{opt}$ от $R_{э.ПТП} / R_{э.СП}$

Рисунок Б.8. Номограмма для расчета нихром-никелевого ПТП.



а – графики зависимости $S_v = f(n, d_1 = \text{var})$;

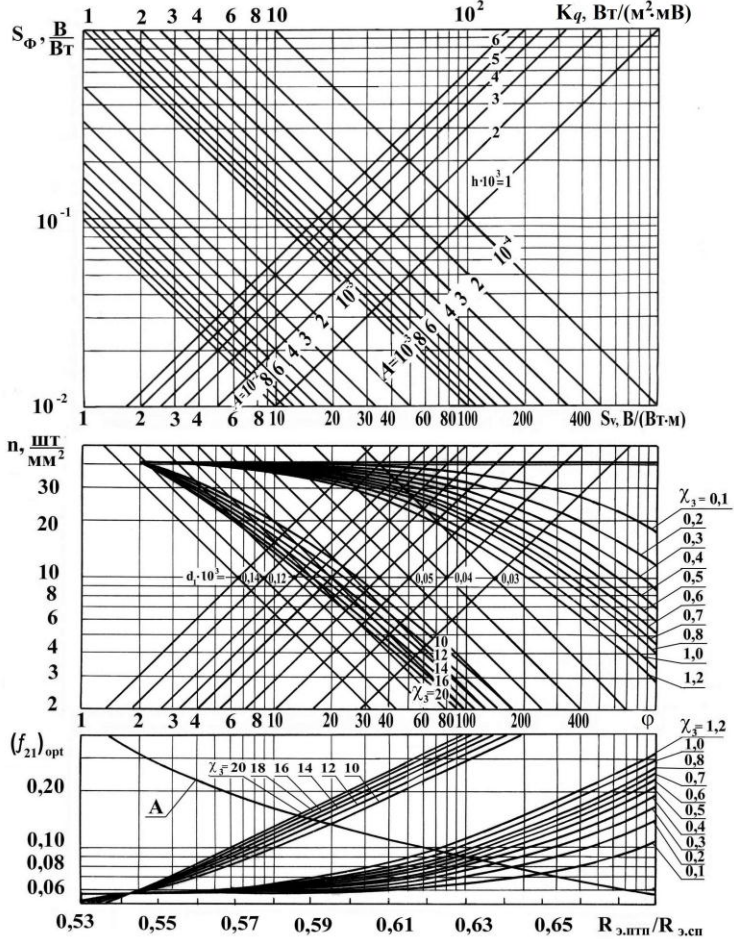
б – графики зависимости $(f_{21})_{opt} = f(n, d_1 = \text{var})$;

А – график зависимости значений $(f_{21})_{opt}$ от $R_{э.лпг} / R_{э.сп}$

Рисунок Б.9. Номограмма для расчета хромель-никелевого ПТП.

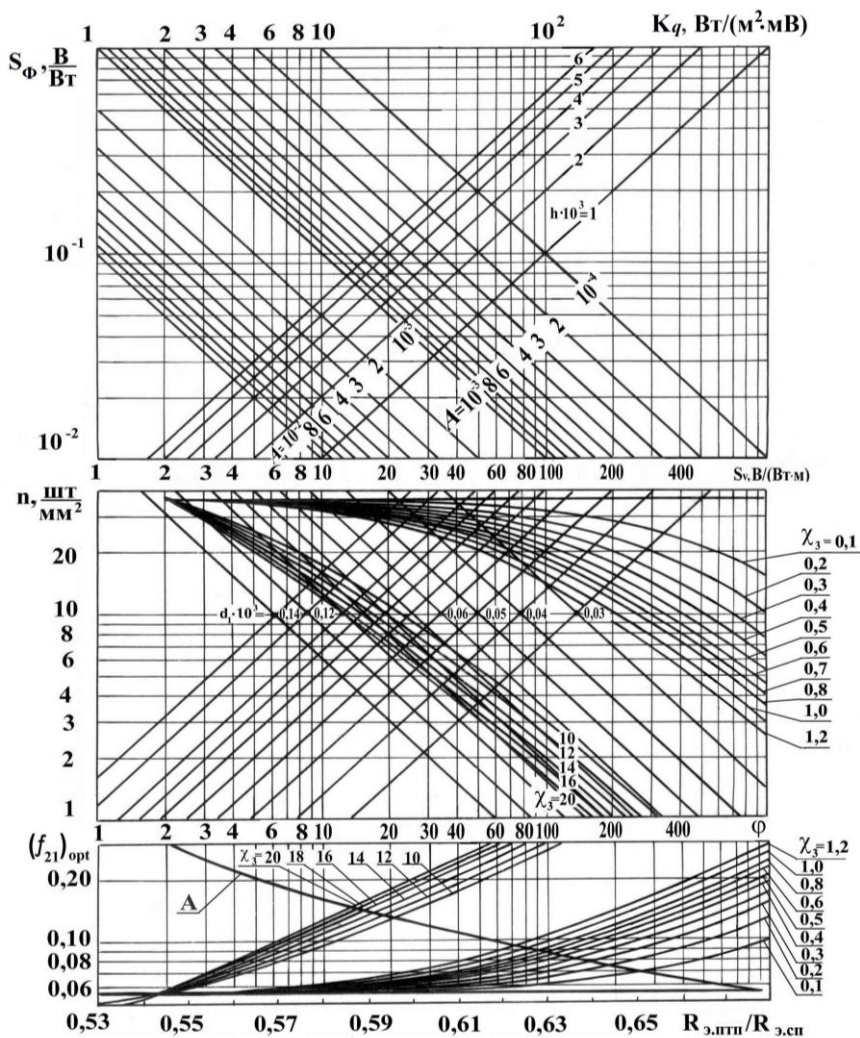
ПРИЛОЖЕНИЕ В

ОБОБЩЕННЫЕ НОМОГРАММЫ ДЛЯ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПТП



А – график соответствия значений $R_{э,пттп} / R_{э,сп}$ и $(f_{21})_{opt}$

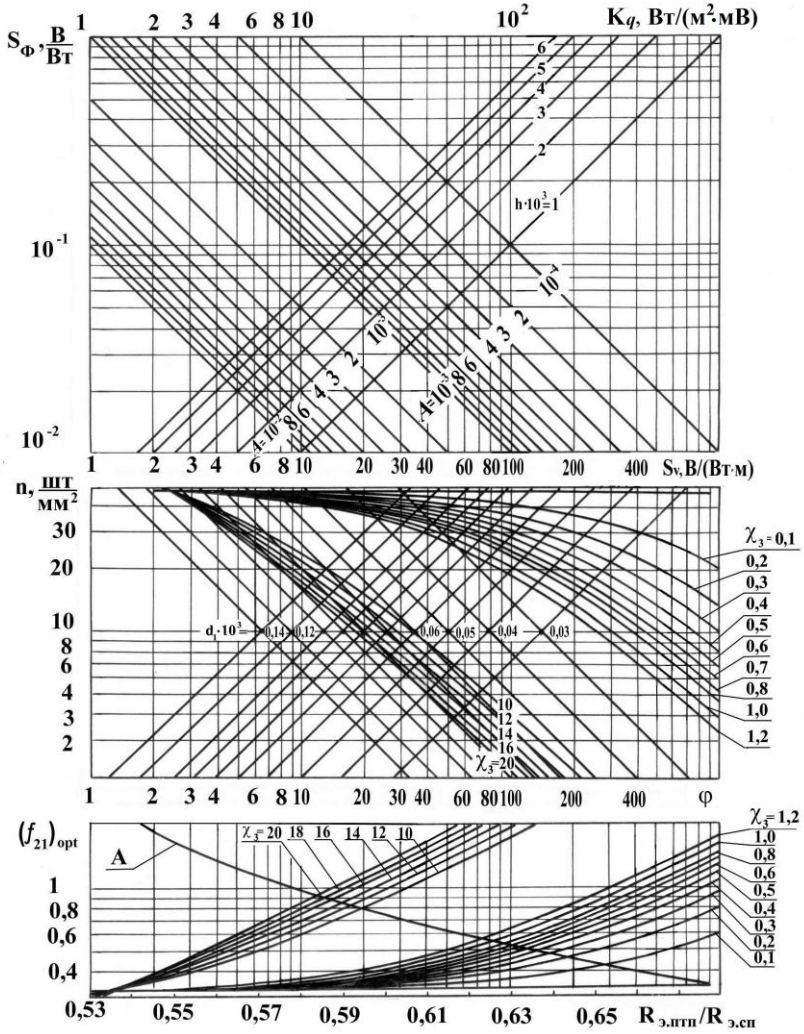
Рисунок В.1. Номограмма для расчета
константан-медных и копель-медных ПТП



А – график соответствия значений $R_{э,птп} / R_{э,сп}$ и $(f_{21})_{opt}$

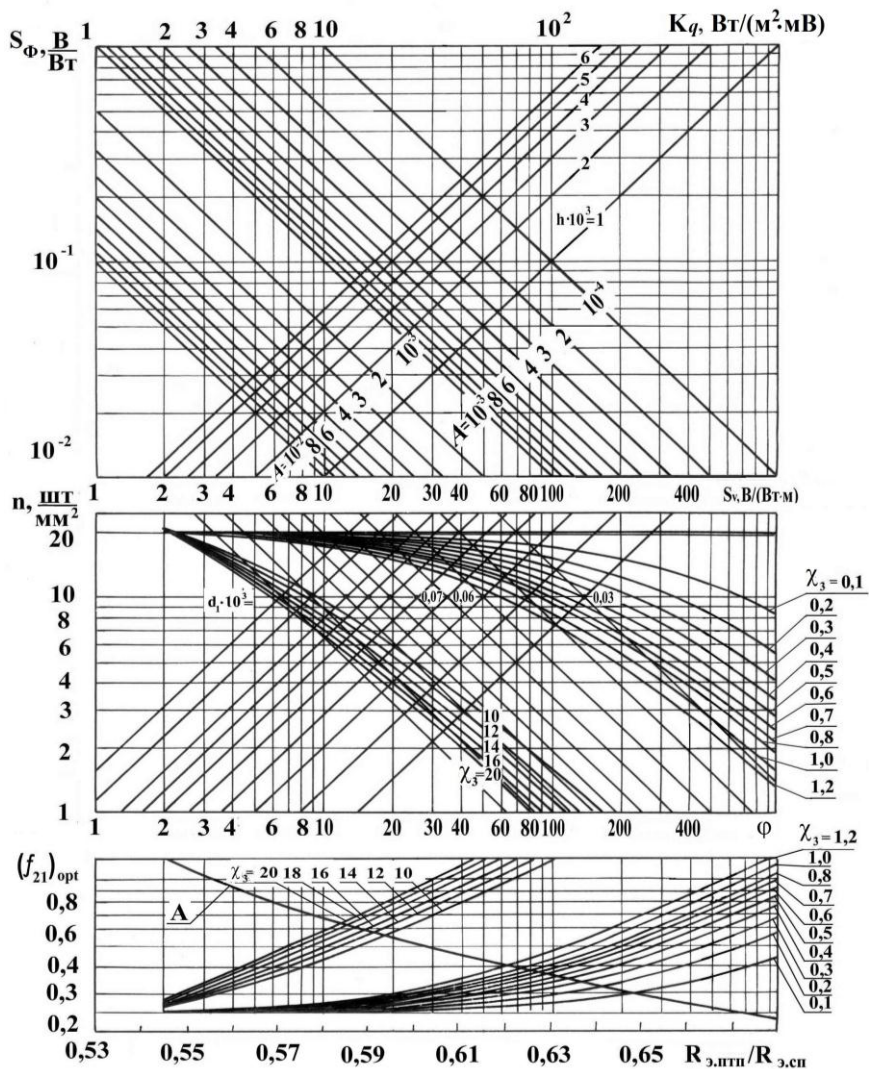
Рисунок В.2. Номограмма для расчета константан-серебряных ПТП

ПРИЛОЖЕНИЕ В



А – график соответствия значений $R_{э,птп} / R_{э,сп}$ и $(f_{21})_{opt}$

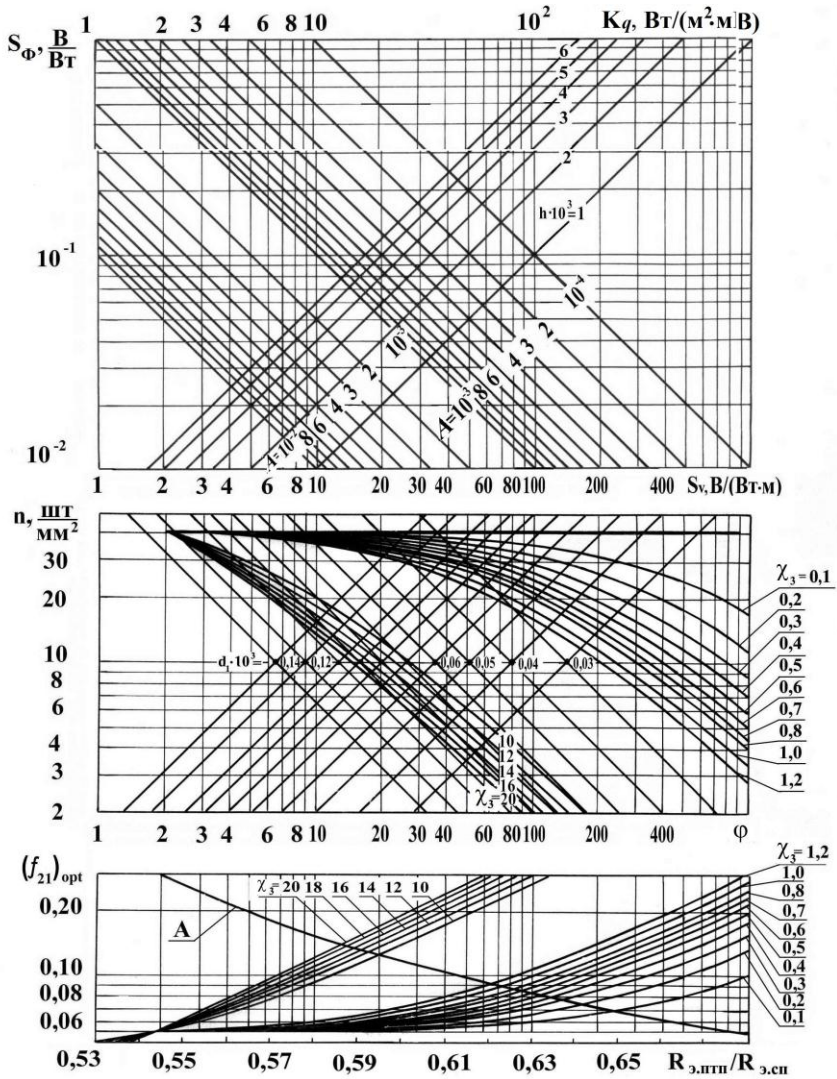
Рисунок В.3. Номограмма для расчета
константан-железных ПТП



А – график соответствия значений $R_{3,ПТТ} / R_{3,СП}$ и $(f_{21})_{opt}$

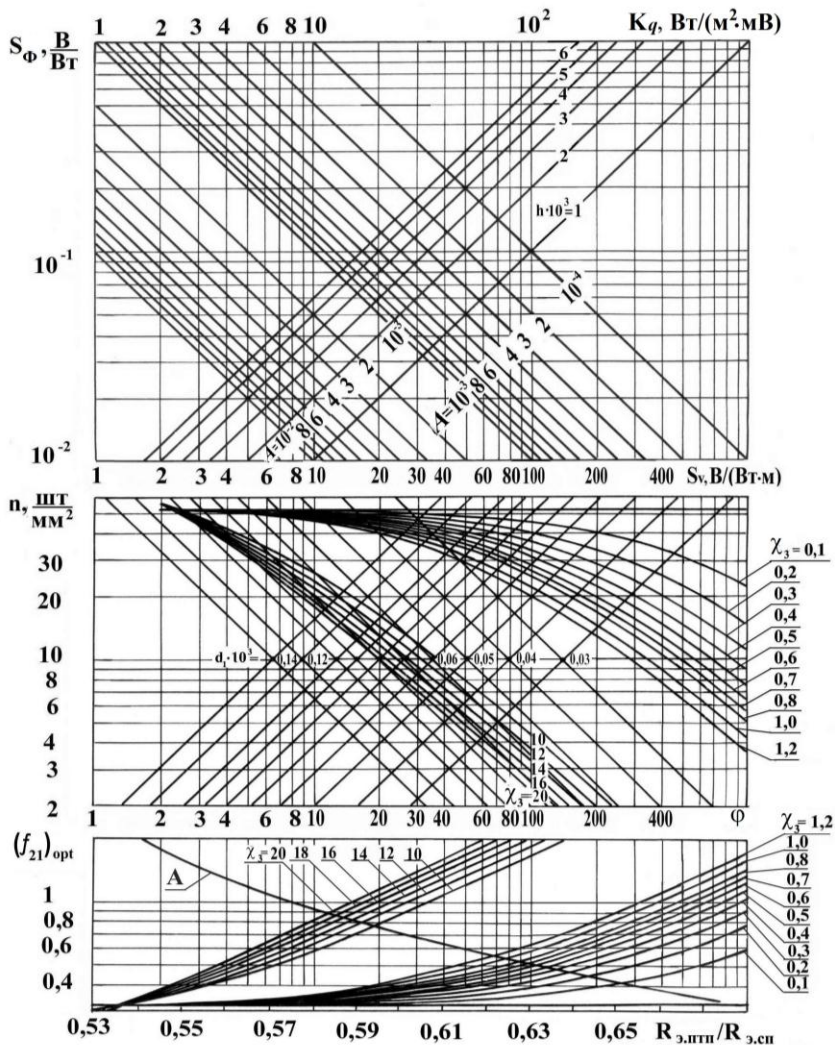
Рисунок В.4. Номограмма для расчета констант никелевых и копель-никелевых ПТП

ПРИЛОЖЕНИЕ В



А – график соответствия значений $R_{\text{э,ППП}} / R_{\text{э,СП}}$ и $(f_{21})_{\text{opt}}$

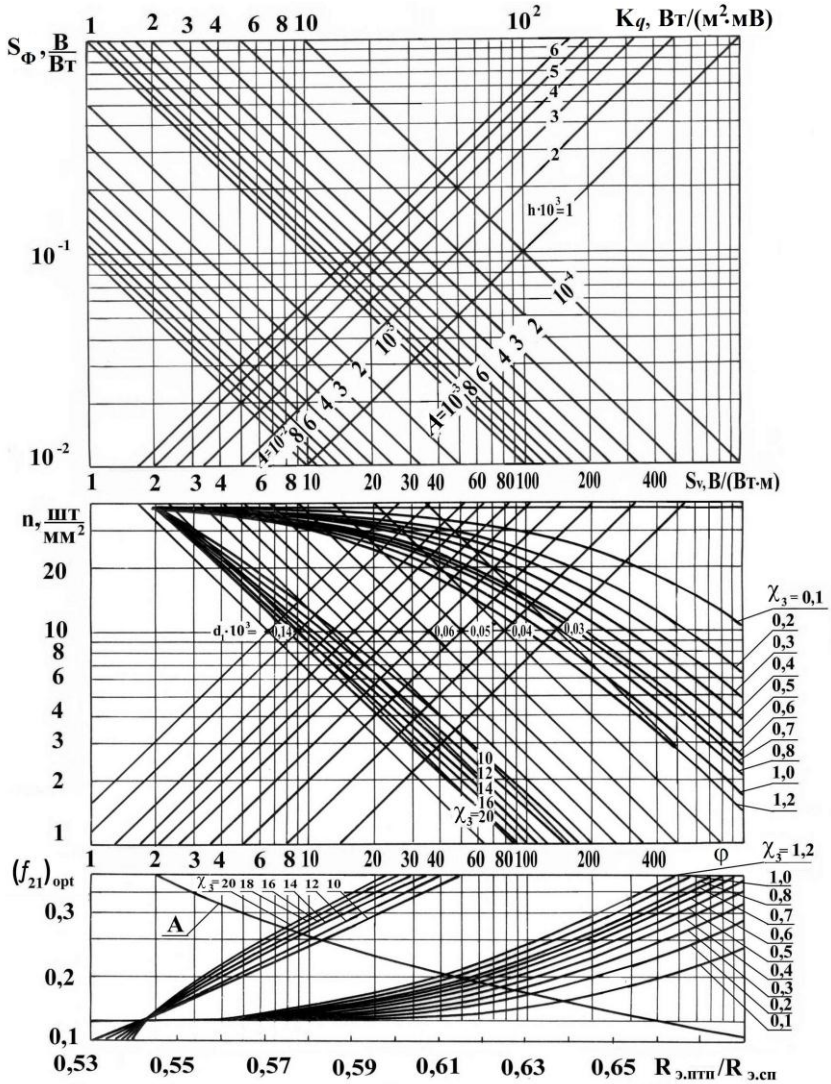
Рисунок В.5. Номограмма для расчета
копель-серебряных ПТП



А – график соответствия значений $R_{э,птп} / R_{э,сп}$ и $(f_{21})_{opt}$

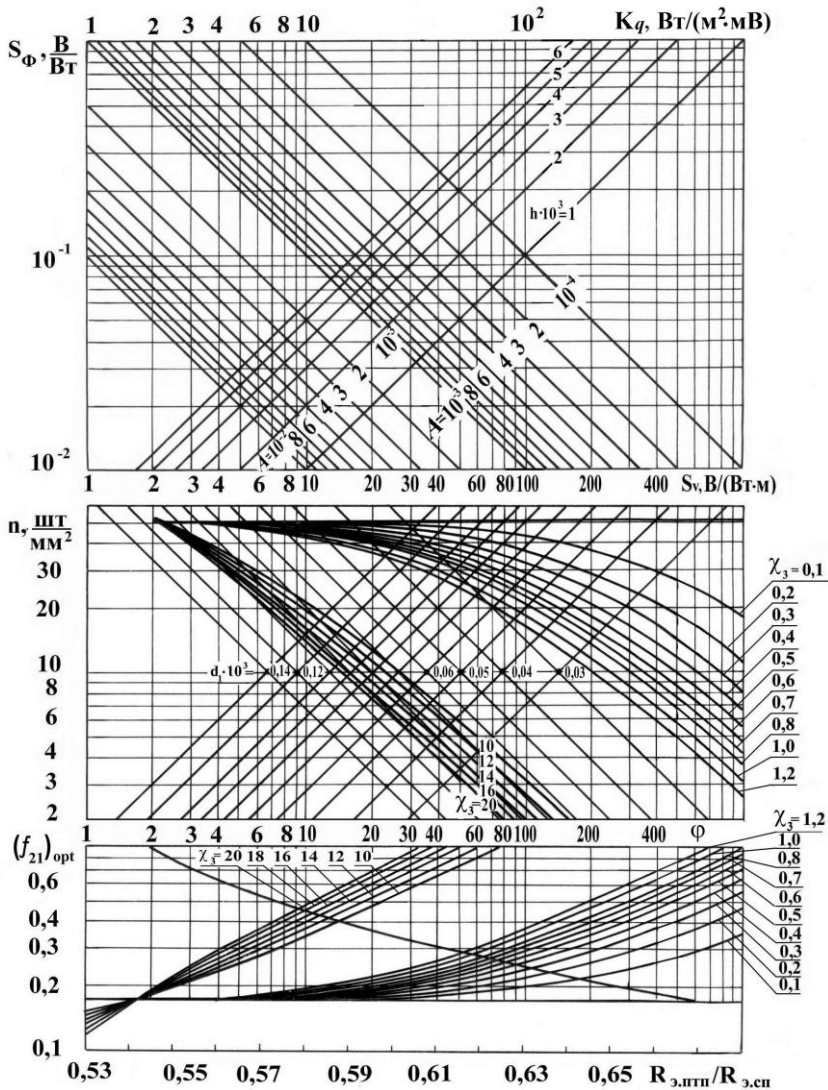
Рисунок В.6. Номограмма для расчета
копель-железных ПТП

ПРИЛОЖЕНИЕ В



А – график соответствия значений $R_{э,птп} / R_{э,сп}$ и $(f_{21})_{opt}$

Рисунок В.7. Номограмма для расчета
нихром-никелевых ПТП



А – график соответствия значений $R_{\Sigma, ПТП} / R_{\Sigma, СП}$ и $(f_{21})_{opt}$

Рисунок В.8. Номограмма для расчета хромель-никелевых ПТП

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 1. Методы и средства измерения
теплового потока**

Под редакцией д.т.н. Т. Г. Грищенко

Подп. к печати 10.03.2017.

Формат 60x80/16. Бумага офс. № 1.

Услов. печатн. лист. 19,2. Уч. – изд. лист. 20,6

Тираж 300 экз.

Отпечатано в ТОВ «Наш формат»

01042, г.Киев, пр. Мира, 7, оф.45