

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ

На правах рукописи



ДЕКУША ЛЕОНИД ВАСИЛЬЕВИЧ

УДК 536.629.7:536.2:536.6

**СРЕДСТВА ТЕПЛОМЕТРИИ НА БАЗЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА**

05.11.04 – приборы и методы измерения тепловых величин

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант
чл.-корр. НАН Украины, д.т.н.
профессор Бабак В.П.

Киев – 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, ИНДЕКСОВ И СОКРАЩЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ.....	9
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕПЛОПОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ.....	20
1.1 Классификация методов получения информации о тепловом потоке и его плотности	20
1.2 Средства измерения теплового потока и типы первичных преобразователей теплового потока.....	23
1.3 Учет искажений при измерении теплового потока с применением ПТП вида вспомогательной стенки.....	36
1.4 Мировые тенденции по созданию системы метрологического обеспечения единства в области измерения теплового потока и его плотности.....	41
1.4.1 Задачи и особенности метрологического обеспечения единства теплопоточных измерений.....	41
1.4.2. Поверочные схемы и эталонные средства измерения теплового потока и его плотности.....	54
1.4.2.1 Поверочные схемы для средств измерения потока теплового излучения.....	55
1.4.2.2 Поверочные схемы для средств контактного измерения теплового потока.....	64
1.5 Выводы и постановка задач исследования.....	83
ГЛАВА 2 ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ПЛОСКИМ ПТП НА РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТАХ.....	85
2.1 ПТП на изотермической поверхности металлической пластины.....	87
2.2 ПТП, вмонтированный в изотермическую пластину из высокотеплопроводного материала заподлицо с ее поверхностью.....	98
2.3 ПТП в полуограниченном массиве из высокотеплопроводного материала заподлицо с его поверхностью.....	103
2.4 ПТП внутри неограниченного сплошного массива.....	106
2.5 ПТП на поверхности полуограниченного сплошного массива.....	114
2.6 ПТП на конвективно охлаждаемой поверхности неограниченной пластины.....	122
2.7 ПТП на поверхности неограниченной пластины, конвективно охлаждаемой с двух сторон.....	127
2.8 Выводы по главе 2.....	141
ГЛАВА 3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ	

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПТП С УЛУЧШЕННЫМИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИМИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ.....	150
3.1 Термоэлектрические ПТП с тепловыми шунтами и температуровыравнивающими покрытиями.....	150
3.2 Повышение временной стабильности характеристик ПТП.....	160
3.3 Биспиральные термоэлектрические ПТП.....	180
3.4 Полиметаллические термоэлектрические ПТП.....	189
3.5 ПТП для исследования нестационарных тепловых процессов.....	194
3.6 Выводы по главе 3.....	211
ГЛАВА 4 МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ РАЗМЕРА ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА И ЕГО ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ.....	213
4.1 Требования к эталонной метрологической аппаратуре нового поколения и пути их выполнения.....	214
4.2 Метрологическая установка нового поколения для воспроизведения размера единицы плотности теплового потока (УВТ-1).....	226
4.2.1 Устройство и принцип действия установки.....	227
4.2.2 Методика определения функции преобразования	234
4.2.3 Эксплуатационные и метрологические характеристики установки и анализ погрешностей.....	238
4.3 Эталонные преобразователи теплового потока.....	248
4.4 Поверочная схема для средств измерения плотности теплового потока в Украине (проект).....	254
4.5 Радиационный компаратор (РГУ-2).....	259
4.6 Выводы по главе 4.....	274
ГЛАВА 5 ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ	276
5.1 Аппаратура для измерения высокоинтенсивного теплового потока....	276
5.1.1 ПТП для измерения плотности теплового потока при высокой интенсивности теплообмена	278
5.1.2 Автоматизированная установка для измерения параметров пламени при огневых испытаниях	282
5.2 Теплометрические приборы для измерения радиационного теплового потока и обеспечения огневых испытаний.....	290
5.3 Теплометрическое обеспечение строительной отрасли в Украине.....	299
5.3.1 Переносной прибор для экспресс-контроля коэффициента теплопроводности строительных материалов (ИТ-8).....	299
5.3.2 Лабораторная установка для измерения коэффициента	

теплопроводности теплоизоляционных и строительных материалов (ИТ-7С).....	308
5.3.3 Теплометрический метод и установка для измерения терморadiационных характеристик светопрозрачных материалов и покрытий (ИТРС-1).....	322
5.3.4 Установка для измерения теплового сопротивления стеклопакетов (ИТС-3).....	327
5.3.5 Компьютеризированная информационно-измерительная система для тепловых испытаний строительных ограждающих конструкций «Ресурс-С».....	335
5.4 Калориметрические установки для измерения теплоты сгорания топлива (КТС).....	340
5.5 Измерительная установка для синхронного термического анализа.....	347
5.6 ПТП для измерительной системы ракеты-носителя «Днепр».....	354
5.7 Микрокалориметр для определения тепловыделения топливосодержащих масс разрушенного реактора ЧАЭС.....	364
5.8 Выводы по главе 5.....	368
ГЛАВА 6 РАЗРАБОТКА НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ДЛЯ ОБЛАСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	372
6.1 Национальные стандарты Украины для области теплоточных измерений.....	373
6.2 Национальные стандарты Украины, гармонизированные с международными и европейскими в области теплофизических измерений.....	376
6.3 Методики измерения в области энергосбережения.....	379
6.4 Выводы по главе 6.....	381
ВЫВОДЫ	382
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	385
ПРИЛОЖЕНИЕ А Первичные преобразователи и переносные измерители теплового потока.....	438
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Описание основных элементов приборного оснащения стендов для аттестации средств измерения (СИ) теплового потока.....	452
ПРИЛОЖЕНИЕ В Решение уравнения теплопроводности при исследовании искажений температурных и тепловых полей в ПТП и контролируемом объекте.....	477
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Информация о метрологической аттестации теплометрических средств измерительной техники (СИТ).....	487
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Перечень нормативно-методических документов (НМД), разработанных с участием Л.В. Декуши (по состоянию на 2014 г).....	490

ПРИЛОЖЕНИЕ Е Информация о внедрениях теплометрических приборов	494
--	-----

ПЕРЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, ИНДЕКСОВ И СОКРАЩЕНИЙ

Условные обозначения:

A	–	площадь
C	–	константа
D	–	диаметр
E	–	сигнал электрический
h	–	высота, толщина
I	–	сила тока
K	–	коэффициент преобразования (градуировочный коэффициент)
k	–	геометрический параметр ПТП
l, L	–	длина
q	–	поверхностная плотность теплового потока
Q	–	количество теплоты
R	–	сопротивление тепловое (согласно индексу)
r	–	радиус
r, z	–	цилиндрические координаты
S	–	чувствительность; среднее квадратическое отклонение
T	–	температура
U	–	напряжение электрического тока
W	–	мощность электрическая
x, y, z	–	декартовы координаты
α	–	коэффициент теплообмена
Δ	–	разность; приращение; погрешность абсолютная
ϑ	–	температура безразмерная
ε	–	степень черноты (коэффициент эмиссии)
λ	–	коэффициент теплопроводности
ρ, ζ	–	безразмерные радиальная и продольная координаты
Θ	–	границы неисключенной систематической погрешности
θ	–	составляющая неисключенной систематической погрешности
σ	–	постоянная Стефана-Больцмана
φ	–	угловой коэффициент
Φ	–	тепловой поток

Индексы нижние:

o	–	начальный (неискаженный, действительный)
σ	–	суммарный
$бок$	–	боковой
v	–	вспомогательный

<i>ВЕРХ</i>	– верхний
<i>ИЗМ</i>	– измеренный
<i>ИТИ</i>	– источник теплового излучения
<i>К</i>	– контактный
<i>ЛОК</i>	– локальный
<i>ОК</i>	– объект контроля; ограждающая конструкция
<i>ОН</i>	– основной нагреватель
<i>ОС</i>	– окружающая среда
<i>П</i>	– поправочный
<i>ПОВ</i>	– поверхность
<i>ПР</i>	– приведенный; продолженный
<i>ПТП</i>	– преобразователь теплового потока
<i>РАД</i>	– радиометр; радиальный
<i>Э</i>	– эталонный
<i>ЭК</i>	– экран
<i>Эф</i>	– эффективный
<i>СПР</i>	– справочное
<i>СР</i>	– среднеинтегральный; средний
<i>ТС</i>	– теплосток; термостатируемый

Индексы верхние:

<i>A</i>	– аппроксимационный; адиабатический
<i>I</i>	– изотермический
<i>T</i>	– температура
<i>ρ</i>	– плотность теплового потока

Сокращения:

АЧТ	– абсолютно черное тело
ВНИИМ	– Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева
ДПТ	– дифференциальный преобразователь температуры
ИК	– инфракрасный
ИТИ	– источник теплового излучения
ИТТФ	– Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины
МХ	– метеорологические характеристики
НПО	– научно-производственное объединение
НСП	– неисключенная систематическая погрешность

ОК	– объект контроля; ограждающая конструкция
ОС	– окружающая среда
ПК	– персональный компьютер
ПО	– программное обеспечение
ПТ	– преобразователь температуры
ПТП	– преобразователь теплового потока
ПТИ	– приемник теплового излучения
СИ	– средство измерения
СИТ	– средство измерительной техники
СКО	– среднее квадратическое отклонение
СНИИМ	– Сибирский научно-исследовательский институт метрологии
ТРХ	– терморadiaционные характеристики
ТСМ	– топливосодержащий материал
ТФС	– теплофизические свойства
ТФХ	– теплофизические характеристики
ТЭДС	– термоэлектродвижущая сила

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

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Превращение энергии является важнейшим проявлением существования материального мира. Полнота информации в этой области определяет уровень наших 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 протекания этих процессов. Известно, что любое физическое явление имеет две стороны: количественную и качественную. В связи с этим контроль переноса энергии, сопровождающего конкретное физическое явление, включает в себя, как правило, измерение двух величин. Например, при исследовании переноса электрической энергии исчерпывающая информация о процессе может быть получена путем измерения электрического напряжения и силы тока (или напряжения и электрического сопротивления).

Контроль процессов теплообмена также базируется на измерении двух величин: температуры и теплового потока. Первая величина характеризует качественную сторону теплового явления, а вторая – количественную. Как известно, уже давно область измерения температуры традиционно хорошо обеспечена аппаратурой и метрологией. Что касается измерения теплового потока и его поверхностной плотности, то исторически сложилось так, что долгое время теплоточные измерения совмещали с температурными измерениями благодаря простоте и доступности последних. Однако, разработки средств измерения (далее – СИ) теплового потока и его поверхностной плотности и достигнутые аппаратурные и методические успехи способствовали неизменно появлению новых прикладных задач, решение которых ставило новые требования к аппаратуре и теории. Цепная реакция такого развития

привела к 60-ым годам прошлого столетия к образованию самостоятельной области измерения – теплотрии [1-5].

Теплотрические средства измерительной техники (далее – СИТ) находят применение 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, с целью определения потерь теплоты от теплотрасс, зданий и сооружений, технологических устройств и аппаратов;

- измерение теплофизических характеристик (далее – ТФХ) с целью исследования эффективности теплозащитных и теплопередающих свойств материалов, одежды, ограждающих конструкций зданий и сооружений, холодильного оборудования, хранилищ и прочее;

- измерение тепловыделения технических и биологических объектов с целью оптимизации многочисленных процессов и систем.

В настоящее время в связи с решением проблем энерго- и ресурсосбережения приобрели особую актуальность исследования и модернизация теплоэнергетических объектов и энергоемких технологий. В этих условиях существенное значение имеют измерения, оперативный контроль и регулирование тепловых параметров, среди которых значительное место занимает тепловой поток, ставший сегодня таким же информативным параметром, как температура, давление, расход и др. Именно с этим обстоятельством связано выделение теплотрии в самостоятельное научное направление экспериментальной теплофизики, актуальность которого подчеркивается еще и тем, что неудовлетворенный спрос на простые и надежные СИ теплового потока непрерывно растет.

Если еще три-четыре десятилетия тому назад исследователям-экспериментаторам приходилось самим создавать необходимые теплотметрические СИТ, то в настоящее время как у нас в стране, так и за рубежом появился ряд организаций и фирм, специализирующихся на выпуске отдельных первичных измерительных преобразователей теплового потока (далее – ПТП).

Ведущие позиции в этом занимает Институт технической теплофизики (далее – ИТТФ) Национальной академии наук Украины (далее – НАН Украины), в котором разрабатываются и изготавливаются термоэлектрические ПТП вида вспомогательной стенки, удовлетворяющие рекомендациям стандартов ДСТУ 3756 и ГОСТ 30619 [6, 7], а также специальным требованиям Заказчика.

С 60-х годов прошлого столетия в ИТТФ выполнялись разработки и осуществлялись поставки уникальной теплотметрической аппаратуры по заданиям предприятий Министерств общего машиностроения, среднего машиностроения, авиационной промышленности, например, НПО имени С. П. Королева, НПО имени С.А. Лавочкина, НПО «ОРИОН» и многие другие. За прошедшее время в ИТТФ были разработаны основы теплотметрии [3], создан комплекс базовых измерительных ПТП для непосредственного измерения плотности теплового потока в широких диапазонах значений плотности теплового потока и рабочей температуры и специальной теплотметрической аппаратуры для различных условий применения, а также методов и средств метрологического обеспечения теплотпоточных измерений [8-10].

В данной диссертационной работе, являющейся логическим продолжением предыдущих исследований и разработок по теплотметрии, основное внимание уделено дальнейшему усовершенствованию и разработке новых конструкций ПТП с улучшенными эксплуатационными и метрологическими характеристиками, созданию на их основе теплофизических

приборов нового поколения и совершенствованию системы метрологического обеспечения теплотрии в Украине.

Такое направление исследований по теплотрии с обеспечением единства и правильности измерения теплового потока и его плотности, осуществляемого с применением усовершенствованных ПТП, является весьма целесообразным и актуальным, поскольку открывает пути получения более точной и достоверной информации о теплофизических свойствах (далее – ТФС) веществ и материалов и тепловых параметрах технологических процессов и оборудования при научных исследованиях и промышленном производстве.

Связь работы с научными программами, планами, темами

Диссертация выполнена в отделе теплотрии ИТТФ в рамках приоритетных направлений развития науки и техники Украины, определенных Законом Украины «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» №2623-3 от 11.07.2001 (ст.7) с учетом внесенных изменений №2623-14 и №2623-6 от 09.09.2010 г., по такому направлению ИТТФ «Теорія вимірювання теплових величин та створення нових теплофізичних приладів і систем» по следующим проблемам, программам, темам и научным проектам:

Проблема 1.9.1.5 «Методи, засоби і метрологічне забезпечення теплофізичних вимірювань»:

– тема 1.7.6.12 «Разработка в интересах энергосбережения элементной базы теплотрии, включая новые типы первичных преобразователей и теплотрических устройств и средства их метрологического обеспечения» (1990-1993г., № ГР UA01013901P, соискатель – ответственный исполнитель);

– тема 1.7.6.52 «Исследование и создание первичных преобразователей теплового потока с расширенным диапазоном теплофизических характеристик и разработка на их основе в интересах теплосбережения нового поколения измерителей теплового потока и температуры» (1994-1996г., № ГР 0194U027206, соискатель – ответственный исполнитель);

– тема 1.7.1.498 «Розробка теплометричного витратоміра та приладів, що походять із нього для урахування витрат води, споживання теплоти та тепловтрат в тепломережах» (1998-2002 г., № ГР 0198U005114, соискатель – ответственный исполнитель);

– тема 1.7.1.569 «Розробка теплометричних основ метрологічного забезпечення теплометрії» (2000-2002г., № ГР 0100U002419, соискатель – ответственный исполнитель);

– тема 1.7.1.570 «Теоретичні основи розрахунку та проектування установ для визначення теплопровідності» (2001-2003г., № ГР 0101U002314, соискатель – ответственный исполнитель);

– тема 1.7.1.643 «Теоретичні та прикладні основи проектування зразкових засобів відтворення одиниці густини теплового потоку» (2003-2005г., № ГР 0103U005193, соискатель – ответственный исполнитель);

– тема 1.7.1.670 «Розробка тепломасометричного блоку та проведення досліджень кінетики сушіння матеріалів малої маси» (2005-2006г., № ГР 0105U006841, соискатель – научный руководитель);

– тема 1.7.1.692 «Створення вихідного еталону для відтворення, зберігання та передавання густини теплового потоку» (2006-2008г., № ГР 0106U004619, соискатель – ответственный исполнитель);

– тема 1.7.1.709 «Дослідження питомої теплоти випаровування різних рідин та розробка для цього диференціального мікрокалориметра» (2007-2008г., № ГР 0107U002380, соискатель – научный руководитель);

– тема 1.7.1.822 «Розробка приладів та методики для теплотехнічної паспортизації будівель та споруд різного призначення» (2009-2011г., № ГР 0109U002570, соискатель – ответственный исполнитель);

– тема 1.7.1.847 «Дослідження методів і засобів прецизійного вимірювання коефіцієнта теплопровідності та створення еталонної установки» (2012-2014г., № ДР 0112U001949, соискатель – научный руководитель).

Целевая комплексная программа РЕСУРС «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин»:

– тема Р5.1 «Подовження ресурсу роботи елементів котельного обладнання децентралізованої енергетики» (2004-2006г., по договорам № Р.5.1-2004/656 от 01.04.2004г., №ГР 0104U006498 и № Р 5.1-2006/656 от 03.04.2006г., №ГР 0106U004765, соискатель – ответственный исполнитель).

Целевая комплексная программа «Науково-технічні основи вирішення проблем енергозбереження»:

– тема «Розробка універсальної комп'ютеризованої системи вимірювання теплових потоків на базі малоінерційних перетворювачів» (2006-2008г., по договорам № 700-2004 от 27.06.2006г., № ГР 0106U009608; № 700/1 от 05.04.2007г., №ГР 0107U005915; № 700/2-2008 от 14.04.2008г., № ГР 0108U002710, соискатель – научный руководитель).

План государственной стандартизации Украины:

– разработка национальных (ДСТУ 3756-98 и ДСТУ 4035-2001) и межгосударственных (ГОСТ 30619-98 и ГОСТ 25380-2001) стандартов по договору № 721-95/827-95 с УкрНИУЦ Госстандарта Украины к теме 3.02.2.102;

– разработка национальных стандартов Украины, гармонизированных с международными (ISO) и европейскими (EN) стандартами (2004-2009г., №№ ГР 0104U009488, 0104U009489, 0106U006951, 0107U2382, 0108U009016, 0109U007915);

Общегосударственная программа реформирования и развития жилищно-коммунального хозяйства Украины на 2009-2014гг. по направлению «Прикладні наукові і науково-технічні розробки за державними програмами у сфері житлово-комунального господарства»:

– тема «Дослідження та розроблення науково-обґрунтованих пропозицій щодо правил вимірювання температури повітря у житлових приміщеннях і температури гарячої води в точці водозабору» (2012-2013 г., №ГР0112U008408, соискатель –научный руководитель);

Цель и задачи исследования

Цель исследования – развитие научных, технических и нормативных принципов создания средств теплотрии на базе термоэлектрических преобразователей теплового потока вида вспомогательной стенки.

Объект исследования – процесс измерения тепловых величин и теплофизических характеристик физических объектов.

Предмет исследования – методы и средства теплотрии на базе термоэлектрических преобразователей теплового потока и система их метрологического обеспечения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи:

- исследовать методические погрешности измерения плотности теплового потока на объектах контроля различных типов, обусловленные искажениями полей температуры и теплового потока, и теоретически обосновать структуру преобразователей теплового потока с улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками;

- разработать эталонные средства измерения для воспроизведения, хранения и передачи размера единицы измерения плотности теплового потока;

- на основании всестороннего исследования тепловых процессов и процесса измерения тепловых величин обосновать основные принципы реализации схемы метрологической поверки средств измерения плотности теплового потока;

- разработать, изготовить, аттестовать и внедрить в научно-производственный комплекс Украины средства теплотрии для решения различных прикладных задач в широком динамическом диапазоне тепловых величин;

- создать систему метрологического обеспечения и нормативные документы (стандарты и методики) для обеспечения единства измерений тепловых величин и теплофизических характеристик.

Методы исследования – для решения поставленных задач использованы методы теории теплообмена, положения термодинамики, теплофизики, методы

математического моделирования, вычислительного и инженерно-физического эксперимента, методы прикладной метрологии.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Теоретически обоснована и предложена структура полиметаллических ПТП, изготовленных из материалов, которые не подлежат технологической операции волочения, что позволило повысить чувствительность ПТП.

2. Обоснованы пути уменьшения основных составляющих методической погрешности измерения плотности теплового потока и разработаны рекомендации по выбору теплофизических характеристик элементов конструкции и конструктивно-технологических особенностей построения ПТП.

3. На основании анализа процесса измерения тепловых величин определены основные источники возникновения методических погрешностей измерения плотности теплового потока на объектах контроля различных типов.

4. Впервые разработаны и предложены способы улучшения метрологических характеристик ПТП с применением никелевого покрытия основного термоэлектрода, что дало возможность расширить температурный диапазон работы ПТП на область выше точки Кюри для никеля.

5. Впервые исследованы и предложены, при конструировании термоэлектрических ПТП, применение пар термоэлектродных материалов константан-никель и копель-никель, что позволило расширить диапазон измерения и увеличить стабильность во времени характеристик ПТП.

6. Получила дальнейшее развитие теория проектирования ПТП, что стало базой для создания новых типов приборов с улучшенными метрологическими характеристиками для определения теплофизических свойств изделий и материалов.

7. Разработаны теоретические основы проектирования ПТП с уменьшенным тепловым сопротивлением для измерения плотности теплового потока в условиях высокоинтенсивного теплообмена.

8. Развита теория проектирования ПТП специального назначения для теплотрии неустановившихся процессов теплообмена.

9. Обоснованы основные принципы создания системы метрологического

обеспечения единства теплоточных измерений.

10. Разработана система нормативных документов и методик для теплоточных измерений, в частности, межгосударственный стандарт на термоэлектрический ПТП вида вспомогательной стенки.

Практическое значение полученных результатов:

1. Разработаны рекомендации по выбору параметров ПТП с учетом условий их применения, обеспечивающих уменьшение методической погрешности теплоточных измерений.

2. Созданы и внедрены в научно-практический комплекс Украины метрологические установки нового поколения для воспроизведения и передачи размера единицы измерения плотности теплового потока.

3. Создан комплекс теплотрических приборов, установок и систем для измерения коэффициента теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов, теплового сопротивления стеклопакетов, коэффициента эмиссии материалов в длинноволновой области спектра, теплоты гидратации бетонов и цемента, для тепловых испытаний строительных ограждающих конструкций в лабораторных и натуральных условиях с улучшенными метрологическими характеристиками.

4. Впервые в Украине созданы универсальные калориметры для определения теплоты сгорания твердых, жидких и газообразных топлив.

5. Впервые в Украине создана установка синхронного теплового анализа, предназначенная для измерения теплоты испарения и теплоемкости растительного сырья и биотоплива.

6. Впервые в Украине созданы и внедрены ПТП для контроля тепловой нагрузки на головной аэродинамический обтекатель ракеты-носителя типа «Днепр» при выводе на орбиту космических аппаратов.

7. Впервые в Украине создан микрокалориметр для диагностирования тепловыделения топливосодержащих масс разрушенного энергоблока Чернобыльской АЭС.

8. Разработана система нормативных документов и методик для теплоточных измерений, в том числе межгосударственный стандарт на термоэлектрический ПТП вида вспомогательной стенки.

Личный вклад соискателя состоит в постановке задач исследований и выборе методов их решения, в интерпретации и обобщении научных результатов, а также разработке большой гаммы теплотеметрических СИТ.

В работах, выполненных вместе с другими соавторами, автору диссертационной работы принадлежит выбор направления исследований, развитие теоретических основ построения ПТП с заданными характеристиками в зависимости от условий их эксплуатации, идеи создания теплофизических приборов на основе ПТП, обоснование ключевых научных положений, положенных в основу разработанных нормативных документов, а также методики проведения натурных теплотехнических испытаний с применением созданных СИТ.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на XI Всеакадемической школе по проблемам метрологического обеспечения и стандартизации, г. Санкт-Петербург, 1993 г.; V научно-технической конференции «Метрологічне забезпечення температурних і теплофізичних вимірювань», г. Харьков, 1994 г.; международных научно-практических конференциях «Региональные проблемы энергосбережения в децентрализованной теплоэнергетике», г. Киев (1999, 2000 гг.); международных научно-технических конференциях «Метрология и измерительная техника», г. Харьков, (1999, 2004, 2006, 2008, 2010 гг.); конференциях СНГ с международным участием «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики», г. Севастополь (2002, 2004 гг.); международных научно-практических конференциях «СЭТТ: Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)», г. Москва, (2002, 2005, 2008 гг.); международной конференции «Температура-2003», г. Львов, 2003 г.; международных конференциях «Проблемы

промышленной теплотехники», г. Киев, (2005, 2007, 2011, 2013 гг.); российской конференции по теплофизическим свойствам веществ, г. Санкт-Петербург, (2005, 2008 гг.); V международной научно-практической конференции «Проблемы учета теплоты и воды в Украине», г. Киев, (2006, 2008, 2010, 2013 гг.); XV международном семинаре метрологов «Методы и техника преобразования сигналов при физических измерениях МСМ'07», г. Львов, 2007 г.; III международной научно-практической конференции «Обеспечение единства измерений физико-химических и оптико-физических величин: ХИММЕТ», г. Киев (2008, 2011 гг.); международной научно-технической конференции «Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ», г. Санкт-Петербург, 2010 г.; III международной конференции «Космические технологии: настоящее и будущее (Передовые космические технологии на благо человечества)», г. Днепропетровск, 2011 г.; международных научно-технических конференциях «Энергосбережение в строительстве. Современные конструктивные системы, эффективные материалы и инженерное оборудование», г. Киев (2013, 2014 гг.); международной научно-технической конференции «Системы 2013 – Томография и термометрия, метрологическое обеспечение измерений и испытаний», г. Львов, 2013 г.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 45 научных работах, в том числе, 35 статей в специализированных изданиях, входящих в перечень Министерства образования и науки Украины, 6 публикаций в изданиях, входящих в наукометрические базы данных, и 4 патента Украины.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, выводов, списка использованных источников из 444 наименований и 6 приложений. Содержание и основные результаты диссертационной работы изложены на 495 страницах, в том числе 320 страниц основного текста, 155 рисунков и 42 таблицы на 117 страницах. Объем приложений – 58 страниц.

ГЛАВА 1

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕПЛОПОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

1.1 Классификация методов получения информации о тепловом потоке и его плотности

Любое физическое явление имеет две стороны – качественную и количественную. Не составили исключения и тепловые явления, качественную сторону которых характеризует температура, а количественную – тепловой поток или количество теплоты. Области познания, для которых актуальны теплоточные измерения, чрезвычайно разнообразны. Получение информации о тепловом потоке и его плотности развивалось двумя путями. Один, базирующийся на измерении температуры и численном решении уравнения теплопроводности, описывающего исследуемый процесс, получил название аналитического, другой, основанный на применении специальных измерительных средств, – экспериментального.

Аналитические методы сводятся к решению задачи восстановления граничных условий второго рода на поверхности объекта контроля (далее – ОК), при этом применяются различные способы решения уравнения теплопроводности [11-22].

Прямым аналитическим методом определения плотности теплового потока является градиентный метод, по которому ее значение находят по температурному градиенту на поверхности теплообмена согласно соотношению:

$$q = -\lambda \cdot gradT = -\lambda \cdot (\partial T / \partial x)_{пов}, \quad (1.1)$$

где q – поверхностная плотность теплового потока; λ – коэффициент теплопроводности материала стенки; $gradT_{пов}$ – градиент температуры в направлении нормали к изотермической поверхности.

Градиентный метод позволяет определять значения теплового потока при произвольном изменении температуры и тепловой нагрузки вдоль поверхности

теплообмена в стационарных и нестационарных условиях. Основные его недостатки – трудности подготовки рабочего участка, большой объем вычислений и невозможность подтверждения полученной информации путем метрологической аттестации, а также, значительными погрешностями, обусловленными необходимостью измерения граничной температуры в процессе эксперимента и определения температурного поля, замены температурного градиента на отношение конечных значений разности температуры и толщины стенки ($gradT \approx \Delta T / h$), а также знания коэффициента теплопроводности материала стенки.

Экспериментальный путь получения информации о тепловом потоке, основанный на применении первичных измерительных ПТП или специальных измерительных устройств, оказался на практике более предпочтительным, так как при сравнительно простых методиках измерения дает возможность применения этих же средств не только в научных исследованиях, но и при контроле и регулировании технологических процессов в самых разных областях народного хозяйства.

В основе любого экспериментального метода лежит физический принцип, отражающий связь между теплотой и каким-либо физическим явлением, которая проявляется через количественное изменение соответствующей физической величины под воздействием теплоты, например, геометрических размеров, электрических параметров, энтальпии и др. Регистрация этого изменения позволяет найти искомый тепловой поток (в Вт) или его плотность (в Вт/м²).

При решении многочисленных прикладных задач для определения теплового потока чаще применяют различные экспериментальные методы, систематическое описание которых впервые было выполнено О. А. Геращенко [1-4] и позднее – в работах [23-29]. Однако, наиболее существенные результаты при становлении и развитии теплотрии получены в ИТТФ [30-42].

На рисунке 1.1 систематизирована информация о методах получения информации о тепловом потоке и его плотности.

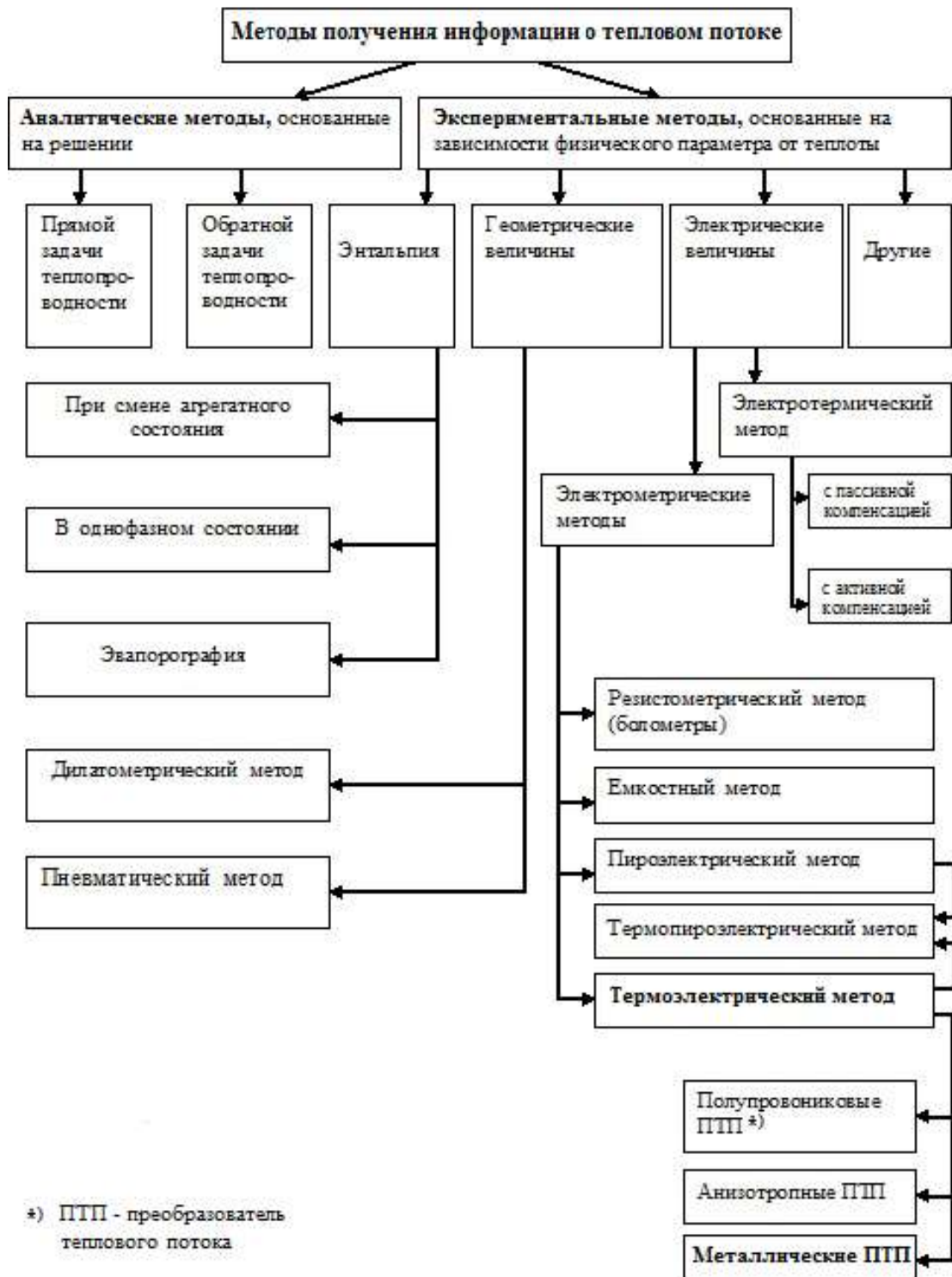


Рисунок 1.1 – Классификация методов получения информации о тепловом потоке и его плотности

1.2 Средства измерения теплового потока и типы первичных преобразователей теплового потока

Тезис о многообразии, справедливый для методов получения информации о тепловом потоке, в не меньшей степени относится и к соответствующим СИТ. В первую очередь, это определено неоднозначностью рассматриваемой физической величины, определяемой видом теплопереноса, в связи с чем имеются СИТ для измерения кондуктивного, конвективного, радиационного и сложного теплового потока и его плотности в стационарном и нестационарном тепловых режимах. Кроме того СИТ классифицируют по заложенному физическому принципу и типу конструктивного оформления (например, в виде вспомогательной стенки; с поперечной составляющей теплового потока; компенсационные; с одним, с двумя или многими чувствительными элементами и др.), способу измерения (прямой или косвенный, абсолютный или относительный (сравнительный)), характеру индикации показаний (непрерывные или дискретные), уровню значения измеряемого теплового потока (малой, средней или высокой интенсивности), а также по метрологическому статусу (эталонные или рабочие).

Основным элементом любого СИТ является первичный измерительный ПТП, который первым воспринимает воздействие измеряемой величины и вырабатывает сигнал в форме, доступной для восприятия наблюдателем. Даже в самой упрощенной схеме последовательности преобразования теплового потока в выходной сигнал ПТП измеряемый тепловой поток преобразуется в разность температуры, разность температуры – в разность значений, например, термоэлектрического потенциала или электрического сопротивления, или электрической емкости, и т.д., которая в многоступенчатой системе последующих преобразований трансформируется в некую выходную информацию, позволяющую определять числовое значение исходной величины.

В качестве измерителей разности температуры в ПТП используют различные термочувствительные элементы [2, 43-45], которые в сочетании с

конструктивными и технологическими особенностями привели к появлению широкой гаммы различных ПТП.

По конструктивному исполнению следует выделить ПТП, выполненные в виде вспомогательной стенки (плоской или цилиндрической), располагаемой перпендикулярно направлению измеряемого теплового потока, и ПТП с поперечной составляющей теплового потока, в которых измеряемый поток полностью или частично проходит через вспомогательный элемент, изменяя свое первоначальное направление [6, 7, 22, 28, 45-50].

Особенностью измерений по методу вспомогательной стенки в стационарных условиях является достаточность измерительной информации о разности температуры двух сечений. Как правило, такими сечениями являются наружные поверхности вспомогательной стенки. В нестационарном тепловом состоянии количество измеренных перепадов температуры необходимо увеличить до трех и более, что позволяет определять локальный во времени тепловой поток, проходящий непосредственно через одну из поверхностей вспомогательной стенки [5, 22]. Эти ПТП применимы для измерения как в стационарных, так и нестационарных тепловых условиях.

Известны различные типы ПТП, выходной сигнал которых является электрической величиной: резистивные, тензорезистивные, емкостные, полупроводниковые, пироэлектрические и термопироэлектрические, а также термоэлектрические, включая полупроводниковые, металлические, анизотропные.

ПТП **резистивного** типа [5, 51-54] в принципе могут быть весьма точными, поскольку электрическое сопротивление является одной из электрических величин, которая измеряется наиболее точно. Однако, выделение теплоты термометрами сопротивления, применяемыми в ПТП для измерения разности температуры, существенно искажает определяемый тепловой поток.

В **тензорезистивном** ПТП [55] чувствительные элементы измерителя разности температуры выполнены из термонеzависимого резистивного

материала и расположены в наружных слоях трехслойной вспомогательной стенки. При этом, наружные слои выполнены из материала с положительным коэффициентом линейного расширения α (например, из алюминия, $\alpha = 22,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), а средний – с отрицательным (например, из инвара, $\alpha = -0,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). 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 разности их температуры, т.е. тепловому потоку. Измерение разности сопротивления производится 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 [56, 57] используется температурная зависимость диэлектрической проницаемости материала конденсатора, которая при температуре выше точки Кюри, подчиняется законам Кюри-Вейсса. Поскольку чувствительный элемент является параметрическим преобразователем и его сопротивление носит реактивный характер, то это позволяет повысить чувствительность за счет увеличения измерительного тока при малом самонагреве. Чувствительный элемент емкостного преобразователя [57] 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. Большим недостатком ПТП этого типа является сложность коммутации с измерительной аппаратурой.

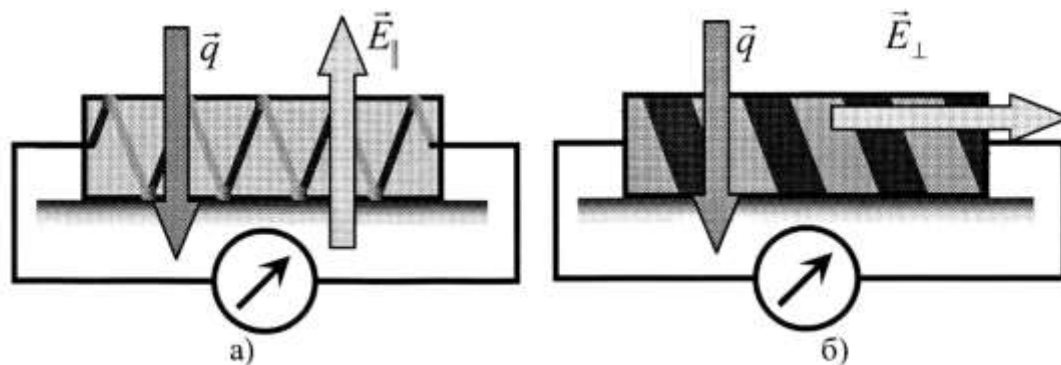
Пироэлектрический ПТП – это преобразователь, основанный на пироэлектрическом эффекте [58], состоящем в возникновении электрических зарядов на поверхности кристаллического диэлектрика при прохождении через него теплового потока. Это явление происходит благодаря наличию в

пироэлектрических кристаллах самопроизвольной поляризации, способной изменяться в зависимости от температуры [59-61]. На основе пироэлектрических материалов широкое распространение получили приемники теплового излучения [59], которые обладают такими достоинствами, как неселективность спектральной характеристики в широком интервале длины волны и температурная стабильность энергетических и временных характеристик.

В термопироэлектрических ПТП и приемниках теплового излучения используется общее свойство их термоэлектрического и пироэлектрического чувствительных элементов, объединенных в единой конструкции, – преобразование измеряемой величины генераторного типа [62]. При этом, 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 $dT(\tau)/d\tau$ 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 теплового излучения в приемнике, содержащем два чувствительных элемента: термо- и пироэлектрический.

Конструкции этого типа состоят из тонкой пластинки из пироактивного материала (например, ниобата или тантала лития), особенная полярная ось которого либо параллельна, либо перпендикулярна потоку излучения. На обе поверхности пластинки нанесены никелевые электроды. Пироэлектрическая пластинка находится в тепловом контакте через изолирующую пленку с термоэлектрическим ПТП вида вспомогательной стенки. При облучении тепловым потоком одновременно регистрируются пироэлектрический и термоэлектрический сигналы. Быстродействие плоского термопироэлектрического ПТП составляет от 10^{-5} с до 10^{-7} с.

В настоящее время наиболее распространенными ПТП вида вспомогательной стенки являются **термоэлектрические** ПТП, которые по своей сущности также относятся к генераторным преобразователям. Их выходным сигналом является термоэлектродвижущая сила (далее – ТЭДС) [1-5, 26-28, 63-68]. Принципиальные схемы термоэлектрических ПТП вида вспомогательной стенки представлены на рисунке 1.2 [28].



а) – ПТП продольного типа, б) ПТП поперечного типа

Рисунок 1.2 – Принципиальные схемы термоэлектрических ПТП вида вспомогательной стенки [28].

Подавляющее большинство термоэлектрических ПТП вида вспомогательной стенки представляют собой пластину (или цилиндрическую оболочку), на поверхностях которой расположены спаи дифференциальной термопары или батареи термопар. Иногда их выполняют из элементов Пельтье. В работах [3, 29] ПТП на термопарах названы «продольного типа» (см. рис. 1.2, а), а выполненные по схеме «б» рис. 1.2, – «поперечного типа».

Одним из первых отечественных термоэлектрических ПТП продольного типа является металлический одиночный преобразователь [69], выполненный в виде пластинки, представляющей собой своеобразную сплюснутую дифференциальную термопару, промежуточный термоэлектрод которой служит вспомогательной стенкой [1-4]. Из-за низкой чувствительности (при толщине ПТП в 1 мм она составляет $(1 - 3) \cdot 10^{-9} \text{ В} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$) эти ПТП нашли применение только для исследования высокоинтенсивных тепловых процессов.

Для увеличения сигнала одиночные элементы коммутируют в батарею идентичных термоэлементов [70], соединенных последовательно по электрическому току и параллельно относительно направления измеряемого теплового потока. Известно несколько способов изготовления многоэлементных (батареиных) ПТП, описанные еще О.А. Геращенко [2-4]. Преимущество получил способ, основанный на технологии гальванического нанесения на оголенную проволоку парного термоэлектродного материала, при этом спаями являются места перехода от оголенных участков проволоки к участкам с нанесенным покрытием [3, 4, 71].

Замена металлического термоэлектродного материала на полупроводниковый [45, 72-75], позволяет получить чувствительность батареиных термоэлектрических ПТП порядка $(10 - 20) \text{ мВ} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$. При помощи таких ПТП можно регистрировать тепловой поток плотностью от $10^{-3} \text{ Вт}/\text{м}^2$ без применения систем усиления сигнала, что позволило использовать их при медико-биологических [76] и геотермических [77] исследованиях, а также в теплофизическом приборостроении [26, 78].

В Европе весьма распространенным является полупроводниковый ПТП фирмы TEG AG (Швеция) [79]. Он состоит из аксиально выравненных полупроводниковых элементов, соединенных последовательно и заформованных в электроизолирующий слой эпоксидной смолы. Предназначен для теплотехнических обследований ОК зданий и сооружений в диапазоне температуры от минус $50 \text{ }^\circ\text{C}$ до $200 \text{ }^\circ\text{C}$ с разрешением $0,5 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Недостатком полупроводниковых ПТП является нелинейность чувствительности в температурном диапазоне, быстрое старение термоэлементов и большая постоянная времени.

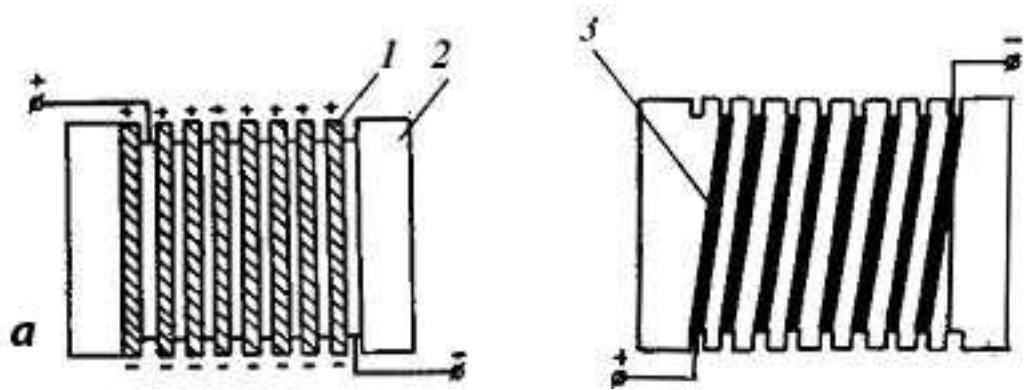
Для измерения теплового потока в быстропротекающих тепловых процессах разработаны **анизотропные** термоэлектрические ПТП с уменьшенной инерционностью, выполненные из материалов с анизотропией теплопроводности, электропроводности и коэффициентов ТЭДС. Их действие основано на поперечном эффекте Зеебека: в сечениях ПТП, нормальных

вектору внешнего теплового потока, возникает поперечная разность температуры и генерируется пропорциональная ей ТЭДС [2, 4, 27-29, 45, 80]. В работе [28] преобразователи из анизотропных материалов отнесены к ПТП поперечного типа, к особенности которых относится то, что их чувствительность в отличие от ПТП продольного типа не зависит от толщины, что позволяет создать чувствительные и одновременно быстродействующие ПТП. Теория генерирования сигнала анизотропного ПТП описана в [3, 4, 27-29, 49] и других источниках.

На рисунке 1.3 показана схема батарейного анизотропного ПТП поперечного типа, изготовленного из монокристаллов различных твердых растворов $Bi_{1-x}Sb_x$, а на рисунке 1.4 – графики температурной зависимости их коэффициента преобразования [80], которая представляет собой существенно нелинейную температурную функцию преобразования.

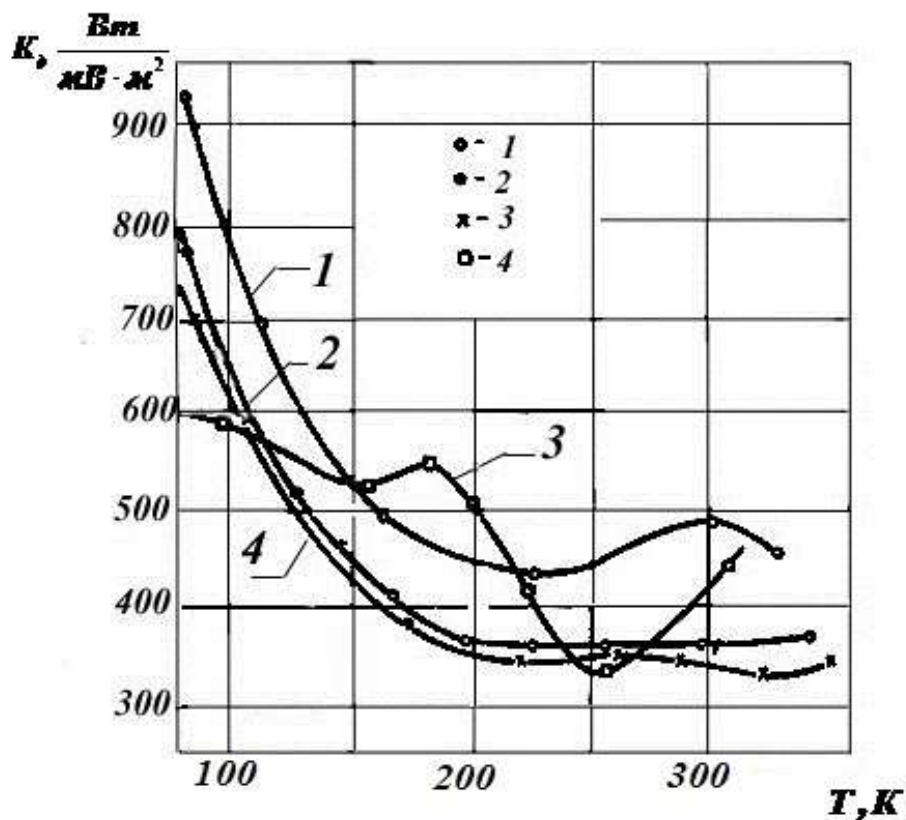
Чувствительность, быстродействие и верхний предел термостойкости анизотропных ПТП могут быть улучшены путем увеличения длины чувствительного элемента, например, выполнением в виде меандра, и уменьшением его толщины [81, 82]. Изготовление меандров из монокристаллических пластин и их истончение сопряжено со значительными трудностями. Целесообразно изготавливать анизотропные термоэлементы из пленочных материалов, которые 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 ленточных, матричных и других типов приемников теплового излучения, например, описанных в [83-85].

В последние полтора – два десятилетия получили признание анизотропные ПТП поперечного типа, изготовленные из композитных материалов [27]. Впервые изготовить ПТП из композитного материала было предложено Л. Гайлингом [86], а затем авторами [87]. На базе композитного материала



1 – термоэлементы; 2 – коммутационные дорожки; 3 – подложки.

Рисунок 1.3 – Схема анизотропного ПТП из монокристаллов твердых растворов $Bi_{1-x}Sb_x$ [74].



1 – $X=0$; 2 – 0,075; 3 – 0,010; 4 – 0,050

Рисунок 1.4 – Температурная зависимость функции преобразования анизотропного ПТП из монокристаллов твердых растворов $Bi_{1-x}Sb_x$ при вариации концентрации Sb_x [80]

выполнен преобразователь ALTP (Atomic layer Thermo Pile – термобатарея с атомарным слоем) фирмы FORTECH HTS GmbH [88]. Косослойная пленка толщиной 1 мкм, полученная напылением чередующихся слоев $YBa_2Cu_3O_{7-d}$ и CuO_2 , нанесена на основании 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, термостойкость не выше 350 К.

Применяя идею Л. Гайлинга, Т. Занер и др. [89] 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 может быть повышена подбором металлических материалов до (500-700) К.

Число природных материалов, пригодных для создания анизотропных ПТП, невелико. Наиболее удачная идея – использование в конструкции ПТП монокристаллического висмута, предложенная Н.П. Дивиным [90]. Позднее разработками поперечных ПТП из слоистых композитов (металл + металл; металл + сплав; полупроводник + полупроводник; полупроводник + металл) занялись авторы работ [27-29, 85, 91-93]. К сожалению, эти ПТП имеют нелинейный характер зависимости ТЭДС от плотности теплового потока с одним максимумом в зоне низких значений плотности теплового потока, как это видно на рисунке 1.5. При этом наблюдается смещение максимумов ТЭДС при увеличении температуры ПТП, показанное на рисунке 1.6. Прямые измерения с применением термоэлектрических ПТП типа вспомогательной стенки проводят во всех развитых странах мира, например, в Нидерландах, Японии, США, Англии, Германии, Венгрии, Чехии, России, Украине и др. [46, 47, 71, 94-100]. Информация о ПТП, производимых в Украине и за рубежом систематизирована в приложении А.

Наибольшее распространение нашли многоэлементные термоэлектрические биметаллический ПТП вида вспомогательной стенки –

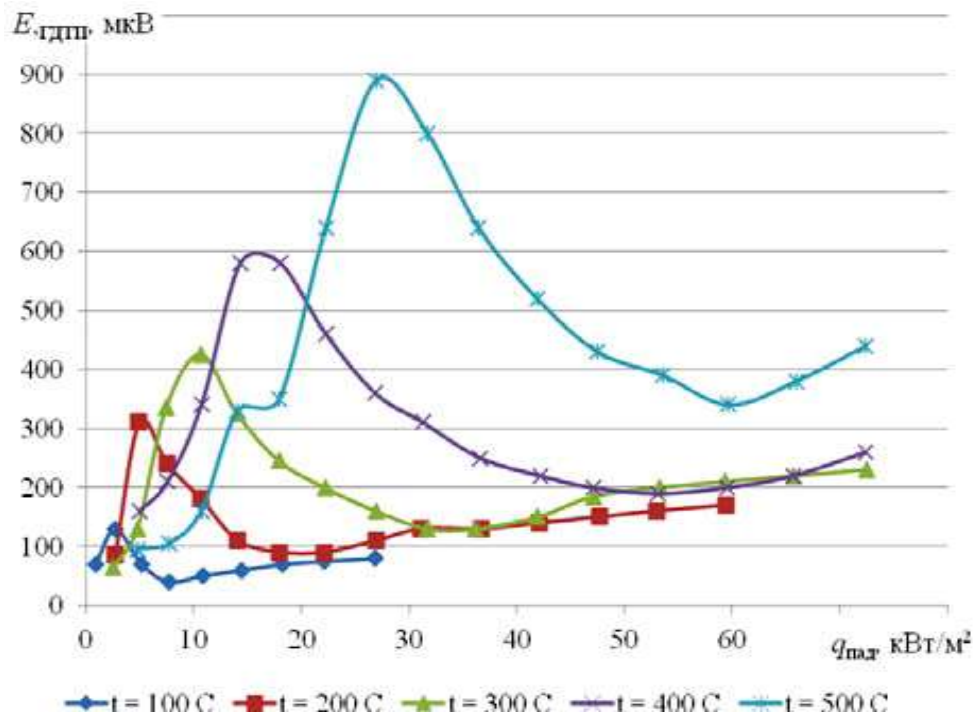


Рисунок 1.5 – Зависимость ТЭДС гетерогенного анизотропного ПТП от плотности воспринятого теплового потока [85]

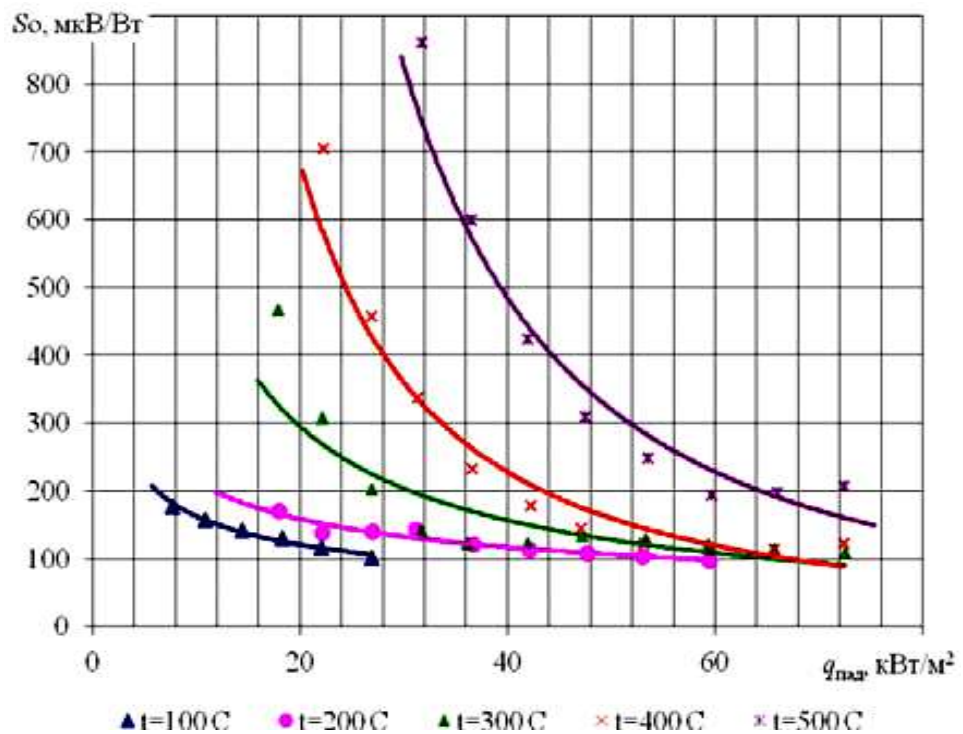


Рисунок 1.6 – Результаты градуировки гетерогенных анизотропных ПТП [85]

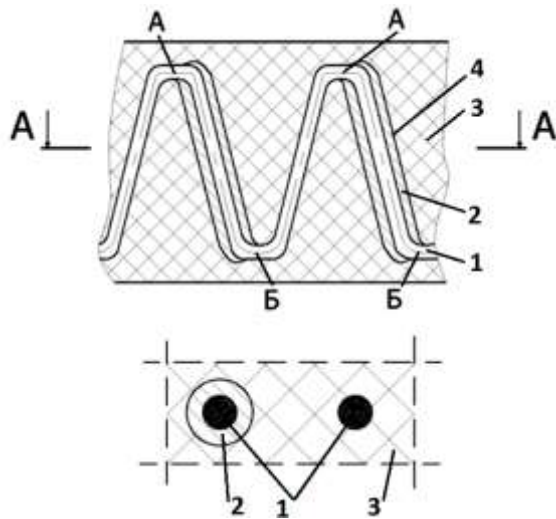
технические устройства, применяемые для определения экспериментальным путем теплового потока или его поверхностной плотности, теплочувствительный элемент которых выполнен с использованием гальванической технологии осаждения металлов [3-5, 72], а определяемый тепловой поток преобразуется в ТЭДС, удобную для прямого измерения, передачи, дальнейшего преобразования, обработки и представления в форме, удобной для восприятия и документирования.

Традиционный ПТП, схема которого показана на рисунке 1.7, представляет собой батарею идентичных термоэлементов (далее – термобатарея), изготовленных из парных термоэлектродных материалов с использованием гальванической технологии и залитых связующим электроизоляционным компаундом для придания ПТП монолитной формы.

Батарея скоммутированных термоэлементов ПТП представляет собой навитую на ленточный каркас из электроизоляционной пленки плоскую спираль, изготовленную из проволоки основного термоэлектродного материала, с периодически нанесенным покрытием парного термоэлектродного металла. При этом границы перехода (А, Б) от основного (несущего) термоэлектрода к биметаллическому являются «спаями» и размещены либо вдоль обеих кромок каркасной ленты (*a*) либо по центральным линиям поверхностей вспомогательной стенки (*b*), как показано на рисунке 1.8.

Каждый полувиток, являющийся биметаллическим термоэлектродом, представляет собой замкнутый контур, в котором при наличии разности температуры возникают вихревые токи, благодаря которым между узлами А и Б появляется разность потенциалов.

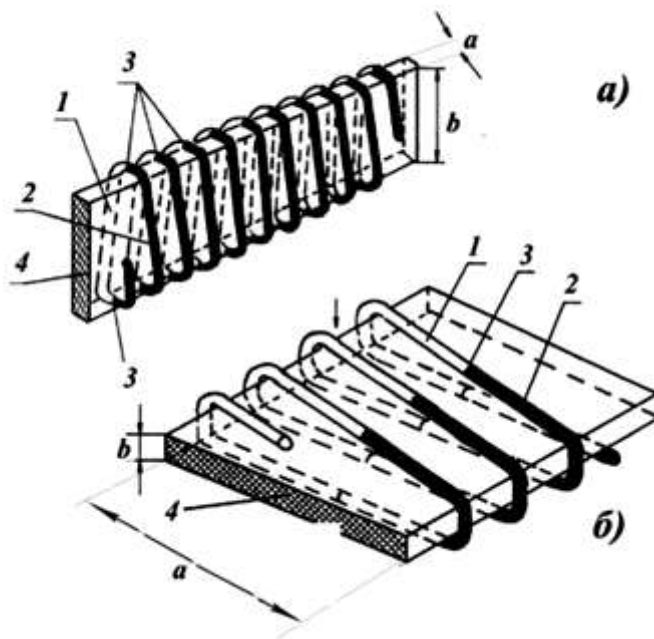
Для прогнозных расчетов параметров ПТП имеются соотношения, связывающие выходные характеристики (габариты и индивидуальная статическая функция преобразования или коэффициент преобразования K_q), исходные данные термобатареи (диаметр основной проволоки, оптимальная толщина гальванического покрытия, плотность заполнения ПТП термоэлементами) и свойства: удельное электрическое сопротивление (ρ_1 и ρ_2)



- 1 – несущая термоэлектродная проволока (основной термоэлектрод);
- 2 – гальваническое покрытие из парного термоэлектродного материала
- 3 – заливочный электроизоляционный компаунд;
- 4 – биметаллический термоэлектрод;

А, Б – «спаи» термоэлектродов

Рисунок 1.7 – Принципиальная схема термобатареи исходного ПТП



- 1 – основной термоэлектрод;
 - 2 – биметаллический термоэлектрод;
 - 3 – спаи термоэлементов;
 - 4 – ленточный каркас из электроизоляционной пленки:
- a – ширина (толщина) каркасной ленты, b – высота

a – термобатарея ПТП в виде лентовидной спирали, стоящей на «ребре»,

b – термобатарея ПТП в виде лентовидной спирали, лежащей «плашмя»

Рисунок 1.8 – Батареи гальванических термоэлементов исходного ПТП

материалов термоэлектродной пары, коэффициенты теплопроводности материалов пары (λ_1 и λ_2) и заливочного компаунда (λ_3) [3-5, 30-33, 72].

Формула для коэффициента преобразования ПТП, который на практике оказался более приемлемой метрологической характеристикой, имеет следующий вид [101]:

$$K_q = \frac{(1 + \rho_{21}/f_{21}) \cdot f_1}{\alpha_{1-2} \cdot A \cdot h} \cdot (2 \cdot \lambda_1 + \lambda_2 \cdot f_{21} + \lambda_3 \cdot (\Phi - 2 - f_{21})), \quad (1.2)$$

где $\rho_{21} = \rho_2/\rho_1$ – приведенное электрическое сопротивление термоэлемента, индекс «1» – основной термоэлектрод, «2» – гальваническое покрытие;

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

$\Phi = (2f_1 + f_2 + f_3)/f_1 = 2 + f_{21} + f_{31}$, – безразмерный формпараметр ПТП;

α_{1-2} – коэффициент Зеебека термоэлектродной пары;

A – площадь ПТП;

h – высота термоэлемента.

В качестве высоты h термоэлемента при выполнении расчетов следует брать значение, равное высоте спирали за вычетом удвоенного диаметра проволоки. Еще в [4] было экспериментально установлено, что вклад ТЭДС, вырабатываемой в зонах перегиба проволоки-основы, не существенен для общего сигнала ПТП.

Для получения ПТП с максимальной чувствительностью к измеряемой плотности теплового потока параметры ПТП оптимизируют с целью определения оптимальной толщины гальванического покрытия, которая обеспечивает искомую максимальную чувствительность ПТП. Оптимальной толщине покрытия соответствует определенное отношение площадей сечений покрытия и проволоки-основы $f_{21,opt}$, которое может быть рассчитано по формуле [4, 101]:

$$f_{21,opt} = ((\rho_{21}/(\lambda_{21} - \lambda_{31})) \cdot (2 + (\Phi - 2) \cdot \lambda_{31}))0,5. \quad (1.3)$$

Из соотношения (1.2) с учетом (1.3) следует, что чувствительность и коэффициент преобразования ПТП зависят от большого количества

параметров: не только от коэффициента Зеебека термоэлектродной пары α_{1-2} , но и от отношения площадей сечений материалов в биметаллическом термоэлектроде f_{21} , отношения значений их электрического сопротивления ρ_{21} , тепловой проводимости компонентов вспомогательной стенки λ_i/h и формпараметра Φ . Изменяя целенаправленно их значения можно влиять на основную выходную характеристику ПТП – коэффициент преобразования (индивидуальную статическую функцию преобразования [6, 7]) и другие характеристики ПТП, такие как стабильность во времени, расширенный диапазон температуры, температурная независимость характеристик, постоянная времени, тепловое сопротивление.

С момента создания [69] в ИТТФ по заявкам различных заинтересованных организаций бывшего СССР изготовлено и передано в эксплуатацию около 20 тысяч ПТП. С 1998 г. термоэлектрический ПТП вида вспомогательной стенки общего назначения стандартизирован в Украине [6] и странах СНГ [7].

1.3 Учет искажений при измерении теплового потока с применением ПТП вида вспомогательной стенки

Как и в других видах измерения, в теплотрии главной проблемой также является погрешность измерения, зависящая от многих факторов, таких как, например, замена в формуле (1.1) градиента температуры $grad T$ на отношение конечных значений $\Delta T/h$, приводящая к формуле:

$$q = \lambda \cdot \Delta T/h, \quad (1.4)$$

а также от размеров ПТП, отличающихся от бесконечно малых, и, главным образом, от неидентичности ТФС ПТП и среды, в которую он помещен. Последнее приводит подчас к существенному искажению теплового поля объекта измерения. Изучение этой проблемы началось при распространении измерений с применением ПТП на различные области науки и техники. Начиная с 60-х годов в бывшем СССР появляются соответствующие публикации [102-110].

Так в [102, 103] решена задача об искажении стационарного плоского температурного поля за счет присутствия в ОК ПТП – ограниченного тела с ТФХ, отличными от характеристик ОК. Полученные результаты показали, что измеренное с помощью ПТП значение плотности теплового потока равно истинному значению через ОК в двух случаях: при $\lambda_{ПТП} = \lambda_{ОК}$ и $h_{ПТП} / D_{ПТП} \rightarrow 0$.

Аналогичные выводы получены в [1, 4] из результатов исследования искажения теплового поля моделированием на электропроводной бумаге и расчетом методом элементарных балансов, хорошо коррелирующихся с [102, 103]. Кроме того, в [1] установлено, что нарушение одномерности теплового поля ПТП проявляется в периферийной зоне вблизи его кромки, поэтому ПТП, выпускаемые в ИТТФ, выполняют с охранной зоной по периметру чувствительного элемента.

В [104, 105] сделана оценка погрешности измерения стационарного теплового потока ПТП с охранной зоной, установленным на поверхности или внутри массивного ОК с учетом фактических размеров ПТП и чувствительного элемента. Полученные результаты подтвердили выводы предшественников. Кроме того, уменьшение зоны чувствительного элемента в ПТП тоже приводит к существенному снижению погрешности в достаточно широком диапазоне значений отношения $\lambda_{ПТП} / \lambda_{ОК}$. Результаты этого исследования позволяют предварительно устанавливать допустимый диапазон коэффициентов теплопроводности ПТП в зависимости от возможной теплопроводности ОК.

Вопрос учета искажений поля теплового потока, вносимых ПТП, расположенным на поверхности полуограниченного тела при граничных условиях третьего рода, рассмотрен авторами [106]. Получено соотношение, которое позволяет вносить поправку в показания ПТП в зависимости от значения отношения теплового сопротивления ПТП и теплообмену конвекцией $R_{ПТП} / R_{\alpha}$ при вариации геометрического параметра ПТП $D_{ПТП} / h_{ПТП}$ и соотношения коэффициентов теплопроводности $\lambda_{ПТП} / \lambda_{ОК}$.

Искажениям теплового потока в случае расположения ПТП на поверхности ограниченной пластины с теплопроводностью λ_{OK} при граничных условиях третьего рода посвящена также работа [107].

При использовании полученных результатов для вычисления ошибок приходится привлекать результаты определения числа Био и применять итерационную процедуру вычислений, что сильно усложняет процедуру отыскания погрешности измерения.

Среди зарубежных публикаций, посвященных искажениям теплового поля при размещении ПТП на ОК, заслуживают внимания работы [108-110]. Полученные результаты хорошо коррелируют с изложенными выше. При анализе искажений теплового поля автор использует отношение $q_{ИЗМ} / q_0$:

$$q_{ИЗМ} / q_0 = h_{OK} / (h_{OK} - h_{ПТП} + h_{ПТП} \cdot \lambda_{OK} / \lambda_{ПТП}). \quad (1.5)$$

Для случая применения ПТП с толщиной $h_{ПТП} \ll h_{OK}$, размещенного внутри ОК, показано, что $q_{ИЗМ} < q_0$. Соответствующий характер эпюр теплового потока в ОК показан на рисунке 1.9. Как видно на рисунке 1.9, в на кромке ПТП наблюдаются искажения теплового потока. Из результатов, приведенных на рисунке 1.10, можно утверждать, что при условии $\lambda_{ПТП} < \lambda_{OK}$ измеряемая плотность теплового потока меньше плотности неискаженного ($q_{ИЗМ} < q_0$), а при $\lambda_{ПТП} > \lambda_{OK}$ – наоборот.

На рисунке 1.11 приведены результаты исследования наличия в ПТП охранной зоны вокруг термобатареи чувствительного элемента, откуда следует, что тепловой поток в этом случае, проходящий через чувствительный элемент, остается одномерным. Охранная зона защищает термобатарею ПТП от воздействия искаженного поля по кромке ПТП.

Эпюр теплового потока, измеряемого с помощью ПТП, установленного на поверхности стены, то есть подверженного суммарному воздействию на его свободную поверхность теплового излучения и конвекции в приповерхностном слое, показан на рисунке 1.12, а, а влияние поперечного размера ПТП на результат измерения – рисунке 1.12, б.

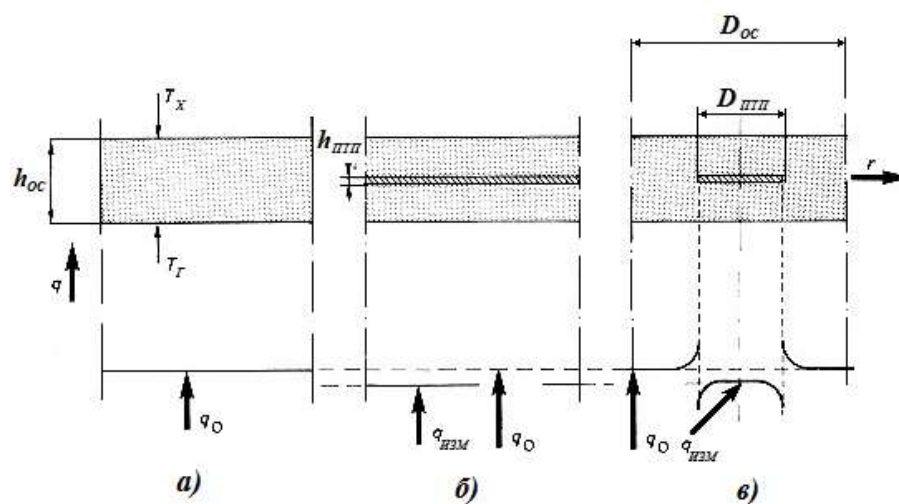


Рисунок 1.9 – Эпюры теплового потока в контролируемом объекте для случаев [110]:

a – без ПТП внутри массива;

б – с ПТП, поперечный размер которого соизмерим с таковым для объекта, а толщина ПТП значительно меньше ($h_{ПТП} \ll h_{OC}$).

в – с ПТП при $h_{ПТП} \ll h_{OC}$ и $D_{ПТП} \ll D_{OC}$.

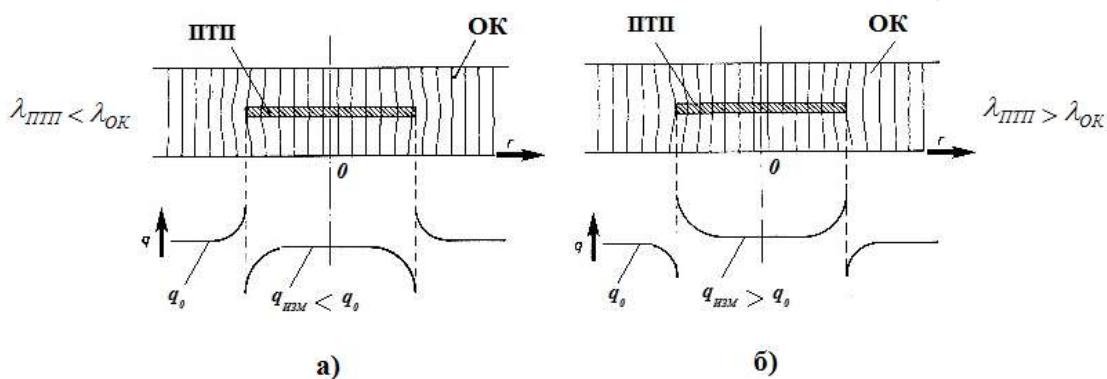


Рисунок 1.10 – Эпюры теплового потока в зависимости от отношения коэффициентов теплопроводности массива и ПТП, размещенного внутри массива [110]:

a – при $\lambda_{ПТП} < \lambda_{OK}$; **б** – при $\lambda_{ПТП} > \lambda_{OK}$;

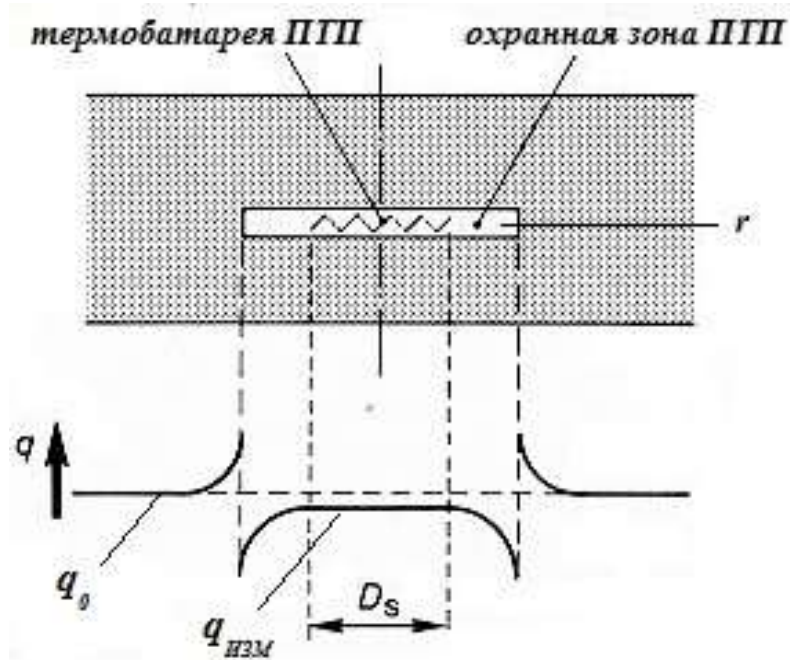


Рисунок 1.11 – Эпюра теплового потока при использовании ТПП, выполненного с охранной зоной [110].

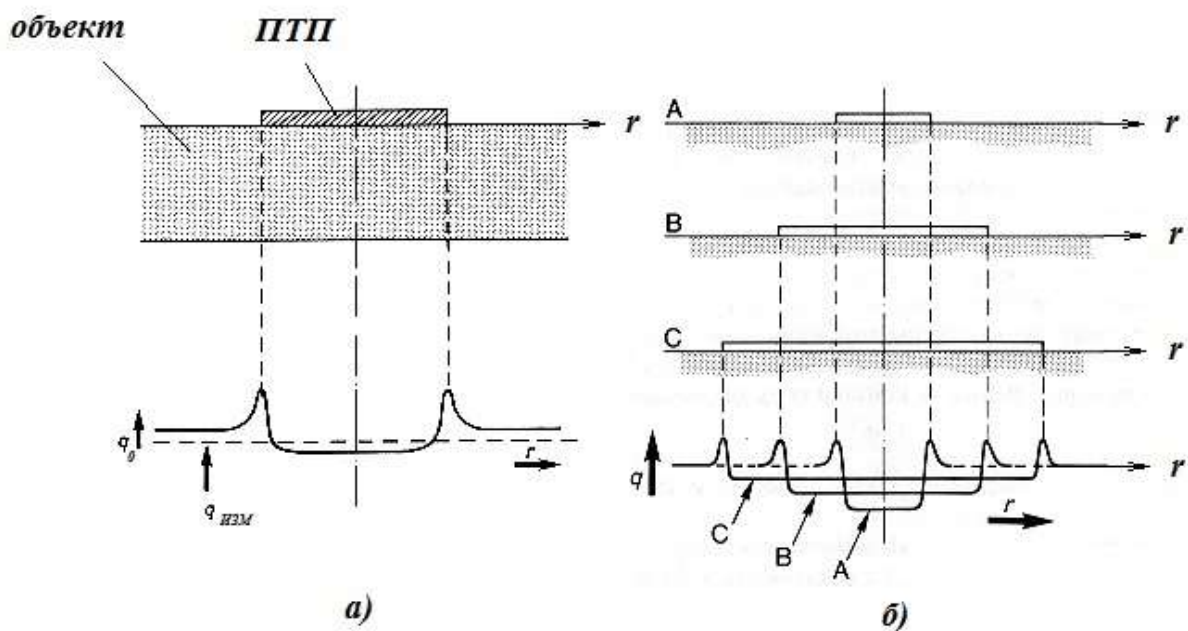


Рисунок 1.12 – Эпюры теплового потока при размещении ТПП на поверхности объекта при вариации размера ТПП [110].

Если тепловое сопротивление теплообмену от поверхности стены обозначить через R_α , а тепловое сопротивление ПТП (с учетом контактного теплового сопротивления между поверхностями ПТП и стены) через $R_{ПТП}$, то отношение $q_{ИЗМ} / q_0$, равно:

$$q_{ИЗМ} / q_0 = R_\alpha / (R_{ПТП} + R_\alpha). \quad (1.6)$$

Учитывая соотношение (1.6), можно сказать, что хорошо проводящий наружный слой устраняет влияние конструкции стены на погрешность измерения. Погрешность можно предсказуемо уменьшить, если использовать тонкий ПТП с малым тепловым сопротивлением [110].

1.4 Мировые тенденции по созданию системы метрологического обеспечения единства в области измерения теплового потока и его плотности

1.4.1 Задачи и особенности метрологического обеспечения единства теплоточных измерений

К настоящему времени наиболее развитой в области теплоточных измерений является метрологическое обеспечение термоэлектрических ПТП генераторного типа вида вспомогательной стенки и приемников теплового излучения (далее – ПТИ), поскольку именно они нашли наибольшее применение в научных экспериментах и производственных условиях.

Аттестация и поверка мер и приборов только в энергетических единицах обеспечивают единство измерений теплового излучения [111, 112] во всех распространенных участках спектрального диапазона оптического излучения, для которых создан ряд стандартов на поверочные схемы и методики измерений [113-121]. Что же касается метрологической аттестации СИТ для кондуктивного теплового потока, то государственная поверочная схема была утверждена в конце 80-х годов 20-го столетия [122].

В рамках проблемы обеспечения единства измерений стационарного теплового потока, как писал Сергеев О.А. [123], существуют две основные задачи. Первая состоит в том, чтобы найти статическую индивидуальную

функцию преобразования (градуировочную характеристику) СИТ и погрешность ее определения. При строгом соблюдении геометрических размеров первичного ПТП и известных его свойствах принципиально возможно получение функции преобразования расчетным путем. Однако, из-за технологических особенностей изготовления ПТП при сопоставлении полученных экспериментально значений МХ СИТ, идентичных с точки зрения их изготовления, обнаруживается расхождение, которое достигает в отдельных случаях (20-30) %, при этом имеется отличие и от расчетных значений. Поэтому каждый ПТП подвергают индивидуальной аттестации. Вторая задача состоит в том, чтобы ответить на вопрос, какова точность технических теплоточных измерений при самых разнообразных условиях и в какой мере эта точность связана с результатами градуирования.

Для измерения стационарного теплового потока нормируемыми МХ ПТП являются чувствительность к тепловому потоку $S_\Phi = E/\Phi$ или плотности теплового потока $S_q = E/q$, либо обратные им величины: коэффициент преобразования, соответственно $K_\Phi = \Phi/E$ и $K_q = q/E$, а также погрешности их определения ΔS_Φ , ΔS_q , ΔK_Φ , ΔK_q . Эти величины в общем случае зависят от температуры, а при больших градиентах температуры в ПТП также и от подводимого теплового потока, и могут быть установлены только экспериментально.

Аттестация (или градуирование) любого ПТП в конечном счете сводится к заданию эталонированной величины – теплового потока или его поверхностной плотности, проходящей через аттестуемый ПТП, и к обеспечению измерения его выходного сигнала с максимально возможной точностью. Точность аттестации ПТП зависит от точности воспроизведения заданного значения поверхностной плотности теплового потока в каждой фиксированной точке из диапазона измерений.

Воспроизвести и измерить единицу плотности теплового потока можно несколькими способами, основанные на положениях физики, а именно:

1. По теории радиационного теплообмена согласно закону Стефана-Больцмана, плотность потока теплового излучения, воспроизводимого источником теплового излучения (далее – ИТИ) на поверхности аттестуемого ПТП, определяется выражением:

$$q = \varepsilon \cdot \varphi_{1-2} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4), \quad (1.7)$$

где ε – приведенная степень черноты излучающей поверхности; φ_{1-2} – угловой коэффициент; σ – постоянная Стефана-Больцмана; T_1 – температура излучающей поверхности ИТИ, T_2 – температура тепловоспринимающей поверхности аттестуемого ПТП.

Современный уровень развития термометрии обеспечивает высокую точность задания и измерения значений температуры T_1 и T_2 . Постоянная Стефана-Больцмана является фундаментальной физической константой, значение которой $\sigma = 5,670400(40) \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) известно также с высокой точностью [124], поэтому основная погрешность измерения плотности потока теплового излучения зависит от погрешности определения терморadiационных характеристик поверхностей. В настоящее время эти значения определяются с погрешностью не менее 1 %.

2. По теории теплопроводности, согласно закону Фурье, плотность теплового потока через слой однородного материала пропорциональна градиенту температуры (см. формулу (1.1)). На точность этого метода, кроме погрешности измерения температуры и линейных размеров теплопроводящего слоя, влияет погрешность определения коэффициента теплопроводности, которая в настоящее время для рабочих эталонов теплопроводности составляет порядка 3 % [125].

3. Основываясь на физике элементарных частиц, создать эталонированный тепловой поток можно бомбардировкой аттестуемого ПТП потоком электронов (электронный нагрев) [2, 126]. Плотность теплового потока, создаваемая электронным пучком на поверхности ПТП, определяется соотношением:

$$q = e \cdot U, \quad (1.8)$$

где $e = I/A$ – плотность потока электронов (I – ток электронного пучка, A – площадь бомбардируемой поверхности); U – напряжение управляющего электрода. Этот способ позволяет весьма точно воспроизводить и определять значения плотности теплового потока, однако реализация электронного пучка возможна лишь в условиях глубокого вакуума, что сильно ограничивает применение данного метода для проведения массовых аттестаций ПТП.

4. Эталонированная плотность теплового потока может быть создана посредством подведения электрической мощности W к источнику теплоты, имеющего конечные геометрические размеры, и определяется формулой:

$$q = W/A, \quad (1.9)$$

где A – площадь рабочей поверхности источника теплоты. Учитывая современный высокий уровень развития электрических измерений, данный способ задания и измерения нормированного значения плотности теплового потока является весьма точным и наиболее перспективным.

В зависимости от вида теплообмена при передаче теплоты от источника аттестуемому ПТП [31, 33, 34, 36, 127, 128] аттестация ПТП бывает радиационная, кондуктивная и конвективная.

Как показала практика, аттестацию ПТП реализуют главным образом, радиационным и кондуктивным способами подведения теплоты к ПТП независимо от способа ее отведения. Теплосток, в свою очередь, может быть организован преимущественно с использованием кондукции или конвекции. Чисто конвективная аттестация ПТП весьма редко находит реализацию в практических исследованиях в силу низкой воспроизводимости нормированного значения плотности конвективного теплового потока [129, 130].

Методы и средства радиационной аттестации ПТП, основанные на законах теплообмена излучением. Современная теория располагает методами расчета потока теплового излучения, который в определенных геометрических и температурных условиях при известных значениях степени черноты попадает на аттестуемое СИТ. Многие исследователи, не располагая

экспериментальными возможностями для определения МХ теплоточных СИТ, прибегали именно к расчетной методике, которая априори не может привести к точным и надежным результатам.

Экспериментальные методы радиационной аттестации базируются на эталонном ИТИ, выполненном с максимальным приближением к модели абсолютно черного тела (далее – АЧТ), либо на эталонном измерителе потока теплового излучения или его поверхностной плотности.

В первом случае расчет плотности измеряемого потока теплового излучения выполняют по формуле закона Стефана-Больцмана (1.7) по измеренным значениям температуры T_1 и T_2 , либо по формуле (1.9) по данным измерения параметров электрической мощности, подводимой к ИТИ. Однако при реализации радиационной аттестации ПТП с использованием эталонного ИТИ, выполненного в виде модели АЧТ, необходимо знать и учитывать геометрию, степень черноты и температуру его излучающей поверхности, а также координаты расположения аттестуемого ПТП, температуру и степень черноты его тепловоспринимающей поверхности. Избежать этих трудностей позволяет градуирование с применением эталонного СИТ – высокоточного средства измерения потока теплового излучения или его плотности, отградуированного в соответствующих единицах измерения (в Вт или Вт/м²). При этом ИТИ отводится второстепенная роль, но при обязательном обеспечении стабильности теплового излучения, и одинаковых условий по геометрии и степени черноты для аттестуемого и эталонного ПТП. К достоинствам такой аттестации относится исключение необходимости определять числовые значения степеней черноты участвующих в теплообмене поверхностей и контролировать спектральный состав излучения. Экспонирование аттестуемого и эталонного СИТ выполняют либо одновременно, располагая их под ИТИ на одинаковом расстоянии от него и симметрично относительно центра, либо попеременно, но устанавливая в одну и ту же позицию относительно излучателя. Значение коэффициента преобразования аттестуемого ПТП K вычисляют по формуле:

$$K = K_0 \cdot E_0 / E \quad (1.10)$$

где K_0 – коэффициент преобразования эталонного СИТ; E_0 и E – ТЭДС, генерируемая, соответственно, эталонным и аттестуемым СИТ.

Большой достоверностью отличается радиационное градуирование, основанное на применении модели АЧТ для измерения потока падающего теплового излучения [2, 4]. Но и в этом случае также надо знать степень черноты приемной поверхности градуируемого СИТ и контролировать спектральный состав теплового излучения.

Достаточно точно можно измерять поток теплового излучения одновременно аттестуемым и эталонным приборами, поставленными в одинаковые условия по геометрии потока теплового излучения и степени черноты, ибо проще обеспечить для двух поверхностей одинаковую степень черноты, чем определять ее абсолютные значения. Отпадает также необходимость контроля спектрального состава излучения. Оба прибора располагают под ИТИ на одинаковом расстоянии от него, либо устанавливая в одну и ту же позицию относительно ИТИ. В этом случае аттестация сводится к сличению показаний двух однотипных приборов (ПТП или ПТИ), находящихся под излучателем в идентичных условиях, а расчет коэффициента преобразования аттестуемого ПТП производят по формуле (1.10).

К настоящему времени разработана довольно большая группа аппаратуры, включая излучатели и измерители потока теплового излучения для оснащения градуировочных радиационных стендов, описание которых приведено в приложении Б, раздел Б.1.

Большинство радиационных установок позволяют проводить градуирование только при одном значении температуры, с погрешностью не ниже 5 %. Поэтому на практике наряду с радиационными получили развитие и методы кондуктивного градуирования.

Кондуктивный способ градуирования ПТП, хотя и применим только к плоским ПТП, позволяет определить функцию преобразования в широком температурном диапазоне и с более высокой точностью, чем при

использовании радиационного теплообмена [3-5, 131-142]. Кроме того, при контактном способе градуирования исключено влияние паразитных конвективных и радиационных источников теплоты, не требуется учета коэффициентов излучения поверхностей нагревателя, холодильника и самого ПТП, обеспечена более высокая точность измерения подводимой мощности к источнику теплового потока. Однако следует согласиться, что для широко распространенных ПТП вида вспомогательной стенки, имеющих в качестве корпуса металлическую обечайку, условия градуирования радиационным методом наиболее близки к условиям измерения теплового потока на массивных теплопроводных источниках теплоты. В этом случае обечайка берет на себя ничтожную часть энергии источника и не нарушает равномерности распределения теплового потока в зоне расположения чувствительных элементов ПТП. При контактном подведении теплоты часть теплового потока между источником и стоком теплоты шунтируется высокотеплопроводной обечайкой и уводится тем самым от чувствительных элементов. Поэтому при разработке методик градуирования кондуктивным методом следует учитывать или полностью исключать шунтирующее влияние обечайки.

Кондуктивная градуировка по реализованному методу измерения может быть абсолютной и относительной.

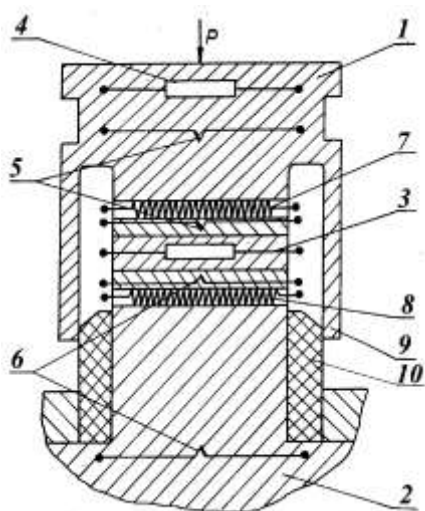
При абсолютном методе градуирования точность определения функции преобразования ПТП зависит, главным образом, от корректности задания и измерения подводимого теплового потока. Абсолютную градуировку можно реализовать двумя методиками. Одна из них, особенно широко распространенная в мировой практике под названием "защищенной горячей плиты" [137-139], заключается в обеспечении прохождения однонаправленного теплового потока через градуируемый ПТП путем применения охранной зоны вокруг теплочувствительной зоны ПТП и адиабатной оболочки вокруг боковых поверхностей ПТП и прилегающих к ПТП конструктивных элементов, за исключением поверхности, через которую тепловой поток от источника теплоты направлен через ПТП к теплостоку. По этой методике коэффициент

преобразования градуируемого ПТП определяют с учетом формулы (1.9) по формуле:

$$K_q = (W / A) / E \quad (1.11)$$

где $W=I \cdot U$ – мощность питания градуировочного нагревателя; I и U – измеряемые параметры: сила тока и напряжение.

В СССР была разработана методика абсолютной кондуктивной градуировки ПТП, получившая название методики двух измерений [4, 19]. Она заключается в том, что значение функции преобразования ПТП при фиксированной температуре определяется по результатам прямых измерений ТЭДС двух ПТП (градуируемого и вспомогательного), и мощности энергии, подведенной к источнику теплоты в двух различных стационарных тепловых режимах. При этом разность температуры теплоотдающей поверхности источника теплоты и тепловоспринимающей поверхности теплостока должна быть постоянной. Схема градуировочного устройства, реализующего методику двух измерений, представлена на рисунке 1.13 [5,132].



- 1 – источник теплоты;
- 2 – сток теплоты;
- 3 – градуировочный нагреватель;
- 4 – нагреватель источника теплоты;
- 5, 6 – термопары;
- 7 – вспомогательный ПТП;
- 8 – градуируемый ПТП,
- 9 – экран,
- 10 – центрирующая втулка

Рисунок 1.13 – Схема устройства для кондуктивной градуировки методом двух измерений [5]

Уравнения теплового баланса для двух режимов измерения при градуировании ПТП по тепловому потоку имеют вид:

$$W^1 = \Phi_1^1 - \Phi_2^1 = K_1 E_1^1 - K_2 E_2^1, \quad (1.12)$$

$$W'' = \Phi_1'' - \Phi_2'' = K_1 E_1'' - K_2 E_2'', \quad (1.13)$$

где W^I и W'' – значения мощности тепловой энергии, выделяемой источником теплоты в двух последовательных режимах; K_1 и K_2 – градуировочные коэффициенты ПТП, соответственно, 1 – градуируемого, 2 – вспомогательного; E_1^I, E_2^I и E_1'', E_2'' – их сигналы в двух режимах соответственно.

Из решения системы уравнений (1.12) и (1.13) получают расчетную формулу для вычисления градуировочного коэффициента ПТП K_ϕ (в ВТ):

$$K_\phi = (W^I / E_2^I - W'' / E_2'') / (E_1^I / E_2^I - E_1'' / E_2''), \quad (1.14)$$

Если в одном из режимов, например, в первом мощность к электрическому нагревателю не подводить, т.е. $W^I=0$, то расчетная формула (1.12) упрощается:

$$K_\phi = W'' / (E_1'' / E_1^I - E_2'' / E_2^I). \quad (1.15)$$

Значение градуировочного коэффициента по плотности теплового потока вычисляют по формуле (1.12) или (1.13), добавив в знаменатель множитель A , соответствующий площади ПТП.

Достоинством этой методики является независимость от точности градуирования вспомогательного ПТП, так его показания входят в формулы (1.14) и (1.15) в отношении. Кроме того, она позволяет получать функцию преобразования ПТП в широком температурном диапазоне рабочих значений температуры, проходя его ступенчато с равномерным шагом. Температуру отнесения полученного результата определяют по формуле:

$$T_{OTH} = T_2 + 0,5 \left(\frac{T_1 - T_2}{K_1 \cdot E_1^I} - C \right) / (K_1 \cdot E_1''), \quad (1.16)$$

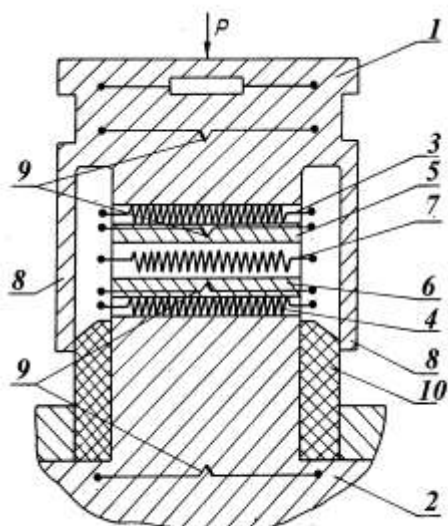
где T_1 и T_2 – значения температуры поверхностей обоих ПТП, обращенных к градуировочному нагревателю, измеренные термопарами 6 и 7; C – константа устройства, равная сумме тепловых сопротивлений вспомогательного ПТП и основного нагревателя 3, определяемая в опыте "холостого хода", когда отсутствует градуируемый ПТП; $K_1 \cdot E_1^I$ и $K_1 \cdot E_1''$ – значения плотности теплового потока, измеренные градуируемым ПТП, в первом и втором режимах. Как видим, по этому методу необязательно создавать адиабатические

условия на всех поверхностях термостолбика из двух ПТП и нагревателя между ними, кроме актуального направления теплового потока через градуируемый ПТП в теплосток. В этом – преимущество методики двух измерений перед методикой «защищенной горячей пластины».

Если с помощью системы автоматического регулирования удаётся обеспечить полную компенсацию теплового потока, проходящего через вспомогательный ПТП при работающем градуировочном нагревателе, то есть $E_2=0$, то формула для вычисления коэффициента преобразования градуируемого ПТП принимает вид (1.11). В этом случае абсолютная методика двух измерений переходит в свою разновидность – методику полной компенсации [4, 5, 132, 133].

Кондуктивное градуирование в относительном варианте реализуется путем компарирования, при котором коэффициент преобразования ПТП определяют по результатам сличения его показаний с показанием эталонного ПТПэ при одинаковом тепловом потоке, проходящем через них. При этом значение плотности теплового потока не фиксируют, а точность градуирования зависит от точности аттестации эталонного ПТП, идентичности условий, при которых находятся оба ПТП, соблюдения строгого совпадения площадей соприкасающихся поверхностей. Постоянство теплового потока обеспечивают поддержанием постоянной разности температуры поверхностей источника и стока теплоты, между которыми установлен термостолбик из ПТП. Коэффициент преобразования по результатам прямых измерений ТЭДС вычисляют по формуле (1.10).

Наиболее корректное компарирование с применением двух эталонных ПТП, между которыми помещен аттестуемый ПТП, как показано на рисунке 1.14. Такая схема позволяет реализовать компарирование как по входящему, так и выходящему тепловому потоку, что оказывается более устойчивым к нестабильности температуры термостатирования источника и стока теплоты во времени.



- 1 – источник теплоты;
- 2 – сток теплоты;
- 3, 4 – эталонные ПТП;
- 5, 6 – температуровыравнивающие пластины;
- 7 – градуируемый ПТП;
- 8 – экран;
- 9 – термопары;
- 10 – центрирующая втулка

Рисунок 1.14 – Схема устройства для кондуктивной градуировки по методике компарирования с двумя эталонными ПТП [5]

В этом случае уравнение теплового баланса имеет вид:

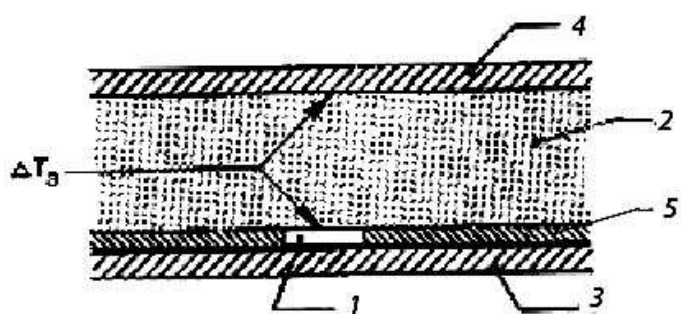
$$\Phi = 0,5(\Phi_{Э1} + \Phi_{Э2}), \quad (1.17)$$

где $\Phi_{Э1}$ и $\Phi_{Э2}$ – значения теплового потока, измеренные двумя эталонными ПТП, а формула для вычисления коэффициента градуируемого ПТП имеет вид:

$$K = 0,5(K_{Э1} \cdot E_{Э1} + K_{Э2} \cdot E_{Э2}) / E. \quad (1.18)$$

За температуру отнесения найденного значения градуировочного коэффициента принимают среднее арифметическое значений температуры поверхностей источника (T_1) и стока теплоты (T_2), измеренных в стационарном состоянии.

Помимо описанных практикуют также методики, основанные на использовании образца материала с хорошо изученной теплопроводностью – эталонного материала для определения плотности теплового потока через градуируемый ПТП. Наиболее широко эта методика используется за рубежом [109, 110, 140-142]. Схема градуирования ПТП с использованием эталонного теплоизоляционного материала приведена на рисунке 1.15.



- 1 – ПТП;
- 2 – образец эталонного тепло-изоляционного материала;
- 3 – холодная пластина;
- 4 – горячая пластина;
- 5 – охранная зона ПТП;
- $\Delta T_{\text{Э}}$ – разность температуры на эталонном образце

Рисунок 1.15 – Принципиальная схема градуирования ПТП с использованием эталонного материала [109, 140]

Между холодной 3 и горячей пластинами расположены градуируемый ПТП 1 с охранной зоной 5 по периметру и образец эталонного материала 2 толщиной $h_{\text{Э}}$ с известным коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{Э}}$.

По результатам измерения сигнала ПТП E и разности температуры $\Delta E_{\text{Э}}$ вычисляют коэффициент преобразования ПТП по формуле:

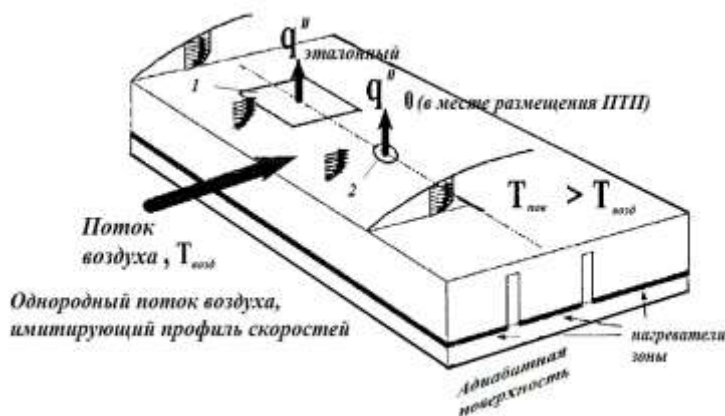
$$K = \lambda_{\text{Э}} \cdot \Delta T_{\text{Э}} / (h_{\text{Э}} \cdot E). \quad (1.19)$$

Рассмотренные в этом параграфе методы градуирования плоских ПТП по кондуктивному тепловому потоку реализованы в целой серии устройств и установок, описание некоторых из них приведено в приложении Б.2.

Конвективному градуированию целесообразно подвергать ПТП, устанавливаемые при их эксплуатации на поверхность нагреваемой пластины, интенсивно обдуваемой газовым потоком, например, ПТП, предназначенные для аэродинамических испытаний. В этом случае теплообмен на поверхности пластины является кондуктивным от пластины к ПТП, конвективным – в прилегающую газовую среду и радиационным в окружающую среду (далее – ОС). Если структура ПТП содержит элементы с низкой теплопроводностью (клеевые прислойки или слои с высоким тепловым сопротивлением), то это может существенно изменить профиль поверхностной температуры и, тем самым, исказить локальный тепловой поток. При наличии шероховатости поверхности пластины или неоднородности ее профиля

конвективная составляющая теплообмена обязательно присутствует. Радиационная составляющая в зоне, где установлен ПТП, тоже изменяется, так как каждый ПТП поглощает, отражает и пропускает теплоту в соответствии с собственными характеристиками его поверхности. При конвективном градуировании подведение к аттестуемому ПТП теплоты осуществляется конвекцией между движущейся газовой средой и тепловоспринимающей поверхностью ПТП при соблюдении режимов течения среды и разности температуры омывающего конвективного потока и поверхности ПТП.

В США на актуальность конвективного градуирования ПТП обратили внимание еще в 1995 году [143, 145]. В первой конвективной установке, созданной в NIST, нормированный тепловой поток на градуируемый ПТП подавался омывающим потоком воздуха, обеспечивающим двухфазный ламинарный поток поперек ПТП, установленного на нагреваемую изотермическую пластину, как это показано на рисунке 1.16 [145].



- 1—защищенная эталонная зона;
- 2—место расположения градуируемого ПТП;

Рисунок 1.16 – Рабочий узел конвективной установки для градуирования ПТП [145]

Плотность стационарного теплового потока, задаваемого защищенной эталонной зоной (1) q_0 , определяется по мощности нагревателя, встроенного в эталонную зону пластины, а коэффициент преобразования ПТП – по формуле (1.10).

В [146] описана конвективная установка для аттестации ПТП методом компарирования с эталонным, в качестве которого взят преобразователь теплового потока Шмидта-Боэлтера. На точность этого метода аттестации ПТП

решающее влияние оказывает степень равенства температуры поверхностей аттестуемого и эталонного ПТП, а также тот факт, что градуировочная характеристика эталонного ПТП определяется с привлечением справочных данных о теплопроводности материала подложки, выполняющий роль вспомогательной стенки, которая не может быть известна с погрешностью меньше 3%. Кроме того при больших значениях плотности теплового потока чувствительность ПТП Шмидта-Боэлтера изменяется на 20%, что приводит к неопределенности аттестации на уровне 10%.

Еще попытки использования конвективного теплообмена для аттестации ПТП описаны в работах американских ученых [130, 147, 148]. Описание некоторых конвективных установок приведено в приложении Б.

Учитывая сложность эталонирования конвективного теплового потока и невозможность реализации конвективной градуировки абсолютным методом, несмотря на усилия отдельных исследователей этот метод не получил широкого распространения в практике теплофизических измерений.

В завершение обзора о методах и средствах градуирования плоских ПТП вида вспомогательной стенки нельзя не упомянуть о способе градуирования «черно-белых» ПТП (см. табл. А.3). Авторы [146, 147] градуируют «черно-белый» плоский ПТП с применением эталонного ПТП, который предварительно аттестован абсолютным контактным методом по мощности, выделившейся в электрическом нагревателе, смонтированном на медной пластинке с площадью, одинаковой с площадью поверхностей «черной» и «белой» зон градуируемого ПТП. Погрешность определения коэффициента преобразования каждой зоны ПТП оценена в 5 %.

1.4.2 Поверочные схемы и эталонные средства измерения теплового потока и его плотности

Метрологическое обеспечение измерений теплового потока различными СИТ первоначально базировалось на ряде устройств и установок, разработанных и адаптированных для решения конкретных локальных задач [1, 47, 58, 72, 75], не связанных между собой единой эталонной базой.

Метрологическое обеспечение единства и достоверности теплоточных измерений должно осуществляться путем прямого воспроизведения единицы измерения теплового потока или его поверхностной плотности с использованием определенного вида теплообмена с последующей передачей её размера подчиненным эталонным и рабочим СИТ.

1.4.2.1 Поверочные схемы для средств измерения теплового излучения

Метрологическое обеспечение единства и правильности измерения потока теплового излучения или его плотности целесообразно осуществлять путем прямых измерений при воспроизведении соответствующей единицы измерения с использованием законов радиационного теплообмена и последующей передачи её размера эталонным и рабочим ПТИ [112, 113].

В начале 70-х годов Госстандартом СССР был введен комплекс государственных специальных эталонов (ГСЭ), предназначенных для воспроизведения единиц физических величин энергетической фотометрии когерентного и некогерентного оптического излучения. Тогда же были введены стандарты на эталоны и общесоюзные поверочные схемы, некоторые из них позднее были отменены или заменены новыми и разработаны методические указания на методы и средства поверки эталонных (по прежней терминологии – образцовых) средств измерения потоков теплового излучения [114-117].

В Украине для этой области измерений в 2003 году введен национальный стандарт [114]. В СССР еще в 70-е годы создана одна из первых эталонных установок для воспроизведения значений плотности потока теплового излучения (энергетической освещенности), а также для градуирования и поверки рабочих ПТИ в интервале от 5 кВт/м² до 100 кВт/м² [149, 150]. Более подробная информация об этой установке и других эталонных средствах приведена в приложении Б, раздел Б.4. Источником теплового излучения (ИТИ) служит галогенная лампа накаливания типа КГМ 40-75, а эталонным измерителем его плотности – калориметр, описанный в [150]. В установке реализован метод аттестации замещением потока теплового излучения теплотой, выделяющейся в электронагревателе.

Метрологическими исследованиями показано, что случайная погрешность измерения плотности потока излучения эталонным прибором составляет 2,1 %, систематическая погрешность – 1,2 %. С учетом нестабильности потока излучения и влияния воздуха случайная погрешность градуирования в энергетическом диапазоне от 5 кВт/м² до 100 кВт/м² составляет 3,5 % с доверительной вероятностью 0,95, а систематическая – не превышает 1,6 %.

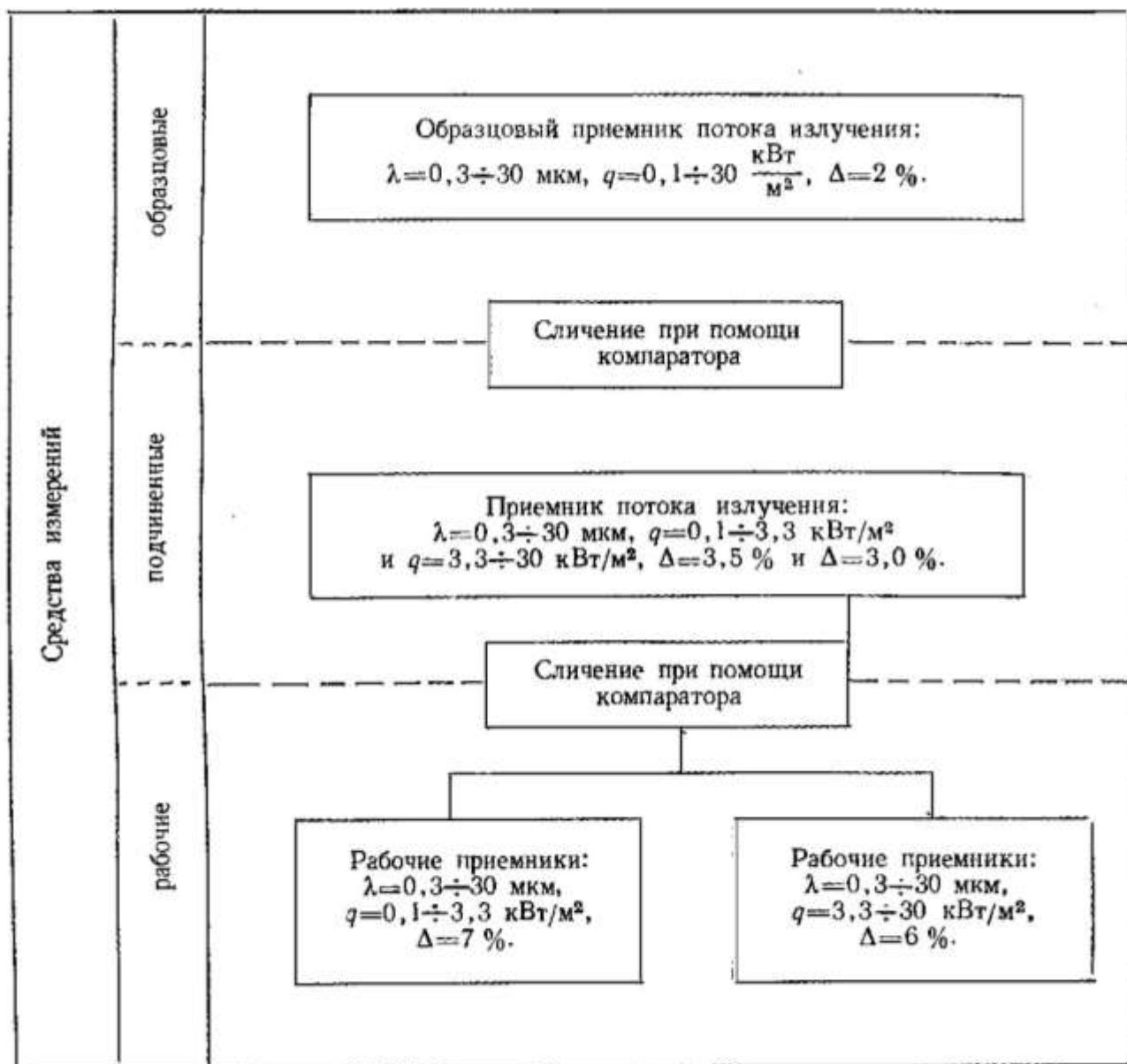
Утвержденный Госстандартом СССР комплекс государственных специальных эталонов [151], предназначенных для воспроизведения единицы плотности потока излучения, не обеспечил потребностей измерений потока теплового излучения высокой плотности, широкого спектрального диапазона и специфических условий эксплуатации рабочих ПТИ. Для решения этой задачи совместными усилиями НПО «Метрология» Госстандарта Украины (г. Харьков) и ИТТФ (г. Киев) был создан комплекс средств метрологической аттестации и поверки рабочих ПТИ для спектрального диапазона от 0,3 мкм до 30 мкм [152-157] и разработана локальная поверочная схема, представленная таблицей 1.1 [155].

Верхним звеном этой локальной поверочной схемы является эталонный ПТИ шарового типа [152-154], а подчиненным эталонным средством – ПТИ разработки ИТТФ [154-159; Б.12].

Согласно локальной поверочной схеме, приведенной в таблице 1.1, единица измерения плотности потока теплового излучения от эталонного приемника ШРК-80 передается подчиненному эталонному СИ и затем от последнего – рабочим ПТИ методом сличения на радиационном компараторе. В основе работы ПТИ ИТТФ лежит принцип преобразования энергии излучения, поглощенного плоской приемной поверхностью, в электрический сигнал.

Для определения градуировочной функции подчиненного эталонного ПТИ и его периодических поверок в ИТТФ разработана метрологическая установка УМАП [Б.11]. По результатам метрологической аттестации установка УМАП получила статус поверочной метрологической установки.

Таблица 1.1 – Локальная поверочная схема на ПТИ ИТТФ АН УССР [155]



В качестве исходного эталонного ПТИ применен эталонный радиометр типа ШРКТ-40У, исследования метрологических характеристик которого проведены на прецизионной установке ПУГ [156].

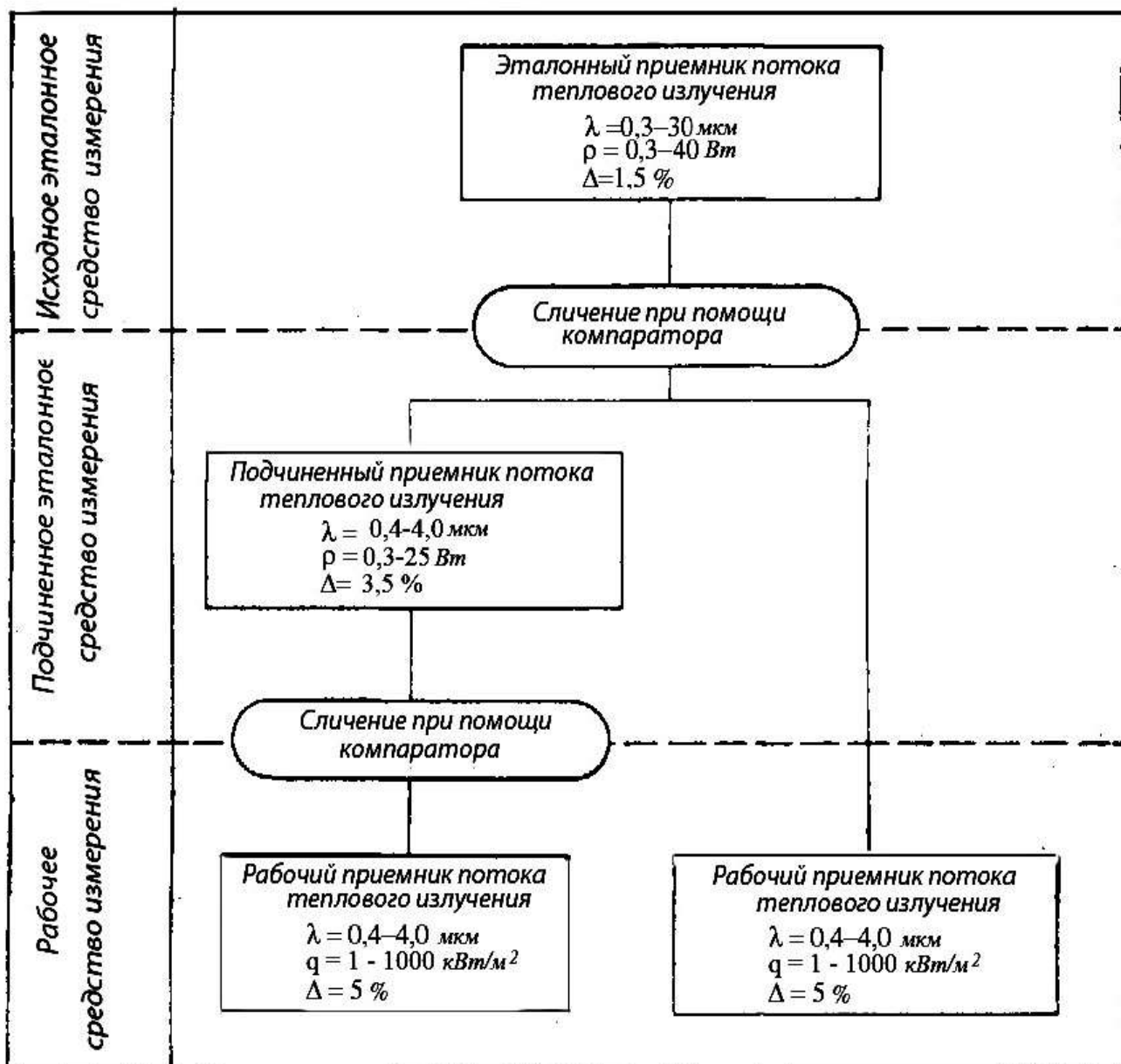
Установка ПУГ и эталонный радиометр ШРКТ-40У признаны годными для эксплуатации в качестве исходных эталонных средств для аттестации подчиненных эталонных ПТИ и нестандартизированных средств измерения потоков теплового излучения в энергетическом диапазоне от 1 кВт/м² до 100 кВт/м². Этот комплекс реализует разработанную локальную поверочную схему на ПТИ, приведенную в таблице 1.2 [156].

Надо отметить, что установка ПУГ и эталонные радиометры типа ШРК продолжают применять в НПО «Метрология» (г. Харьков) по настоящее время.

В физико-техническом институте АН Узбекской ССР (г. Ташкент) был разработан стенд для аттестации ПТИ, в котором источником излучения является Солнце [153]. По принципу работы стенд является радиационным компаратором. Сличение показаний аттестуемого ПТИ производится с показаниями эталонного радиометра первого разряда типа ШРК-80. Стенд позволяет производить градуировку и аттестацию ПТИ потоком концентрированного солнечного излучения в диапазоне длин волн (0,4 – 2,5) мкм плотностью от 5 кВт/м² до 350 кВт/м² как на воздухе, так и в вакууме с погрешностью 4 %.

Для метрологического обеспечения ряда ПТИ, разработанных в ИТТФ в 90-е годы, был создан автоматизированный комплекс «ЛУЧ», используемый как для экспериментальных исследований, так и для аттестации рабочих нестандартизированных средств измерений [101, 157]. Этот комплекс включает в себя набор технических, методических и аппаратно-программных средств. Он состоит из двух основных частей: тепловакуумной камеры (ТВК) с набором агрегатных средств, позволяющих создавать различные условия эксплуатации, и измерительно-управляющей системы для управления ходом эксперимента, сбора и обработки информации и представления её в единицах измеряемых физических величин, выполненной на основе микроЭВМ «Электроника ДЗ-28».

Таблица 1.2 – Локальная поверочная схема на ПТИ в диапазоне плотности потока теплового излучения от 1 кВт/м² до 100 кВт/м² [156].



В программном обеспечении предусмотрены фильтрация и корреляция погрешностей. Любая информация отображается по вызову оператора на экране дисплея и выводится на цифровое устройство. Передача единицы измерения плотности потока теплового излучения от исходного эталонного к рабочим СИТ осуществляется через аттестованное подчиненное эталонное средство второго разряда, разработанное в ИТТФ [155]. Допускаемые пределы погрешностей, согласно локальной поверочной схеме, распределены следующим образом: исходное эталонное средство – 2 %; подчиненное эталонное – 4 %; Рабочее средство измерений – 8 %.

Высокая стабильность интегральной плотности потока излучения в контрольной плоскости внутренних излучателей, юстировка координат механизма перемещения, возможность автоматического поддержания стабильных условий, применение высокоточных измерительных приборов, наличие оптимальных методик проведения эксперимента позволили обеспечить внутрилабораторную воспроизводимость 1 % в диапазоне воздействия плотности теплового излучения от 0,1 кВт/м² до 1000 кВт/м². Для нескольких опорных точек этого диапазона воспроизводимость составила 0,5 %.

В настоящее время в России создан Государственный первичный специальный эталон единицы плотности радиационного теплового потока в диапазоне измеряемых значений от 1 кВт/м² до 5 кВт/м² [158], который, судя по структурной схеме, приведенной на рисунке 1.17, является аналогией рассмотренной в приложении Б (раздел Б.1, рис. Б.15) с ИТИ в виде АЧТ цилиндрической формы.

За рубежом метрологическим обеспечением теплоточных измерений применительно к СИ теплового излучения наиболее активно занимаются в США [159, 160]. В Национальном институте стандартов и технологии (NIST) разработана поверочная схема на ПТП типа Гардона и Шмидта-Боэлтера [Б.15], показанная на рисунке 1.18.

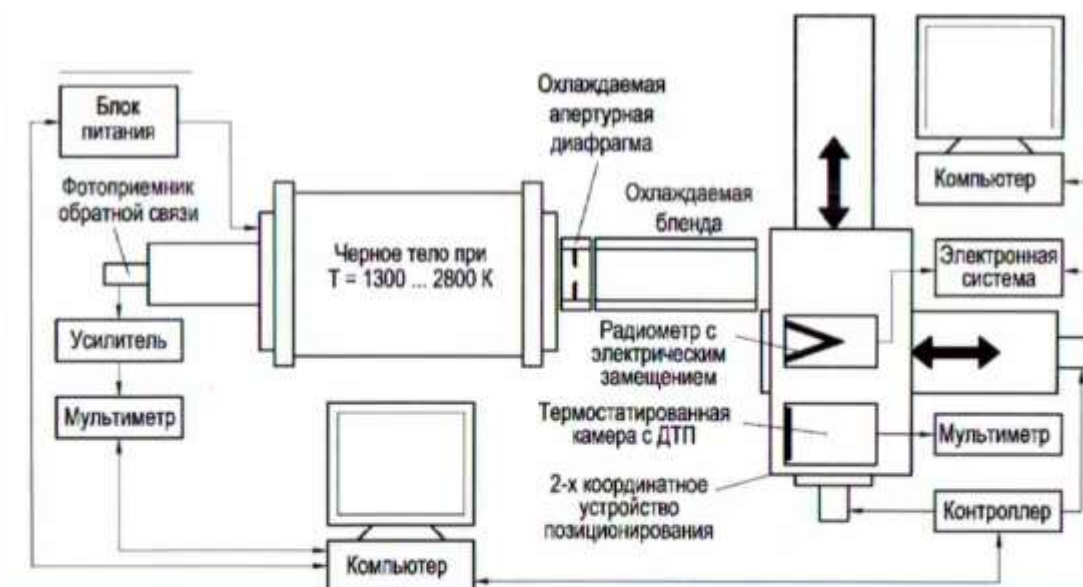


Рисунок 1.17 – Структурная схема Государственного первичного специального эталона единицы плотности радиационного теплового потока России [160].

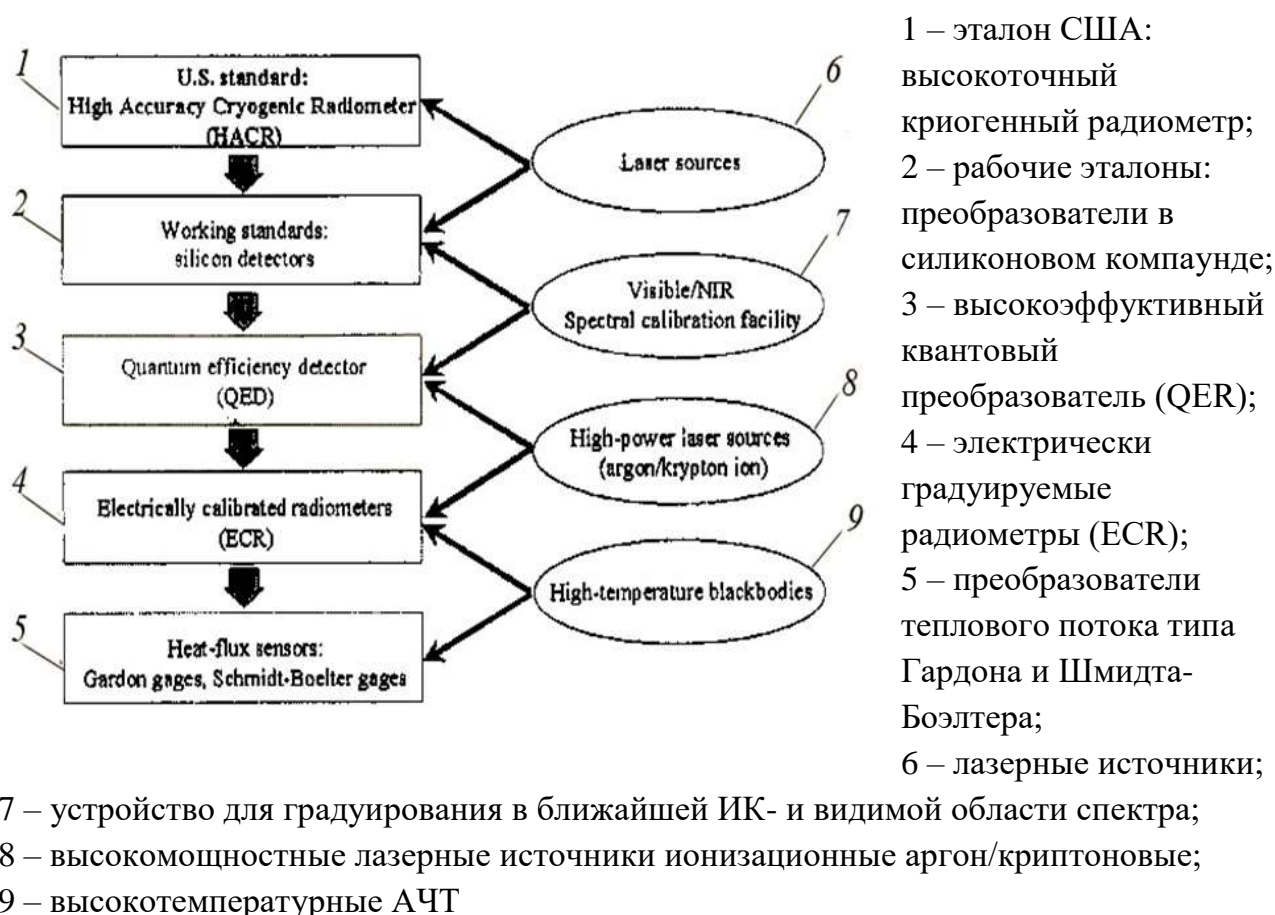


Рисунок 1.18 – Поверочная схема США для средств измерения потока теплового излучения (ПТИ типа Гардона и Шмидта-Боэлтера) [160]

Во главе этой схемы поставлен первичный эталон США «NACR» (High Accuracy Griogenic Radiometer – высокоточный криогенный радиометр) [Б.26], по которому аттестуют рабочие эталоны, в качестве которых применяют ПТП в силиконовом компаунде (silicon detectors). Другие СИТ согласно указанной схеме поверяют методом сличения с рабочими эталонами высокоэффективным квантовым преобразователем QED (Quantum efficiency detector), электрически градуируемыми радиометрами ECR (Electrically calibrated radiometers) и ПТП типа Гардона и Шмидта-Боэлтера. В установках, на которых выполняют перечисленные аттестации и поверки, применяют в качестве ИТИ различные устройства (см. рис. 1.18 и таблицу 1.3).

NACR – это абсолютный радиометр с относительно большой полостью постоянной времени около 240 с, работающий при криогенной температуре (около 5 К), со встроенным электронагревателем. Перепад температуры в полости радиометра, вызванный поглощенным излучением, сравнивается с мощностью, требуемой для такого же повышения температуры путем электрического нагрева. Эксплуатация при криогенной температуре значительно уменьшает влияние теплового излучения от ОС и теплопотери по проводам. Все это повышает точность измерения падающего излучения. Относительная неопределенность измерения при мощности 1 мВт составляет 0,02 %, а при комнатных значениях температуры погрешность возрастает до 1 %.

В США аттестацию ПТП проводят, главным образом, в установках радиационного типа [135, 136, 159, 160], в которых в качестве ИТИ применяют АЧТ, сферической и цилиндрической формы (см. приложение Б, рис. Б.13-Б.16).

В одной из эталонных установок (см. рис. Б.14) реализован абсолютный метод аттестации ПТИ, который помещают внутрь водоохлаждаемой бленды, примыкающей к выходному отверстию АЧТ. Бленда изнутри покрыта чернью, что предотвращает переотражение потока теплового излучения.

Таблица 1.3 – Источники теплового излучения, применяемые в системе метрологического обеспечения в США [160]

Тип ИТИ эталонных установок ^{*)}	Основные характеристики ИТИ			
	Диаметр полости, мм	Диаметр диафрагмы, мм	Тепловой поток или его плотность Вт или Вт/м ² (температура, К)	Статус
АЧТ цилиндрической формы с переменной температурой	25	25	3350 кВт/м ² (2773 К)	Первичный эталон
АЧТ цилиндрической формы с переменной температурой	51	51	3350 кВт/м ² (2773 К)	Действующий на конец 1991 г.
АЧТ сферической формы	230	51	200 кВт/м ² (1373 К)	Введен в 1997 г
Аргоновые и криптоновые лазеры высокой мощности	–	–	до 8 Вт	Действующий на конец 1999 г.
*) Краткое описание этих установок приведено в 1.4.2.				

Уровень плотности потока теплового излучения задают расположением аттестуемого ПТП на фиксированном расстоянии от апертуры, то есть фактически изменением значения углового коэффициента. Такая конструкция позволяет задавать поток теплового излучения плотностью вплоть до 100 кВт/м^2 .

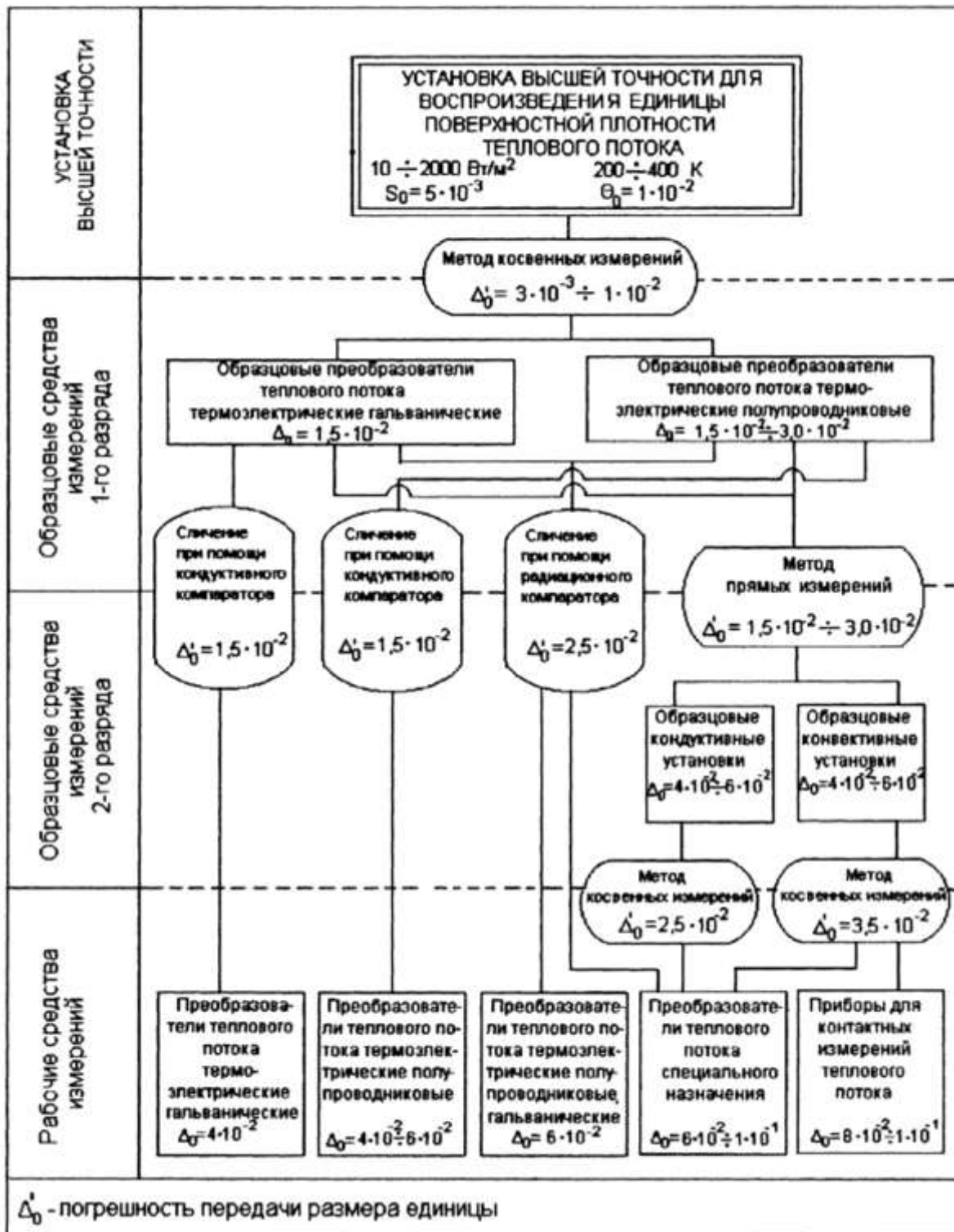
В другой эталонной установке с цилиндрическим АЧТ в качестве ИТИ (см. рис. Б.15) аттестацию ПТИ или ПТП выполняют относительным методом, сопоставляя сигналы аттестуемого и эталонного приборов. Аттестуемый ПТП устанавливают в одной плоскости с эталонным радиометром на фиксированном расстоянии от выходного отверстия АЧТ, в зависимости от ожидаемого уровня плотности потока теплового излучения. Его возможно варьировать, задавая значения от $0,04 \text{ кВт/м}^2$ до 50 кВт/м^2 . Стабильность температуры ИТИ контролируется оптическим пирометром.

1.4.2.2 Поверочные схемы для средств контактного измерения теплового потока

Метрологическое обеспечение единства измерения теплового потока контактными ПТП целесообразно осуществлять путем прямого воспроизведения единицы поверхностной плотности теплового потока с использованием кондуктивного теплообмена с последующей передачей ее размера подчиненным рабочим эталонам и рабочим ПТП.

В СССР разработки в этом направлении активно выполнялись в ИТТФ с конца 50-х годов. В 70-е годы их начали проводить и в Сибирском научно-исследовательском институте метрологии (СНИИМ, г. Новосибирск) системы Госстандарта СССР. К концу 80-х годов СНИИМ совместно с ИТТФ при содействии таких компетентных организаций как, например, НПО «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева», была разработана Государственная поверочная схема для средств измерения поверхностной плотности теплового потока [123], приведенная в таблице 1.4. Именно эта поверочная схема до настоящего времени является действующей в Украине, в то время как в России взамен поверочной схемы [123] разработан стандарт на обновленную поверочную схему [161].

Таблица 1.4 – Государственная поверочная схема для средств измерений поверхностной плотности теплового потока в диапазоне от 10 Вт/м² до 2000 Вт/м² [161]



В порядке реализации поверочной схемы, представленной в табл. 1.4, появились методики и комплекс средств для аттестации контактных ПТП в диапазоне плотности теплового потока от 10 Вт/м^2 до 2000 Вт/м^2 . В комплекс эталонных СИТ вошли установка высшей точности УВТ-53-А-88 (далее – УВТ) для абсолютной кондуктивной градуировки и аттестации эталонных ПТП в диапазоне значений температуры от 200 К до 400 К и эталонная установка-компаратор для относительной градуировки рабочих ПТП при температуре, близкой к комнатной [162, 163], разработанные в СНИИМ, и Рабочее место для периодических проверок рабочих ПТП [164], а также комплект СИТ эталонного уровня из трех исходных образцовых установок ИТТФ серии КГУ [5, 165].

УВТ, реализующая абсолютный метод измерения аксиального теплового потока через аттестуемый ПТП в вакуумном адиабатическом калориметре [166-168], включает в себя блок для создания и измерения аксиального теплового потока с заданной поверхностной плотностью и пропускания этого потока через аттестуемый ПТП, а также набор термоэлектрических плоских ПТП для хранения размера воспроизводимой единицы измерения и проверки стабильности установки. Общий вид УВТ, конструктивная схема теплового блока и описание УВТ и других эталонных установок для кондуктивной аттестации плоских ПТП приведены в приложении Б (раздел Б.4).

Установку УВТ применяют для аттестации рабочих эталонов первого разряда, которыми являются термоэлектрические гальванические и полупроводниковые ПТП с пределами допускаемой относительной погрешности от 1,5 % до 3 %.

Эталонные средства измерений первого разряда применяют для поверки эталонных средств второго разряда и рабочих средств измерений методами прямых измерений и сличения. В качестве рабочих эталонов второго разряда согласно поверочной схеме [123] выступают кондуктивные или конвективные установки, в которых через поверяемый ПТП задается тепловой поток системой «нагреватель-холодильник» или открытой нагретой поверхностью при естественной конвекции, соответственно, с пределами допускаемых

относительных погрешностей от 4% до 6%. Эти СИТ применяют для поверки рабочих ПТП специального назначения и приборов для контактных измерений теплового потока методом косвенных измерений.

Эталонный кондуктивный компаратор обеспечивает градуировку и поверку рабочих ПТП в диапазоне значений плотности теплового потока от 100 Вт/м^2 до 2000 Вт/м^2 при температуре от 300 К до 350 К с пределом допускаемой основной относительной погрешности 3%.

Для оснащения территориальных органов Госстандарта и ведомственных метрологических служб в СНИИМ была разработана поверочная установка «Рабочее место для поверки преобразователей теплового потока РМП ПТП» (далее – РМП) [164] (см. приложение Б. раздел Б.4).

Ряд эталонных средств разработки СНИИМ для области контактных теплоточных измерений был существенно расширен разработанными в ИТТФ тремя унифицированными установками серии КГУ. Эти установки применялись для метрологической аттестации изготавливаемых в ИТТФ термоэлектрических гальванических ПТП, наиболее востребованных в 80-е и 90-е годы типоразмеров. Каждая установка представляет собой совокупность функционально объединенных блоков, устройств и систем, в которую входят измерительная головка с устройствами задания нормированного усилия прижима и термостатирования свободных спаев термопар, система регулирования и стабилизации теплового потока и температуры, а также аппаратура для опроса первичных преобразователей, регистрации их сигналов и обработки полученной измерительной информации [5, 34]. Принципиальные схемы измерительных головок с указанием основных технических характеристик приведены в таблице 1.5, а внешний вид – на рисунке 1.19.

Установки серии КГУ реализуют кондуктивный способ подведения теплоты к аттестуемому ПТП и выполнены как в абсолютном, так и в относительном варианте. Установки КГУ-1-25 и КГУ-2-25 применялись для градуирования, аттестации и поверки по плотности теплового потока в диапазоне значений от 10^3 Вт/м^2 до 10^4 Вт/м^2 ПТП диаметром 25 мм и

Таблица 1.5 – Принципиальные схемы и технические характеристик измерительных метрологических установок типа КГУ [36, 40]

	Название, модель установки (метод измерения)	Принципиальная схема измерительной головки установки	Технические характеристики	
			Обозначение	Диапазон значений
ИСХОДНЫЕ ЭТАЛОНЫ	Кондуктивная градуировочная установка КГУ-1-25 (абсолютный метод)		$q, \text{Вт/м}^2$ $T, \text{К}$ $\delta_{\text{осн}}, \%$ $\varnothing, \text{мм}$ $h, \text{мм}$	$10^3 - 10^4$ 100–500 $\pm 1,5$ 25 ± 1 1,5–3,5
	Кондуктивная градуировочная установка КГУ-3-20 (абсолютный метод)		$\Phi, \text{Вт}$ $T, \text{К}$ $\delta_{\text{осн}}, \%$ $\varnothing, \text{мм}$ $h, \text{мм}$	1–10 100–500 $\pm 1,5$ 20 ± 1 1,5–3,5
	Кондуктивная градуировочная установка КГУ-2-25 (относительный метод сравнением)		$q, \text{Вт/м}^2$ $T, \text{К}$ $\delta_{\text{осн}}, \%$ $\varnothing, \text{мм}$ $h, \text{мм}$	$10^3 - 10^4$ 100–500 $\pm 2,5$ 25 ± 1 1,5–3,5
<p>1 – регулируемый нагреватель; 2 – регулируемый теплосток; 3 – источник нормированной мощности; 4 – температуровыравнивающая пластина; ПТП – преобразователь теплового потока аттестуемый; ПТПЭ – эталонный; \varnothing, h – диаметр, высота ПТП; Φ – тепловой поток; q – поверхностная плотность теплового потока; T – температура; $\delta_{\text{осн}}$ – границы основной относительной погрешности измерений</p>				



Рисунок 1.19 – Внешний вид эталонных установок типа КГУ (разработки ИТТФ, Украина) [5].

толщиной от 1,5 мм до 3,0 мм при температуре от 100 К до 500 К с относительной погрешностью 1,5% и 2,5%, соответственно. Установка КГУ-3-20 – для аттестации по тепловому потоку ПТП диаметром 20 мм и толщиной от 1,85 мм в диапазоне значений от 1 Вт до 10 Вт в том же интервале значений температуры с относительной погрешностью 1,5%.

Метрологические характеристики КГУ, установленные по результатам государственной метрологической аттестации, оказались на уровне погрешностей установки высшей точности УВТ-53-А-88 и получили статус исходных образцовых средств измерения (в настоящее время согласно [169] это статус первичного эталона) и поставлены во главе локальных поверочных схем, соответственно, представленных таблицами 1.6 и 1.7 [170].

Таким образом в СССР к началу 90-х годов была заложена нормативная и приборная базы для государственной системы обеспечения измерения теплового потока и поверхностной плотности теплового потока средствами измерительной техники контактного типа. В связи с дальнейшим распространением в практике теплоточных измерений плоских ПТП и возрастанием требований к достоверности получаемой с их помощью информации внимание к эталонной метрологической аппаратуре не ослабевает как в странах ближнего, так и дальнего зарубежья.

После распада СССР оказалось, что в области теплоточных измерений установка высшей точности УВТ-53-А-88, стоящая во главе государственной поверочной схемы для средств измерения поверхностной плотности теплового потока [123], осталась в России, а на Украине – установки КГУ-1-25 и КГУ-3-20 со своими локальными поверочными схемами.

По истечении более 20 лет как в России, так и в Украине сложились условия, которые потребовали существенного обновления системы метрологического обеспечения теплоточных измерений. Возрастание требований к повышению точности СИТ теплового потока продиктовано прежде всего актуальностью задач энерго- и ресурсосбережения как общемировой проблемы, так и в связи с принятием в России и в Украине

Таблица 1.6 – Локальная поверочная схема для средств измерения поверхностной плотности теплового потока в диапазоне (1000 – 10000) Вт/м² [170]

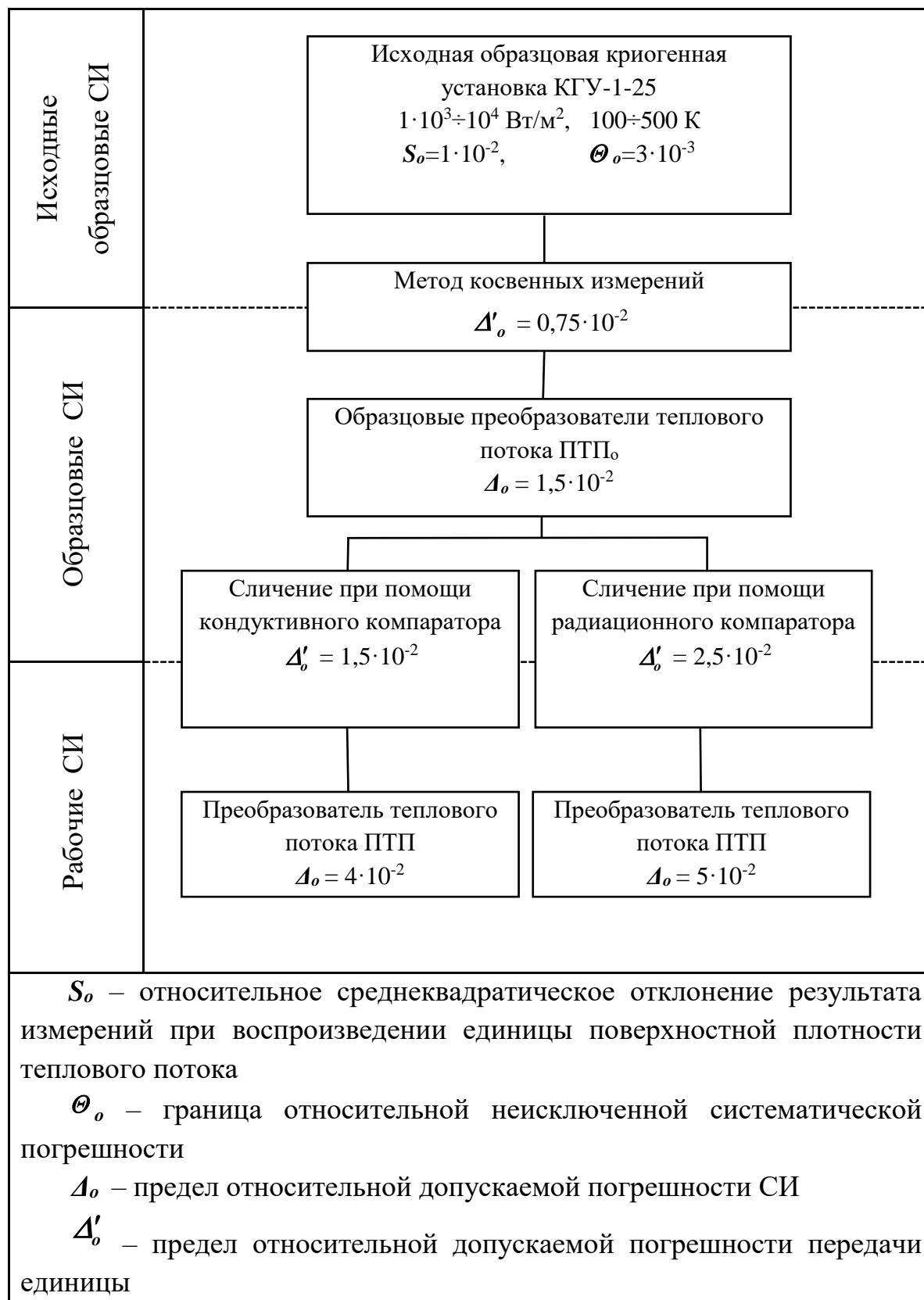
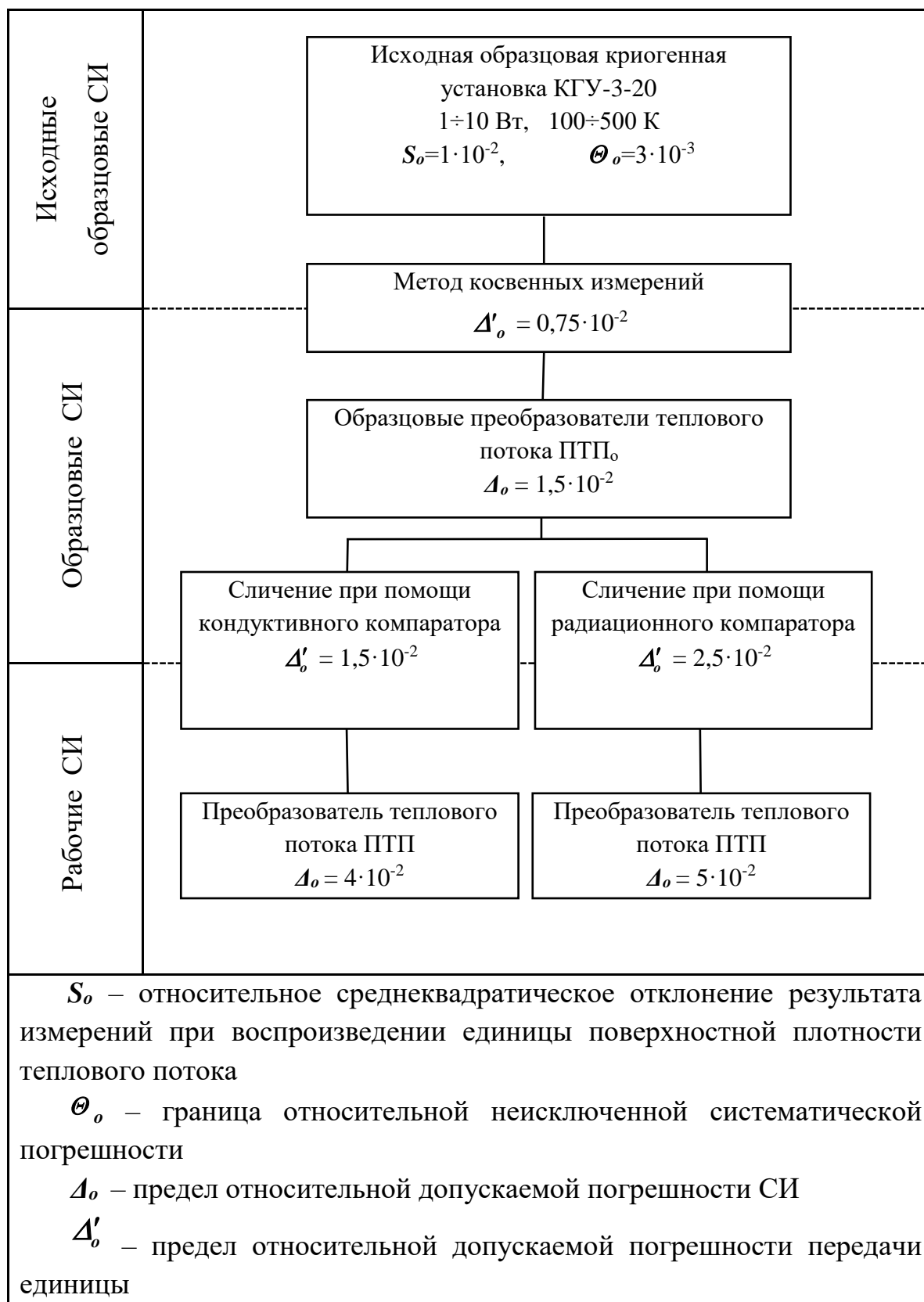


Таблица 1.7 – Локальная поверочная схема для средств измерения теплового потока в диапазоне (1,0 – 10) Вт [170]



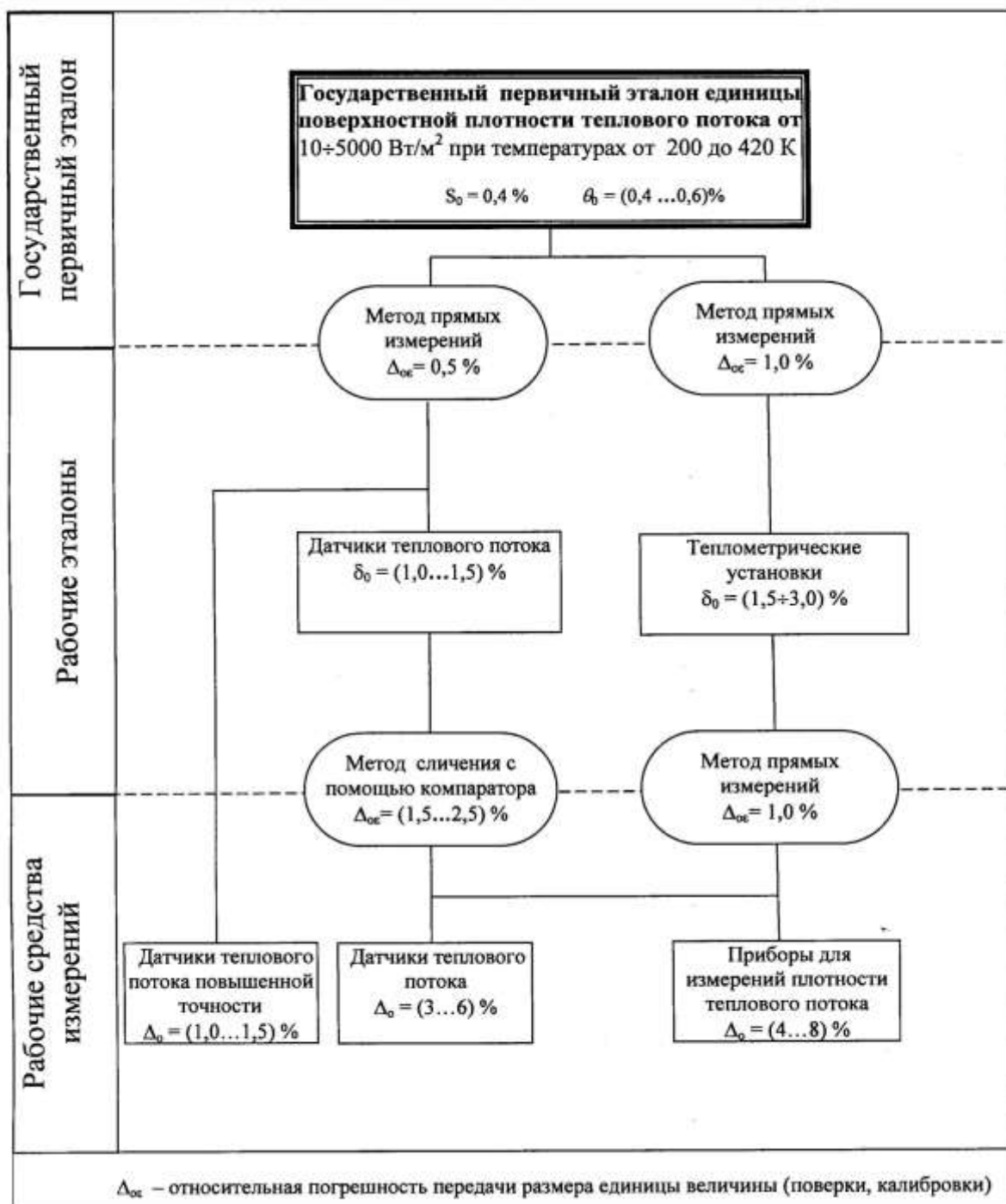
законов "Об энергосбережении". Это привело к более широкому распространению и применению СИТ этой величины и необходимости повышения точности технических измерений и, следовательно, уровня их метрологического обеспечения.

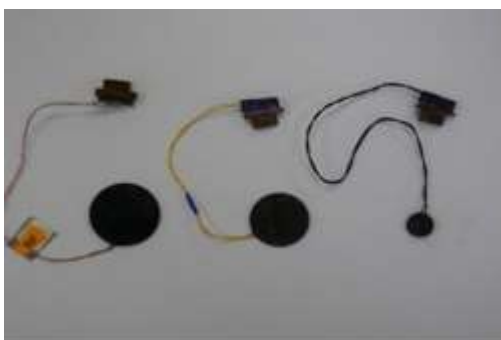
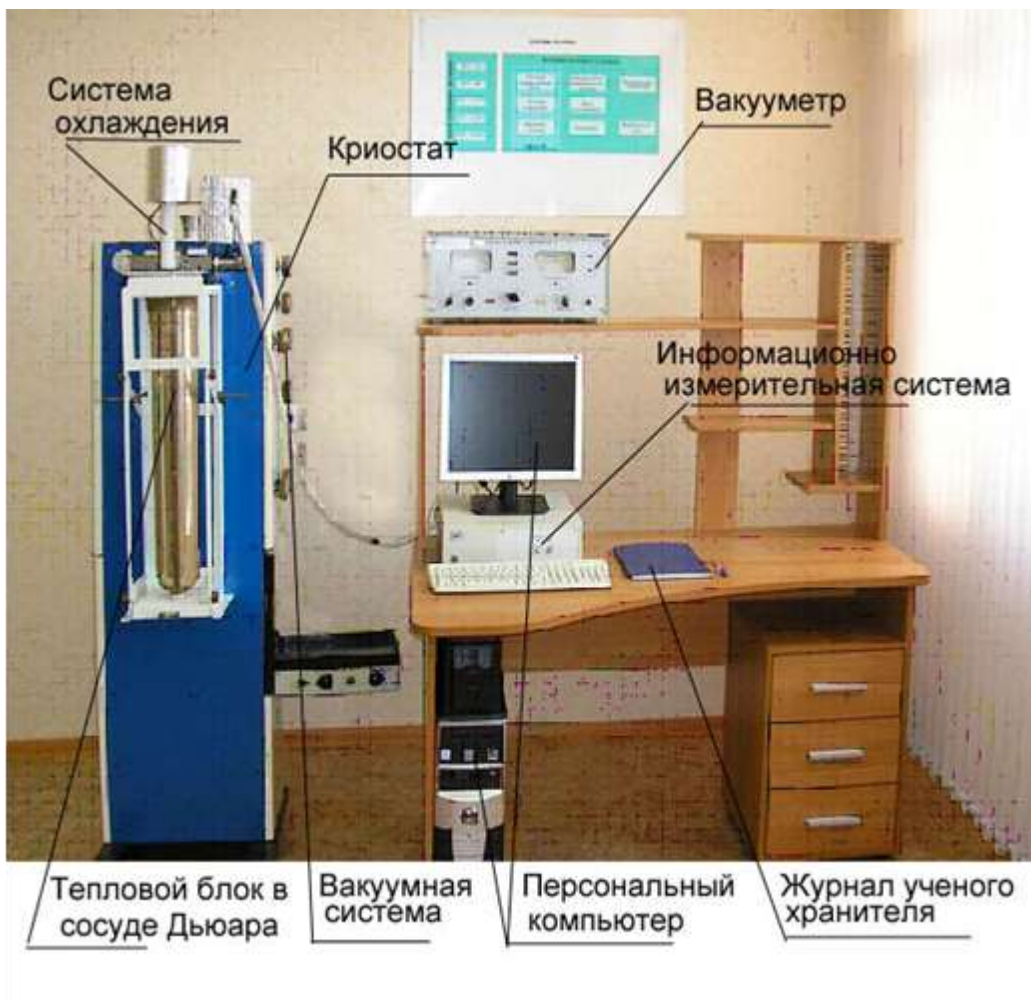
В связи со сказанным в России в течение 2003-2007 гг. проведены работы [168, 171-173], направленные на повышение точности теплоточных измерений путем изменения статуса созданной в 1988 г. установки высшей точности УВТ-53-А-88 на Государственный первичный эталон. Соподчинение СИТ, участвующих в передаче размера единицы измерения поверхностной плотности теплового потока от эталонных рабочим СИТ установлено в обновленной Государственной поверочной схеме [161], приведенной в таблице 1.8.

Государственный первичный эталон России, внешний вид которого показан на рисунке 1.20, разработан на базе установки УВТ с использованием новых, более удачных технических решений [173]. Он содержит эталонную калориметрическую установку с адиабатическим источником теплового потока, снабженным активной изоляцией, и набор эталонных преобразователей: два металлических терморезистивных преобразователя ДТП-М1 и ДТП-М2 для оценки качества воспроизведения размера единицы измерения плотности теплового потока и контроля стабильности установки и три термоэлектрических преобразователя в полимерном заливочном компаунде ДТП-П3, ДТП-П4, ДТП-П5 для передачи размера единицы плотности теплового потока, а также информационно-измерительную и управляющую системы, позволяющие задавать и поддерживать необходимые параметры и условия эксперимента, отображать данные в режиме реального времени, собирать, обрабатывать и сохранять всю измерительную информацию.

Эталонная калориметрическая установка реализует абсолютный метод измерения и основана на формировании одномерного теплового потока в адиабатной измерительной ячейке, конструктивная схема которой показана на рисунке 1.21 [173].

Таблица 1.8 – Российская обновленная Государственная поверочная схема для средств измерения поверхностной плотности теплового потока в диапазоне от 10 Вт/м² до 5000 Вт/м² при температуре от 200 К до 420 К [161].



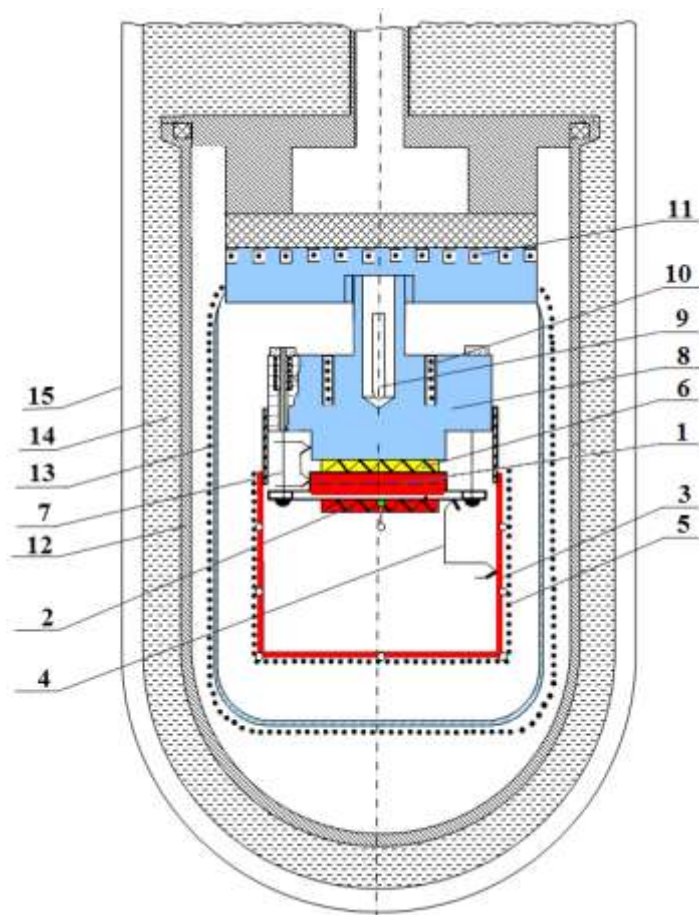


Термоэлектрические преобразователи
ДТП – ПЗ, ДТП – П4, ДТП – П5



Терморезисторные преобразователи
ДТП – М1, ДТП – М2

Рисунок 1.20 – Внешний вид измерительного комплекса Государственного первичного эталона поверхностной плотности теплового потока России [173]



1 – основной нагреватель,
 2 – контрольный ПТП,
 3 – адиабатический экран,
 4 – дифференциальная
 термомпара,
 5 – нагреватель адиабатного
 экрана,
 6 – эталонный ПТП,
 7 – растяжки,

8 – холодильник-термостат,
 9 – платиновый термометр
 сопротивления,
 10 – нагреватель холодильника,
 11 – фоновый нагреватель
 12 – вакуумная камера,
 13 – внешний экран,
 14 – жидкий азот,
 15 – сосуд Дьюара

Рисунок 1.21 – Конструктивная схема адиабатной измерительной ячейки теплового блока [173]

Аттестуемый эталонный ПТП зажимают между основным нагревателем 1 и термостатированным холодильником 8, температура которого задается и поддерживается постоянной. Для уменьшения теплообмена между основным нагревателем 1 и экраном 3, а также исключения конденсации влаги в измерительной ячейке при низких значениях температуры, в ней создается вакуум. Для получения низких значений температуры вакуумную камеру помещают в сосуд Дьюара 15 с жидким азотом 14.

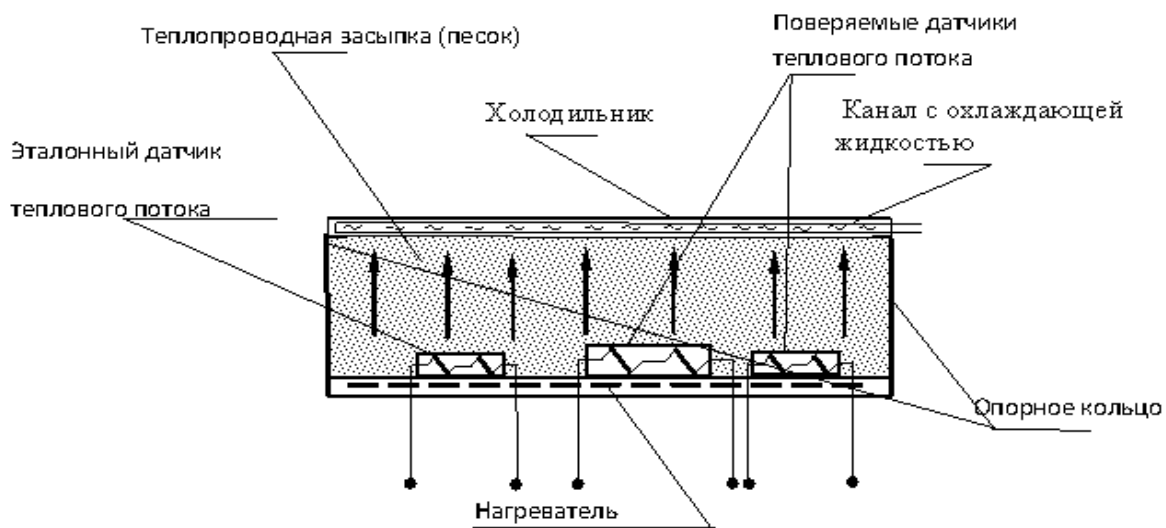
В 2007 году помимо указанных выше эталонных СИТ теплового потока в ОАО НПП «Эталон» (г. Омск, Россия) разработана установка модели УТМ-1, являющаяся кондуктивным компаратором, для поверки ПТП различных форм и размеров в диапазоне от 50 Вт/м^2 до 2000 Вт/м^2 с относительной погрешностью передачи размера единицы (1,5–2,5) % при температуре от $20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $150 \text{ }^\circ\text{C}$ [100]. Внешний вид и схема измерительной ячейки установки УТМ-01 показаны на рисунке 1.22.

Установка состоит из теплотрического блока и блоков охлаждения и управления, а также многоканального измерителя коэффициента теплопроводности.

Эталонный и аттестуемый ПТП размещают в рабочем объеме теплотрической камеры и засыпают песком, коэффициент теплопроводности которого определен заранее. Требуемую плотность теплового потока определяют по установленному перепаду температуры между нагревателем и холодильником и коэффициенту теплопроводности песка. Указанная погрешность передачи размера единицы вызывает сомнение, поскольку тепловой поток, проходящий через эталонный и поверяемые ПТП, в данных условиях зависит от отношения диаметра к толщине ПТП, размеров чувствительных зон и соотношения коэффициентов теплопроводности ПТП и песка. При отношении диаметра ПТП к его толщине, равному или менее 10, методическая погрешность возрастает до 10 % и более. Кроме того, время выхода на режим установки составляет несколько часов.



a)



б)

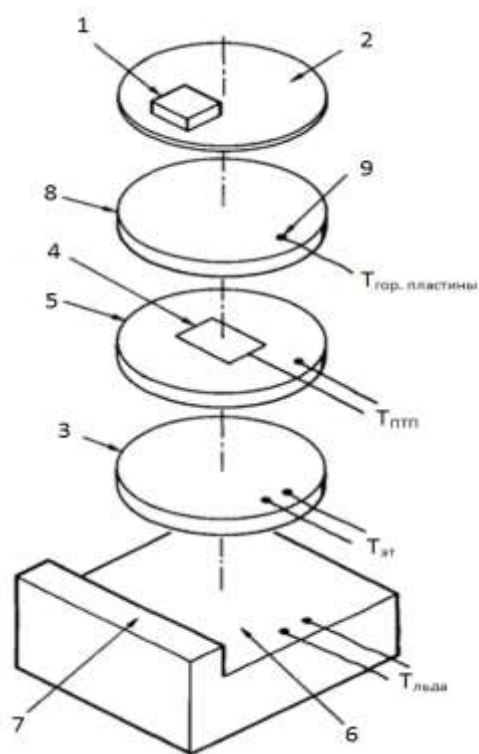
Рисунок 1.22 – Внешний вид (*a*) и схема (*б*) измерительной ячейки теплотрической установки УТМ-1 (НПО «ЭТАЛОН», г. Омск, Россия) [100].

Средства для контактных измерений плотности теплового потока, включая ПТП, выпускают многие фирмы в США, Великобритании, Германии, Франции, Швейцарии, Нидерландах, Венгрии и др. (см. приложение А). В зависимости от области применения и диапазона измеряемых значений заявленная погрешность этих средств составляет от 1 % до 10 % [142, 174-178].

На государственном уровне вопросами единства измерений плотности кондуктивного теплового потока занимаются, по нашим сведениям, Национальный институт стандартов и технологий (NIST) в США, Национальная организация TNO в Нидерландах и Национальная физическая лаборатория (NPL) Национального института измерений Великобритании. Опубликованные данные этих метрологических институтов распространяются на область значений плотности теплового потока от 10^3 Вт/м² до 10^5 Вт/м².

Наиболее популярными для аттестации контактных ПТП являются установки, реализующие метод «горячей пластины», который можно отнести к методу измерений при полной компенсации теплового потока от источника в неактуальном направлении, а также метод определения функции преобразования аттестуемого ПТП с применением эталонной меры теплопроводности [109, 110, 140].

В монографии нидерландского ученого Ф. ван дер Граафа [110] подробно описаны различные ПТП и применяемые в западных европейских странах методы их аттестации. На первое место ван дер Грааф ставит метод определения коэффициента преобразования ПТП с применением эталонного образца теплопроводности. На рисунке Б.24. приведена схема градуировочной установки, эксплуатируемой в TNO (Нидерланды) [110]. В [140] описана установка для аттестации ПТП с применением в качестве эталона теплопроводности экструдированного пенополистирола, схема которой представлена на рисунке 1.23. Плотность теплового потока определяют по значению теплового сопротивления эталонной меры теплопроводности и измеренного перепада температуры на ее торцах.



- 1 – тепловой резервуар;
- 2 – горячая пластина (нагреватель);
- 3 – эталонная мера теплопроводности;
- 4 – аттестуемый ПТП;
- 5 – слой теплового сопротивления (пенополистирол) с аттестуемым ПТП;
- 6 – холодная пластина (холодильник);
- 7 – ванночка с тающим льдом;
- 8 – слой теплового сопротивления (пенополистирол);
- 9 – термопара

Рисунок 1.23 – Схема метода аттестации ПТП с применением эталонной меры теплопроводности [140].

Измерительный столбик состоит из набора пенополистирольных дисков, в один из которых запрессован аттестуемый ПТП. Температурный и тепловой режимы обеспечивают применением определенного количества пенополистирольных дисков, а фиксированный перепад температуры поддерживают за счет использования таких физических свойств чистых веществ, как постоянная температура плавления либо затвердевания.

Преимуществами такого способа аттестации плоских ПТП является простота устройства, возможность варьирования значениями плотности теплового потока посредством изменения числа слоев теплового сопротивления и температуры аттестации ПТП путем смены позиции аттестуемого ПТП относительно холодного (либо горячего) торца измерительного столбика либо применением определенного сочетания пары чистых веществ. Однако здесь, как и в предыдущем случае, не учтена разница в теплопроводности ПТП и эталонного материала, что приводит к искажению поля теплового потока в периферийной зоне ПТП [107, 109] и, следовательно, к увеличению

погрешности аттестации. Помимо этого, должны быть известны коэффициенты теплопроводности эталонной меры и погрешности ее определения при той температуре, при которой она находится в измерительном столбике.

Относительный метод с использованием эталонного материала вошел в основу национальных стандартов ряда зарубежных стран, регламентирующих методики и технические средства для аттестации плоских ПТП, например, в США это стандарты C1130-90 и C1132-95 [142, 177]. В стандарте [142] регламентирован сравнительный метод, применение которого позволяет просто и доступно поверять средство измерения теплового потока на промышленном оборудовании или части ограждающей строительной конструкции. При этом ПТП или крепится на поверхности, или становится составной частью системы изоляции.

Согласно стандарту [178] аттестацию ПТП выполняют в широком диапазоне значений плотности теплового потока и рабочей температуры, что позволяет в дальнейшем применять ПТП при испытаниях различных изоляционных материалов в расширенном температурном диапазоне. В этом стандарте даны три принципиальные схемы, приведенные на рисунке 1.24.

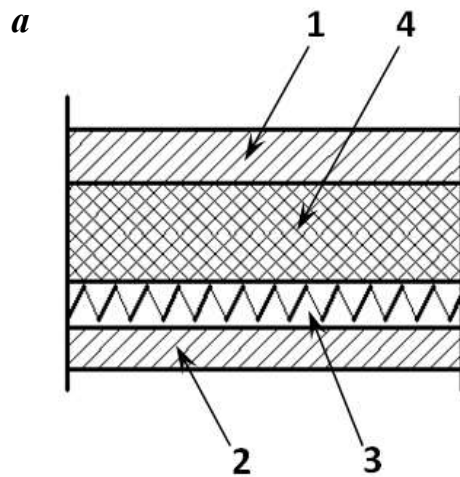
Первая схема (см. рис 1.24, *а*) распространяется на аттестацию ПТП с использованием одной эталонной меры теплопроводности – образца толщиной $h_{\text{Э}}$ с известным коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{Э}}$. Коэффициент преобразования ПТП вычисляют по формуле (1.19), где $\Delta T_{\text{Э}}$ – разность значений температуры горячей и холодной сторон эталонного образца.

Вторая схема (см. рис 1.22, *б*) распространяется на аттестацию одного ПТП с применением двух эталонных образцов. Расчетная формула имеет вид:

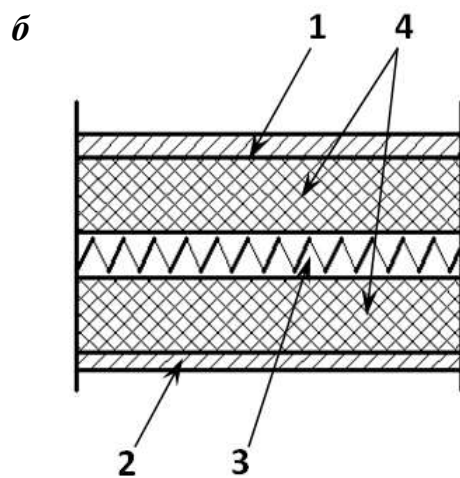
$$K = 0,5(C_{\text{Э},a} + C_{\text{Э},б}) / (E \cdot (1/(T_{a,\Gamma} - T_{a,X}) + 1/(T_{б,\Gamma} - T_{б,X}))), \quad (1.20)$$

где $C_{\text{Э},a}, C_{\text{Э},б}$ – тепловая проводимость эталонных образцов *а* и *б*, равная $\lambda_{\text{Э}} / h_{\text{Э}}$ для каждого образца.

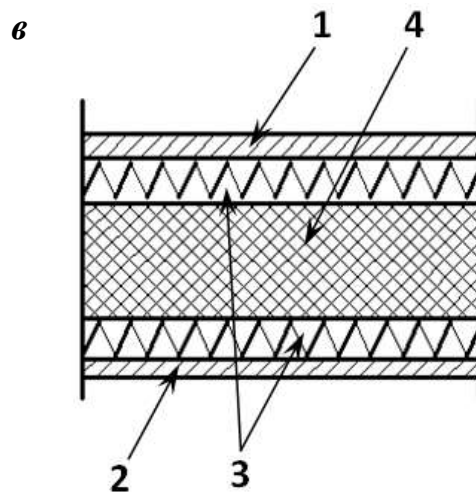
Третья схема (см. рис 1.24, *в*) регламентирует аттестацию одновременно двух ПТП с использованием одного образца эталонного материала. Коэффициент преобразования каждого ПТП вычисляют по формуле (1.19).



a – аттестация ПТП с применением одной эталонной меры теплопроводности;



б – аттестация ПТП с применением двух эталонных мер теплопроводности;



в – аттестация двух ПТП с применением одной эталонной образца меры теплопроводности;

1 – холодильник; 2 – нагреватель;

3 – аттестуемый ПТП; 4 – эталонная мера теплопроводности

Рисунок 1.24 – Схемы аттестации плоских ПТП согласно стандарту [178]

1.5 Выводы и постановка задач исследования

Из аналитического обзора современной научно-технической литературы, авторских свидетельств, патентов и нормативных документов, касающихся методов и средств измерения плотности теплового потока, следует, что:

- широкое применение в измерительной практике имеют термоэлектрические ПТП вида вспомогательной стенки как для стационарного, так и нестационарного теплового потока;

- при наличии широкой номенклатуры рабочих ПТП, выпускаемых в Украине и ввозимых из-за рубежа, актуальным является реконструкция и модернизация как материальной, так и нормативной и эталонной баз для метрологического обеспечения теплотметрии;

- из анализа способов аттестации ПТП видны преимущества абсолютного кондуктивного метода с заданием нормированного значения поверхностной плотности теплового потока с помощью подводимой и измеряемой электрической мощности по сравнению с радиационным и конвективным методами, а также кондуктивным методом аттестации по эталонной мере теплопроводности;

- на современном этапе научно-технического развития в передовых странах мира практика теплоточных измерений обеспечена эталонными средствами измерительной техники с погрешностью (неопределенностью) в пределах (0,5...3) %;

- конструкция эталонных ПТП должна обеспечивать их корректное применение как в условиях кондуктивного, так и радиационного компарирования, для чего эталонный ПТП необходимо выполнять с охранной зоной;

- на сегодняшний день в Украине основными потребителями ПТП являются организации строительной области, для которой характерны измерения плотности теплового потока на уровне нескольких десятком Вт/м², и предприятия аэрокосмической отрасли, интересы которой распространяются на измерения значений плотности теплового потока до 20 кВт/м².

На основании сделанных выводов задачами данного исследования являются следующие:

- исследовать методические погрешности измерения плотности теплового потока на объектах контроля различных типов, обусловленные искажениями полей температуры и теплового потока и теоретически обосновать структуру преобразователей теплового потока с улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками;

- разработать эталонные средства измерения для воспроизведения, хранения и передачи размера единицы измерения плотности теплового потока;

- обосновать принципы построения поверочной схемы для средств измерения плотности теплового потока;

- разработать, изготовить, аттестовать и внедрить в научно-производственный комплекс Украины средства теплотрии для решения различных прикладных задач в широком динамическом диапазоне тепловых величин;

- создать систему метрологического обеспечения и нормативные документы (стандарты и методики) для обеспечения единства измерений тепловых величин и теплофизических характеристик.

ГЛАВА 2

ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ПЛОСКИМ ПТП НА РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТАХ

Термоэлектрические плоские ПТП вида вспомогательной стенки имеют широкое распространение в мире, включая Украину и страны СНГ, в различных сферах научных исследований и промышленного производства. Этому способствовало то, что с 1998 г. эти ПТП в Украине и странах СНГ стали стандартизованными средствами измерения [6, 7], а также в связи с введением в действие стандартов, касающихся применения ПТП в теплотехнических измерениях [179-184]. В этих условиях стало актуальным ответить на вопрос о точности технических измерений на различных объектах при самых разнообразных условиях применения ПТП.

Для обеспечения требуемой точности измерений с применением ПТП необходимо, чтобы ПТП имел параметры (габаритные размеры; соотношение размеров ПТП, его термобатарей и охранной зоны; ТФС)), которые обеспечивают минимальную методическую погрешность, за которую принята погрешность, определяемая согласно РМГ 29-99 [184] следующим выражением:

$$\delta^q = (q_{ИЗМ} - q_0) / q_0 = q_{ИЗМ} / q_0 - 1. \quad (2.1)$$

Измеренное ПТП значение плотности теплового потока в общем случае не совпадает с действительным из-за неидентичности температурных полей ОК при наличии и отсутствии ПТП. Эта неидентичность обусловлена различием ТФС объекта и ПТП, а также размерами ПТП, далекими от бесконечно малых. Известно, что одним из способов уменьшения различия между измеренным и действительным значениями плотности теплового потока ($q_{ИЗМ}$ и q_0), является изготовление ПТП с охранной зоной по периметру чувствительного элемента. При этом ее ширина должна быть такой, чтобы обеспечить одномерность теплового потока в области чувствительного элемента как при метрологической

аттестации и поверках ПТП, так и при его применении на различных ОК.

Для обеспечения корректности теплоточных измерений ниже проведен анализ методических погрешностей, обусловленных нарушением одномерности температурного поля и начального теплового потока при установке ПТП на ОК. Анализ выполнен путем исследования зависимостей степени искажения тепловых и температурных полей для наиболее типичных ОК и наиболее распространенных случаев взаимного расположения ПТП и ОК при различных граничных условиях теплообмена с ОС [42, 185-187].

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 при различных граничных условиях теплообмена с ОС, рассмотрено несколько задач, отразивших многообразие случаев применения ПТП [42]. Кроме обозначений, указанных в «Перечне условных обозначений, индексов и сокращений», применены следующие:

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

$$\Delta T = T_{OC} - T_0; \quad (2.2)$$

Θ – искажение первоначальной температуры ОК, равное разности значений температуры искаженного и первоначального температурных полей, равное

$$\Theta = T(z, r) - T_0; \quad (2.3)$$

K^T и K^q – безразмерные критерии степени искажения первоначальных температуры ОК и плотности теплового потока, соответственно:

$$K^T = (T(z, r) - T_0) / (T_{OC} - T_0), \quad (2.4)$$

$$K^q = q_{ИЗМ} / q_0, \quad (2.5)$$

откуда с учетом (2.1) имеем: $K^q = \delta^q + 1$. (2.6)

2.1 ПТП на изотермической поверхности металлической пластины

Наиболее частым случаем применения ПТП является размещение его на поверхности ОК, температурное поле которого изотермично, что имеет место при установке ПТП на пластине из высокотеплопроводного материала ($\lambda_{ОК} \gg \lambda_{ПТП}$), противоположная сторона которой омывается хорошо турбулизированным потоком жидкости. На поверхности, где установлен ПТП, происходит теплообмен с граничными условиями 3-го рода. Модель теплообмена приведена на рисунке 2.1 [36, 42, 185-191].

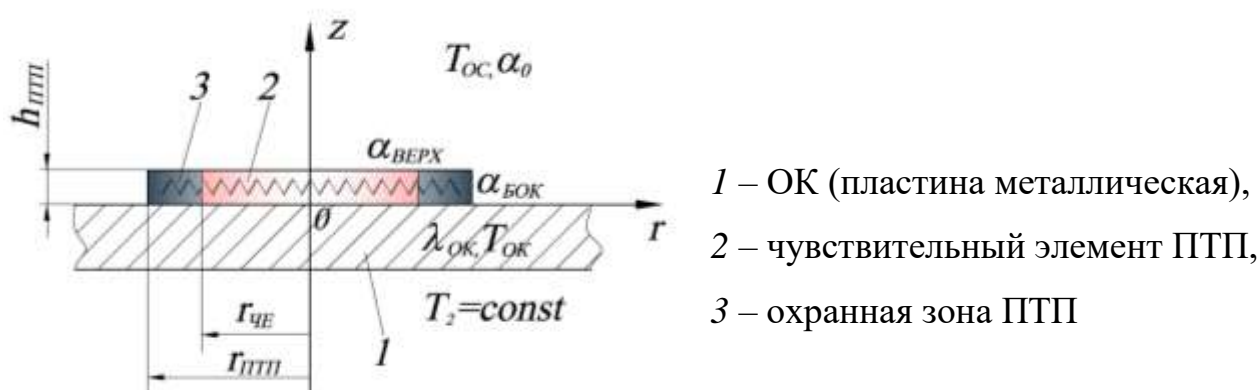


Рисунок 2.1 – Схема расположения ПТП на изотермической поверхности пластины из высокотеплопроводного материала

Ввиду изотермичности ОК данная задача сведена к рассмотрению возможных искажений в ПТП. При наличии конвективного теплообмена при неодинаковых коэффициентах теплообмена на поверхностях ОК и ПТП, то есть при $\alpha_{ВЕРХ} \neq \alpha_{БОК} \neq \alpha_0$, появляется методическая погрешность измерения теплового потока с применением плоского ПТП. Эта погрешность обусловлена не только тепловым сопротивлением конвективному теплообмену с ОС на поверхности ОК $R_{\alpha} = 1/\alpha_0$, собственным тепловым сопротивлением ПТП $R_{ПТП} = h_{ПТП}/\lambda_{ПТП}$, контактному тепловым сопротивлением R_K между нижним торцом ПТП и поверхностью ОК, но и тепловым сопротивлением конвективному теплообмену на торцевой и боковой поверхностях ПТП: $R_{\alpha, ВЕРХ} = 1/\alpha_{ВЕРХ}$ и $R_{\alpha, БОК} = 1/\alpha_{БОК}$.

В этом случае плотность действительного теплового потока равна

$$q_0 = \Delta T / R_\alpha = (T_{OK} - T_{OC}) / R_\alpha, \quad (2.7)$$

а плотность измеренного с применением ПТП теплового потока равна

$$q_{ИЗМ} = \Delta T / (R_{\alpha, ВЕРХ} + R_{ПТП} + R_K). \quad (2.8)$$

Исходя из (2.7) и (2.8) согласно определению (2.1), методическая погрешность измерения теплового потока ПТП, расположенным на изотермической металлической пластине, δ^q , имеет следующий вид:

$$\delta^q = R_\alpha / (R_{\alpha, ВЕРХ} + R_{ПТП} + R_K) - 1, \quad (2.9)$$

из анализа которого следует, что эта погрешность может быть уменьшена за счет снижения теплового сопротивления ПТП $R_{ПТП}$ или контактного теплового 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 с коэффициентом теплообмена $\alpha_{БОК}$ [186].

Для обеспечения одномерности температурного и теплового полей необходимо ПТП снабжать охранной зоной. Определение размеров охранной зоны сведено к исследованию стационарного осесимметричного распределения теплового потока в ПТП, представляющем собой ограниченный короткий цилиндр высотой $h_{ПТП}$ и диаметром $D_{ПТП} = 2r_{ПТП}$ с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{ПТП}$ [185-188]. На свободной поверхности ПТП (при $z = h_{ПТП}$) имеет место конвективный теплообмен с ОС, температура которой $T_{OC} = const$ и коэффициент теплообмена $\alpha_{ВЕРХ}$. В плоскости контакта ПТП с поверхностью ОК (при $z = 0$) имеется контактное тепловое сопротивление R_K . На его боковой поверхности (при $r = r_{ПТП}$) происходит теплообмен с ОС с коэффициентом теплообмена $\alpha_{БОК}$, чему соответствует тепловое сопротивление теплообмену на боковой поверхности $R_{\alpha, БОК}$. Схема физической модели ПТП, установленного на поверхности изотермической металлической пластины приведена на рис. 2.2.

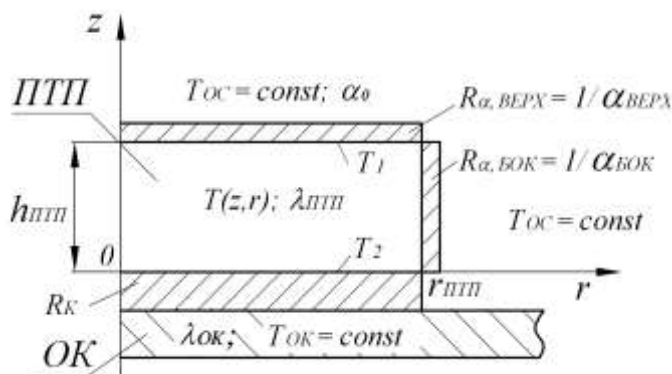


Рисунок 2.2 – Схема ПТП, установленного на поверхности изотермического объекта контроля

При условии осевой симметрии и независимости ТФС ПТП от температуры стационарное распределение температуры в ПТП описывается классическим уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах r и z [195, 196]:

$$\frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z)}{\partial z^2} = 0 \quad (2.10)$$

с граничными условиями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{ПТП} \cdot \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} = \alpha_{ВЕРХ} \cdot (T_{OC} - T_1), \quad T_1 = T(r, z = h_{ПТП}), \quad \text{при } r \leq r_{ПТП} \\ \lambda_{ПТП} \cdot \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} = \frac{1}{R_K} \cdot (T_2 - T_{OK}), \quad T_2 = T(r, z = 0), \quad \text{при } r \leq r_{ПТП} \\ \lambda_{ПТП} \cdot \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} = \alpha_{БОК} \cdot (T_{OC} - T_{БОК}), \quad T_{БОК} = T(r = r_{ПТП}, z), \quad \text{при } 0 \leq z \leq h_{ПТП}, \\ \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} = 0, \quad \text{при } r = 0. \end{array} \right. \quad (2.11)$$

При введении безразмерных координат $\rho = r/r_{ПТП}$, $\zeta = z/h_{ПТП}$ и геометрического параметра ПТП $k = D_{ПТП}/h_{ПТП}$, а также температуры в безразмерной форме $\vartheta(\zeta, \rho) = (T(r, z) - T_{OC})/T_{OC}$ и $\vartheta_i = (T_i - T_{OC})/T_{OC}$ при $i = 1, 2$ и введением числа Био $Bi_{БОК} = \alpha_{БОК} \cdot r_{ПТП}/\lambda_{ПТП}$ уравнение (2.10) и граничные условия (2.11) преобразуются к виду:

$$\frac{k^2}{4} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta(\rho, \zeta)}{\partial \zeta^2} + \frac{\partial^2 \vartheta(\rho, \zeta)}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \vartheta(\rho, \zeta)}{\partial \rho} = 0, \quad (2.12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \vartheta(\rho, 1)}{\partial \zeta} = \frac{R_{ПТП}}{R_{\alpha, ВЕРХ}} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta(\rho, 1)), \quad \text{при } \rho \leq 1, \\ \frac{\partial \vartheta(\rho, 0)}{\partial \zeta} = \frac{R_{ПТП}}{R_K} \cdot (\vartheta(\rho, 0) - \vartheta_2), \quad \text{при } \rho \leq 1, \\ \frac{\partial \vartheta(1, \zeta)}{\partial \rho} + Bi_{БОК} \cdot \vartheta(1, \zeta) = 0, \quad \text{при } 0 \leq \zeta \leq 1, \\ \frac{\partial \vartheta(0, \zeta)}{\partial \rho} = 0, \quad \text{при } 0 \leq \zeta \leq 1. \end{array} \right. \quad (2.13)$$

В силу линейности рассматриваемого дифференциального уравнения (2.12) его решение найдено методом разделения переменных и интегральных преобразований [186, 195] и приведено в пункте В.1 приложения В.

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

$$q_{ЛОК}(\rho, \zeta) = -\frac{\lambda_{ПТП} \cdot T_{ОС}}{h_{ПТП}} \cdot \frac{\partial \vartheta(\rho, \zeta)}{\partial \zeta}. \quad (2.14)$$

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

$$q_0 = -\frac{T_1 - T_2}{R_{ПТП} + R_{\alpha, ВЕРХ} + R_K} = -\frac{T_{ОС}}{R_{ПТП}} \cdot \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{1 + R_{\alpha, ВЕРХ} / R_{ПТП} + R_K / R_{ПТП}}. \quad (2.15)$$

Тогда с учетом (2.9), отношение плотностей локального теплового потока (2.14) и неискаженного (2.15) (т.е. критерий степени искажения локального теплового потока) имеет следующее выражение:

$$K_{ЛОК}^q = \frac{q_{ЛОК}(\rho, \zeta)}{q_0} = \frac{\partial \vartheta(\rho, \zeta) / \partial \zeta}{\vartheta_1 - \vartheta_2} \cdot (1 + R_{\alpha, ВЕРХ} / R_{ПТП} + R_K / R_{ПТП}). \quad (2.16)$$

Поскольку сигнал ПТП, выполненного в виде вспомогательной стенки с конкретными размерами и ТФС, пропорционален значению среднеинтегрального теплового потока по поверхности чувствительного элемента ПТП (а не локального), целесообразно рассматривать расчетные

формулы для среднеинтегральных по торцевой поверхности:

– плотности теплового потока:

$$q_{CP}(\rho, \zeta) = \frac{1}{\pi\rho^2} \int_0^\rho \frac{\partial\vartheta(\rho, \zeta)}{\partial\zeta} 2\pi\rho d\rho = 2K_q \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{J_1(v_n \cdot \rho)}{\rho} \cdot P_n(v_n \cdot \zeta); \quad (2.17)$$

– температуры:

$$\vartheta_{CP}(\rho, \zeta) = \frac{1}{\pi\rho^2} \int_0^\rho \vartheta(\rho, \zeta) 2\pi\rho d\rho = 2K_t \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \frac{J_1(v_n \cdot \rho)}{v_n \rho} \cdot S_n(\zeta). \quad (2.18)$$

Для граничных условий данного случая, сформулированных в начале параграфа 2.1, путем преобразований получено:

$$Bi_{БЕРХ} = \alpha_{БЕРХ} h_{ПТП} / \lambda_{ПТП} = R_{ПТП} / R_{\alpha, БЕРХ},$$

$$Bi_{БОК} = \alpha_{БОК} \cdot r_{ПТП} / \lambda_{ПТП} = 0,5 \cdot k \cdot R_{ПТП} / R_{\alpha, БОК} = 0,5k(R_{ПТП} / R_{\alpha, БЕРХ}) \cdot (R_{\alpha, БЕРХ} / R_{\alpha, БОК}) = \\ = 0,5k \cdot Bi_{БЕРХ} (R_{\alpha, БЕРХ} / R_{\alpha, БОК}),$$

а расчетные коэффициенты K_t (см. (В.1.2)), $D_{n,1}$ и $D_{n,2}$ (см. (В.1.8)) и K_q (см. (В.1.10)) преобразованы к виду: $K_t = 0,5 \cdot k \cdot Bi_{БЕРХ}$, $D_{n,1} = 2v_n / (k \cdot Bi_{БЕРХ})$, $D_{n,2} = 0$, $K_q = Bi_{БЕРХ}$, а характеристическое уравнение примет вид: $J_1(v_n) = Bi_{БОК} \cdot v_n \cdot J_0(v_n)$.

С учетом этих изменений и того, что $R_K = 0$ (т.к. теплопроводность материала стенки намного выше теплопроводности ПТП), поле температуры в безразмерной форме можно определить по формуле (В.1.1), а плотности теплового потока – по формуле (2.14) для локального и по формуле (2.17) – для среднеинтегрального, при этом отношения значений плотности измеренного и действительного теплового потока, т.е. теплоточные критерии степеней искажения $K_{ЛОК}^q$ и $K_{СР}^q$ определены соотношениями, соответственно:

$$\text{– для локального:} \quad K_{ЛОК}^q = \frac{q_{ЛОК}}{q_0} = \left(\frac{\partial\vartheta(\rho, \zeta)}{\partial\zeta} / \Delta\vartheta \right) \cdot (1 + 1/Bi_{БЕРХ}), \quad (2.19)$$

$$\text{– для среднеинтегрального:} \quad K_{СР}^q = \frac{q_{СР}}{q_0} = \frac{q_{СР}}{\vartheta_1 - \vartheta_2} \cdot (1 + 1/Bi_{БЕРХ}). \quad (2.20)$$

Результаты вычислений теплоточного критерия степени искажения локального теплового потока по (2.19) для входящего в ПТП и выходящего из ПТП теплового потока представлены семействами графиков в таблице 2.1 в зависимости от текущего относительного радиуса $r/h_{ПТП}$ при вариациях числа Био $Bi_{ВЕРХ} = 10^{-1}; 10^{-2}; 10^{-3}$, геометрического параметра ПТП $k = 10; 20; 30; 40$ и отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{БОК} / \alpha_{ВЕРХ} = 10^{-4}; 10^{-2}; 1; 5; 10$. Как видим, значения входящего и выходящего из ПТП теплового потока не равны, а краевой эффект распространяется от боковой поверхности в глубину ПТП на расстояние не далее пяти высот ПТП. Эти результаты получены для ПТП, представляющего собой изотропное тело, то есть $\lambda_{РАД} = \lambda_{ПР}$. В анизотропном ПТП глубина проникновения искажения теплового потока будет зависеть еще и от отношения $\lambda_{РАД} / \lambda_{ПР}$ и тем меньше, чем $\lambda_{РАД} < \lambda_{ПР}$.

В таблице 2.2 представлены результаты вычисления теплоточного критерия степени искажения среднеинтегрального теплового потока по формуле (2.20) в зависимости от параметров, аналогичных параметрам с таблицы 2.1. Эти данные можно распространить на ПТП, высота которого совпадает с высотой термобатареи, т.е. $h_{ТБ} = h_{ПТП}$.

Анализ семейств графиков таблицы 2.2 подтверждает предыдущий вывод о том, что глубина проникновения искажения теплового потока из-за наличия теплообмена на боковой поверхности ПТП не превышает пяти высот ПТП и быстро уменьшается с увеличением радиуса ПТП.

Как правило, ПТП вида вспомогательной стенки представляет собой плоскую монолитную конструкцию из электроизоляционного компаунда, внутри которого расположена термобатарея, по обе стороны которой имеются защитные электроизоляционные слои, как это показано на рисунке 2.3 [42, 189-191]. 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:

Таблица 2.1 – Характер распространения искажений плотности локального теплового потока на входе в ПТП и выходе из него в зависимости от относительного текущего радиуса ПТП $r/h_{ПТП}$ при вариациях числа Био $Bi_{ВЕРХ}$, геометрического параметра ПТП $k = D_{ПТП}/h_{ПТП}$ и отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{БОК}/\alpha_{ВЕРХ}$.

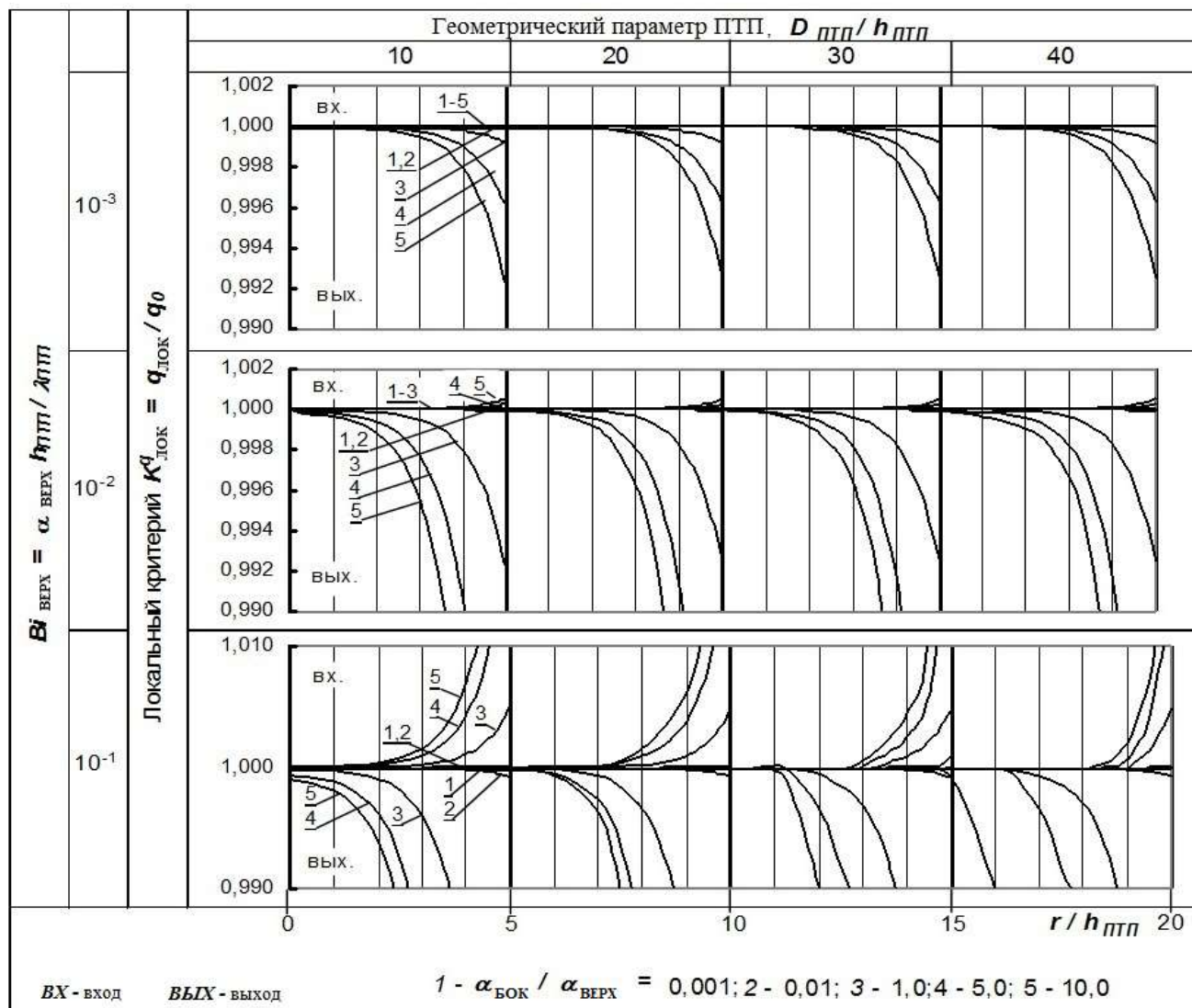
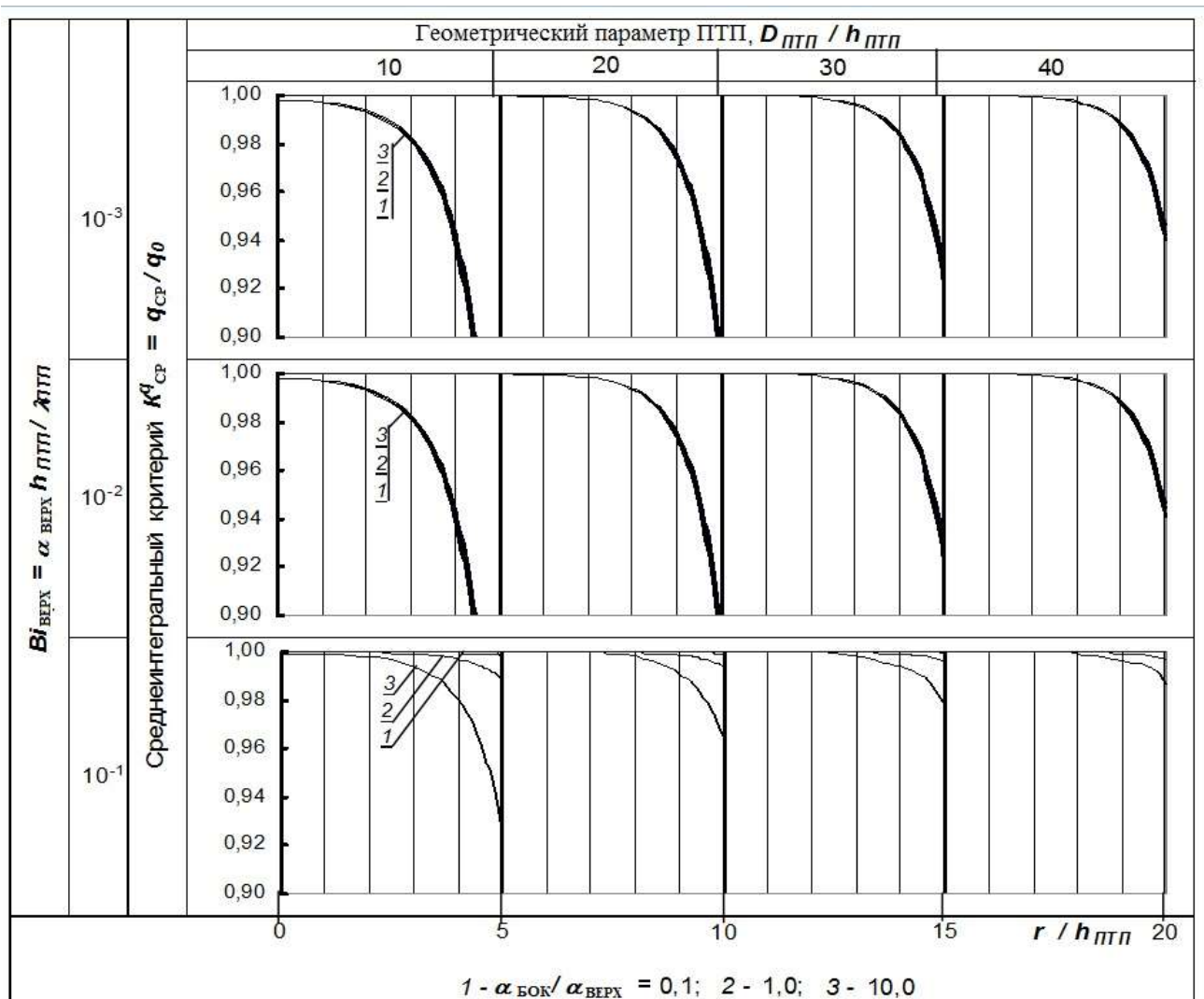
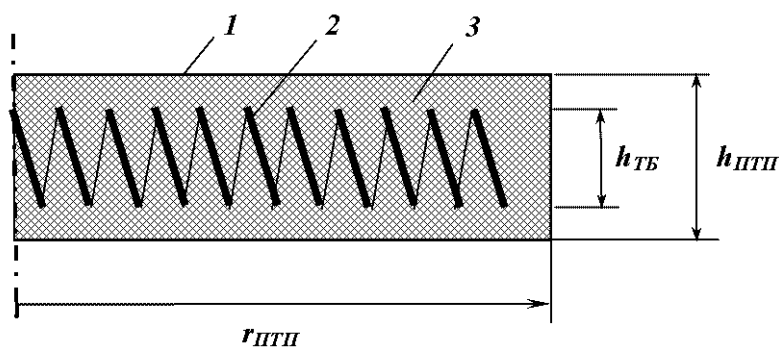


Таблица 2.2 – Характер распространения искажений плотности среднеинтегрального теплового потока при относительной высоте термобатареи $h_{ТБ}/h_{ПТП}$ в зависимости от относительного текущего радиуса ПТП $r/h_{ПТП}$ при вариациях числа Био $Bi_{ВЕРХ}$, геометрического параметра ПТП $k = D_{ПТП}/h_{ПТП}$ и отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{БОК}/\alpha_{ВЕРХ}$





- 1 – ПТП;
2 – термобатарея;
3 – электроизоляционный
компаунд

Рисунок 2.3 – Схема

ПТП вида вспомогательной стенки

$$q_{CP} = \lambda_{ПТП} \frac{T_{CP}(r, h_1) - T_{CP}(r, h_2)}{h_{ТБ}} = \lambda_{ПТП} \frac{T_{CP}(r, h_1) - T_{CP}(r, h_2)}{h_{ПТП} (h_{ТБ}/h_{ПТП})}, \quad (2.21)$$

где h_1 и h_2 – безразмерные параметры термобатареи в ПТП, определяемые следующими соотношениями:

$$h_1 = 0,5 \cdot (1 - h_{ТБ}/h_{ПТП}), \quad h_2 = 1 - 0,5 \cdot (1 - h_{ТБ}/h_{ПТП}). \quad (2.22)$$

Критерий распространения искажения среднеинтегрального теплового потока с учетом (2.21) и (2.22) имеет вид:

$$K_{CP}^q = \frac{q_{CP}}{q_0} = \frac{\vartheta_{CP}(r, h_1) - \vartheta_{CP}(r, h_2)}{h_{ТБ}/h_{ПТП}}, \quad (2.23)$$

где среднеинтегральная температура ϑ_{CP} определяется по (2.18).

Результаты вычислений критерия распространения искажения среднеинтегрального теплового потока по формуле (2.23) в зависимости от относительной высоты термобатареи $h_{ТБ}/h_{ПТП}$ представлены семействами графиков в таблице 2.3 при $Bi_{БЕРХ} = 0,01$ и таблице 2.4 при $Bi_{БЕРХ} = 0,1$. Вычисления выполнены при вариациях отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{БОК}/\alpha_{БЕРХ} = 0,1; 1; 10$, геометрического параметра ПТП $k = 10; 20; 30; 40$ и относительной высоты термобатареи $h_{ТБ}/h_{ПТП} = 1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2; 0,1$.

Как видно на этих графиках, краевой эффект проникновения искажения теплового потока с уменьшением числа $Bi_{БЕРХ}$ уменьшается и при $Bi_{БЕРХ} = 10^{-3}$ им практически можно пренебречь.

Таблица 2.3 – Характер распространения искажений плотности среднеинтегрального теплового потока на выходе из ПТП при $Bi_{\text{ВЕРХ}}=0,01$ в зависимости от относительного текущего радиуса $r/h_{\text{ПТП}}$ при вариации геометрического параметра ПТП $k = D_{\text{ПТП}}/h_{\text{ПТП}}$, относительной высоты термобатареи $h_{\text{ТБ}}/h_{\text{ПТП}}$ и отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{\text{БОК}}/\alpha_{\text{ВЕРХ}}$

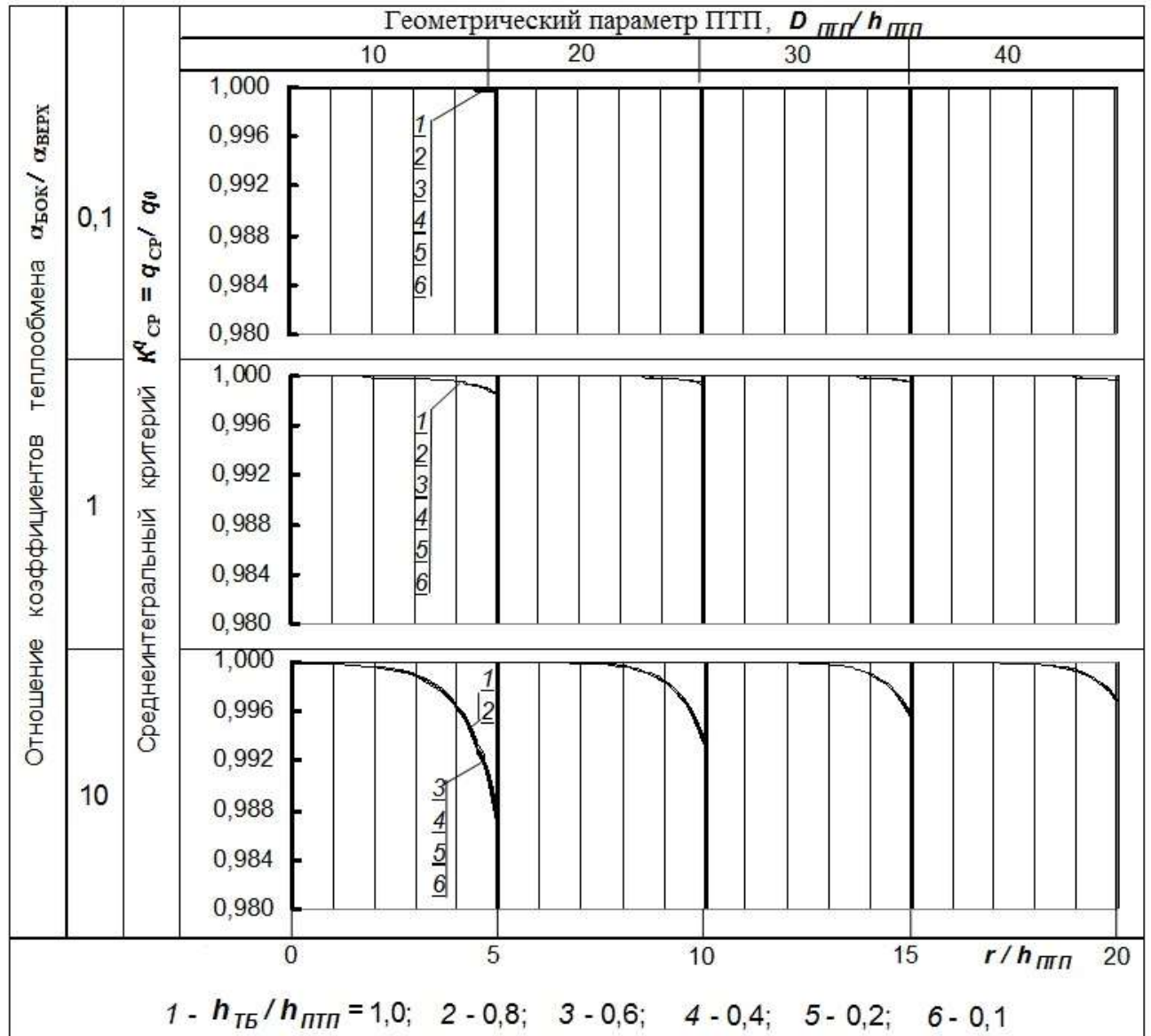
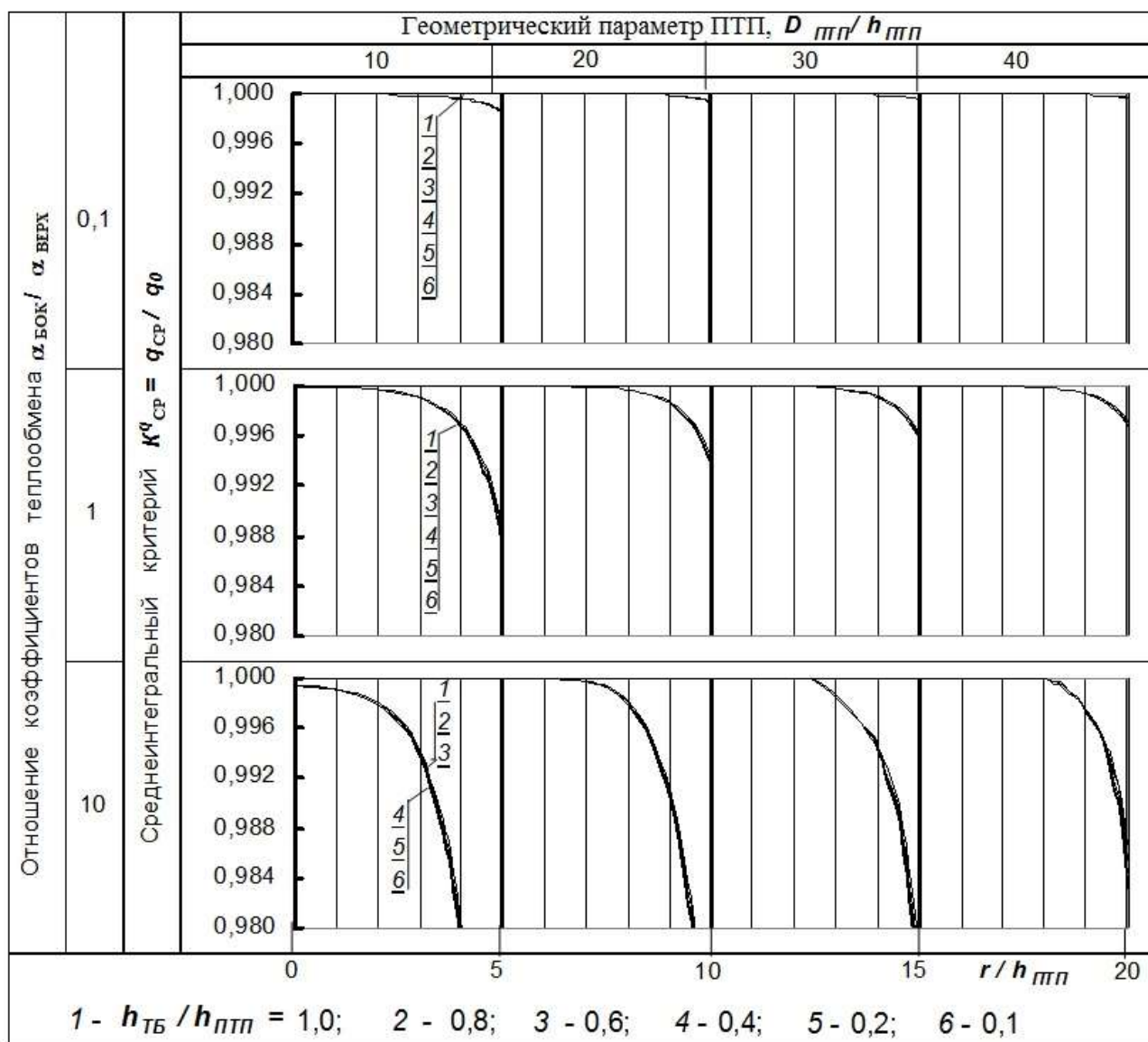


Таблица 2.4 – Характер распространения искажений плотности среднеинтегрального теплового потока на выходе из ПТП при $Bi_{\text{ВЕРХ}}=0,1$ в зависимости от относительного текущего радиуса $r/h_{\text{ПТП}}$ при вариации геометрического параметра ПТП $k = D_{\text{ПТП}}/h_{\text{ПТП}}$, относительной высоты термобатареи $h_{\text{ТБ}}/h_{\text{ПТП}}$ и отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{\text{БОК}}/\alpha_{\text{ВЕРХ}}$



Основной вывод из этих результатов состоит в том, что изменение толщины внешних защитных слоев по обе стороны термобатареи, вмонтированной в ПТП, не приводит к краевому эффекту, то есть не влияет на точность измерения плотности теплового потока.

2.2 ПТП, вмонтированный в изотермическую пластину из высокотеплопроводного материала заподлицо с ее поверхностью

Не менее часто при использовании ПТП его необходимо вмонтировать заподлицо с поверхностью пластины из высокотеплопроводного материала ОК, например, в приборостроении или при контроле промышленного оборудования. При этом очень важно грамотно выполнить охранную зону вокруг чувствительного элемента ПТП. В связи с этим рассмотрена задача для случая расположения ПТП на изотермической пластине заподлицо с ее поверхностью, около которой происходит теплообмен с граничным условием 3-го рода.

На противоположной поверхности пластины имеет место высокоинтенсивный теплообмен, обеспечивающий на ней граничное условие 1-го рода [36, 42]. Схема теплообмена приведена на рисунке 2.4.

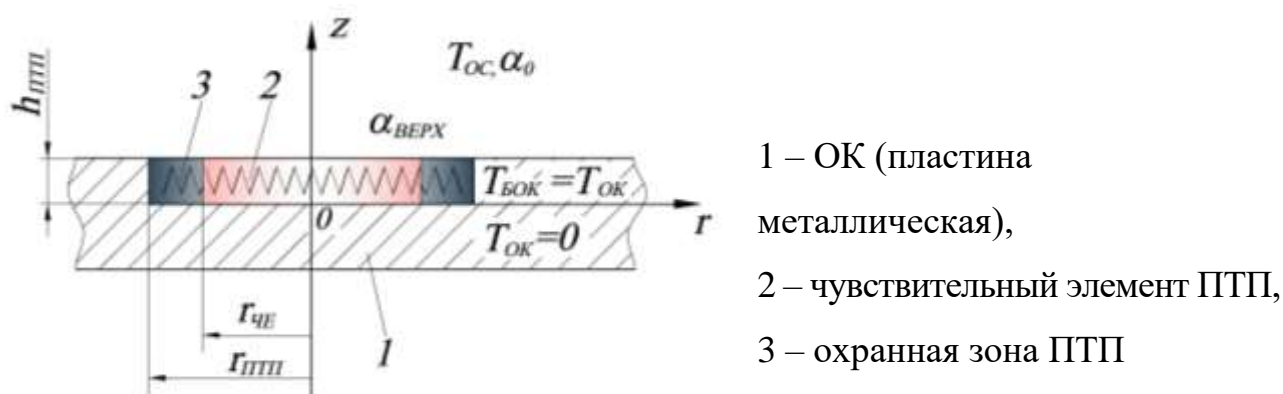


Рисунок 2.4 – Схема ПТП, вмонтированного в изотермическую пластину из высокотеплопроводного материала заподлицо с ее поверхностью

Как и в предыдущей задаче (см. 2.1), методическая погрешность измерения плотности теплового потока зависит от соотношения значений теплового сопротивления ПТП и конвективному теплообмену ОК с ОС и может быть определена по формуле (2.9). В этих условиях также присутствует краевой

эффект в ПТП, влияние которого нельзя не учитывать. По аналогии с принятым в 2.1 тепловое сопротивление конвективному теплообмену на торцевой поверхности ПТП равно $R_{\text{БЕРХ}} = 1/\alpha_{\text{БЕРХ}}$. Однако, на боковой поверхности ПТП $T_{\text{БОК}} = T_2$, а $R_{\text{БОК}} = 0$. Поэтому вместо характеристического уравнения к функции температуры (В.1.1) будет следующее:

$$J_0(v) = 0, \quad (2.24)$$

а вместо коэффициента, определенного формулой (В.1.3), будет коэффициент A_n , равный:

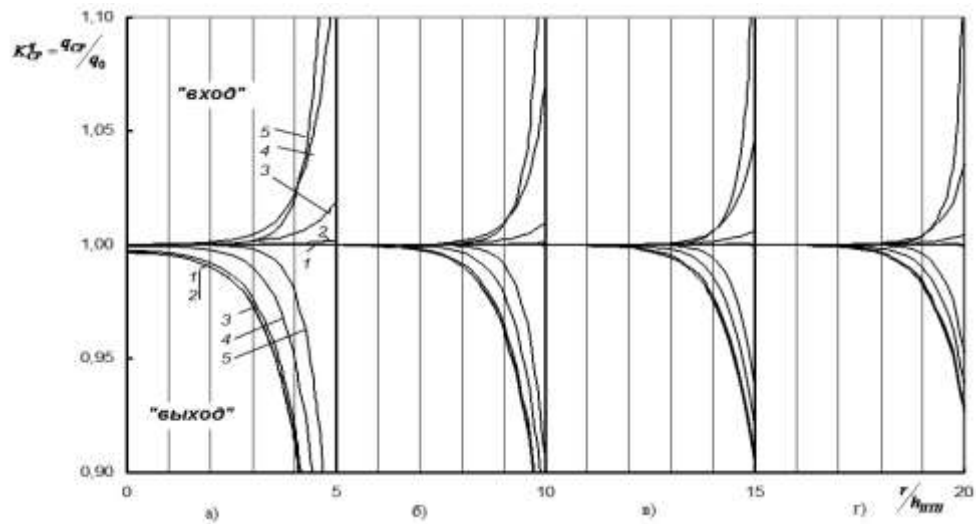
$$A_n = 2/(v_n^2 \cdot J_1(v_n)). \quad (2.25)$$

Соотношения (2.10) – (2.13) и (В.1.1) с введенными к ним безразмерными обозначениями действительны и для данного случая.

По аналогии с предыдущей задачей и с учетом того, что ПТП измеряет значения плотности среднеинтегрального теплового потока, исследован краевой эффект в ПТП путем вычисления значений критерия K_{CP}^q распространения искажения плотности среднеинтегрального теплового потока.

Результаты вычислений представлены на рисунке 2.5 семействами графиков критерия K_{CP}^q как функции относительного радиуса $r/h_{\text{ПТП}}$ при вариациях геометрического параметра k и числа Био $Bi_{\text{БЕРХ}}$ на входе и выходе из ПТП. Как видим, искажения теплового потока достаточно большие, что подтверждает необходимость выполнения ПТП с охранной зоной.

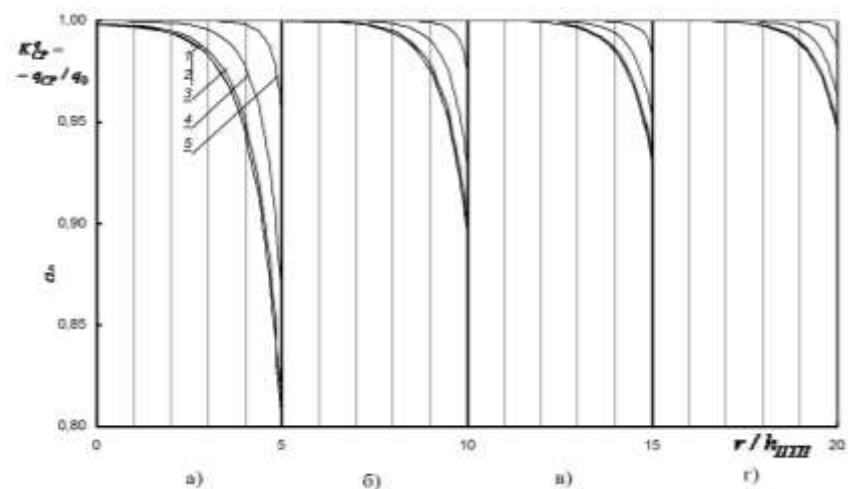
С учетом того, что ПТП являются преобразователями генераторного типа, также выполнены расчеты для определения зависимости теплоточного критерия K_{CP}^q от относительной высоты термобатареи $h_{\text{ТБ}}/h_{\text{ПТП}}$. На рисунке 2.6 представлены семейства графиков критерия K_{CP}^q как функции относительного текущего радиуса $r/h_{\text{ПТП}}$ при вариациях геометрического параметра k и числа $Bi_{\text{БЕРХ}}$ для случая, когда высота термобатареи совпадает с высотой ПТП, т.е. при $h_{\text{ТБ}}/h_{\text{ПТП}} = 1$, а в таблице 2.5 – то же для различных значений относительной высоты термобатареи $h_{\text{ТБ}}/h_{\text{ПТП}} = 1,0; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2; 0,1$.



$a - k = D_{ТПП} / h_{ТПП} = 10; б - 20; в - 30; г - 40;$

$1 - Bi_{ВЕРХ} = \alpha_{ВЕРХ} \cdot h_{ТПП} / \lambda_{ТПП} = 10^{-3}; 2 - 10^{-2}; 3 - 0,1; 4 - 1; 5 - 10$

Рисунок 2.5 – Характер распространения искажения плотности среднеинтегрального теплового потока на входе и выходе ПТП в зависимости от текущего относительного радиуса при вариации геометрического параметра ПТП $k = D_{ТПП} / h_{ТПП}$ и числа Био $Bi_{ВЕРХ}$



$a - k = D_{ТПП} / h_{ТПП} = 10; б - 20; в - 30; г - 40;$

$1 - Bi_{ВЕРХ} = \alpha_{ВЕРХ} \cdot h_{ТПП} / \lambda_{ТПП} = 10^{-3}; 2 - 10^{-2}; 3 - 0,1; 4 - 1; 5 - 10$

Рисунок 2.6 – Характер распространения искажения плотности среднеинтегрального теплового потока при относительной высоте термобатареи $h_{ТБ} / h_{ТПП} = 1$ в зависимости от текущего относительного радиуса

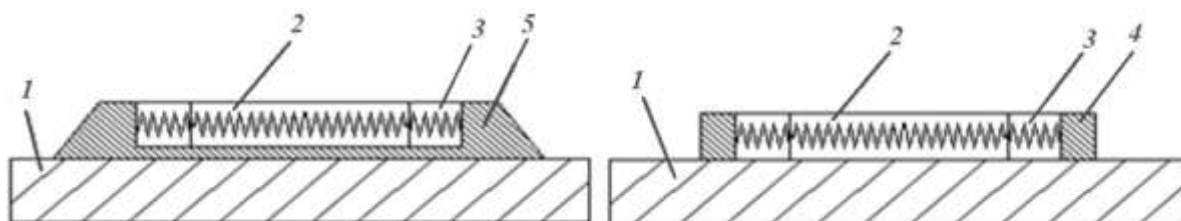
Несмотря на некоторые отличия, эти графики аналогичны представленным в 2.1 (см. табл. 2.3 и 2.4). И выводы, которые можно сделать из их анализа, такие же:

–охранная зона ПТП должна быть выполнена шириной, составляющей (3-5) высоты ПТП;

–тепловое сопротивление ПТП должно быть не более 0,1 сопротивления теплообмену с ОС;

–геометрический параметр ПТП должен быть $k = D_{ПТП} / h_{ПТП} \geq 10$.

Все результаты, полученные в задачах 2.1 и 2.2, могут быть распространены на ПТП, устанавливаемые поверх металлического ОК, как показано на рисунке 2.7 [42].

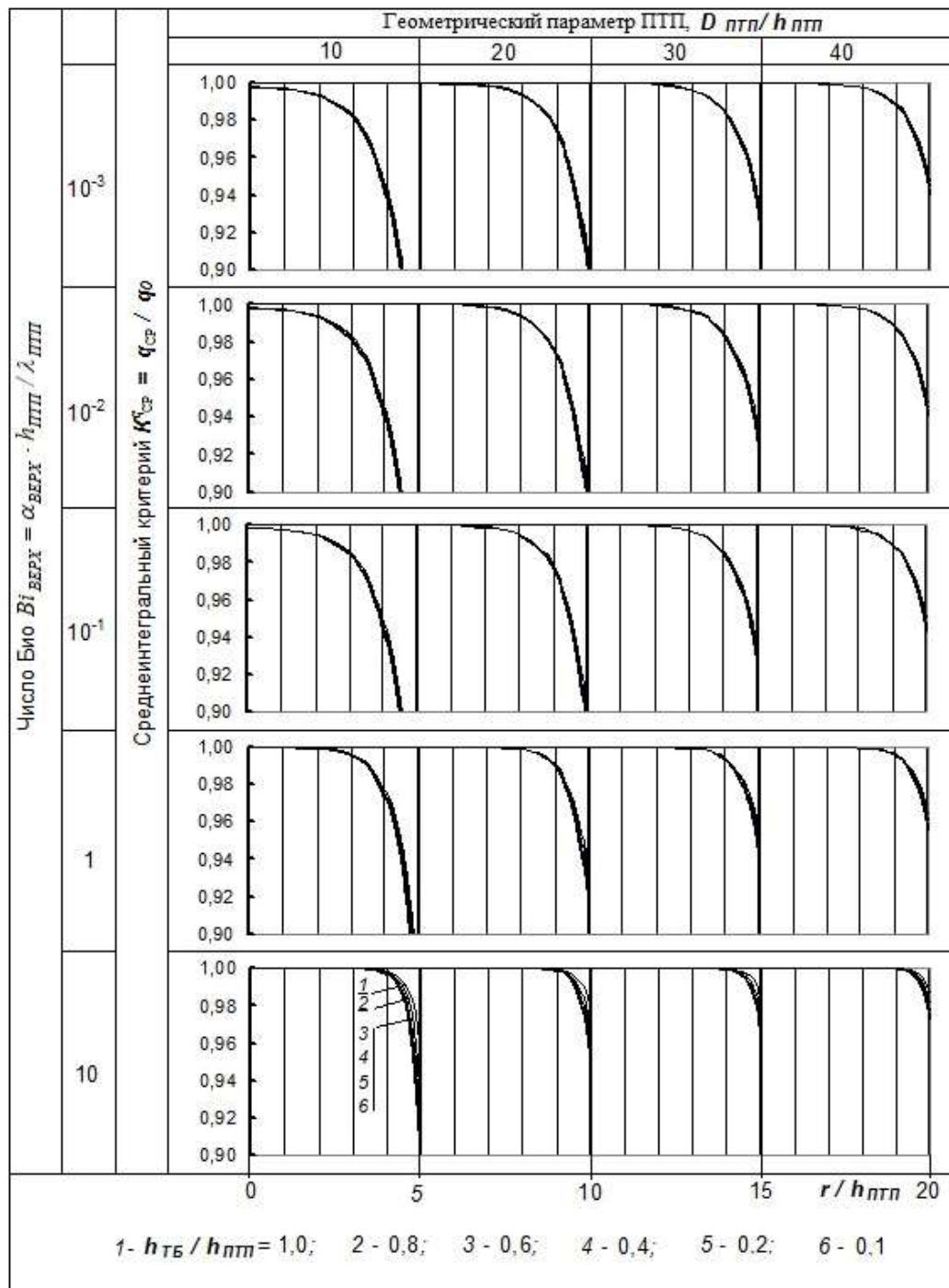


1 – ОК, 2 – чувствительный элемент ПТП, 3 – охранная зона, 4 – металлическое кольцо, 5 – профилированная металлическая подложка.

Рисунок 2.7 – Варианты установки ПТП на металлической пластине

Эти варианты монтажа ПТП обусловлены невозможностью в некоторых случаях размещения ПТП заподлицо с поверхностью, например, на стенках различного промышленного оборудования. При этом наличие профилированной металлической подложки позволяет при расположении ПТП на поверхности ОК уменьшить влияние гидродинамического фактора на направление теплового потока, а защитного металлического кольца – усилить механическую прочность.

Таблица 2.5 – Характер распространения искажения плотности среднеинтегрального теплового потока в зависимости от относительного текущего радиуса ПТП $r/h_{ПТП}$ при вариациях геометрического параметра $k = D_{ПТП}/h_{ПТП}$, относительной высоты термобатареи $h_{ТБ}/h_{ПТП}$ и числа Био $Bi_{ВЕРХ}$



2.3 ПТП в полуограниченном массиве из высокотеплопроводного материала заподлицо с его поверхностью

Ниже рассмотрена задача об искажении поля теплового потока при расположении ПТП в полости полуограниченного массива из высокотеплопроводного материала заподлицо с ней [36, 42], как это показано на рисунке 2.8.

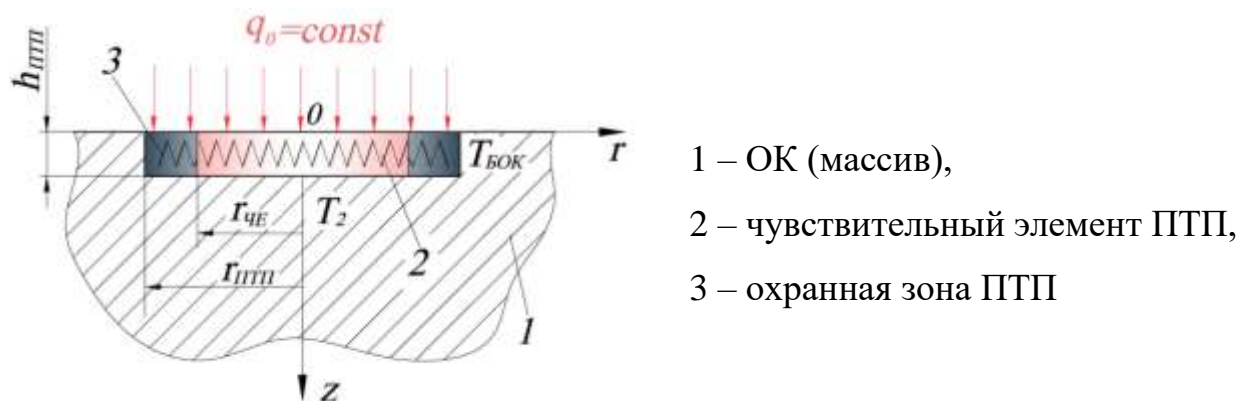


Рисунок 2.8 – Схема расположения ПТП в полуограниченном массиве из высокотеплопроводного материала заподлицо с его поверхностью

Теплообмен на поверхности массива ($z=0$) обусловлен тепловым излучением, то есть происходит при граничном условии 2-го рода: $q_0 = const$, а в плоскости контакта ПТП с ОК ($z = h_{ПТП}$) при граничном условии 1-го рода: $T_2 = const$. Кроме того, в силу высокой теплопроводности материала ОК его температура постоянна по всему массиву кроме области, занятой ПТП.

Из-за существенного различия коэффициентов теплопроводности ОК и ПТП, в последнем формируется двухмерное температурное поле, описываемое известным уравнением теплопроводности (см. 2.10) [195]. Его решение при следующих граничных условиях:

$$\begin{array}{ll}
 q_0(r, z) = const & \text{при } 0 \leq r < \infty \text{ и } z = 0, \\
 T(r, z) = T_2 = const & \text{при } 0 \leq r < r_{ПТП} \text{ и } z = h_{ПТП}, \\
 T(r, z) = T_{БЭК} = const & \text{при } r = r_{ПТП} \text{ и } 0 < z \leq h_{ПТП}, \\
 T_2 = T_{БЭК} = 0 & \text{при } r = r_{ПТП} \text{ и } 0 < z \leq h_{ПТП}
 \end{array}$$

заимствовано из работы [199] и имеет следующий вид:

$$T(\rho, \zeta) = 2 \cdot \frac{q_0 \cdot r_{ПТП}}{\lambda_{ПТП}} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(v_m \cdot \rho) \cdot sh(M \cdot v_m \cdot (1 - \zeta/h_{ПТП}))}{v_m^2 \cdot J_1(v_m) \cdot ch(M \cdot v_m)}, \quad (2.26)$$

где M – согласно формуле (В.1.9), v_m – собственные числа характеристического уравнения $J_0(v_m) = 0$ (см. (2.2.1)), J_0 и J_1 – функции Бесселя [200].

Далее, воспользовавшись выражением для разности температуры, возникающей в неограниченной пластине (с толщиной $h_{ПТП}$ и коэффициентом теплопроводности $\lambda_{ПТП}$), через которую проходит поток теплового излучения с плотностью q_0 :

$$\Delta T_0 = q_0 \cdot h_{ПТП} / \lambda_{ПТП}, \quad (2.27)$$

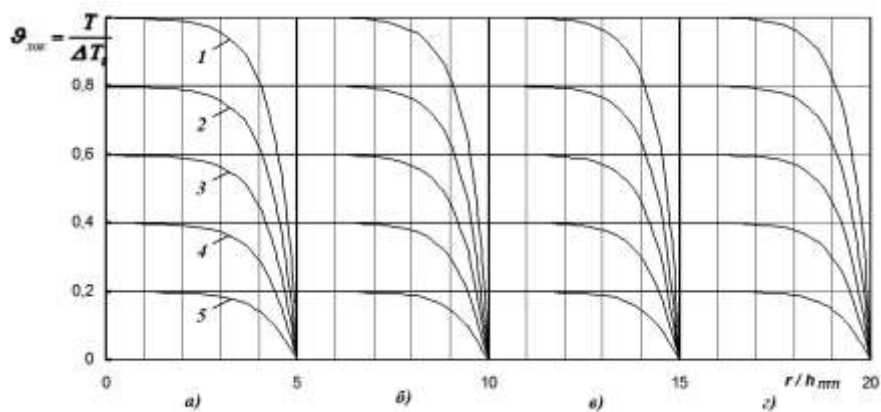
рассмотрим функцию приведенной локальной температуры $\vartheta(r, z) = T(r, z) / \Delta T_0$, для которой получено следующее выражение:

$$\vartheta(r, z) = \frac{2r_{ПТП}}{h_{ПТП}} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(v_m \cdot r/r_{ПТП})}{v_m^2 \cdot J_1(v_m)} \cdot \frac{sh(v_m \cdot (1 - z/h_{ПТП}) \cdot h_{ПТП}/r_{ПТП})}{ch(v_m \cdot h_{ПТП}/r_{ПТП})}. \quad (2.28)$$

Результаты вычисления значений приведенной локальной температуры как функции относительного текущего радиуса $r/h_{ПТП}$ представлены на рисунке 2.9 в виде семейств графиков, полученных при вариации геометрического параметра ПТП $K=10; 20; 30; 40$ для нескольких значений относительной высоты ПТП: $z/h_{ПТП}=0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$. Как видно, и здесь краевой эффект наблюдается на расстоянии от боковой поверхности ПТП, составляющем (3-4) высоты ПТП. Чтобы искажения температурного поля не проникали далее $0,2 \cdot r_{ПТП}$, геометрический параметр ПТП должен быть более 10.

Степень искажения плотности локального теплового потока может быть оценена по теплоточному критерию $K_{ЛОК}^q$, который с учетом (2.28) имеет вид:

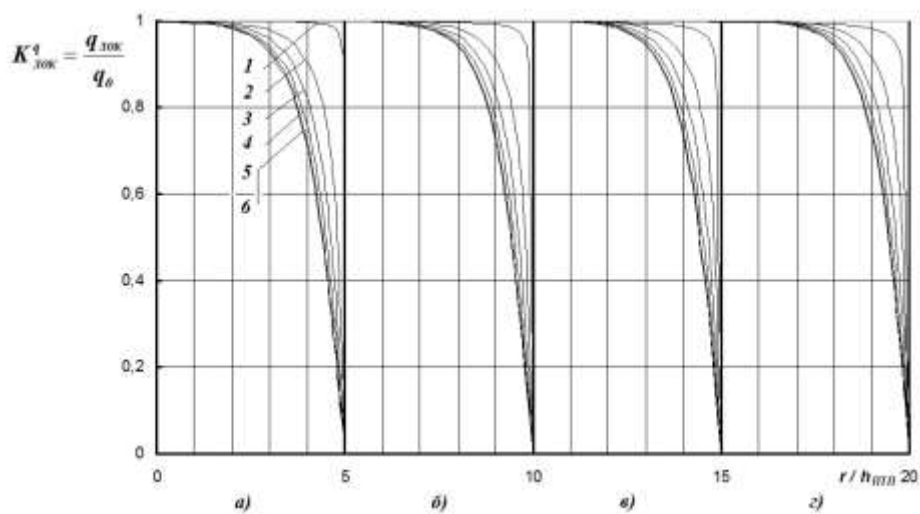
$$K_{ЛОК}^q = 2 \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(v_m \cdot r/r_{ПТП})}{v_m^2 \cdot J_1(v_m)} \cdot \frac{ch(v_m \cdot (1 - z/h_{ПТП}) \cdot h_{ПТП}/r_{ПТП})}{ch(v_m \cdot h_{ПТП}/r_{ПТП})}. \quad (2.29)$$



a) – $D_{ППП} / h_{ППП} = 10$; *б)* – 20; *в)* – 30; *з)* – 40

1 – $z / h_{ППП} = 0$; 2 – 0,2; 3 – 0,4; 4 – 0,6; 5 – 0,8

Рисунок 2.9 – Характер распространения искажений приведенной локальной температуры в зависимости от текущего относительного радиуса $r/h_{ППП}$ при вариации геометрического параметра ПТП $D_{ППП}/H_{ППП}$ и относительной высоты $z/h_{ППП}$



a) – $D_{ППП} / h_{ППП} = 10$; *б)* – 20; *в)* – 30; *з)* – 40

1 – $z / h_{ППП} = 0$; 2 – 0,2; 3 – 0,4; 4 – 0,6; 5 – 0,8

Рисунок 2.10 – Характер распространения по высоте ПТП искажений локального теплового потока в зависимости от относительного текущего радиуса $r/h_{ППП}$ при вариации геометрического параметра ПТП $D_{ППП}/h_{ППП}$ и относительной высоты $z/h_{ППП}$.

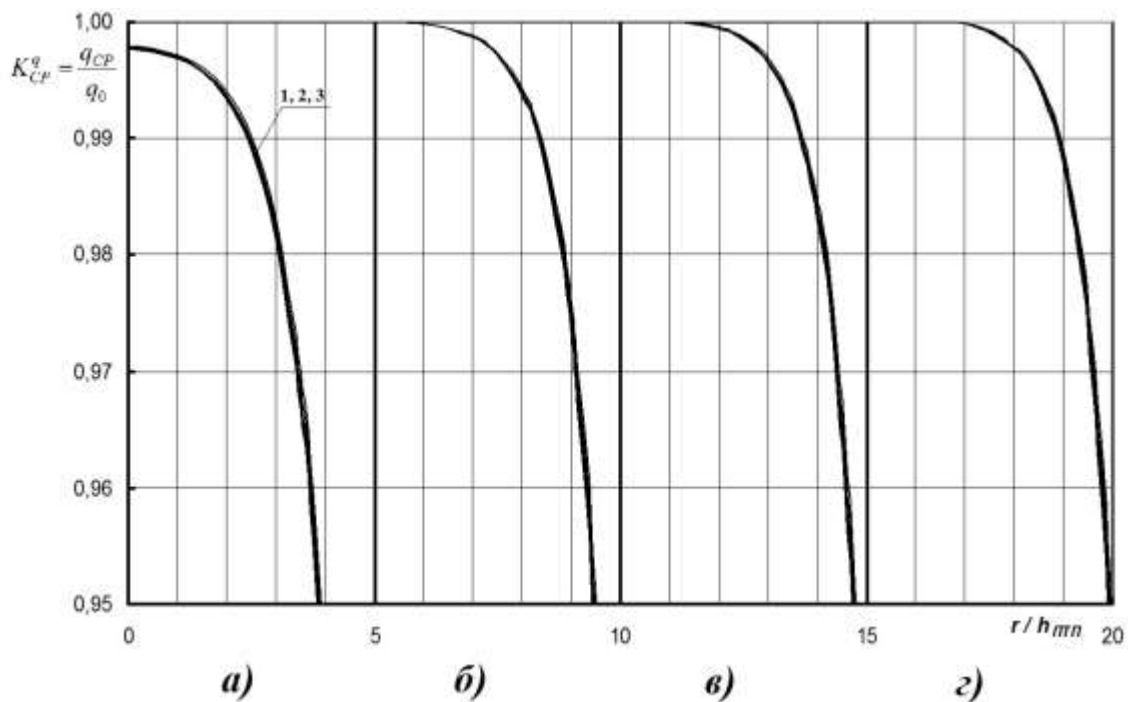
Результаты вычисления $K_{ЛОК}^q$ по (2.29) в зависимости от относительного текущего радиуса $r/h_{ПТП}$ представлены на рисунке 2.10 в виде семейств графиков, полученных для нескольких значений относительной высоты ПТП $z/h_{ПТП}$ при вариации геометрического параметра ПТП. Как видно, искажения теплового поля также проникают на глубину, равную (3-4) высотам ПТП, а геометрический параметр ПТП должен быть больше 10.

Для определения распределения плотности среднеинтегрального теплового потока в зависимости от глубины заделки термобатарей в ПТП, рассмотрена плотность среднеинтегрального теплового потока на выходе из термобатарей, как и в 2.1, через разность значений среднеинтегральной температуры для сечений $z = h_1$ и $z = h_2$, где h_1 и h_2 взяты согласно (2.22). Критерий $K_{СР}^q$ распространения искажения среднеинтегрального теплового потока с учетом (2.21) и (2.22) имеет вид (2.23), где $\mathcal{G}(r, z)$ взята согласно (2.18).

Для оценки зависимости степени искажения плотности среднеинтегрального теплового потока от высоты термобатарей выполнены расчеты по (2.23) критерия $K_{СР}^q$ как функции от относительного радиуса $r/h_{ПТП}$. Результаты вычислений представлены на рисунке 2.11 в виде семейств графиков, полученных для диапазона значений относительной высоты $h_{ТБ}/h_{ПТП}$ от 0,1 до 1,0 с шагом 0,1 при вариации геометрического параметра. Как показывают и эти графики, глубина заделки термобатарей в ПТП практически не влияет на распределение среднеинтегрального теплового потока вдоль радиуса ПТП, в то время как характер влияния геометрического параметра остается таким же. Как видим, выводы, сделанные при решении предыдущих задач, остаются справедливыми и для этого случая.

2.4 ПТП внутри неограниченного сплошного массива

Рассмотрим задачу для случая расположения ПТП высотой $h_{ПТП}$ и радиусом $r_{ПТП}$ внутри ОК, представляющего собой неограниченный сплошной



а) – $D_{ПТП} / h_{ПТП} = 10$; б) – 20; в) – 30; г) – 40

1 – $h_{ТБ} / h_{ПТП} = 0,1$; 2 – 0,5; 3 – 1;

Рисунок 2.11 – Характер распространения искажения плотности среднеинтегрального теплового потока в зависимости от относительного текущего радиуса $r/h_{ПТП}$ при вариации геометрического параметра ПТП $k = D_{ПТП} / h_{ПТП}$ и относительной высоты термобатареи $h_{ТБ} / h_{ПТП}$

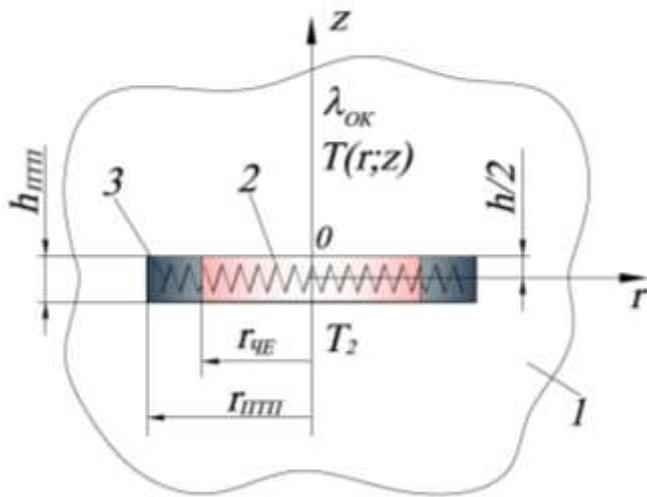
массив с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{ОК}$, как показано на рисунке 2.12 [36, 42, 192].

Первоначальное температурное поле массива одномерное и определяется уравнением:

$$T_0(z) = b \cdot (0,5h + z) \quad \text{при } z \in (-\infty, \infty), \quad (2.30)$$

где $b = \partial T_0(z) / \partial z$ – первоначальный градиент температуры ОК.

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. 2.12).



- 1 – ОК;
- 2 – ПТП;
- 3 – охранный зона ПТП

Рисунок 2.12 – Схема расположения ПТП внутри неограниченного сплошного массива

Для температурного возмущения $\Theta(r, z)$ по (2.3) из уравнения Лапласа [195, 196] аналитическое решение при соответствующих данной схеме граничных условиях согласно [104] имеет следующий вид:

$$\Theta(r, z) = T(r, z) - T_0(z) = -B \cdot \int_0^{\infty} \frac{J_1(x) \cdot J_0(x \cdot \rho) \cdot \exp(-x \cdot \zeta)}{(x + k)} dx, \quad (2.31)$$

где $\rho = r/r_{ПТП}$ и $\zeta = z/r_{ПТП}$ – текущие безразмерные радиальная и осевая координаты;

$$B = \frac{\delta^\lambda \cdot r_{ПТП} \cdot b}{1 + \delta^\lambda \cdot k \cdot I(k, \rho)}, \quad \text{где } \delta^\lambda = \lambda_{ПТП} / \lambda_{ОК} - 1, \quad I(k, \rho) = \int_0^{\infty} \frac{J_1(x) \cdot J_0(x \cdot \rho)}{x + k} dx.$$

Для определения размеров зоны распространения возмущения теплового потока в радиальном и продольном (вдоль оси ПТП) направлении и по нормали к плоской поверхности ПТП, а также степени влияния на эту зону различных факторов введены теплоточные радиальный и продольный критерии степени искажения первоначального теплового потока, исходя из (2.5). За радиальный критерий $K_{РАД}^q$, в отличие от принятого в [104], взято отношение значений плотности измеренного и невозмущенного теплового потока $q_{ИЗМ} / q_0$ на границе контакта ПТП и ОК ($z = 0$), а за продольный $K_{ПР}^q$ – вдоль оси ($r = 0$).

На основании (2.30) плотность неискаженного теплового потока равна:

$$q_0(z) = -\lambda_{OK} \cdot \frac{dT_0(z)}{dz} = -\lambda_{OK} \cdot b, \quad (2.32)$$

а плотность измеренного теплового потока с учетом (2.3), исходя из (2.31), равна:

$$q_{ИЗМ}(r, z) = -\lambda_{OK} \cdot \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} = -\lambda_{OK} \left(\frac{\partial \Theta(r, z)}{\partial z} + \frac{dT_0(z)}{dz} \right). \quad (2.33)$$

Согласно (2.5) критерий степени искажения первоначального теплового потока равен:

$$K^q = \frac{q_{ИЗМ}(r, z)}{q_0(z)} = \frac{1}{b} \cdot \frac{\partial \Theta(r, z)}{\partial z} + 1. \quad (2.34)$$

Так как функция производной по z от температурного искажения (2.31) равна:

$$\frac{\partial \Theta(r, z)}{\partial z} = \frac{B}{r_{ППП}} \cdot \int_0^{\infty} \frac{x \cdot J_1(x) J_0(x \cdot \rho) \cdot \exp(-x \cdot \zeta)}{x + k} dx, \quad (2.35)$$

градиенты радиального и продольного теплоточных искажений имеют следующий вид:

$$\left. \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{B}{r_{ППП}} \cdot I_r(k, \rho), \quad (2.36)$$

$$\left. \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right|_{r=0} = \frac{B}{r_{ППП}} \cdot I_z(k, \zeta), \quad (2.37)$$

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, теплоточный радиальный критерий, исходя из (2.34) с учетом (2.36) и введенных к решению (2.31) обозначений, определяется следующим выражением:

$$K_{РАД}^q = \left. \frac{q_{ИЗМ}(r, z)}{q_0(z)} \right|_{z=0} = 1 + \frac{\delta^\lambda \cdot I_r(k, \rho)}{1 + \delta^\lambda \cdot k \cdot I(k, \rho)}, \quad (2.38)$$

а теплоточный продольный критерий с учетом (2.37) – таким:

$$K_{ПР}^q = \left. \frac{q_{ИЗМ}(r, z)}{q_0(z)} \right|_{r=0} = 1 + \frac{\delta^\lambda \cdot I_z(k, \zeta)}{1 + \delta^\lambda \cdot k \cdot I(k, 0)}. \quad (2.39)$$

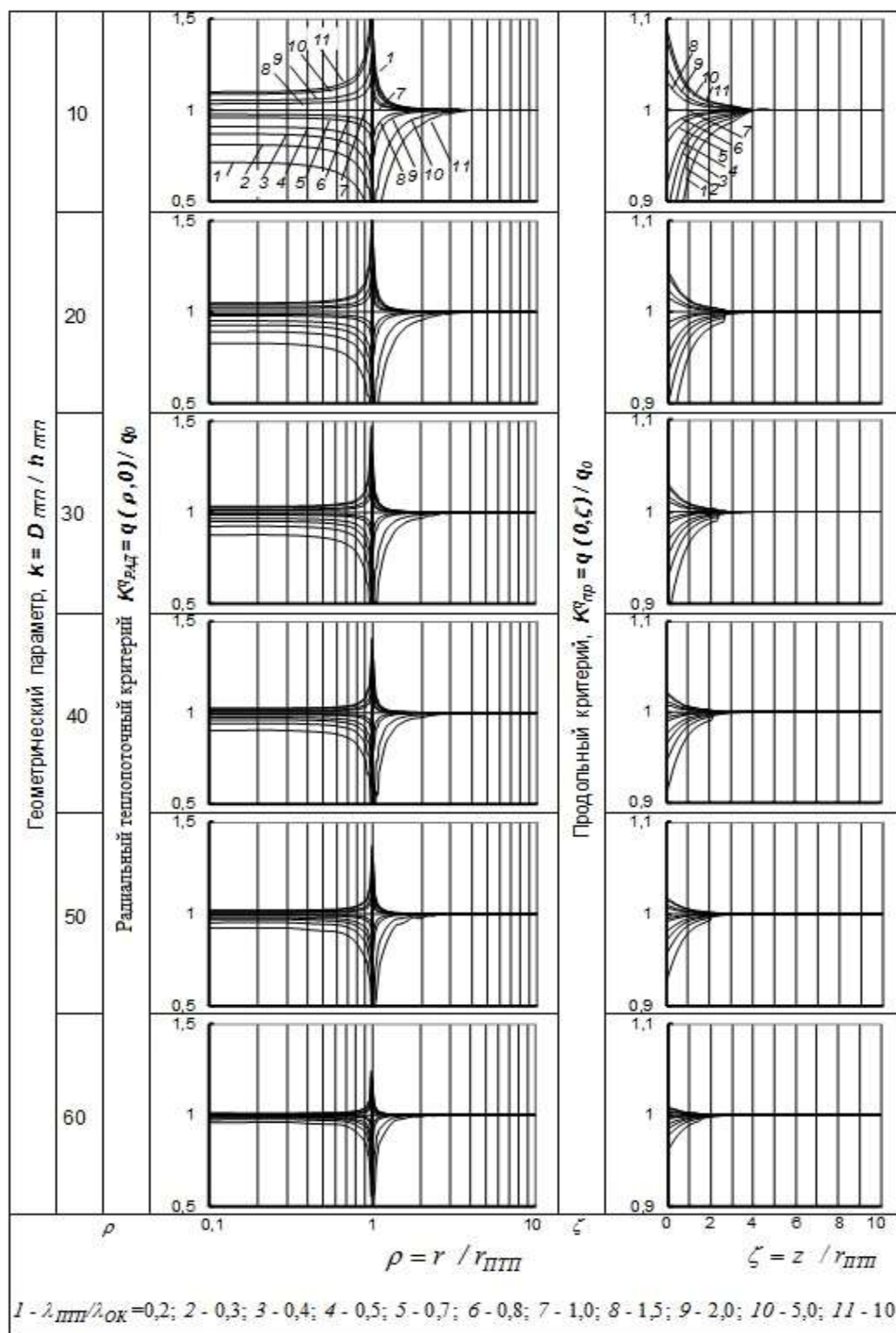
Результаты вычислений радиального по формуле (2.38) и продольного по формуле (2.39) критериев степени искажения в зависимости от безразмерных координат ρ и ζ при вариациях геометрического параметра ПТП k и отношения $\lambda_{ПТП} / \lambda_{ОК}$ представлены в таблице 2.6.

Эти данные дают возможность оценить влияние размеров ПТП, радиуса его чувствительного элемента и отношения $\lambda_{ПТП} / \lambda_{ОК}$ на методическую (относительную) погрешность δ^g по (2.1) измерения 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 таблицы 2.6 эта глубина может составить от одного до двух диаметров ПТП в зависимости от геометрического параметра. К таким ОК относятся дисперсные засыпки, грунты, большие слои теплоизоляционных покрытий и др. На всех графиках видно, что во всех случаях, соответствующих расстояниям, равным (4-5) радиусам ПТП, искажения теплового потока не наблюдается 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, но большими радиуса ПТП в пять и более раз. Кроме того, отсюда следует, что для обеспечения наименьшего искажения теплового потока необходимо применять ПТП, коэффициент теплопроводности которого отличается от коэффициента теплопроводности объекта не более, чем в два раза, как в большую, так и в меньшую сторону.

Для анализа методической погрешности в радиальном направлении формула (2.6) подстановкой в нее отношения $q_{ИЗМ} / q_0$, равного выражению (2.38), преобразована к виду:

Таблица 2.6 – Характер распространения в радиальном и осевом направлениях искажения плотности теплового потока, вносимого ПТП, размещенным внутри неограниченного сплошного массива при вариации геометрического параметра $k = D_{ПТП} / h_{ПТП}$ и отношения $\lambda_{ПТП} / \lambda_{ОК}$.



$$\delta^q(\rho_{чЭ}, \lambda, k) = \delta^\lambda \cdot \frac{\varphi(k, \rho_{чЭ})}{1 + \delta^\lambda (1 - \varphi(k, \rho_{чЭ}))}, \quad (2.40)$$

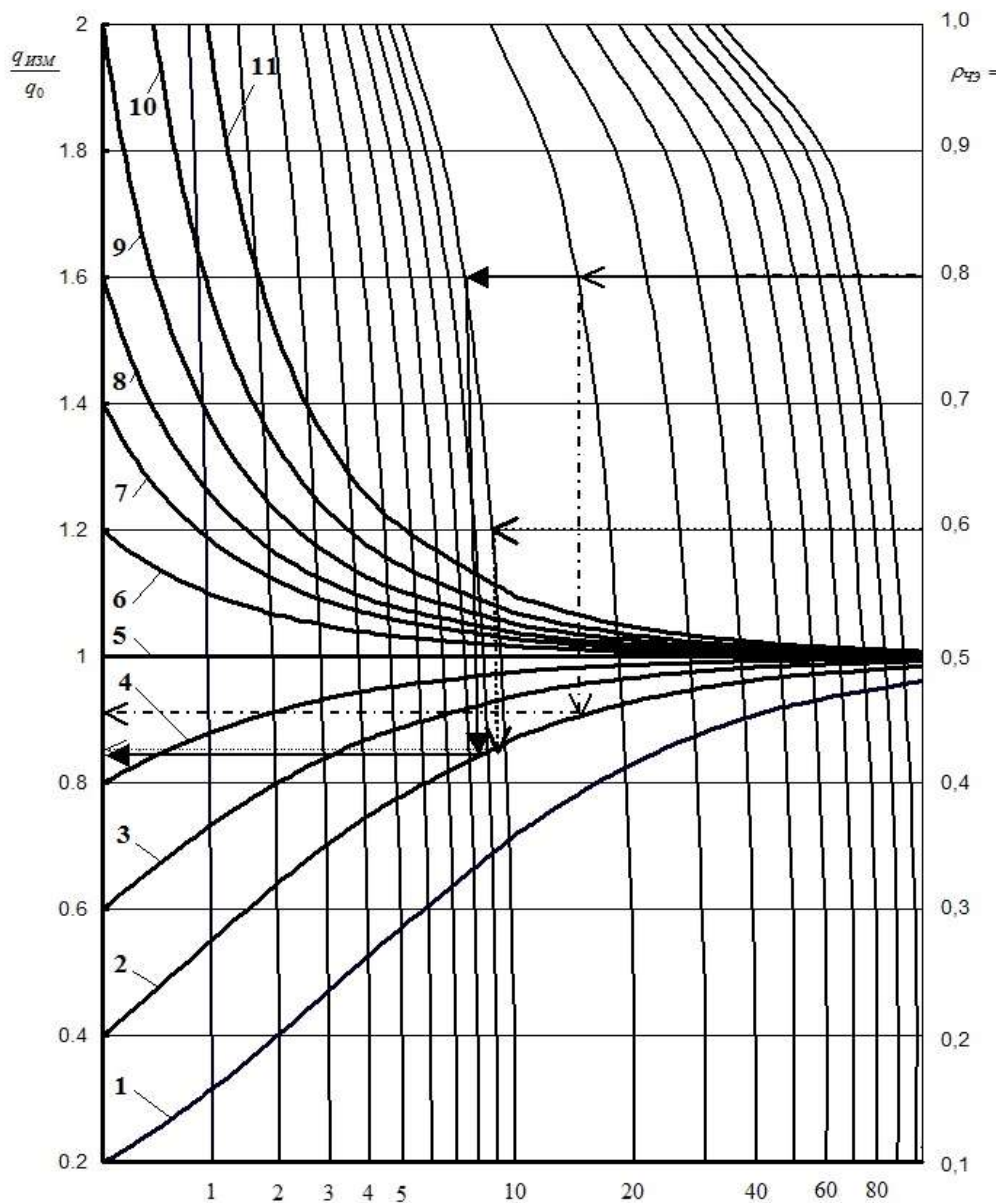
где

$$\varphi(k, \rho_{чЭ}) = \int_0^\infty \frac{J_1(x) \cdot J_1(x \cdot \rho_{чЭ})}{x+k} dx \bigg/ \int_0^\infty \frac{J_1(x) \cdot J_1(x \cdot \rho_{чЭ})}{x} dx, \quad (2.41)$$

$\rho_{чЭ}$ – безразмерный радиус чувствительного элемента ПТП, равный $r_{чЭ} / r_{ПТП}$.

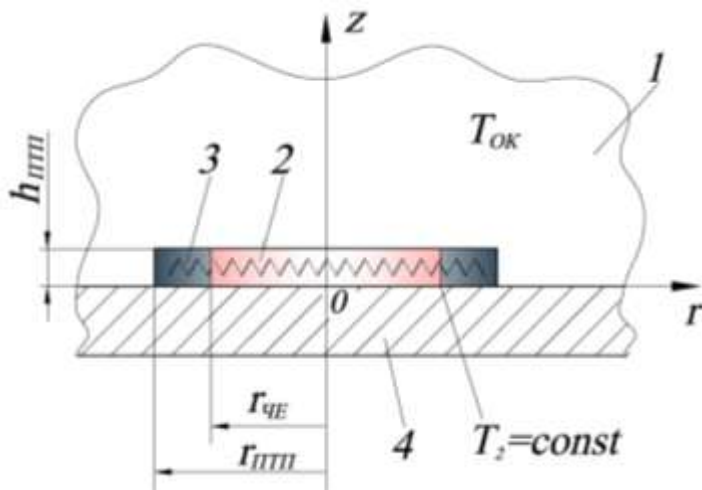
По результатам вычислений методической погрешности δ^q по формуле (2.40) и отношения $q_{ИЗМ} / q_0$ по формуле (2.38) в зависимости от безразмерного радиуса $\rho_{чЭ} = r / r_{ПТП}$ в диапазоне значений от 0,1 до 1,0 при вариациях отношения $\lambda_{ПТП} / \lambda_{ОК}$ от 0,2 до 10 и геометрического параметра ПТП $k=1, 2, 3, \dots, 10, 20, \dots, 100$, построена номограмма, приведенная на рисунке 2.13 [42]. Номограмма позволяет прогнозировать методическую погрешность измерения плотности теплового потока еще на этапе подбора ПТП для конкретных условий эксплуатации. В качестве примера на номограмме ключом (сплошной линией) показаны варианты ПТП, имеющего $\rho_{чЭ}=0,8$ (или 0,6), $k=10$ и $\lambda_{ПТП} / \lambda_{ОК} = 0,4$, что соответствует погрешности 16 % (15 %). Однако, если взять $k = 20$, относительная методическая погрешность $|\delta_q| \leq 8\%$.

Решение рассмотренной в 2.4 задачи применимо для случая измерения теплового потока через тонкую металлическую конструкцию (пластинку) ПТП, 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 2.14. В этом случае справедливы полученные в 2.4 формулы, графики и номограмма, только в качестве геометрического параметра k следует брать половинные значения.



1 – $\lambda_{ПТП}/\lambda_{ОК} = 0,2$; 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;

Рисунок 2.13 – Номограмма зависимостей отношения значений плотности теплового потока $q_{ИЗМ}/q_0$ и методической погрешности δ^q от текущего радиуса $\rho_{чЭ} = r/r_{ПТП}$ при вариации геометрического параметра $k = D_{ПТП}/h_{ПТП}$ и отношения $\lambda_{ПТП}/\lambda_{ОК}$ (случай расположения ПТП внутри ОК – неограниченного массива).

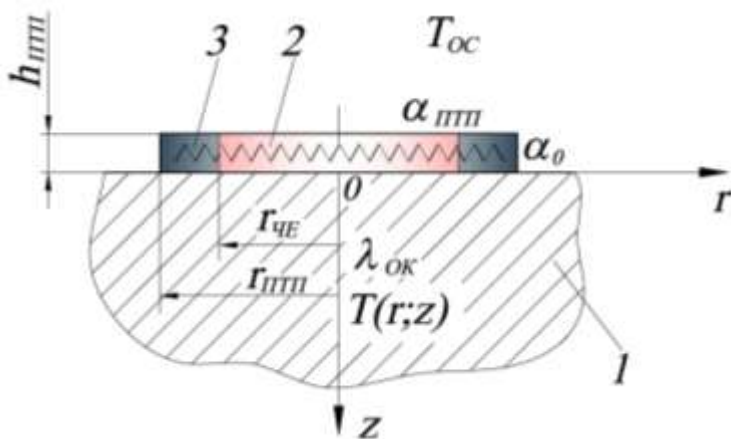


- 1 – ОК (массив),
- 2 – ПТП,
- 3 – охранный зона ПТП,
- 4 – пластина металлическая

Рисунок 2.14 – Схема расположения ПТП на поверхности металлической пластины в полуограниченном массиве (теплоизолятор)

2.5 ПТП на поверхности полуограниченного сплошного массива

Рассмотрим случай расположения ПТП на поверхности ОК – полуограниченного сплошного массива, как показано на рисунке 2.15 [36, 42, 193], на которой происходит теплообмен с ОС при граничных условиях 3-го рода. Температура ОС $T_{OC} = const$, а коэффициент теплообмена в отсутствие ПТП α_0 , на поверхности ПТП – $\alpha_{ПТП}$.



- 1 – ОК (массив);
- 2 – чувствительный элемент ПТП;
- 3 – охранный зона

Рисунок 2.15 – Схема расположения ПТП на поверхности полуограниченного сплошного массива

В результате теплообмена с ОС в массиве ОК сформировано одномерное температурное поле $T_0(z)$, а плотность входящего в ОК действительного (неискаженного) теплового потока определяется выражением:

$$q_0 = \alpha_0 \cdot (T_{OC} - T_0(z=0)) = \alpha_0 \cdot \Delta T. \quad (2.42)$$

При установке на поверхности массива ПТП, для которого отношение $\lambda_{ПТП}/\lambda_{ОК} \neq 1$, степени черноты поверхностей объекта и ПТП приняты одинаковыми.

Для отыскания температурного возмущения $\Theta(r, z)$ по (2.2) в данной задаче использовано решение авторов [105], где введено следующее число Био для первоначального состояния:

$$Bi_{0,r} = \alpha_0 \cdot r_{ПТП} / \lambda_{ОК}. \quad (2.43)$$

В отсутствие радиальных перетоков в ПТП решение для температурного возмущения $\Theta(r, z)$ в безразмерных координатах $\rho = r / r_{ПТП}$ и $\zeta = z / r_{ПТП}$ имеет вид:

$$\Theta(r, z) = T(z, r) - T_0 = -A \cdot \int_0^{\infty} \frac{J_1(x) \cdot J_0(x \cdot \rho) \cdot \exp(-x \cdot \zeta)}{(x + Bi_{0,r})} dx, \quad (2.44)$$

$$\text{где } A = \frac{\Delta T \cdot Bi_{0,r} \cdot (R_{\alpha,ОК} / (R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП}) - 1)}{1 + Bi_{0,r} \cdot (R_{\alpha,ОК} / (R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП}) - 1) \cdot I_r(Bi_{0,r}, \rho)}, \quad (2.45)$$

где $R_{\alpha,ОК} = 1/\alpha_0$; $R_{\alpha,ПТП} = 1/\alpha_{ПТП}$; $R_{ПТП} = h_{ПТП} / \lambda_{ПТП}$,

$$I_r(Bi_{0,r}, \rho) = \int_0^{\infty} \frac{J_1(x) \cdot J_0(x \cdot \rho)}{x + Bi_{0,r}} dx. \quad (2.46)$$

Для уточнения места установки другого ПТП на поверхности массива за пределами зоны возмущения из-за присутствия первого ПТП рассмотрен радиальный критерий степени температурного возмущения $K_{РАД}^T$ по (2.4) на поверхности рассматриваемого массива ($z = 0$).

Исходя из (2.5) с учетом (2.45), обозначений к (2.45) и (2.46), для расчета радиального температурного критерия получена следующая формула:

$$K_{РАД}^T = \frac{\Theta(r, z)}{\Delta T} \Big|_{z=0} = \frac{Bi_{0,r} \cdot (R_{\alpha,ОК} / (R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП}) - 1) \cdot I_r(Bi_{0,r}, \rho)}{1 + Bi_{0,r} \cdot (R_{\alpha,ОК} / (R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП}) - 1) \cdot I_r(Bi_{0,r}, \rho)}. \quad (2.47)$$

С целью установления применимости формул, полученных для полуограниченного массива, к телам конечной толщины определены зоны распространения искажения теплового потока как в радиальном направлении

по поверхности, так и по глубине массива. Для этого использованы теплопоточные радиальный и продольный критерии: $K_{РАД}^q$ и $K_{ПР}^q$ (см. (2.38) и (2.39)).

При наличии ПТП на поверхности полуограниченного массива плотность измеряемого теплового потока определяется уравнением, аналогичным (2.33):

$$q_{ИЗМ}(r, z) = -\lambda_{ОК} \cdot \frac{\partial T(r, z)}{\partial z} = -\lambda_{ОК} \cdot \left(\frac{\partial \Theta(r, z)}{\partial z} + \frac{dT_0(z)}{dz} \right) = -\lambda_{ОК} \cdot \frac{\partial \Theta(r, z)}{\partial z} + q_0, \quad (2.48)$$

откуда в связи с тем, что плотность исходного теплового потока определяется уравнением (2.42), получено следующее отношение значений плотности теплового потока:

$$\frac{q_{ИЗМ}(r, z)}{q_0(z)} = - \frac{\lambda_{ОК} \cdot \partial \Theta(r, z) / \partial z}{\alpha_0 \cdot \Delta T} + 1. \quad (2.49)$$

Исходя из (2.44), функция производной по z температурного искажения имеет вид:

$$\frac{\partial \Theta(r, z)}{\partial z} = \frac{A}{r_{ПТП}} \cdot \int_0^{\infty} \frac{x \cdot J_1(x) \cdot J_0(x \cdot \rho) \cdot \exp(-x \cdot \zeta)}{(x + Bi_0)} dx, \quad (2.50)$$

откуда производная в радиальном направлении равна:

$$\left. \frac{\partial \Theta(r, z)}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{A}{r_{ПТП}} \cdot I_r(Bi_{0,r}, \rho), \quad (2.51)$$

$$\text{где } I_r(Bi_{0,r}, \rho) = \int_0^{\infty} \frac{x \cdot J_1(x) \cdot \exp(-x \cdot \zeta)}{x + Bi_{0,r}} dx;$$

а в осевом – следующему:

$$\left. \frac{\partial \Theta(r, z)}{\partial z} \right|_{r=0} = \frac{A}{r_{ПТП}} \cdot I_z(Bi_{0,r}, \zeta), \quad (2.52)$$

$$\text{где } I_z(Bi_{0,r}, \zeta) = \int_0^{\infty} \frac{x \cdot J_1(x) \cdot J_0(x \cdot \rho)}{(x + Bi_{0,r})} dx.$$

Зона распространения искажения теплового потока по поверхности ОК в радиальном направлении, как и в работе [102], может быть охарактеризована

радиальным теплоточным критерием $K_{РАД}^q$, который с учетом (2.51) (при $z=0$) имеет вид:

$$K_{РАД}^q = \frac{q_{ИЗМ}}{q_0} \Big|_{z=0} = 1 - \frac{(R_{\alpha,ОК} / (R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП}) - 1) \cdot I_r(Bi_{0,r}, \rho)}{1 + Bi_{0,r} \cdot (R_{\alpha,ОК} / (R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП}) - 1) \cdot I_r(Bi_{0,r}, \rho)}, \quad (2.53)$$

а зона распространения искажения теплового потока в глубину массива – продольным теплоточным критерием $K_{ПП}^q$, который с учетом (2.52), равен

$$K_{ПП}^q = \frac{q_{ИЗМ}}{q_0} \Big|_{r=0} = 1 - \frac{(R_{\alpha,ОК} / (R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП}) - 1) \cdot I_z(Bi_{0,r}, \zeta)}{1 + Bi_{0,r} \cdot (R_{\alpha,ОК} / (R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП}) - 1) \cdot I_z(Bi_{0,r}, 0)}. \quad (2.54)$$

Результаты вычислений по (2.53), и (2.47) систематизированы в таблице 2.7, а по (2.54) – в таблице 2.8.

Расчеты выполнены в зависимости от безразмерного радиуса при вариации числа Био $Bi_{0,r}$ в диапазоне от 0,001 до 100 и отношения значений теплового сопротивления $R_{\alpha,ОК} / (R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП})$ в диапазоне от 0,2 до 2,2.

Полученные результаты, представленные в таблице 2.7, 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. Эти данные дают возможность подобрать такое сочетание числа Био и отношения значений теплового сопротивления, которое обеспечивает минимальное искажение. Пользуясь ими, можно также решить вопрос о расположении нескольких ПТП на одной поверхности без их взаимного влияния.

Результаты, представленные в таблице 2.8, дают возможность определить 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

Таблица 2.7 – Характер распространения по поверхности в радиальном направлении искажений плотности теплового потока и температуры, вносимых ПТП, расположенным на поверхности полуограниченного массива, в зависимости от текущего радиуса ρ при вариации числа Био, $Bi_{0,r}$ и отношения $R_{\alpha,OK} / (R_{\alpha,ППП} + R_{ППП})$

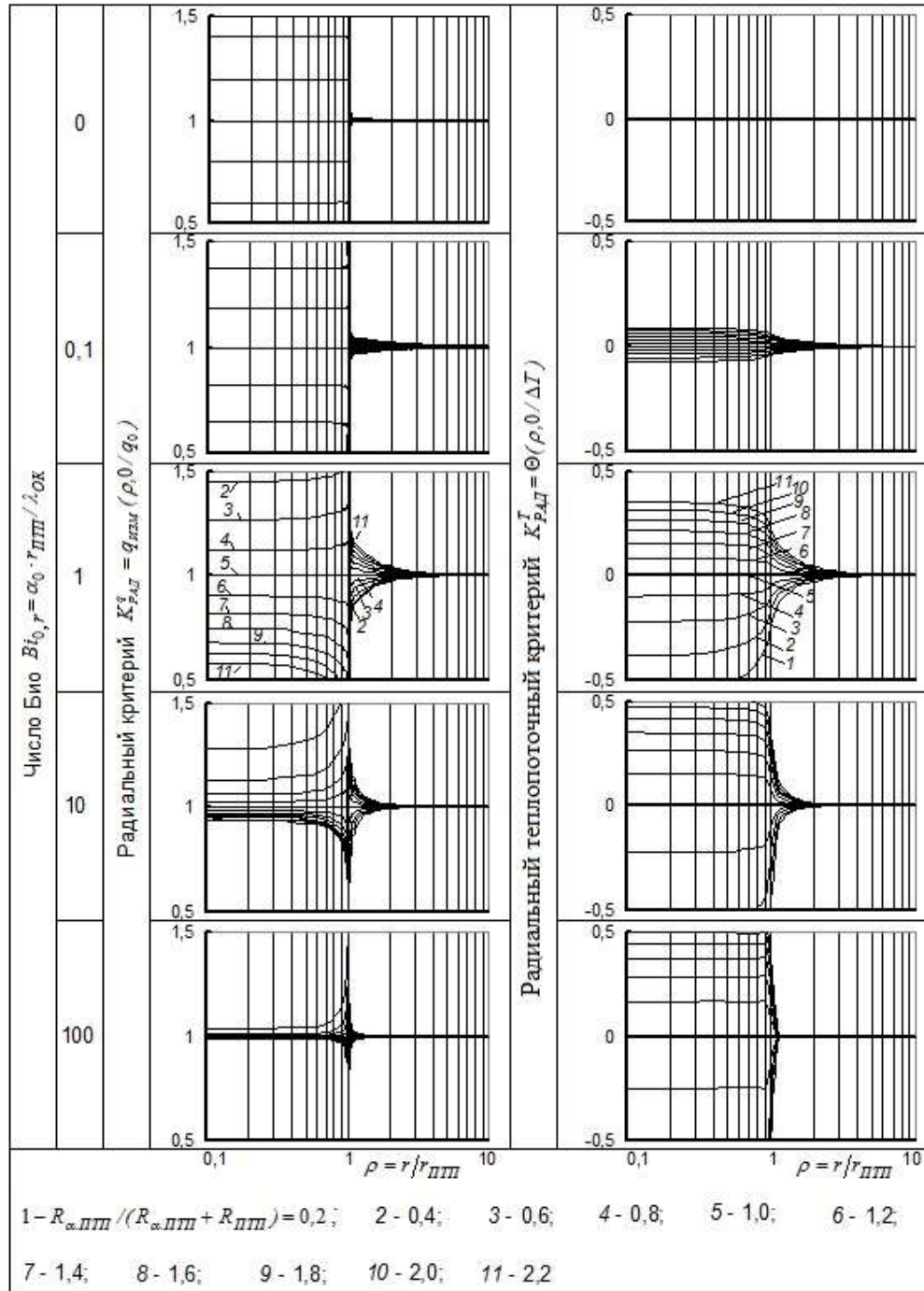
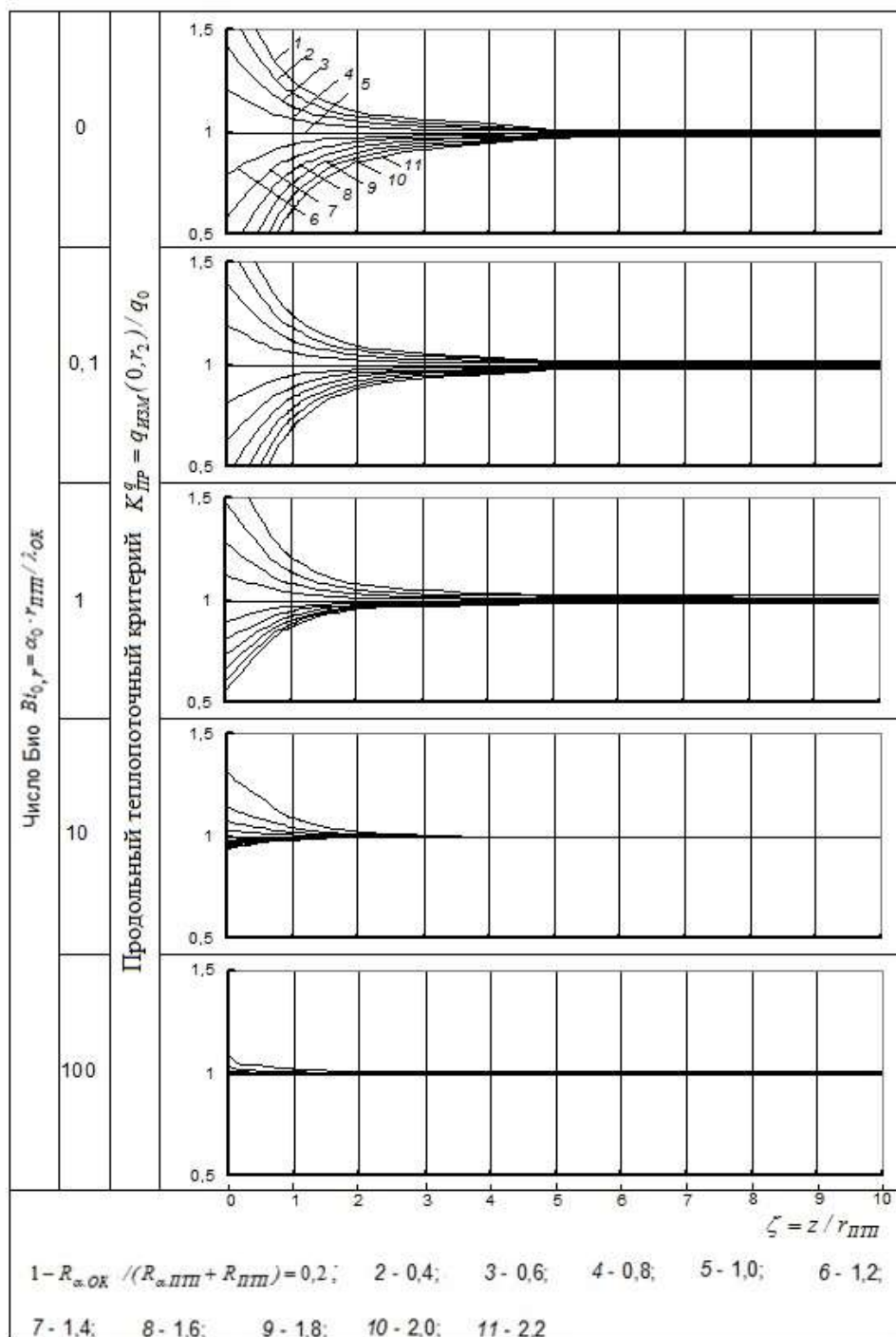


Таблица 2.8 – Характер распространения в глубину ОК искажения плотности теплового потока, вносимого ПТП, расположенным на поверхности полуограниченного массива, в зависимости от относительной осевой координаты при вариации числа Био $Bi_{0,r}$ и отношения $R_{\alpha,OK} / (R_{\alpha,ППП} + R_{ППП})$



контакта ОК с ПТП до другой поверхности ОК более глубины проникновения искажений теплового потока, вносимых ПТП. Согласно таблице 2.8 в зависимости от числа Био $Bi_{0,r}$ и отношения $R_{\alpha,OK} / (R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП})$ ОК при толщине, равной (2-3) радиусом ПТП, можно считать полуограниченным массивом. Для этих же значений числа $Bi_{0,r}$ и отношения $R_{\alpha,OK} / (R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП})$ определены методическая погрешность измерения плотности теплового потока δ^q согласно (2.1) и влияние на нее эффективного безразмерного радиуса чувствительного элемента ПТП ($\rho_{чЭ}$).

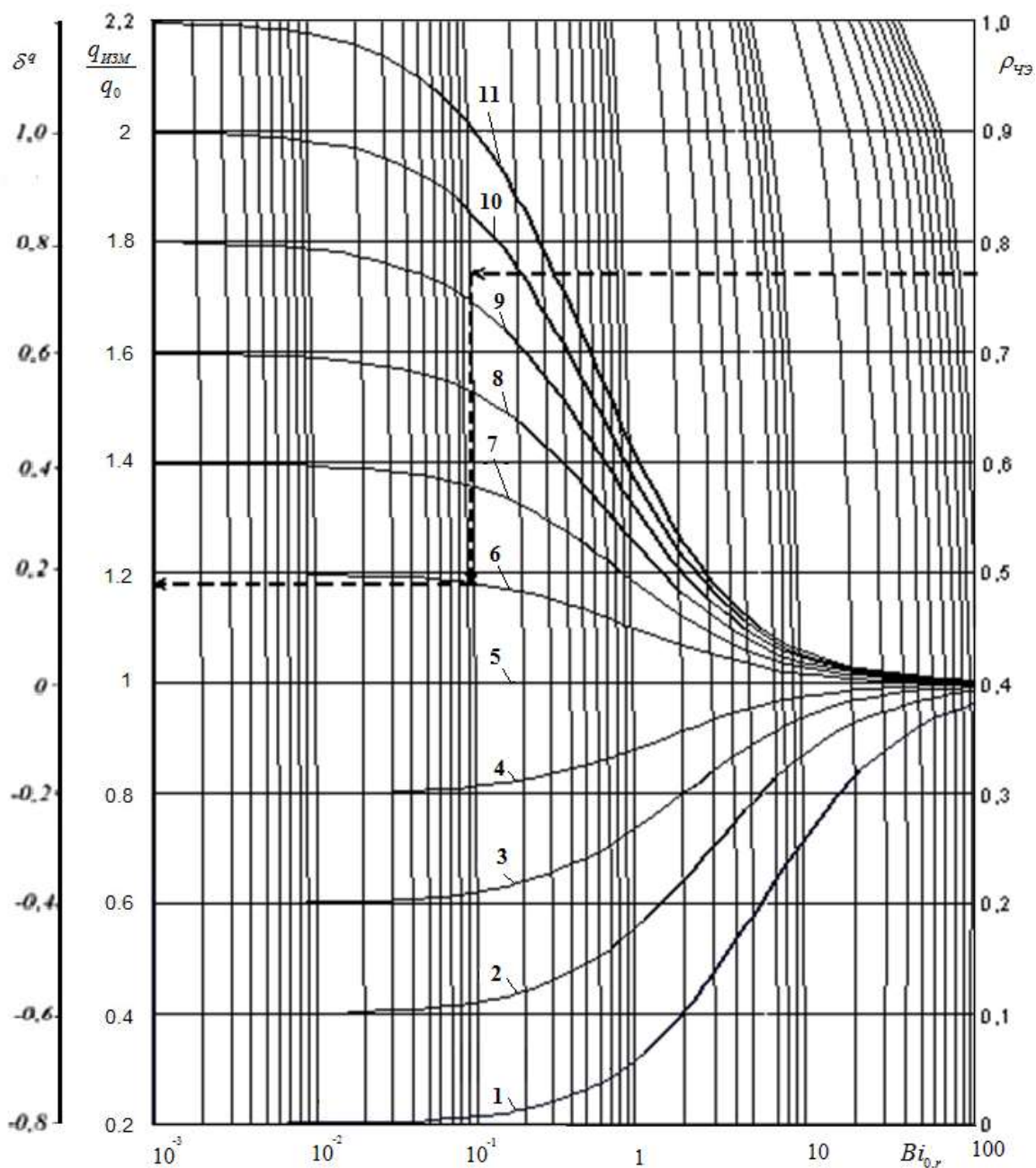
После преобразования формулы, предложенной в [105], получено выражение для относительной погрешности измерения δ^q :

$$\begin{aligned} \delta^q(Bi_{0,r}, \frac{R_{\alpha,OK}}{R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП}}, \rho_{чЭ}) &= \frac{q_{ИЗМ}}{q_0} - 1 = \\ &= (\frac{R_{\alpha,OK}}{R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП}} - 1) \cdot (1 + Bi_{0,r} \cdot \frac{R_{\alpha,OK}}{R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП}} \cdot \varphi(\rho_{чЭ}, Bi_{0,r})), \end{aligned} \quad (2.55)$$

где $\varphi(\rho_{чЭ}, Bi_{0,r}) = \int_0^{\infty} \frac{J_1(x) \cdot J_1(x \cdot \rho_{чЭ})}{x(x + Bi_{0,r})} dx / \int_0^{\infty} \frac{J_1(x) \cdot J_1(x \cdot \rho_{чЭ})}{x + Bi_{0,r}} dx$.

На рисунке 2.16 приведены результаты вычислений по (2.53) отношения $q_{ИЗМ} / q_0$ и погрешности δ^q в зависимости от безразмерного радиуса $\rho_{чЭ}$ при тех же вариациях чисел Био и отношения значений теплового сопротивления. Эта номограмма [42] позволяет подбирать значения соотношения $R_{\alpha,OK} / (R_{\alpha,ПТП} + R_{ПТП})$ и размеров ПТП и чувствительного элемента, удовлетворяющих установленным пределам допускаемой 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 применяемого ПТП и могут считаться полуограниченным массивом.



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;

Рисунок 2.16 – Номограмма для определения отношения значений $q_{ИЗМ} / q_0$ и методической погрешности измерения $\delta^q = q_{ИЗМ} / q_0 - 1$ изменения плотности теплового потока с применением ПТП, установленным на поверхности полуограниченного массива, в зависимости от безразмерного радиуса $\rho_{ч.э}$ и числа Био $Bi_{0,r}$ при вариации отношения $R_{\alpha,OK} / (R_{\alpha,ППП} + R_{ППП})$

2.6 ПТП на конвективно охлаждаемой поверхности неограниченной пластины

Рассмотрим случай расположения ПТП на поверхности неограниченной пластины конечной толщиной h_{OK} с неодинаковыми граничными условиями на ее поверхностях, как показано на рисунке 2.17 [36, 42, 194]

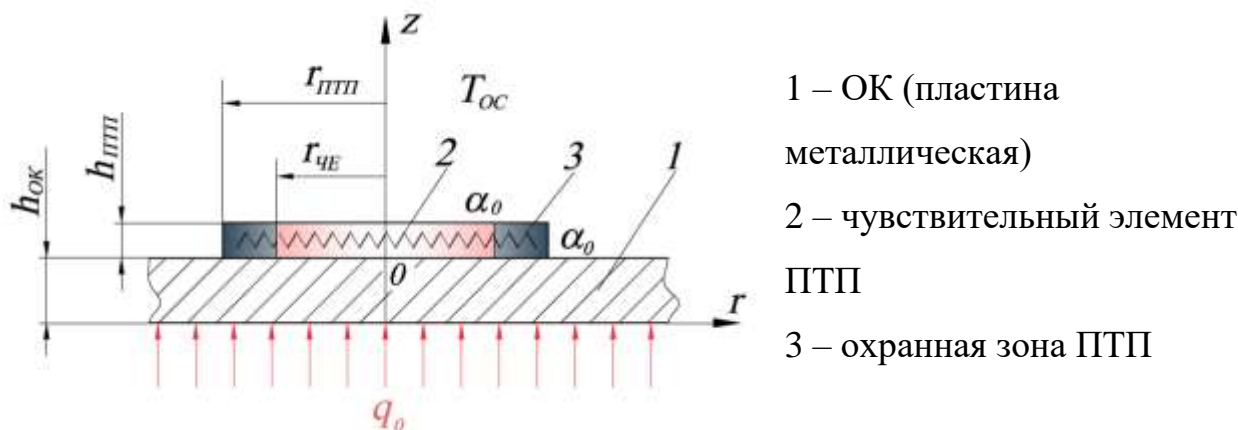


Рисунок 2.17 – Схема расположения ПТП на неограниченной металлической пластине

На поверхности пластины при $z = 0$ теплообмен определен граничным условием 2-ого рода ($q_0 = const$), а при $z = h_{OK}$ – 3-ого рода. Кроме того, коэффициент теплообмена на всей поверхности $z = h_{OK}$ и на торцевой поверхности ПТП принят одинаковым и является постоянной величиной ($\alpha_0 = const$). Это соответствует отсутствию радиальных потерь теплоты по боковой поверхности ПТП.

В отсутствие ПТП температурное поле в пластине одномерно и может считаться осесимметричным относительно оси координат, а на конвективно охлаждаемой поверхности пластины ($z = h_{OK}$) температура определяется формулой:

$$T|_{z=h_{OK}} = T_{OK} = q_0/\alpha_0 + T_{OC} . \quad (2.56)$$

При принятом допущении об одномерности теплового потока в ПТП (то есть не учитывается теплообмен по боковой поверхности ПТП), тепловое сопротивление ПТП $R_{ПТП}$, включая контактное сопротивление между ПТП и

пластиной, объединено с тепловым сопротивлением конвективному теплообмену на его торцевой поверхности и введено понятие эффективного коэффициента следующим соотношением:

$$\alpha_{\text{эф}} = (1/\alpha_0 + h_{\text{ПТП}}/\lambda_{\text{ПТП}})^{-1} = (R_{\alpha} + R_{\text{ПТП}})^{-1}. \quad (2.57)$$

Такой заменой исходная задача трансформирована в следующую: определить температурное поле в ОК – неограниченной пластине толщиной $h_{\text{ОК}}$ при граничном условии 2-го рода на поверхности при $z = 0$ и 3-го рода – при $z = h_{\text{ОК}}$, где конвективный теплообмен происходит со скачкообразным изменением коэффициента теплообмена при $r = r_{\text{ПТП}}$. Модель теплообмена трансформированной задачи представлена на рисунке 2.18.

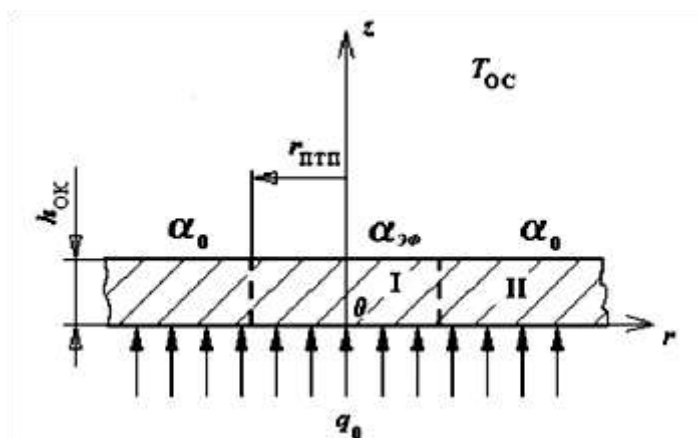


Рисунок 2.18 – Схема трансформированной задачи

Температурное поле также описывается классическим уравнением теплопроводности [195] в цилиндрической системе координат. Его решение найдено по схеме, предложенной в [107] и приведено в пункте В.2 приложения В.

Исходя из (В.2.26) выражение для плотности среднеинтегрального теплового потока для области имеет вид:

$$q_{\text{CP},I} = \frac{\lambda_{\text{OK}}}{\rho^2} \cdot \frac{T_{\text{OK}} - T_{\text{OC}}}{h_{\text{OK}}} \cdot (\rho^2 \cdot Bi_{0,h} + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \frac{h_{\text{OK}}}{r_{\text{ПТП}}} \cdot \rho \cdot I_1(\bar{v}_n \cdot \rho) \cdot \sin(v_n \zeta)) \quad (2.58)$$

где: $Bi_{0,h} = \alpha_0 \cdot h_{\text{OK}} / \lambda_{\text{OK}}$; A_n – по формуле (В.2.23).

Измеренная плотность теплового потока равна плотности среднеинтегрального теплового потока по площади, занимаемой ПТП, то есть

при $\zeta = 1$ и $\rho = 1$, следовательно,

$$q_{ИЗМ} = q_{CP,I}(1,1) = \lambda_{OK} \cdot \frac{T_{OK} - T_{OC}}{h_{OK}} \cdot (Bi_{0,h} + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \frac{h_{OK}}{r_{ПТП}} \cdot I_1(\bar{v}_n) \sin v_n), \quad (2.59)$$

а плотность входящего теплового потока определяется по той же площади на нижней стороне пластины:

$$q_0 = -\lambda_{OK} \cdot \frac{\partial T_I}{\partial z} \Big|_{z=0} = -\lambda_{OK} \cdot \frac{T_{OK} - T_{OC}}{h_{OK}} \cdot \frac{\partial \bar{T}_I}{\partial \zeta} \Big|_{\zeta=0} = \lambda_{OK} \cdot \frac{T_{OK} - T_{OC}}{h_{OK}} \cdot Bi_{0,h}. \quad (2.60)$$

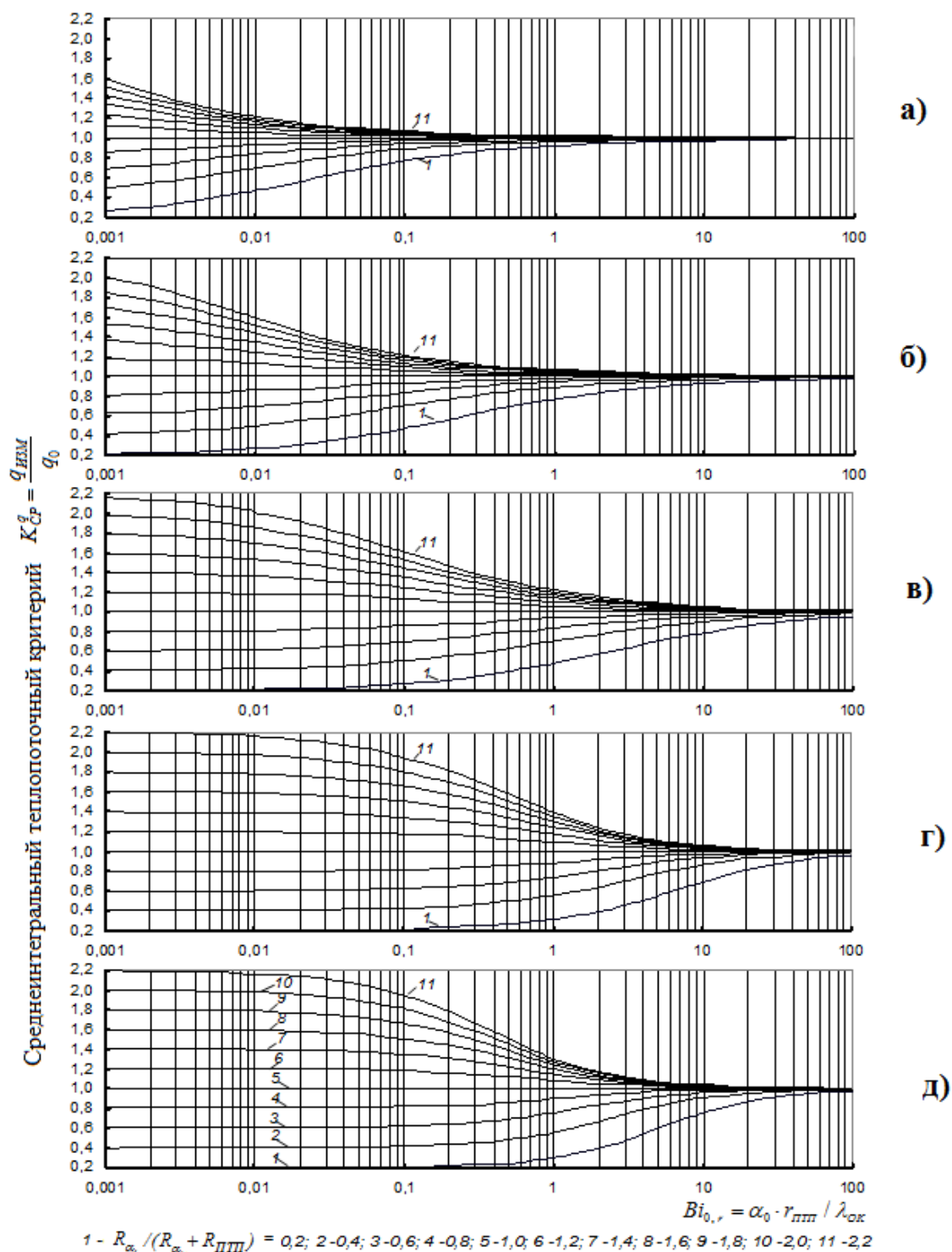
Таким образом, критерий степени искажения среднеинтегрального теплового потока $K_{CP}^q = q_{ИЗМ} / q_0$ находится по следующему алгоритму: из решения характеристических уравнений (В.2.16) и (В.2.17) находят собственные числа \bar{v}_n и $\bar{\mu}_m$; затем из решения системы алгебраических уравнений (В.2.23) находят коэффициенты A_n . На основании (2.59) и (2.60) отношение $q_{ИЗМ} / q_0$ определится следующим выражением:

$$K_{CP}^q = \frac{q_{ИЗМ}}{q_0} = 1 + \frac{2 \cdot h_{OK}}{Bi_{0,h} \cdot r_{ПТП}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot I_1(\bar{v}_n) \cdot \sin v_n. \quad (2.61)$$

В связи с необходимостью знать зоны отсутствия влияния ПТП здесь также использован критерий Био с характерным геометрическим размером, равным радиусу ПТП: $Bi_{0,r} = \alpha_0 \cdot r_{ПТП} / \lambda_{OK}$, который связан с критерием $Bi_{0,h}$ соотношением: $Bi_{0,r} = Bi_{0,h} \cdot r_{ПТП} / h_{OK}$. В результате выражение (2.61) принимает следующий вид:

$$K_{CP}^q = \frac{q_{ИЗМ}}{q_0} = 1 + \frac{2}{Bi_{0,r}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot I_1(\bar{v}_n) \cdot \sin v_n. \quad (2.62)$$

На рисунке 2.19 представлены семейства графиков зависимости теплоточного критерия K_{CP}^q по (2.62) от чисел 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, соответственно, для пяти фиксированных значений относительной толщины пластины $h_{OK} / r_{ПТП} = 10^{-3}; 10^{-2}; 10^{-1}; 1$ и 10. При этом отношение



$a - h_{OK}/r_{ПТП}=10^{-3}$; $б - 10^{-2}$; $в - 10^{-1}$; $г - 1$; $д - 10$.

Рисунок 2.19 – Зависимость отношения плотности измеренного среднеинтегрального и действительного теплового потока $\bar{q}_{ИЗМ} / q_0$ от числа Био $Bi_{0,r}$ при вариации отношения $R_{\alpha} / (R_{\alpha} + R_{ПТП})$ и фиксированных значений относительной толщины $h_{OK}/r_{ПТП}$

значений теплового сопротивления находится из следующего выражения:

$$R_{\alpha} / (R_{\alpha} + R_{ППП}) = \alpha_{\text{эф}} / \alpha_0.$$

Как следует из сравнения данных рисунка 2.19 для случая $h_{OK} / r_{ППП} = 10$ с данными рис. 2.16, пластину относительной толщины $h_{OK} / r_{ППП} = 10$ можно считать полуограниченным массивом. Следовательно, для расчетов можно пользоваться формулами полуограниченного массива (см. 2.5).

Для определения мест установки двух и более ПТП без их взаимного влияния исследовано распространение искажений локальных температуры и плотности теплового потока на поверхности ОК. Функции локальной безразмерной температуры на поверхности ОК $\zeta = 1$, найденные для обеих областей, имеют вид:

– для области **I** при $\rho \leq 1$ с учетом (В.2.1) и (В.2.14):

$$\tilde{T}_I = \frac{T_I(r, h_{OK}) - T_{OC}}{T_{OK} - T_{OC}} = \mathfrak{G}_1(\rho, 1) + \frac{Bi_{0,h}}{Bi_{\text{эф},h}} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n I_0(\bar{v}_n \cdot \rho) \cos(v_n) + \frac{Bi_{0,h}}{Bi_{\text{эф},h}}. \quad (2.63)$$

– для области **II** при $\rho \geq 1$ с учетом (В.2.2) и (В.2.15):

$$\bar{T}_{II} = \frac{T_{II}(r, h_{OK}) - T_{OC}}{T_{OK} - T_{OC}} = \mathfrak{G}_2(\rho, 1) + 1 = \sum_{m=1}^{\infty} B_m K_0(\bar{\mu}_m \cdot \rho) \cos \mu_m + 1, \quad (2.64)$$

а функции плотности локального теплового потока на поверхности ОК следующий вид:

– для области **I** (при $r \leq r_{ППП}$):

$$q_{ЛОК,I} = \alpha_{\text{эф}} \cdot (T_I(r, h_{OK}) - T_{OC}), \quad (2.65)$$

– для области **II** (при $r \geq r_{ППП}$):

$$q_{ЛОК,II} = \alpha_0 \cdot (T_{II}(r, h_{OK}) - T_{OC}). \quad (2.66)$$

Исходя из того, что первоначальная плотность теплового потока равна:

$$q_0 = \alpha_0 \cdot (T_{OK} - T_{OC}), \quad (2.67)$$

найденные критерии степени искажения локального теплового потока на поверхности ОК равны:

– для области **I** (исходя из формул (2.63), (2.65) и (2.67)):

$$K_{ЛОК, I}^q = \frac{q_{ЛОК, I}}{q_0} = \frac{\alpha_{эф}}{\alpha_0} \cdot \frac{T_I(r, h_{ОК}) - T_{ОС}}{T_{ОК} - T_{ОС}} = \frac{R_\alpha}{R_\alpha + R_{ПТП}} \cdot \mathcal{G}_1(\rho, 1) + 1; \quad (2.68)$$

– для области **II** (исходя из формул (2.64), (2.66) и (2.67)):

$$K_{ЛОК, II}^q = \frac{q_{ЛОК, II}}{q_0} = \frac{\alpha_0}{\alpha_0} \cdot \frac{T_{II}(r, h_{ОК}) - T_{ОС}}{T_{ОК} - T_{ОС}} = \mathcal{G}_2(\rho, 1) + 1. \quad (2.69)$$

В таблицах 2.9 – 2.12 представлены полученные по результатам счета по формулам (2.63) и (2.64) семейства графиков распространения на поверхности ОК в радиальном направлении искажения локальной температуры и по (2.68) и (2.69) – локальной плотности теплового потока в зависимости от числа $Bi_{0,r}$ при вариации относительной толщины ОК $h_{ОК}/r_{ПТП}$ и отношения $R_\alpha/(R_\alpha + R_{ПТП})$.

Из представленных данных следует, что для уменьшения методической погрешности δ^q 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 δ^q уменьшается. В случае применения дополнительно измерителя температуры поверхности ОК для возможности корректирования показаний ПТП, этот преобразователь температуры должен быть размещен на расстоянии от ПТП, не меньше, чем пять радиусов ПТП.

2.7 ПТП на поверхности неограниченной пластины, конвективно охлаждаемой с двух сторон

В предыдущей задаче на одной из поверхностей пластины происходит теплообмен с граничными условиями 2-го рода. Однако, его можно заменить условием 3-го рода. Тогда имеем задачу, в которой на поверхности пластины, где установлен ПТП, теплообмен с ОС происходит с коэффициентом теплообмена α_1 при значениях температуры среды $T_{ОС,1}$ и поверхности пластины $T_{П,1}$, а с противоположной стороны – соответственно, с

Таблица 2.9 – Характер распространения на поверхности ОК в радиальном направлении искажений локальной плотности теплового потока и локальной температуры при относительной толщине ОК $h_{OK}/r_{ППП} = 10^{-3}$ при вариациях отношения $R_\alpha/(R_\alpha + R_{ППП})$ и числа Био $Bi_{0,r} = \alpha_0 \cdot r_{ППП} / \lambda_{OK}$

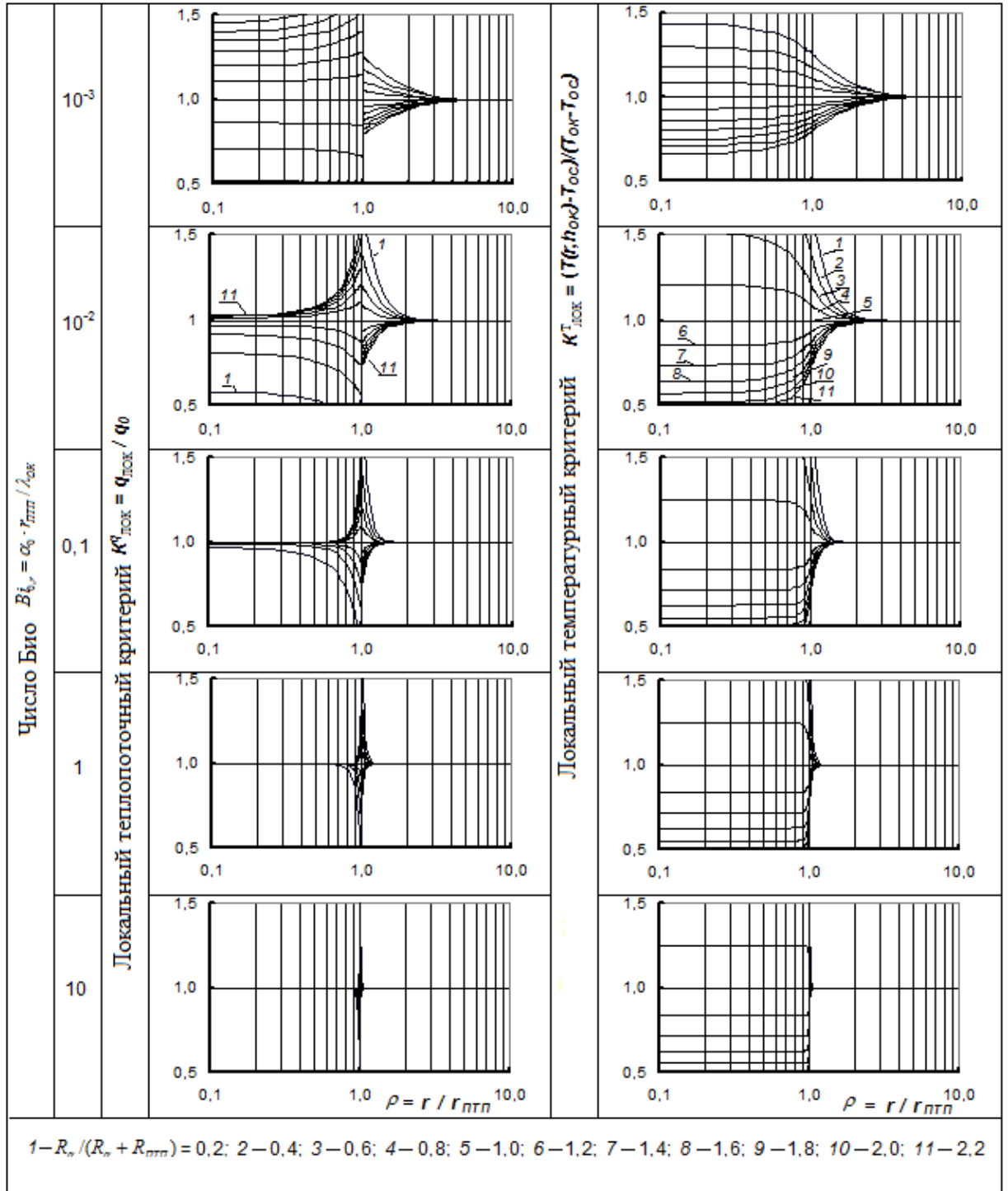


Таблица 2.10 – Характер распространения по поверхности ОК в радиальном направлении искажений локальной плотности теплового потока и локальной температуры при относительной толщине ОК $h_{OK}/r_{III} = 10^{-2}$ при вариациях отношения $R_\alpha/(R_\alpha + R_{III})$ и числа Био $Bi_{0,r} = \alpha_0 \cdot r_{III}/\lambda_{OK}$

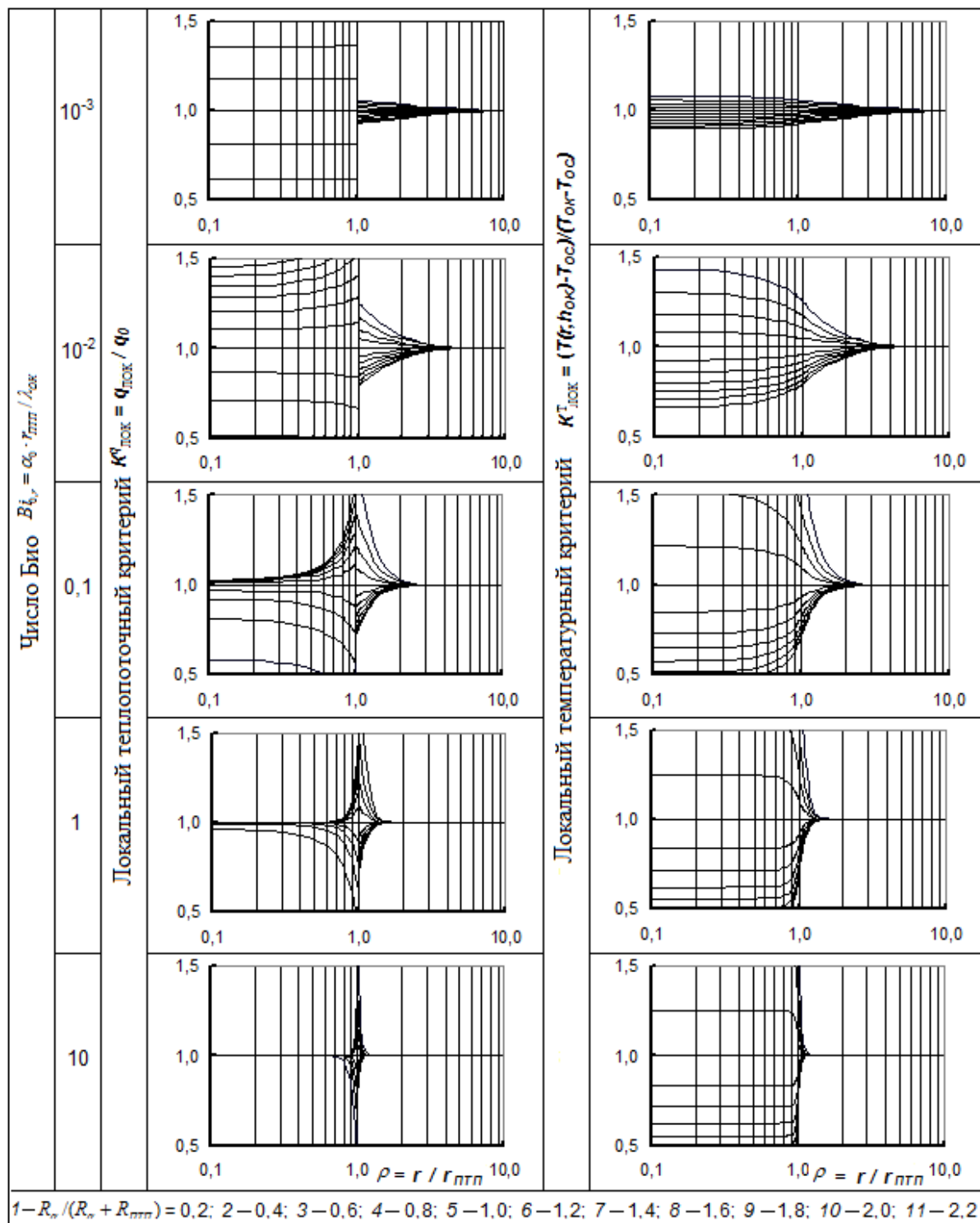


Таблица 2.11 – Характер распространения по поверхности ОК в радиальном направлении искажений локальной плотности теплового потока и локальной температуры при относительной толщине ОК $h_{OK} / r_{ППП} = 10^{-1}$ при вариациях отношения $R_{\alpha} / (R_{\alpha} + R_{ППП})$ и числа Био $Bi_{0,r} = \alpha_0 \cdot r_{ППП} / \lambda_{OK}$

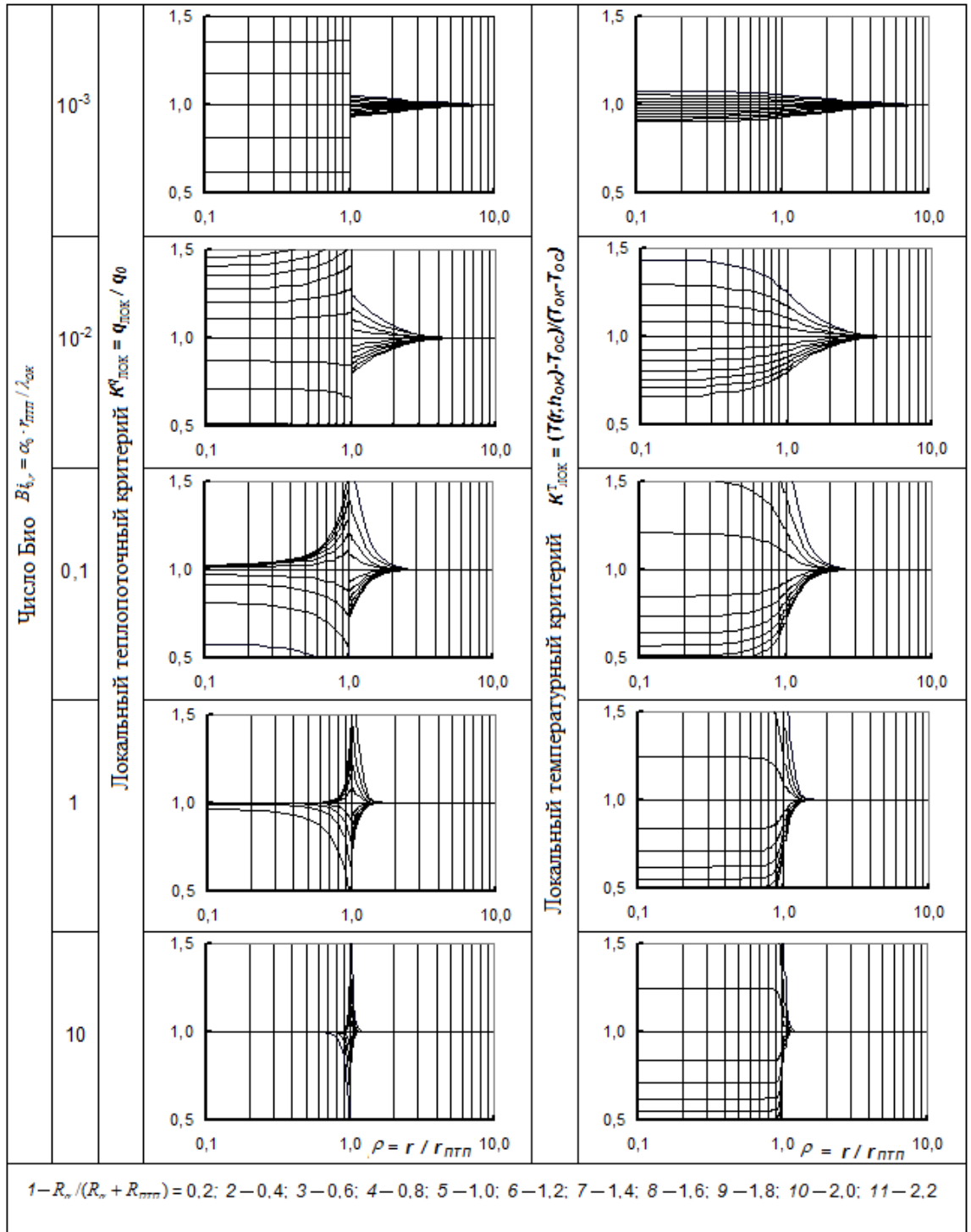
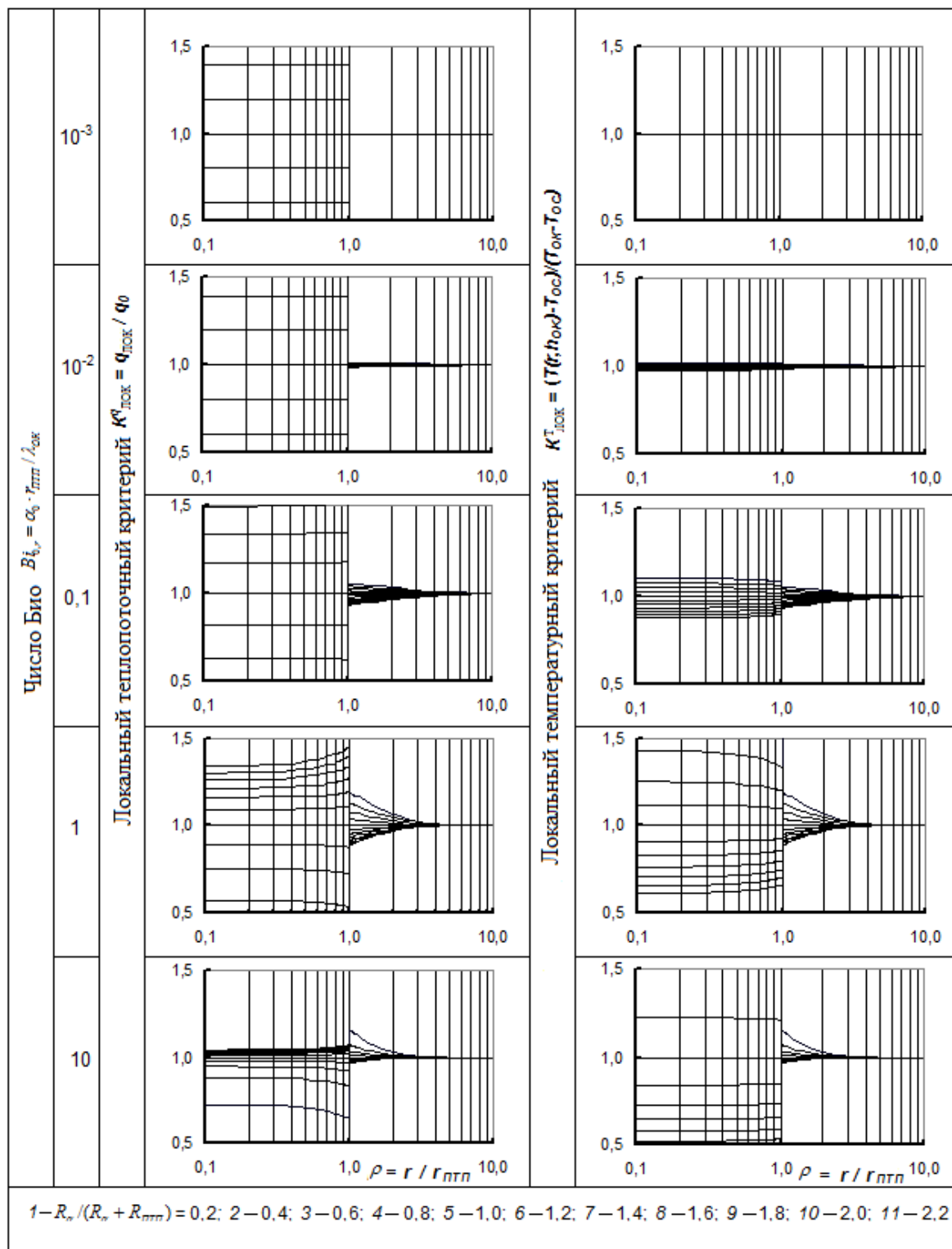


Таблица 2.12 – Характер распространения по поверхности ОК в радиальном направлении искажений локальной плотности теплового потока и локальной температуры при относительной толщине ОК $h_{OK}/r_{ППП} = 1$ при вариациях отношения $R_\alpha/(R_\alpha + R_{ППП})$ и числа Био $Bi_{0,r} = \alpha_0 \cdot r_{ППП} / \lambda_{OK}$



коэффициентом теплообмена α_2 при значениях температуры $T_{OC,2}$ и $T_{П,2}$, как показано на рисунке 2.20 [36, 197, 198].

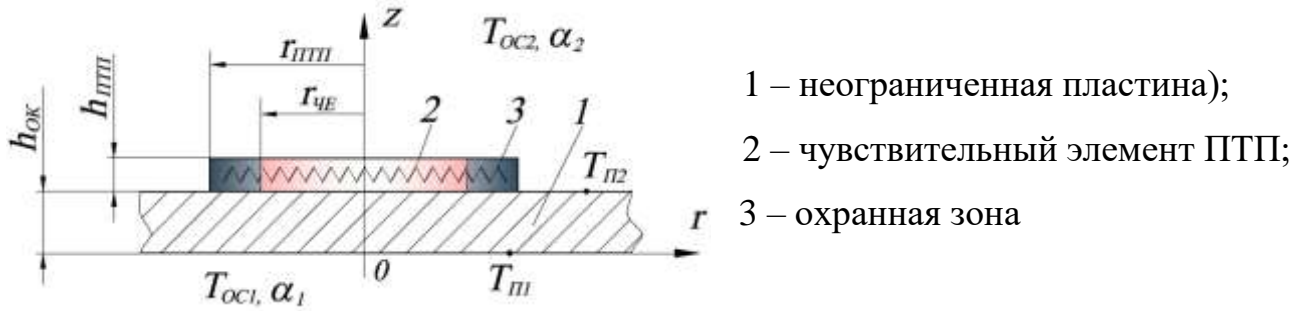


Рисунок 2.20 – Схема расположения ПТП на неограниченной пластине, по обе стороны которой происходит конвективный теплообмен

В этой задаче процесс теплообмена также является осесимметричным и рассмотрен в цилиндрической системе координат. При этом величины $T_{OC,1}$, $T_{OC,2}$, α_1 и α_2 постоянны во времени и вдоль поверхности. Это позволяет в отсутствие ПТП рассматривать изменение температуры только в направлении, нормальном к поверхности пластины. В этом случае плотность неискаженного теплового потока q_0 равна:

$$q_0 = (T_{OC,2} - T_{OC,1}) / R_{\Sigma}, \quad (2.70)$$

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:

$$T_{П,2} = T|_{z=0} = -q_0 / \alpha_2 + T_{OC,2}; \quad (2.71)$$

$$T_{П,1} = T|_{z=h_{OK}} = -q_0 / \alpha_1 + T_{OC,1}. \quad (2.72)$$

Как отмечалось выше, наличие ПТП, установленного на пластине (см. рис. 2.20), приводит к искажению в распределении температуры в стенке. Температурное поле перестает быть одномерным, а тепловой поток, проходящий через эту зону, тоже искажается и становится неидентичным исходному q_0 . Потери теплоты на боковой поверхности ПТП можно не

учитывать. Это упрощение приводит к осевой одномерности теплового потока в самом ПТП. Такое допущение справедливо лишь в том случае, если присутствие ПТП не вызывает возмущения окружающей среды и, как следствие, перехода ламинарного режима обтекания в турбулентный.

Как и в предыдущей задаче, предположение об одномерности теплового потока в ПТП позволяет объединить тепловое сопротивление ПТП $R_{ПТП}$ (включая контактное сопротивление между ПТП и пластиной) с тепловым сопротивлением конвективному теплообмену на его торцевой поверхности α_1 и ввести понятие эффективного коэффициента конвективного теплообмена:

$$\alpha_{\text{эф}} = (1/\alpha_1 + h_{ПТП} / \lambda_{ПТП})^{-1} = (R_{\alpha_1} + R_{ПТП})^{-1}. \quad (2.73)$$

Такая замена позволяет исходную задачу трансформировать в следующую: определить температурное поле в неограниченной пластине при граничных условиях 3-го рода на обеих поверхностях. При этом на верхней поверхности конвективный теплообмен происходит со скачкообразным изменением коэффициента теплообмена при $r = r_{ПТП}$. Модель теплообмена для этого случая представлена на рисунке 2.21.

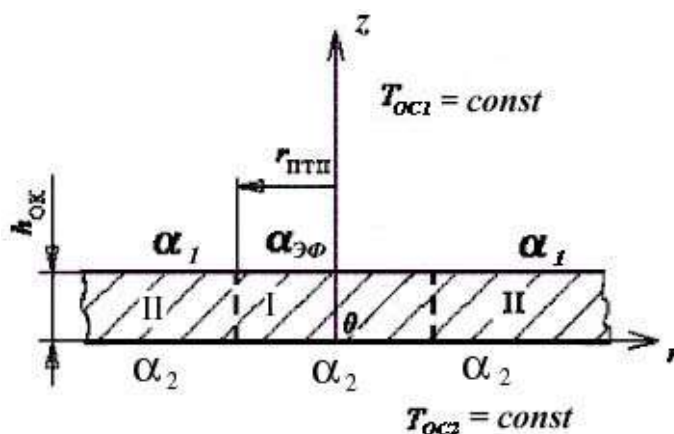


Рисунок 2.21 – Схема трансформированной задачи

По аналогии с предыдущей задачей, рассмотрено две области – *I* и *II*, в каждой из которых распределение температуры обозначено, соответственно, функциями $T_I(r, z)$ и $T_{II}(r, z)$ (см. пункт В.2 приложения В).

На поверхности каждой области происходит конвективный теплообмен с

постоянными коэффициентами теплообмена $\alpha_{\text{эф}}$ и α_1 при $z = h_{\text{OK}}$ и α_2 при $z = 0$.

В системе безразмерных координат $\rho = r/r_{\text{ПТП}}$ и $\zeta = z/h_{\text{ПТП}}$ приняты для температуры в безразмерном виде такие выражения:

$$\text{– для области I: } \tilde{T}_I = \frac{T_I - T_{\text{OC},1}}{T_{\text{OC},2} - T_{\text{OC},1}}, \quad (2.74)$$

$$\text{– для области II: } \tilde{T}_{II} = \frac{T_{II} - T_{\text{OC},1}}{T_{\text{OC},2} - T_{\text{OC},1}}, \quad (2.75)$$

$$\begin{aligned} \text{– для поверхностей: } \tilde{T}_{II,1} = \tilde{T}(\rho,1) &= \frac{T_{II,1} - T_{\text{OC},1}}{T_{\text{OC},2} - T_{\text{OC},1}}; \\ \tilde{T}_{II,2} = \tilde{T}(\rho,0) &= \frac{T_{II,2} - T_{\text{OC},1}}{T_{\text{OC},2} - T_{\text{OC},1}}, \end{aligned} \quad (2.76)$$

$$\text{– для ОС: } \tilde{T}_{\text{OC},1} = 0 \text{ и } \tilde{T}_{\text{OC},2} = 1 \quad (2.77)$$

При введении числа Био соотношениями:

$$Bi_{1,h} = \alpha_1 \cdot h_{\text{OK}} / \lambda_{\text{OK}}, \quad Bi_{2,h} = \alpha_2 \cdot h_{\text{OK}} / \lambda_{\text{OK}}, \quad Bi_{\text{эф},h} = \alpha_{\text{эф}} \cdot h_{\text{OK}} / \lambda_{\text{OK}} \quad (2.78)$$

граничные условия имеют вид:

$$\frac{\partial \tilde{T}_I}{\partial \zeta}(\rho,1) = -Bi_{\text{эф},h} \cdot \tilde{T}_{II,1} \quad \text{при } 0 \leq \rho < 1, \quad (2.79)$$

$$\frac{\partial \tilde{T}_{II}}{\partial \zeta}(\rho,1) = -Bi_{1,h} \cdot \tilde{T}_{II,1} \quad \text{при } 1 \leq \rho < \infty, \quad (2.80)$$

$$\frac{\partial \tilde{T}_i}{\partial \zeta}(\rho,0) = -Bi_{2,h} \cdot (1 - \tilde{T}_{II,2}), \quad \text{где } i = I, II \text{ при } 0 \leq \rho < \infty. \quad (2.81)$$

Решение рассматриваемой в данном параграфе трансформированной задачи при сформулированных граничных условиях (2.79) – (2.81) приведено в пункте В.3 приложения В.

Исходя из того, что сигнал ПТП пропорционален среднему по площади контакта значению теплового потока, представляет интерес плотность среднеинтегрального теплового потока, которая в области I ($0 \leq \rho \leq 1$) определяется интегралом:

$$q_{cp}(z, r) = -\frac{\lambda_{OK}}{\pi r^2} \cdot \int_0^{\rho} \frac{\partial T_1}{\partial z} \cdot 2\pi r dr. \quad (2.82)$$

Равенство (2.82) в безразмерных координатах с учетом (2.74) принимает вид:

$$q_{cp}(\zeta, \rho) = -\frac{\lambda_{OK}}{\rho^2} \cdot \frac{T_{OC2} - T_{OC1}}{h_{OK}} \int_0^{\rho} \frac{\partial \tilde{T}_1}{\partial \zeta} \cdot 2\rho d\rho. \quad (2.83)$$

С использованием соотношений (B.3.1), (B.3.2) и (B.3.26), получена следующая функция плотности среднеинтегрального теплового потока:

$$\begin{aligned} q_{cp}(\zeta, \rho) &= \frac{-2\lambda_{OK} \cdot (T_{OC,2} - T_{OC,1})}{\rho^2 \cdot h_{OK}} \int_0^{\rho} \left(\frac{\partial \vartheta_I}{\partial \zeta} - Bi_{\varepsilon\phi, h} \cdot \alpha_{2\varepsilon\phi} \right) \rho d\rho = \frac{-2\lambda_{OK} \cdot (T_{OC,2} - T_{OC,1})}{\rho^2 \cdot h_{OK}} \times \\ &\times \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{\rho} A_n \cdot I_0(\lambda_n \rho) \cdot (-\varepsilon_n \cdot \sin(\varepsilon_n \zeta) + Bi_{2, h} \cdot \cos(\varepsilon_n \zeta)) \rho d\rho + \\ &+ \frac{2\lambda_{OK} \cdot T_{OC,2} - T_{OC,1}}{\rho^2 \cdot h_{OK}} \int_0^{\rho} Bi_{\varepsilon\phi, h} \cdot \alpha_{2\varepsilon\phi} \rho d\rho. \end{aligned} \quad (2.84)$$

Путём несложных преобразований с учетом того, что $x \cdot I_0(x) = (x \cdot I_1(x))'$,

откуда $\int_0^{\rho} I_0(\lambda_n \rho) \rho d\rho = \frac{\rho}{\lambda_n} I_1(\lambda_n \rho)$, выражение (2.84) преобразовано к виду:

$$\begin{aligned} q_{CP}(\zeta, \rho) &= -\lambda_{OK} \cdot \frac{T_{OC,2} - T_{OC,1}}{h_{OK}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{\lambda_n \rho} \cdot A_n \cdot I_1(\lambda_n \rho) \cdot (-\varepsilon_n \sin(\varepsilon_n \zeta) + Bi_{2, h} \cdot \cos(\varepsilon_n \zeta)) - \right. \\ &\left. - Bi_{\varepsilon\phi, h} \cdot \alpha_{2\varepsilon\phi} \right). \end{aligned} \quad (2.85)$$

Измеренная плотность теплового потока равна плотности среднеинтегрального теплового потока по площади, занимаемой ПТП, то есть при $\zeta = 1$ и $\rho = 1$. Следовательно, если учесть формулу (2.70), определяющую плотность входящего невозмущенного теплового потока, отношение измеренной плотности теплового потока к плотности пришедшего к пластине теплового потока для области I ($0 \leq \rho \leq 1$) равно:

$$\frac{q_{ИЗМ, I}}{q_0} = \frac{q_{CP}(1, 1)}{q_0} = -K_R \cdot \left(\sum_{n=1}^{\infty} 2A_n \cdot \frac{I_1(\lambda_n)}{\lambda_n} \cdot (-\varepsilon_n \sin \varepsilon_n + Bi_{2, h} \cdot \cos \varepsilon_n) - Bi_{\varepsilon\phi, h} \cdot \alpha_{2\varepsilon\phi} \right), \quad (2.86)$$

$$\text{где } K_R = \frac{R_{\Sigma}}{h_{OK} / \lambda_{OK}} = \frac{1}{Bi_{1, h}} + \frac{1}{Bi_{2, h}} + 1. \quad (2.87)$$

Аналогично для области **II** ($1 \leq \rho < \infty$) получено:

$$\frac{q_{ИЗМ,II}}{q_0} = \frac{q_{CP}(1,1)}{q_0} = -K_R \cdot \left(\sum_{m=1}^{\infty} 2B_m \cdot \frac{K_1(\delta_m)}{\delta_m} \cdot (-\psi_m \sin \psi_m + Bi_{2,h} \cdot \cos \psi_m) - Bi_{1,h} \cdot a_2 \right). \quad (2.88)$$

Таким образом, алгоритм отыскания отношения плотности искаженного теплового потока к действительной плотности состоит в следующем: из решения уравнений (В.3.2) и (В.3.33) определяют собственные числа ε_n и ψ_m ; решением системы алгебраических уравнений (В.3.40) находят коэффициенты A_n ряда; по формулам (2.86) и (2.88) находят отношение значений измеренной и действительной плотности среднеинтегрального теплового потока.

В связи с необходимостью знать размер зоны влияния ПТП здесь также введено число Био с характерным геометрическим размером – радиусом: $Bi_{i,r} = \alpha_i \cdot r_{ПТП} / \lambda_{OK}$, ($i=1;2$), который связан с критерием $Bi_{i,h}$ соотношением: $Bi_{i,r} = Bi_{i,h} \cdot (r_{ПТП} / h_{OK})$.

Отношение теплового сопротивления пластины конвективному теплообмену с ОС в отсутствие ПТП к суммарному тепловому сопротивлению пластины с ПТП находится с учетом (2.73) из следующего выражения:

$$R_{\alpha_1,OK} / (R_{\alpha_1,ПТП} + R_{ПТП}) = \alpha_{\varepsilon\phi} / \alpha_1. \quad (2.89)$$

В результате вычислительного эксперимента получены представленные на рисунках 2.22 – 2.24 семейства графиков зависимостей отношения измеренного и действительного значений среднеинтегральной плотности теплового потока (то есть среднеинтегрального теплоточного критерия K_{CP}^q) от числа Био $Bi_{1,r}$ при фиксированных значениях относительной толщины ОК ($h_{OK} / r_{ПТП} = 10^{-2}; 10^{-1}$ и 1) и вариации коэффициентов теплообмена $\alpha_{\varepsilon\phi} / \alpha_1$ 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 $z = h_{OK}$. Функция локальной безразмерной температуры на поверхности $z = h_{OK}$ для области **I**, найдена по формуле (В.3.1) при значении $\zeta = 1$, которая с учетом формулы (В.3.26) имеет следующий вид:

$$\tilde{T}_{II,1}(\rho,1) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot I_0(\lambda_n \cdot \rho) \cdot (\cos \varepsilon_n + \frac{Bi_{2,h}}{\varepsilon_n} \cdot \sin \varepsilon_n) + a_{2ЭФ}. \quad (2.90)$$

Аналогично для поверхности $z = h_{OK}$ области **II** функция локальной безразмерной температуры, найденная по формуле (В.3.4), которая с учетом формулы (В.3.34), имеет вид:

$$\tilde{T}_{II,2}(\rho,1) = \sum_{m=1}^{\infty} B_m \cdot K_0(\delta_m \cdot \rho) \cdot (\cos \psi_m + \frac{Bi_{2,h}}{\psi_m} \cdot \sin \psi_m) + a_2. \quad (2.91)$$

а локальная плотность теплового потока на поверхности пластины при $z = h_{OK}$ определяется по формулам:

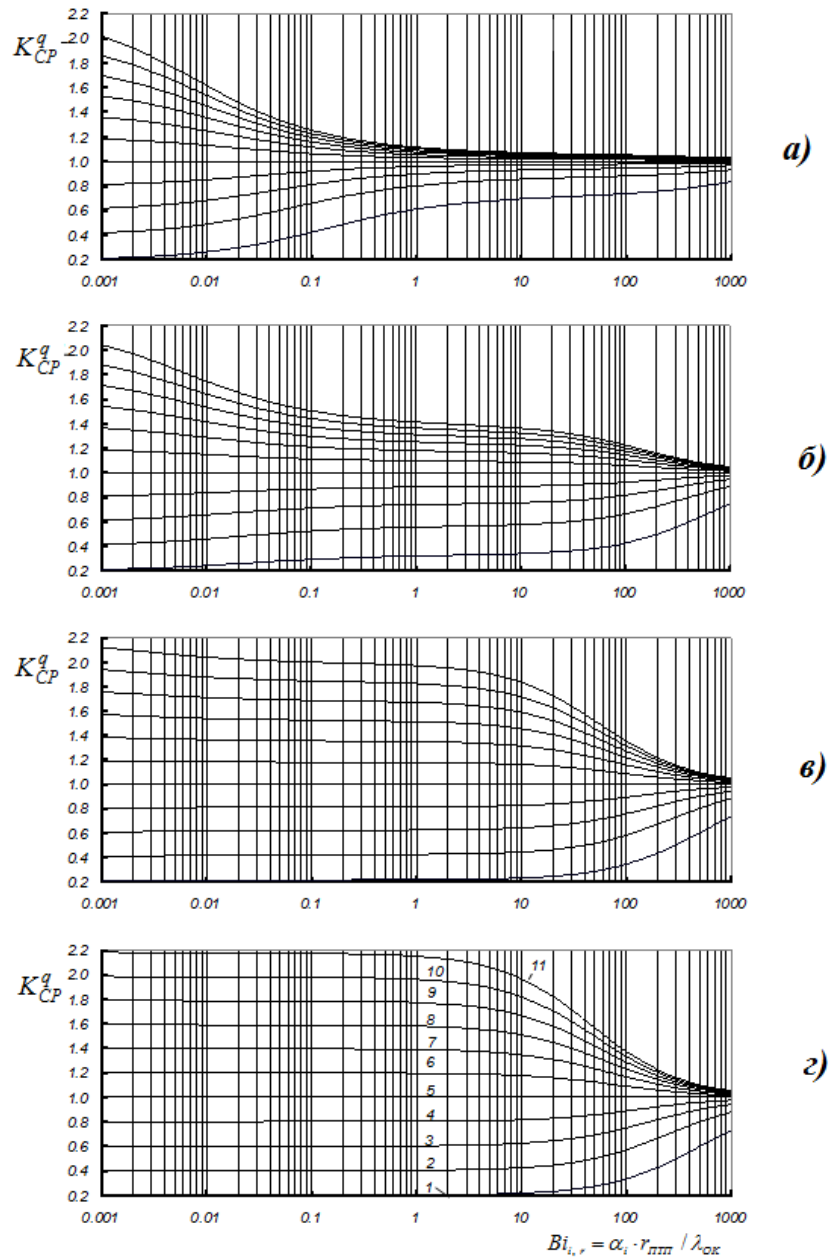
$$q_{ЛОК}(\rho,1) = -\lambda_{OK} \left. \frac{\partial T_{II,1}}{\partial z} \right|_{\zeta=1} \quad \text{при } \rho \leq 1, \quad (2.92)$$

$$q_{ЛОК}(\rho,1) = -\lambda_{OK} \left. \frac{\partial T_{II,2}}{\partial z} \right|_{\zeta=1} \quad \text{при } \rho \geq 1. \quad (2.93)$$

Исходя из (2.74), (2.76), (2.75) с учетом (В.3.26) и (В.3.34), получены следующие выражения для расчета отношения измеренного и действительного значений плотности локального теплового потока для обеих областей:

– для области **I** ($0 \leq \rho \leq 1$):

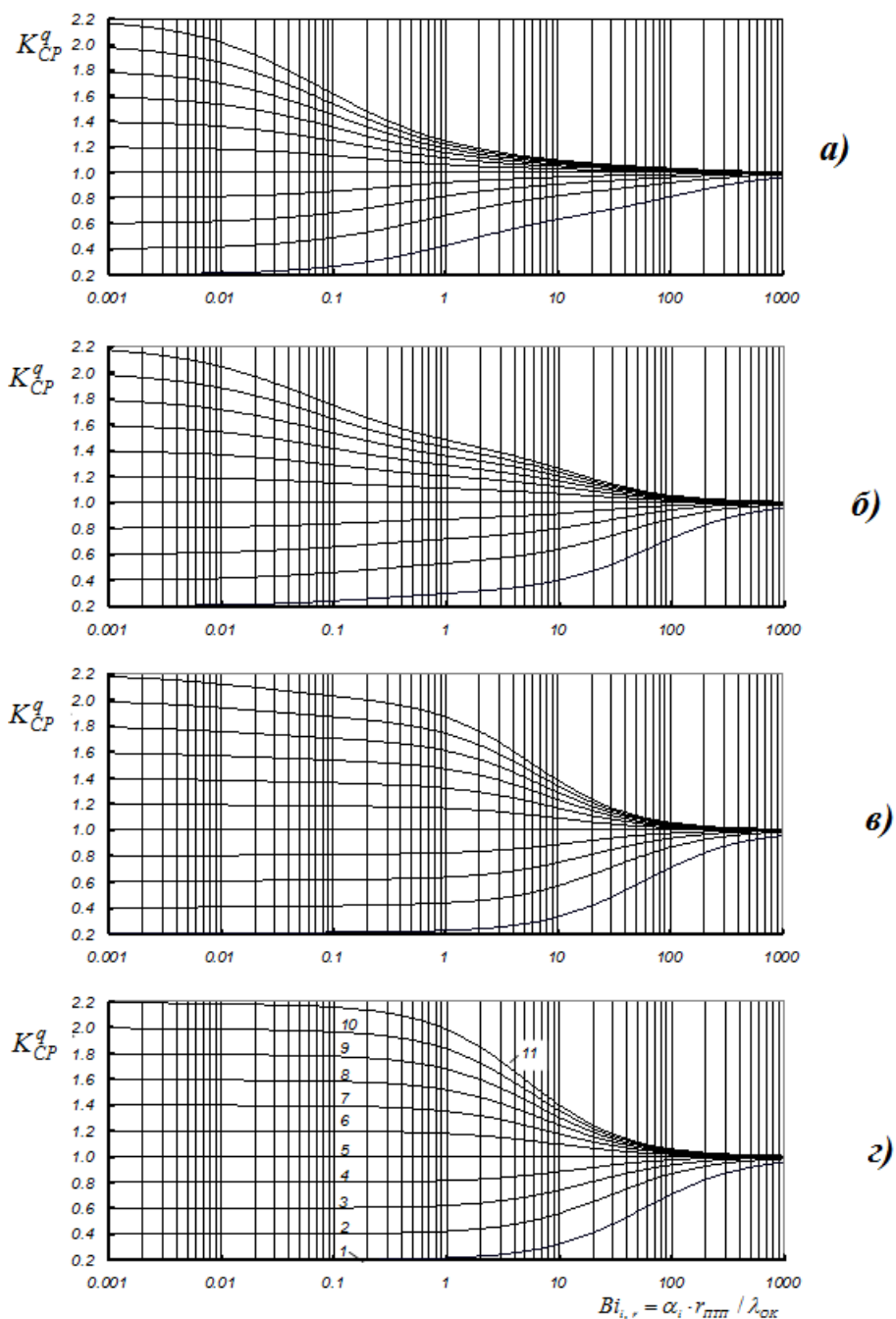
$$\frac{q_{ЛОК,I}(\rho,1)}{q_0} = -K_R \cdot \left[\sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot I_0(\lambda_n \rho) \cdot (-\varepsilon_n \sin \varepsilon_n + Bi_{2,h} \cdot \cos \varepsilon_n) - Bi_{ЭФ,h} \cdot a_{2ЭФ} \right]; \quad (2.94)$$



1 - $\alpha_{\text{эФ}} / \alpha_1 = 0,2$; 2 - 0,4; 3 - 0,6; ...; 10 - 2,0; 11 - 2,2.

а - $Bi_{2,r} / Bi_{1,r} = 0,1$; б - 1; в - 10; г - 100

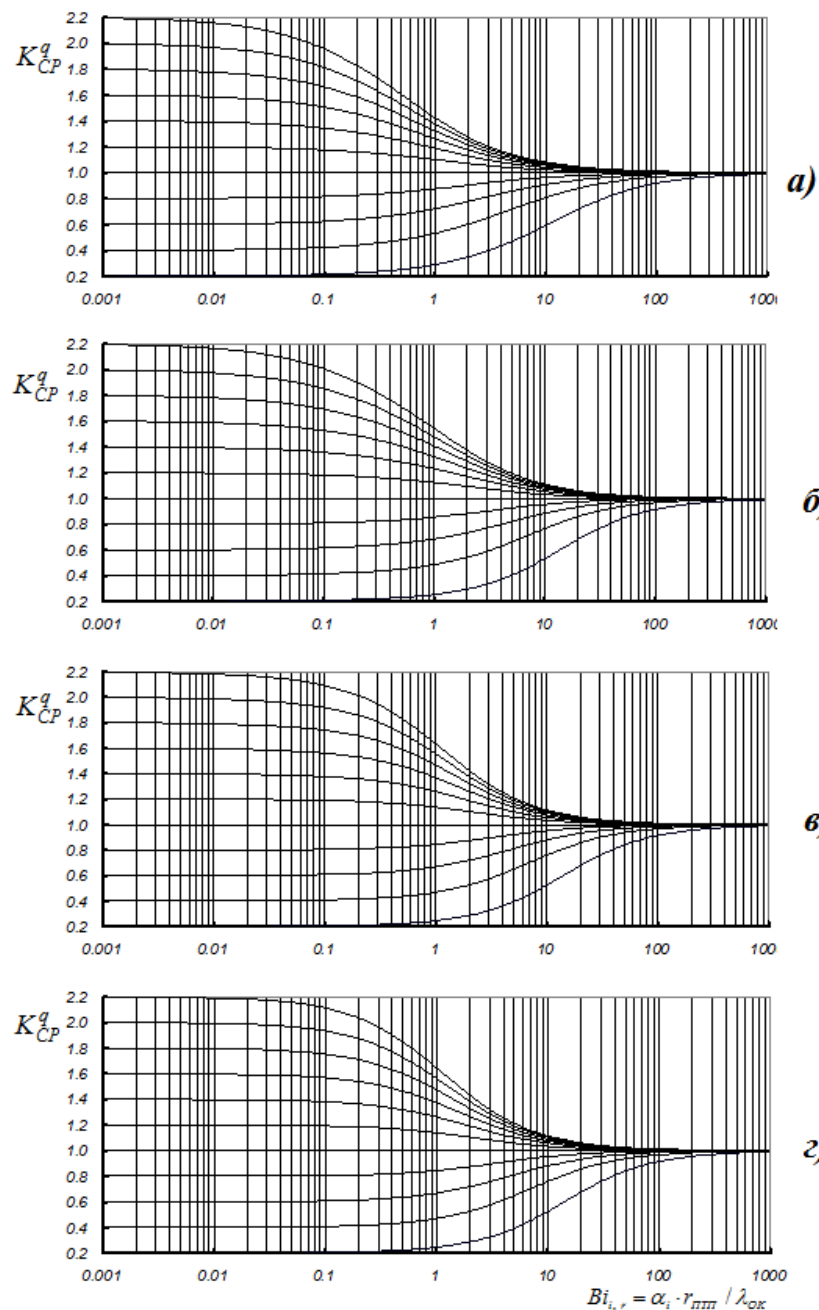
Рисунок 2.22 – Зависимости среднеинтегрального теплоточного критерия K_{CP}^q от числа Био $Bi_{1,r}$ при фиксированном значении $h_{OK}/r_{III} = 0,01$ и вариации отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{\text{эФ}} / \alpha_1$ и отношения чисел Био $Bi_{2,r} / Bi_{1,r}$



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.

a - $Bi_{2,r}/Bi_{1,r}=0,1$; **б** - 1; **в** - 10; **г** - 100

Рисунок 2.23 – 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 $\alpha_{3\phi}/\alpha_1$ 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.

a - $Bi_{2,r} / Bi_{1,r} = 0,1$; **б** - 1; **в** - 10; **г** - 100

Рисунок 2.24 – Зависимости среднеинтегрального теплоточного критерия K_{CP}^q от числа Био $Bi_{i,r}$ при фиксированном значении $h_{OK} / r_{ППП} = 1$ и вариации отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{3\phi} / \alpha_1$ и отношения чисел Био $Bi_{2,r} / Bi_{1,r}$

– для области **II** ($1 \leq \rho < \infty$):

$$\frac{q_{\text{ЛОК. II}}(\rho, 1)}{q_0} = -K_R \cdot \left[\sum_{m=1}^{\infty} B_m \cdot K_0(\delta_m \rho) \cdot (-\psi_m \sin \psi_m + Bi_{2,h} \cdot \cos \psi_m) - Bi_{1,h} \cdot a_2 \right], (2.95)$$

где K_R – по формуле (2.87).

В таблицах в безразмерной форме (2.13) – (2.18) систематизированы результаты расчетов локальной температуры по формулам (2.90) и (2.91), а также локальной плотности теплового потока по формулам (2.94) и (2.95). 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 также не более пяти радиусов ПТП.

2.8 Выводы по главе 2

Для обеспечения соответствующей точности измерения теплового потока плоскими ПТП проведено теоретическое исследование степени неидентичности результата измерения плотности теплового потока её действительному значению. При этом рассмотрен ряд задач, соответствующих ОК различных типов и случаям взаимного расположения ПТП и ОК, и выполнены вычислительные эксперименты.

Установлено, что при размещении ПТП на поверхности ОК, заподлицо с ней или внутри массива ОК из-за отличия ТФС ПТП и ОК и конечных размеров ПТП, далёких от бесконечно малых значений, происходят искажения теплового и температурного полей как в ПТП, так и в ОК, являющиеся причиной несоответствия измеренного значения плотности теплового потока её действительному значению. При этом получены такие результаты:

– для уменьшения различия между измеренным и действительным значениями плотности теплового потока, ПТП следует изготавливать с

Таблица 2.13 – 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 $Bi_{2,h}/Bi_{1,h} = 0,1$ при вариации числа Био Bi_1 и отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{\text{эф}}/\alpha_1$

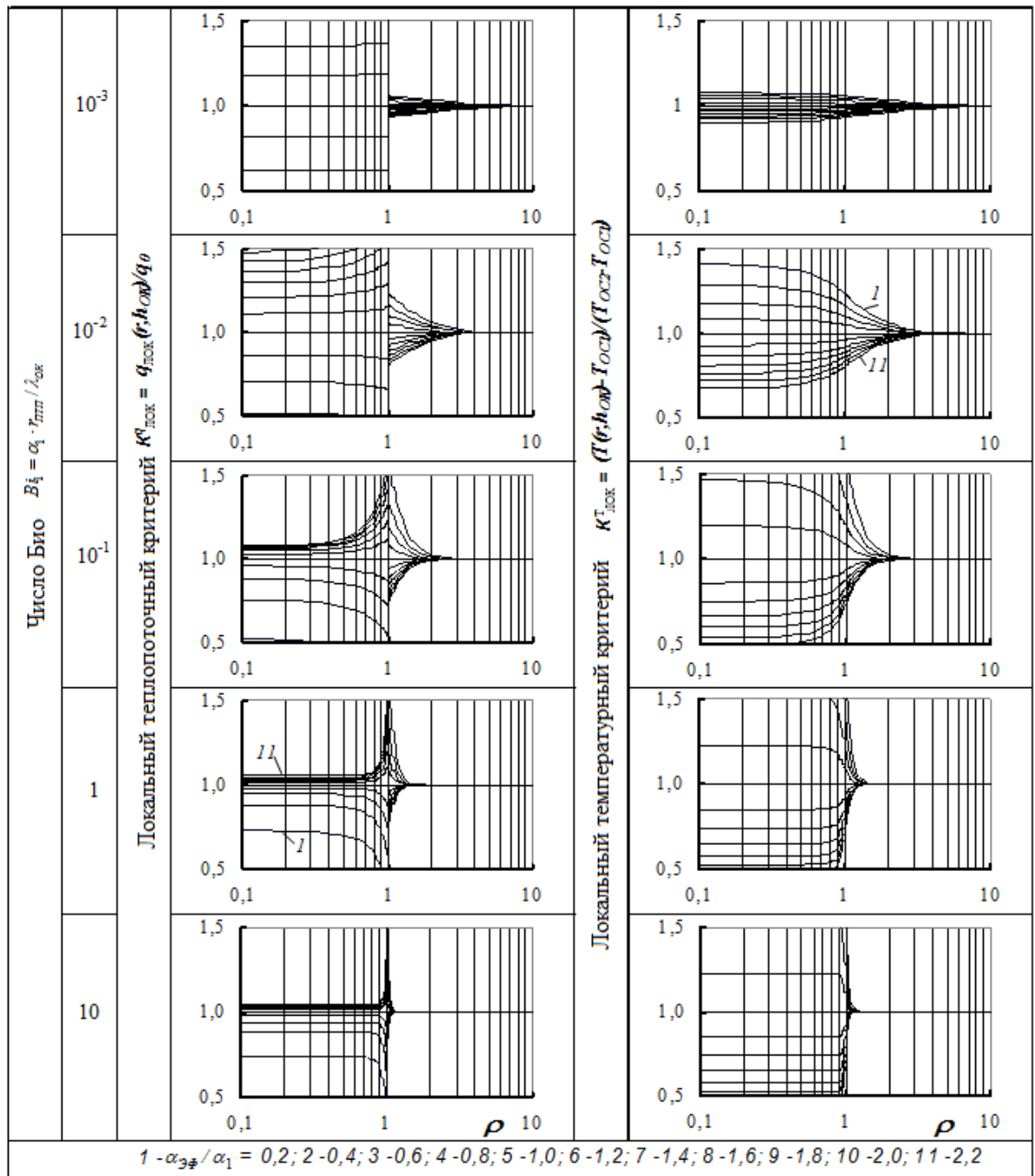


Таблица 2.14 – Характер распространения на поверхности ОК в радиальном направлении искажений локальной плотности теплового потока и локальной температуры, при относительной толщине ОК $h_{OK}/r_{ППП} = 0,01$ для фиксированного отношения чисел Био $Bi_{2,h}/Bi_{1,h} = 1$ при вариации числа Био Bi_1 и отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{\text{эф}}/\alpha_1$

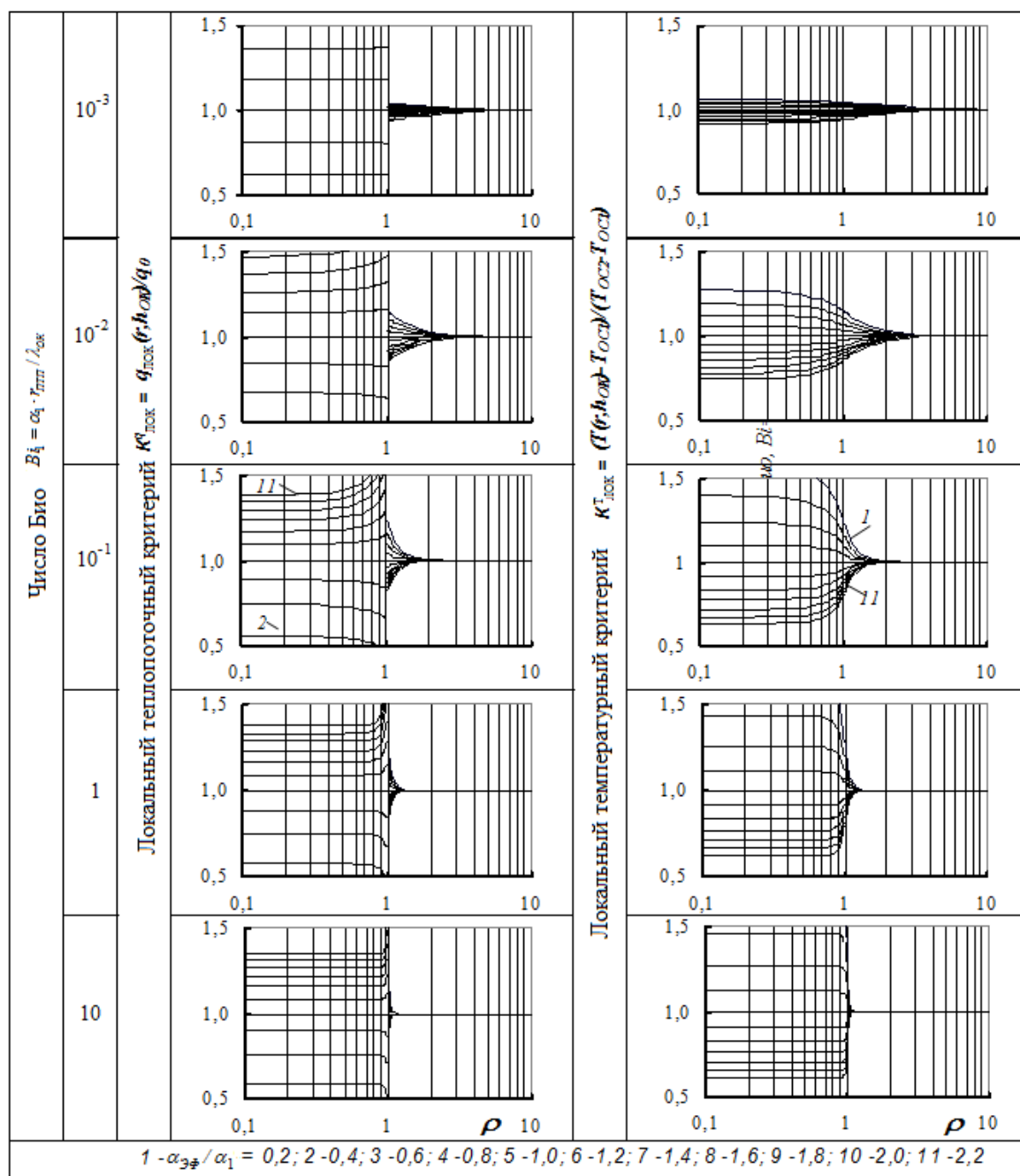


Таблица 2.15 – Характер распространения на поверхности ОК в радиальном направлении искажений локальной плотности теплового потока и локальной температуры, при относительной толщине ОК $h_{OK}/r_{ППП} = 0,01$ для фиксированного отношения чисел Био $Bi_{2,h}/Bi_{1,h} = 10$ при вариации числа Био Bi_1 и отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{\text{эф}}/\alpha_1$

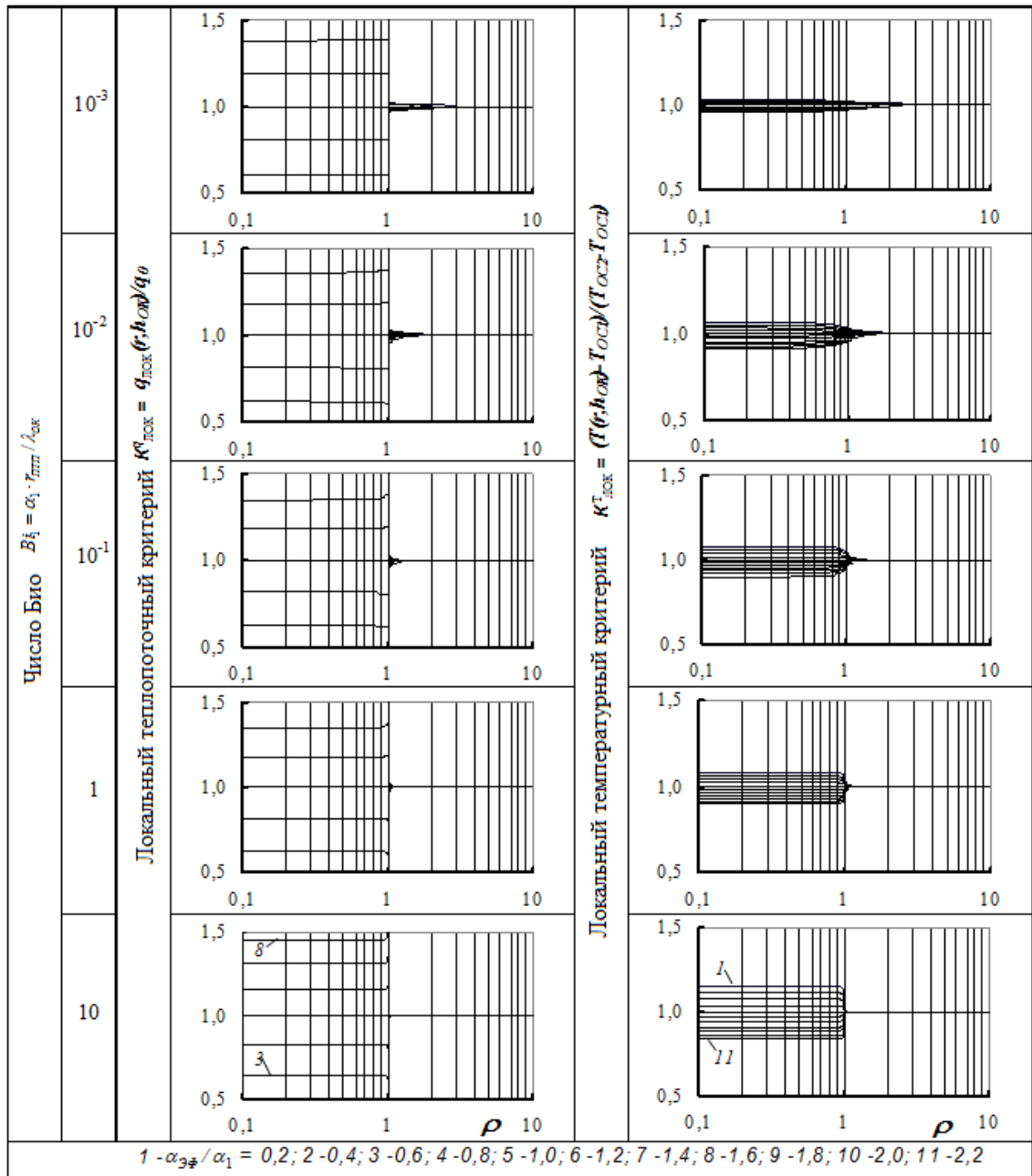


Таблица 2.16 – Характер распространения на поверхности ОК в радиальном направлении искажений локальной плотности теплового потока и локальной температуры, при относительной толщине ОК $h_{OK}/r_{III} = 0,1$ для фиксированного отношения чисел Био $Bi_{2,h}/Bi_{1,h} = 0,1$ при вариации числа Био Bi_1 и отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{\partial\phi}/\alpha_1$

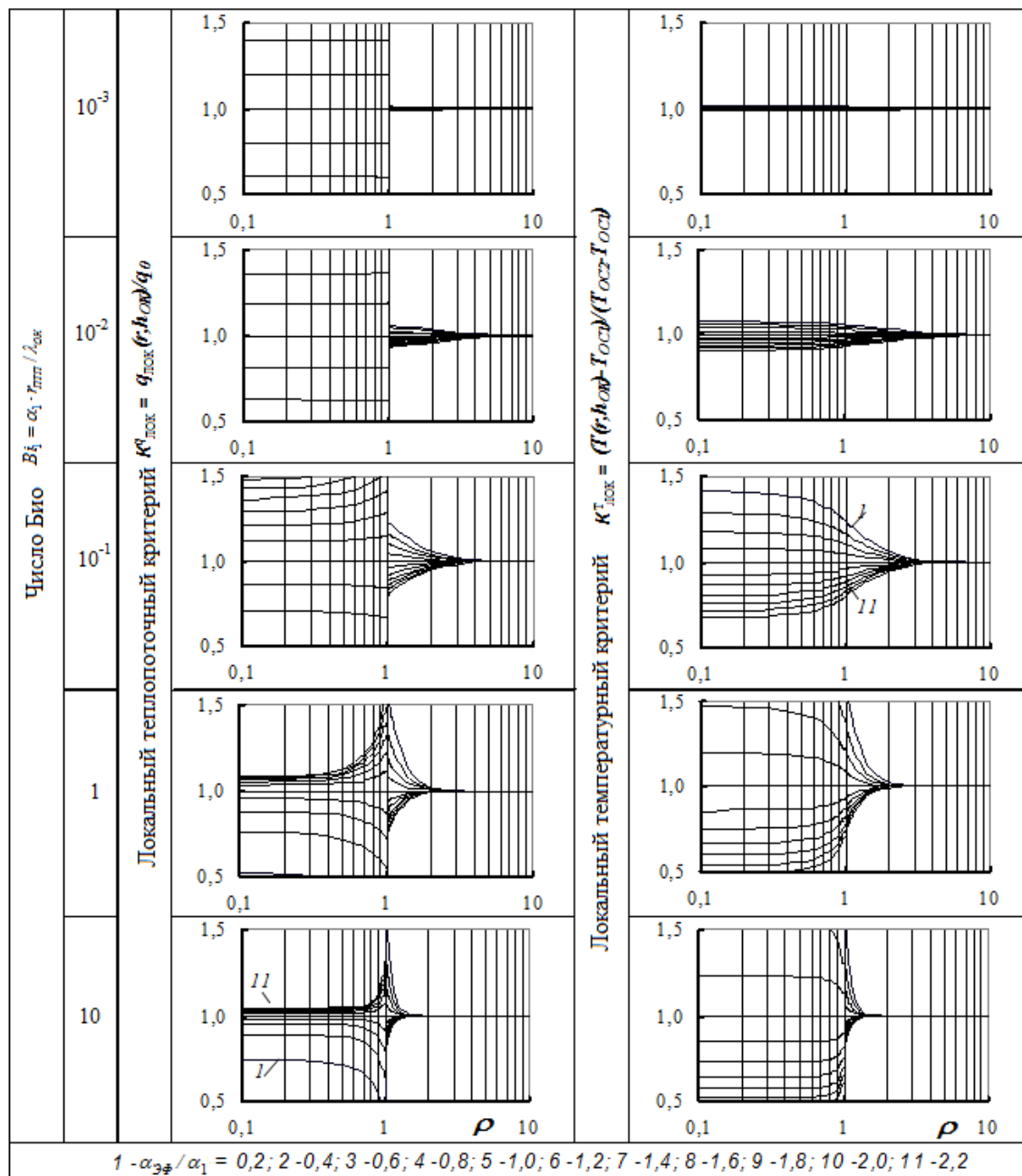


Таблица 2.17 – Характер распространения на поверхности ОК в радиальном направлении искажений локальной плотности теплового потока и локальной температуры, при относительной толщине ОК $h_{OK}/r_{III} = 0,1$ для фиксированного отношения чисел Био $Bi_{2,h}/Bi_{1,h} = 1$ при вариации числа Био Bi_1 и отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{\text{эф}}/\alpha_1$

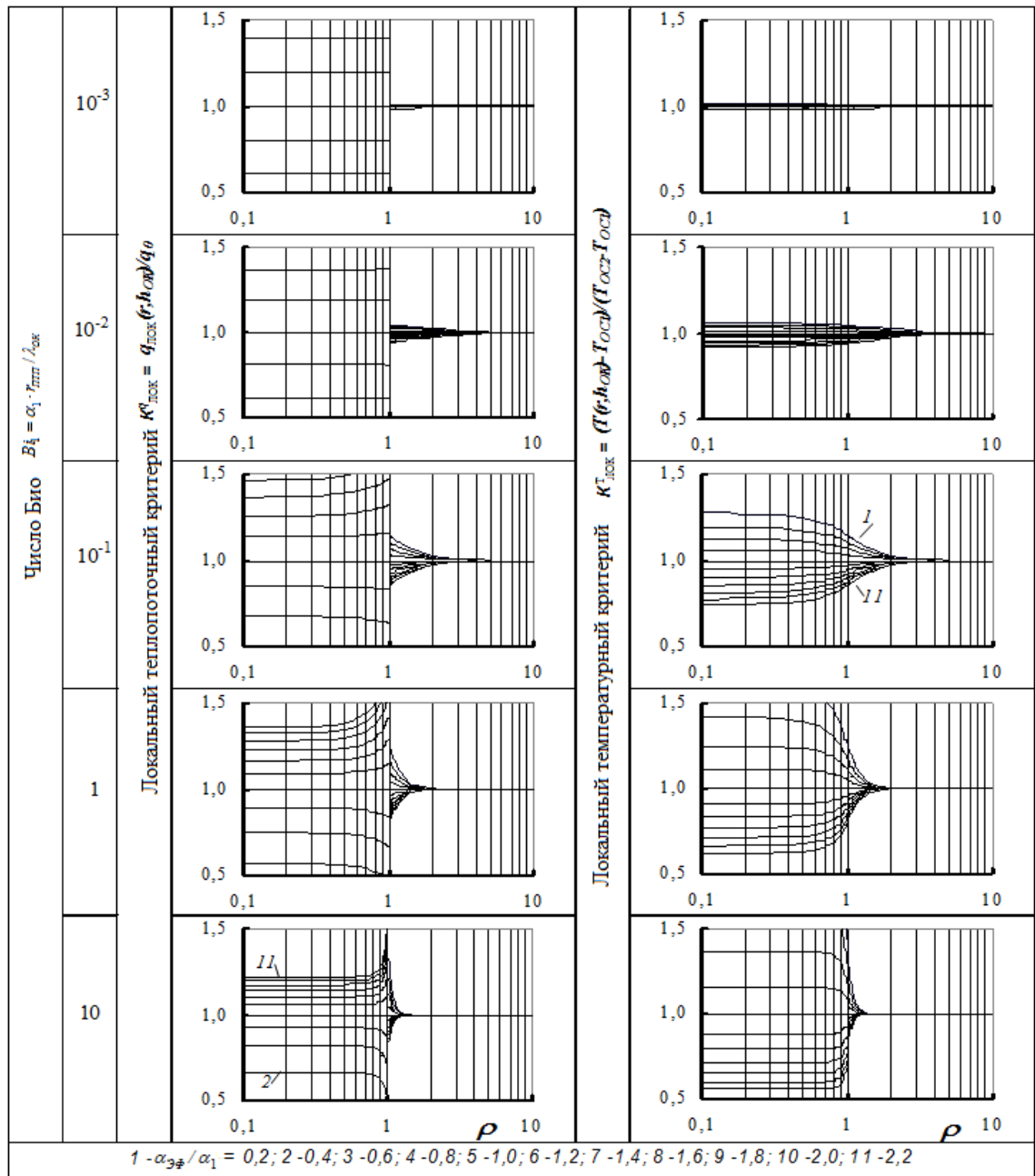
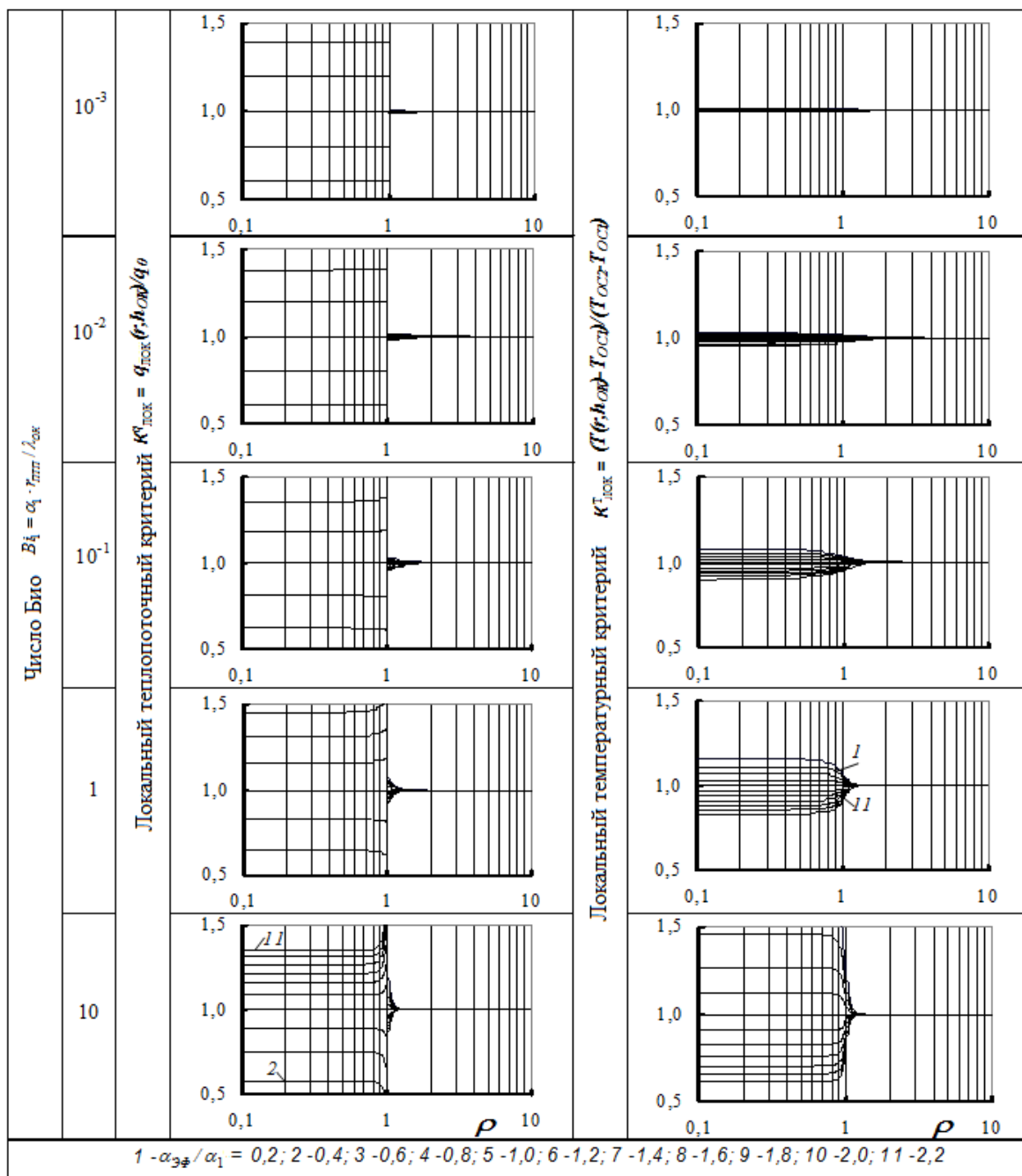


Таблица 2.18 – Характер распространения на поверхности ОК в радиальном направлении искажений локальной плотности теплового потока и локальной температуры, при относительной толщине ОК $h_{OK}/r_{III} = 0,1$ для фиксированного отношения чисел Био $Bi_{2,h}/Bi_{1,h} = 10$ при вариации числа Био Bi_1 и отношения коэффициентов теплообмена $\alpha_{\text{эф}}/\alpha_1$



охранной зоной вокруг чувствительного элемента. Материал охранной зоны должен иметь одинаковое с областью чувствительного элемента ПТП тепловое сопротивление, а ее ширина обеспечивать одномерность теплового потока в области чувствительного элемента как при метрологических аттестации и поверке, так и при его применении на различных ОК;

–при расположении ПТП на поверхности изотермической металлической пластины, или заподлицо с ней, или заподлицо с поверхностью полуограниченного массива из высокотеплопроводного материала входящий в ПТП и выходящий тепловой поток не одинаковые, а краевой эффект распространяется от боковой поверхности ПТП в глубину порядка (3 – 5) его высот, при этом геометрический параметр ПТП должен быть $k = D_{ПТП} / h_{ПТП} \geq 10$, а тепловое сопротивление ПТП – не более 0,1 сопротивления теплообмену с ОС; степень искажения, проникающего в глубину ПТП от боковой поверхности, не зависит от толщины внешних защитных слоев термобатареи, а с уменьшением интенсивности теплообмена торцевой поверхности ПТП и при числе Био $Bi_{БЕРХ} = 10^{-3}$ практически может не учитываться;

–при расположении ПТП внутри ОК – неограниченного сплошного массива или на поверхности полуограниченного сплошного массива или на поверхности металлической пластины под слоем теплоизоляции толщиной более пяти радиусов ПТП искажения теплового потока не наблюдаются на расстоянии от ПТП, равном (4 – 5) радиусам ПТП. ОК может считаться неограниченным массивом, если его конечные размеры больше радиуса ПТП в пять и более раз. Для обеспечения наименьшей степени искажения, необходимо применять ПТП, теплопроводностью, отличающимся от теплопроводности ОК не более чем в два раза, как в большую, так и меньшую сторону. Для возможности подбора ПТП, обеспечивающего наименьшую методическую погрешность измерения плотности теплового потока, построена номограмма зависимостей теплоточного критерия $K^q = q_{ИЗМ} / q_0$ и относительной

погрешности $\delta^q = K^q - 1$ от безразмерного радиуса ПТП и отношения коэффициентов теплопроводности ПТП и ОК;

–при расположении ПТП на поверхности неограниченной пластины, конвективно охлаждаемой с одной (где расположен ПТП) или двух сторон, уменьшение методической погрешности δ^q может быть достигнуто при обеспечении технологическим путем теплового сопротивления на порядок меньше теплового сопротивления конвективному теплообмену или применением дополнительного измерителя неискаженной температуры поверхности ОК, причем измеритель температуры должен быть установлен на расстоянии от ПТП не меньшем, чем пять радиусов ПТП.

Таким образом, анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что подбором соответствующих диаметра ПТП и условий теплообмена можно обеспечить одномерность теплового потока на определенном расстоянии от края ПТП. При определенных условиях отпадает необходимость в охранной зоне. В каждом конкретном случае следует учитывать соотношение толщины пластины и радиуса ПТП в сочетании с условиями теплообмена. В любом случае, при относительной толщине пластины, равной единице, можно пользоваться для определения искажений локальных плотности теплового потока и температуры формулами для полубесконечного массива.

ГЛАВА 3

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ПТП С УЛУЧШЕННЫМИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИМИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

3.1 Термоэлектрические ПТП с тепловыми шунтами и температуро- выравнивающими покрытиями

Корректность измерения теплового потока ПТП вида вспомогательной стенки, как показано в разделе 2, зависит в значительной степени от собственного теплового сопротивления ПТП и степени его соответствия тепловому сопротивлению материала ОК и теплообмену объекта с ОС.

Практически оказывается, что измеренное с помощью ПТП значение плотности теплового потока ($q_{изм}$) отличается от действительного (q_0) на корректирующую поправку (δ), учитывающую суммарный вклад погрешностей, обусловленный влиянием геометрических размеров ПТП в сравнении с размерами ОК и отличием теплофизических и терморadiационных характеристик ПТП и ОК. С учетом сказанного действительное значение измеряемого теплового потока равно:

$$q_0 = q_{изм} \cdot (1 + \delta), \quad (3.1)$$

где корректирующую поправку определяют по специальному алгоритму с использованием номограммы, приведенной в [42, 179, 180].

Однако этот путь весьма трудоемкий и требующий большого объема дополнительных измерений и информации по применяемому ПТП (значения радиусов ПТП и чувствительного элемента, высоты ПТП, коэффициента теплопроводности или теплового сопротивления и степень черноты его поверхности) и ОК: о виде ОК (пол, стена или потолок; стена или крыша), температуре ОС и скорости ветра, эффективной теплопроводности и интегральной излучательной способности.

Наиболее рациональным является применение ПТП, характеристики которого согласованы с особенностями объекта и условиями проведения

измерений. Основное внимание при этом должно быть обращено на тепловое сопротивление ПТП, значение которого зависит от высоты ПТП, термобатареи и защитных слоев заливочного компаунда по обе стороны термобатареи, формпараметра ПТП [101] и теплопроводности компонентов ПТП, главным образом, заливочного компаунда.

Результаты исследований, выполненных различными авторами [4, 201, 104-110], показывают, что основными влияющими на точность измерения теплового потока являются отношение коэффициентов теплопроводности ПТП и материала ОК ($\lambda_{ПТП} / \lambda_{ОК}$) или теплового сопротивления $R_{ПТП} / R_{\alpha}$, где $R_{\alpha} = 1 / \alpha$ – тепловое сопротивление конвективному теплообмену поверхности ПТП с ОС, и геометрический параметр ПТП $k = D_{ПТП} / h_{ПТП}$. Установлено, что в случае размещения ПТП с геометрическим параметром $k \geq 10$ внутри массива при $\lambda_{ПТП} / \lambda_{ОК} < 10$, поправка δ может составлять (10-12) % [201]. В случае же размещения ПТП на поверхности массива при конвективном теплообмене с ОС, поправка δ зависит не только от свойств ПТП и ОК, но и от интенсивности теплообмена с ОС, которая может изменяться в процессе эксплуатации. При наличии достоверной информации об условиях эксплуатации ОК поправку δ можно определить заранее [1, 104]. В случае отсутствия или неполноты необходимой информации, а также в случае, когда условия эксплуатации не являются постоянными, необходимо выбирать ПТП с характеристиками, которые обеспечивают минимальную корректирующую поправку и тем самым уменьшают погрешность измерения. Таким образом, для применения ПТП на разных ОК, включая монтаж ПТП в теплотрические блоки различных теплофизических приборов, необходимо не только знать числовые значения коэффициента теплопроводности или теплового сопротивления ПТП, но и уметь ими варьировать при изготовлении ПТП.

Еще в работе [5] выполнено теоретическое исследование зависимости теплового сопротивления ПТП от его конструктивных параметров и характеристик материалов, используемых при изготовлении. Это исследование выполнено исходя из представления о ПТП как гетерогенном теле с

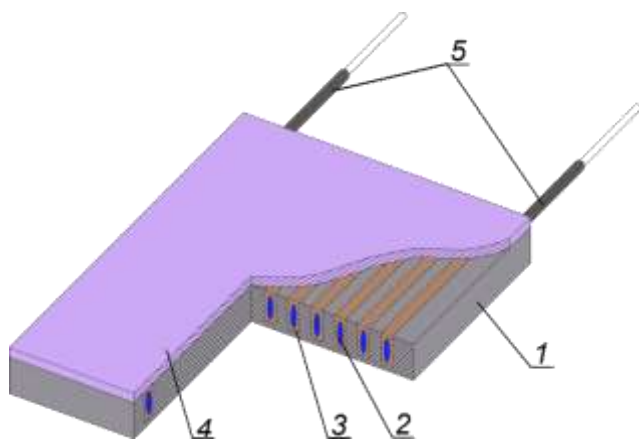
замкнутыми, вытянутыми по направлению теплового потока включениями с контрастной теплопроводностью [202, 203], в результате которого были предложены соотношения для вычисления теплового сопротивления и коэффициента эффективной теплопроводности традиционных биметаллических ПТП по изотермической и адиабатной моделям дробления термоэлемента ПТП на элементарные ячейки.

Из этого теоретического исследования следует, что эффективные тепловое сопротивление и теплопроводность биметаллического ПТП произвольной толщины зависят от многих параметров: Φ , $h_{ПТП}$, $h_{ТБ}$, λ_i ($i = 1,2,3$). Полученные результаты использованы для создания ПТП с требуемым тепловым сопротивлением за счет варьирования типом наполнителя, его концентрацией и толщиной слоев заливочного компаунда по обеим торцам ПТП.

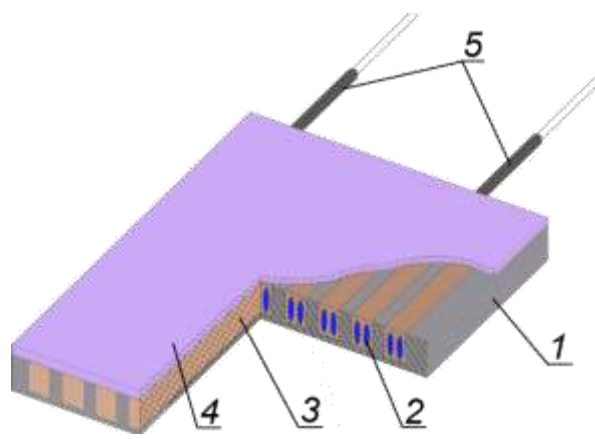
При этом следует учитывать, что именно сопротивления наружных слоев компаунда вносит заметный вклад в эффективное сопротивление ПТП. Поэтому для формирования термобатареи ПТП можно использовать неодинаковые по теплопроводности компаунды, например, с наполнителем из молотого кварца – для заливки спирали, а для защитных слоев – компаунд, наполненный нитридом бора, теплопроводность которого существенно больше. Однако, такая технология позволяет изменять тепловое сопротивление ПТП в весьма узком диапазоне.

Другим путем технологического изменения теплового сопротивления ПТП является введение в конструкцию тепловых шунтов, расположенных между тепловоспринимающей и теплоотдающей поверхностями ПТП. При этом шунты должны быть равномерно распределены в теле ПТП, а наружные поверхности снабжены температуровыравнивающими покрытиями [32, 204, 205].

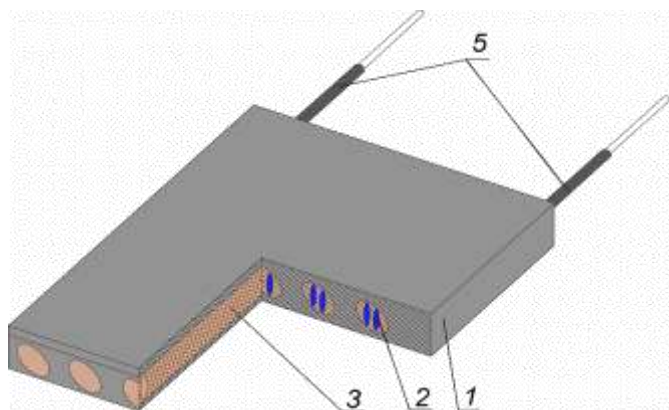
Три возможных конструктивных решения ПТП с тепловыми шунтами и температуровыравнивающими покрытиями показаны на рисунке 3.1 при выполнении ПТП в металлическом корпусе и на рисунке 3.2 – принципиальная схема ПТП с проволочным тепловым шунтом (четвертое решение).



а – первая модель



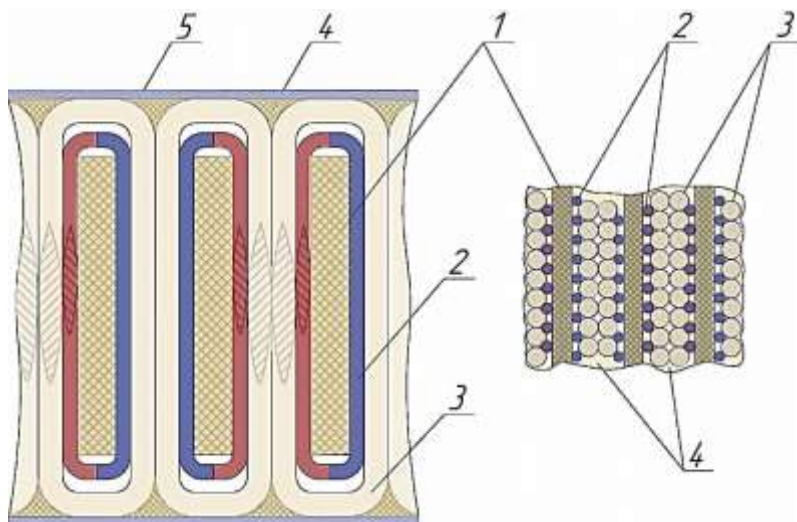
б – вторая модель



в – третья модель

- 1 – металлический корпус;
- 2 – ленточная батарея термоэлементов;
- 3 – электроизоляционный заливочный компаунд;
- 4 – крышка;
- 5 – потенциалосъемные выводы

Рисунок 3.1 – Варианты моделей ПТП с тепловыми шунтами, изготовленных в металлическом корпусе



- 1 – основа;
- 2 – батарея термоэлементов;
- 3 – проволочный тепловой шунт;
- 4 – заливочный компаунд;
- 5 – температуровыравнивающее металлическое покрытие

Рисунок 3.2 – Принципиальная схема ПТП с проволочным тепловым шунтом

Одной из первых моделей ПТП с тепловым шунтом, используемых в приборах для исследования теплофизических свойств материалов, характеристик тепловых труб и других объектов новой техники, явилась конструкция ПТП с фрезерованным металлическим корпусом, показанная на рисунке 3.1, *а*. В этом случае ПТП состоит из корпуса, в параллельных пазах которого размещена ленточная термобатарея, залитая электроизоляционным компаундом. После полимеризации компаунда к корпусу припаяна крышка. Через два отверстия в боковой поверхности корпуса выведены потенциалосъемные проводники 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. 3.1, *б*), технология изготовления которой предусматривает припаивание крышки к корпусу сразу после фрезерования пазов. При этом пазы выполняют большей ширины (не менее чем в 2 раза) и в них вкладывают сложенную вдвое ленточную спираль, предварительно обвитую нитью, пропитанную 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 применением легкоплавкого припоя или галлий-индиевой эвтектики. Но при этом есть опасность попадания этих веществ на паяные швы корпуса и взаимодействия их с припоем. В этом случае целесообразно ПТП изготавливать в цельнометаллическом корпусе в виде пластины, в которой высверлены отверстия для размещения ленточной батареи (см. рис. 3.1, *в*).

Корпус изготавливают из нержавеющей стали, латуни или дюралюмина в зависимости от сформулированных требований к значению эффективного теплового сопротивления ПТП. Однако, следует помнить, что дюралюминиевый корпус нельзя крепить к исследуемой поверхности с помощью галлий-индиевых эвтектик, так как взаимодействие галлия с

алюминием приводит к полному разрушению корпуса. В этом случае надежность теплового контакта ПТП с объектом обеспечивают при помощи смазок, содержащих порошок нитрида бора, или применяют ПТП, изготовленные в корпусе из нержавеющей стали или латуни.

Однако, описанные модели ПТП, решая проблему снижения собственного теплового сопротивления, обладают существенным недостатком – низкой технологичностью и, как следствие, высокой себестоимостью. В связи с этим разработана конструкция ПТП, при изготовлении которых максимально использованы технологическое оборудование и процессы, традиционные для ПТП в обычном исполнении.

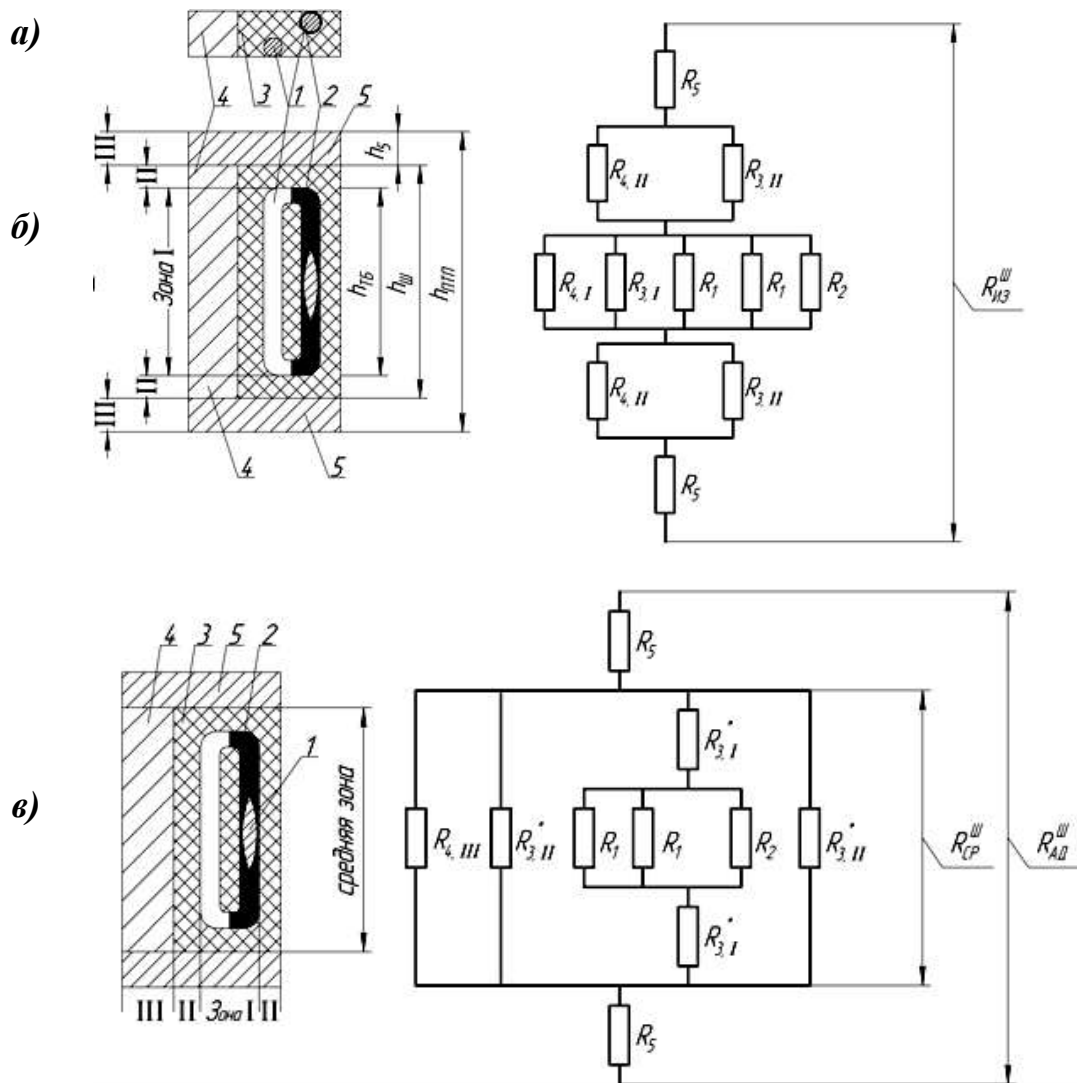
В новой, четвертой модели ПТП (см. рис. 3.2) ленточная термобатарея с нанесенным гальваническим покрытием дополнительно обвивается электроизолированной проволокой, медной или константановой, диаметр и плотность навивки которой выбирают исходя из расчета требуемого значения эффективного теплового сопротивления ПТП. Эта проволока выполняет функцию тепловых шунтов, размещенных параллельно термоэлементам.

Дальнейшая технология изготовления ПТП не отличается от традиционной, неоднократно описанной в литературе [1, 3-5, 23, 31, 32].

После получения заготовки ПТП типа вспомогательной стенки, состоящей из гальванических термоэлементов, заформованных вместе с проволочными шунтами в заливочном компаунде, рабочие поверхности ПТП зашлифовывают до появления в срезе сечений шунтирующей проволоки и, при необходимости, металлизуют, образуя тем самым температуровыравнивающие покрытия тепловоспринимающей и теплоотдающей поверхностей ПТП.

Для анализа эффективного теплового сопротивления ПТП с проволочными шунтами также применен способ представления ПТП в виде элементарных ячеек, получаемых при изотермическом и адиабатном дроблении [202]. На рисунке 3.3 представлены соответствующие схемы (*а* и *б*).

Исходя из схемы *б*, эффективное тепловое сопротивление ПТП с шунтами при изотермическом способе дробления единичного термоэлемента



a – поперечное сечение единичного термоэлемента ПТП с тепловыми шунтами и температуровыравнивающим покрытием;

б – изотермическая модель: фрагмент дробления ПТП и схема соединения теплового сопротивления элементов дробления для расчета $R_{ш3}$;

в – адиабатная модель: фрагмент дробления ПТП и схема соединения теплового сопротивления элементов дробления для расчета $R_{шД}$;

1 – основной термоэлектрод; 2 – гальваническое покрытие; 3 – заливочный компаунд; 4 – тепловой шунт; 5 – температуровыравнивающее покрытие.

Рисунок 3.3 – Схемы представления ПТП с тепловыми шунтами и температуровыравнивающим покрытием для расчета эффективных теплового сопротивления и теплопроводности.

ПТП равно сумме тепловых сопротивлений трех последовательно расположенных зон: средней зоны – R_I , двух участков зоны **II** – $2 \cdot R_{II}$ и двух участков зоны **III** – $2 \cdot R_{III}$. Тепловое сопротивление **I** и **II** зон рассчитывают по правилам для параллельного соединения, а площадь единичного термоэлемента равна сумме $f_{ЭД.ЭЛ} = 2 \cdot f_1 + f_2 + f_3 + f_4$, откуда для формпараметра ПТП с тепловыми шунтами имеет место следующее выражение:

$$\Phi^{III} = 2 + f_{21} + f_{31} + f_{41}. \quad (3.2)$$

Исходя из аддитивного закона для проводимостей получена формула:

$$R_{III}^{III} = \left(\frac{2}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{3,I}} + \frac{1}{R_{4,I}} \right)^{-1} + 2 \cdot \left(\frac{1}{R_{3,II}} + \frac{1}{R_{4,II}} \right)^{-1} + 2 \cdot R_5, \quad (3.3)$$

где $R_1 = h_{ТБ} \cdot f_{ЭД.ЭЛ} / (\lambda_1 \cdot f_1)$ и $R_2 = h_{ТБ} \cdot f_{ЭД.ЭЛ} / (\lambda_2 \cdot f_2)$ – значения теплового сопротивления основного термоэлектрода 1 и его гальванического покрытия 2;

$R_{3,I} = h_{ТБ} \cdot f_{ЭД.ЭЛ} / (\lambda_3 \cdot f_3)$ и $R_{4,I} = h_{ТБ} \cdot f_{ЭД.ЭЛ} / (\lambda_4 \cdot f_4)$ – значения теплового сопротивления заливочного компаунда 3 и проволочного теплового шунта 4;

$2 \cdot R_5 = h_5 / \lambda_5$ – суммарное тепловое сопротивление двух участков зоны **III**, т.е. наружных температуровыравнивающих покрытий суммарной высотой $h_5 = h_{ПТП} - h_{III}$.

При использовании формпараметра Φ^{III} по формуле (3.2) и введении геометрического параметра для шунта, равного $\varphi = f_4 / f_{ЭД.ЭЛ}$, расчетное соотношение (3.3) преобразуется к виду:

$$R_{III}^{III} = h_{ТБ} \cdot \Phi^{III} / (2 \cdot \lambda_1 + \lambda_2 \cdot f_{21} + \lambda_3 \cdot (\Phi^{III} - \varphi \cdot \Phi^{III} - 2 - f_{21}) + \lambda_4 \cdot \varphi \cdot \Phi^{III}) + (h_{III} - h_{ТБ}) / (\lambda_3 \cdot (1 - \varphi) - \lambda_4 \cdot \varphi) + (h_{ТБ} - h_{III}) / \lambda_5. \quad (3.4)$$

Наличие двухстороннего температуровыравнивающего покрытия 5 создает изотермические условия на поверхности ПТП, поэтому адиабатное дробление применено только для средней зоны ПТП. Комбинированное изотермично-адиабатное дробление единичного термоэлемента ПТП привело к схеме, показанной на рис. 3.3, в. Применяя правила для последовательного и параллельного включения тепловых сопротивлений компонентов средней зоны и зон покрытия 5, получена формула:

$$R_{AD}^{III} = 2 \cdot R_5 + (1/R_{4,III} + 2/R_{3,II}^* + 1/(2 \cdot R_{3,I}^* + (2/R_1 + 1/R_2)^{-1})), \quad (3.5)$$

где $2 \cdot R_5$, R_1 и R_2 – определяются по изотермическому дроблению;

$$R_{4,III} = h_{III} \cdot f_{ED.ЭЛ} / (\lambda_4 \cdot f_4) - \text{тепловое сопротивление шунта, т.е. зоны III};$$

$$2 \cdot R_{3,II}^* = h_{III} \cdot f_{ED.ЭЛ} / (\lambda_3 \cdot (f_4 - 2 \cdot f_1 - f_2 - f_4)) - \text{тепловое сопротивление}$$

заливочного компаунда, т.е. двух участков зоны II;

$$2 \cdot R_{3,I}^* = (h_{III} - h_{ТБ}) \cdot f_{ED.ЭЛ} / (\lambda_3 \cdot (2 \cdot f_1 + f_2)) - \text{тепловое сопротивление}$$

слоев заливочного компаунда над и под термоэлементом, т.е. зоны I.

С учетом формпараметра Φ^{III} и геометрического параметра φ формула (3.3) преобразуется к виду:

$$R_{AD}^{III} = \frac{h_{III} - h_{ТБ}}{\lambda_5} + \left(\frac{\lambda_4 \cdot \varphi \cdot \Phi^{III} + \lambda_3 \cdot ((1 - \varphi) \cdot \Phi^{III} - 2 - f_{21})}{h_{III} \cdot \Phi^{III}} + \left(\frac{(h_{III} - h_{ТБ}) \cdot \Phi^{III}}{\lambda_3 \cdot (2 + f_{21})} + \frac{h_{ТБ} \cdot \Phi^{III}}{2 \cdot \lambda_1 + \lambda_2 \cdot f_{21}} \right)^{-1} \right)^{-1}. \quad (3.6)$$

На рисунке 3.4 приведены результаты расчетов эффективного теплового сопротивления константан-медных ПТП с проволочными шунтами в зависимости от теплопроводности шунтирующего материала для фиксированного значения геометрического параметра шунта $\varphi = 0,5$, выполненных по формуле (3.4) (кривая 1), формуле (3.6) (кривая 2) и по формуле среднего арифметического: $0,5 \cdot (R_{IB}^{III} + R_{AD}^{III})$ (кривая 3).

Как видно, с увеличением коэффициента теплопроводности материала шунта кривые 1 и 2 сближаются, потому что действительные значения теплового сопротивления, которые согласно [202] лежат в поле между кривыми 1 и 2, могут быть рассчитаны как средние арифметические между значениями, соответствующими изотермическому и адиабатному дроблениям.

На рисунке 3.5 представлены результаты теоретического исследования зависимости эффективного теплового сопротивления от геометрического параметра шунта φ . Как видно, с увеличением доли шунтов в сечении ПТП, тепловое сопротивление уменьшается больше, чем на порядок.

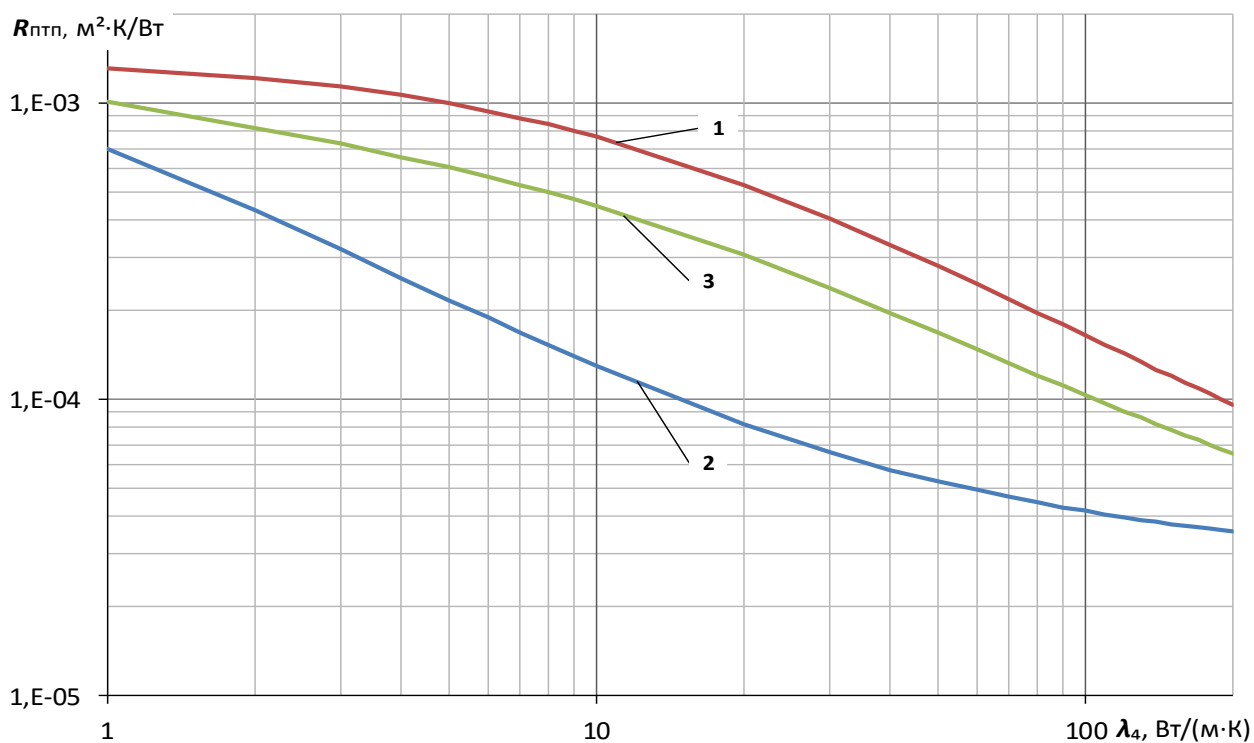
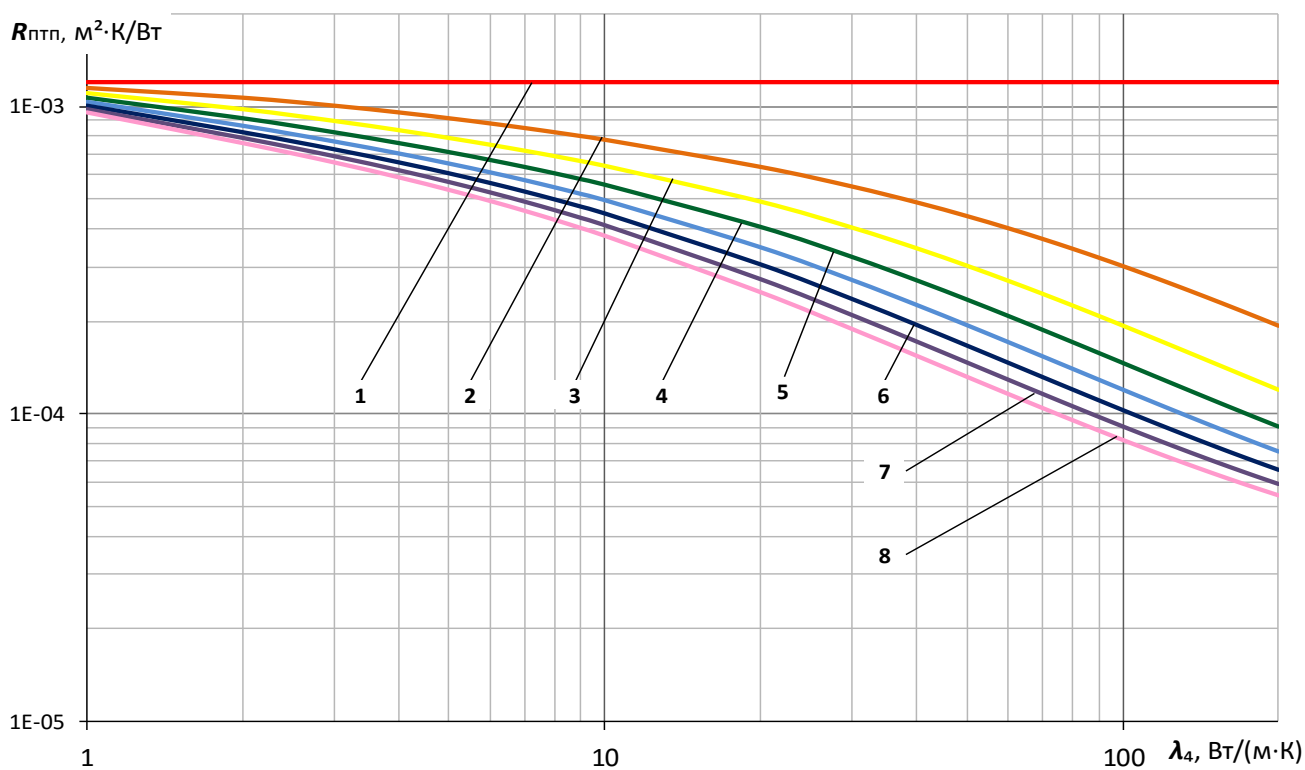


Рисунок 3.4 – Зависимость эффективного теплового сопротивления ПТП от теплопроводности λ_4



1 – $\varphi=0$; 2–0,1; 3–0,2; 4–0,3; 5–0,4; 6–0,5; 7–0,6; 8–0,7

Рисунок 3.5– Зависимость эффективного теплового сопротивления ПТП $R_{ПТП}$ при вариации φ

Это дает возможность изменять эффективное тепловое сопротивление ПТП в широком диапазоне значений, а наличие температуровыравнивающего покрытия обеих поверхностей зашунтированного ПТП обеспечивает равномерность поля теплового потока на входе и выходе из него.

Таким образом, задача по обеспечению измерения плотности теплового потока с большей точностью на конкретном объекте с применением ПТП, который имеет необходимое для согласованности с теплофизическими характеристиками объекта значение эффективного теплового сопротивления, решается введением в конструкцию ПТП теплового шунта с соответствующим геометрическим параметром φ и коэффициентом теплопроводности.

3.2 Повышение временной стабильности характеристик ПТП

Практика многолетней эксплуатации термоэлектрических биметаллических многоэлементных ПТП вскрыла их недостатки, основными из которых являются ограниченный диапазон температуры эксплуатации и зависимость функции преобразования от температуры.

Стабильность во времени характеристик ПТП, в частности метрологических, зависит от множества факторов, некоторые из них подобны воздействующим на термоэлектрические преобразователи температуры (термопары), но существует и ряд факторов специфических для ПТП. В процессе эксплуатации ПТП подвергаются физическому старению, в результате чего изменяются свойства термоэлементов. 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 нестабильности термопар, приведены в [43, 206, 207], причем большинство работ посвящено изменению ТЭДС термоэлектрических материалов. Продолжаются такие работы и сейчас, причем основное внимание уделяется методам контроля и

стабилизации характеристик термопар как при выпуске, так и в процессе эксплуатации [208-210].

Поскольку в процессе изготовления металлы термоэлементов подвергаются обработке (неравномерные нагревы и охлаждения 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 комнатных температурах относительно медленно. При повышении же 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 коэффициента преобразования ПТП. Окисление и диффундирование металлов термоэлектродов приводят к уменьшению их сечения. Для термопар это приводит к ограничению срока 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 сильнее сказывается на чувствительности влияние уменьшения его слоя вследствие окисления или диффундирования металла.

Например, наиболее распространенные традиционные ПТП, выполненные на базе термоэлектрической пары константан-медь, имеют весьма тонкий слой медного гальванического покрытия ($f_{21} \approx 0,06 \div 0,09$) [4, 5], а при температуре выше 380 К медь начинает активно окисляться, что приводит к изменению коэффициента преобразования и делает невозможной их эксплуатацию при более высокой температуре. В паре константан-серебро серебро значительно меньше подвержено окислению, чем медь, однако необходимая толщина

гальванически наносимого серебряного электрода также очень мала, а диффузия атомов серебра в металл проволоки тоже приводит к изменению ТЭДС.

Защитить биметаллический термоэлектрод от окисления можно путем гальванического осаждения поверх меди сначала защитного подслоя из коррозионно стойкого металла, то есть выполнить термобатарею с двухслойным покрытием восходящих или нисходящих полувитков спирали.

Так обеспечить качественное осаждение слоя серебра, железа или сурьмы на константан можно предварительным нанесением промежуточного подслоя перед осаждением основного гальванического покрытия. При этом технологическим подслоем может быть использована медь, поверх которой серебрение, железнение и сурьмлиение осуществляются более добротнее.

Другим, не менее эффективным путем получения ПТП с большей стойкостью против коррозионных процессов является замена покрывного термоэлектродного материала на другой, приводящий либо к повышению коррозионной стойкости, что способствует расширению температурного диапазона эксплуатации ПТП, либо к уменьшению температурной зависимости чувствительности ПТП.

Частично решить эту проблему удаётся за счет замены медного (или серебряного) покрытия никелевым. При этом в качестве основного термоэлектрода используется нихромовая или хромелевая проволоки, которые хорошо поддаются никелированию. Этими ПТП удалось поднять верхнюю границу диапазонба температуры от 400 К до 500 К. Кроме того, технологически никель может быть нанесен более толстым слоем (по сравнению с медью и серебром) для обеспечения оптимальной толщины покрытия парного термоэлектрода, что увеличивает гарантированный срок эксплуатации ПТП с неизменяющимися характеристиками за счет постоянства толщины коррозионно устойчивого материала покрытия. Но и никель не лишен отрицательных качеств. К сожалению, он имеет нелинейную зависимость коэффициента Зеебека от температуры с экстремумом при 631 К (точка Кюри) [211], что не позволяет иметь ПТП с функцией преобразования теплового

потока в ТЭДС, независимой от температуры в широком температурном диапазоне [212, 213]. Весьма актуальным это становится при эксплуатации ПТП в экстремальных условиях: при высоких значениях температуры с широким диапазоном ее изменения. В этом случае приходится не только тщательно градуировать ПТП в широком диапазоне температуры, но и снабжать его встроенным преобразователем температуры, что неизбежно усложняет конструкцию ПТП и процедуру измерений.

Таким образом, хотя традиционным ПТП с однослойным гальваническим покрытием из меди, серебра и никеля в течение многих лет удавалось решать подавляющее большинство задач по измерению теплового потока [4, 5, 31-34, 36-40], возникла необходимость в усовершенствованных многоэлементных ПТП с улучшенными эксплуатационными и метрологическими характеристиками в расширенном диапазоне значений температуры их эксплуатации. Для принятия решения о путях усовершенствования ПТП с целью получения их улучшенных характеристик проведено систематическое изучение возможностей существующих термоэлектрических материалов, пригодных для изготовления биметаллических ПТП, допускающих реализацию электрического осаждения покрывного термоэлектрического материала на соответствующие полувитки основной проволоки термобатареи. Таких материалов весьма много, их свойства хорошо изучены [4, 5, 39, 45, 206-217].

Из приведенных в главе 1 формул (1.2) и (1.3) следует, что коэффициент преобразования ПТП является функцией многих параметров:

$$K_q(T) = f(\alpha_{1-2}; \rho_{21}; \lambda_i; f_{21}), \quad i = 1, 2, 3. \quad (3.7)$$

Чтобы воспользоваться формулой (1.2) для исследования и прогнозных расчетов возможных температурных зависимостей коэффициента преобразования ПТП, изготовленных из различных термобатарей с использованием различных заливочных компаундов, необходимо знать температурные зависимости параметров, указанных в выражении (3.7).

В связи с этим был осуществлен поиск термоэлектрических материалов, обеспечивающих термонеинзависимую чувствительность ПТП в расширенном

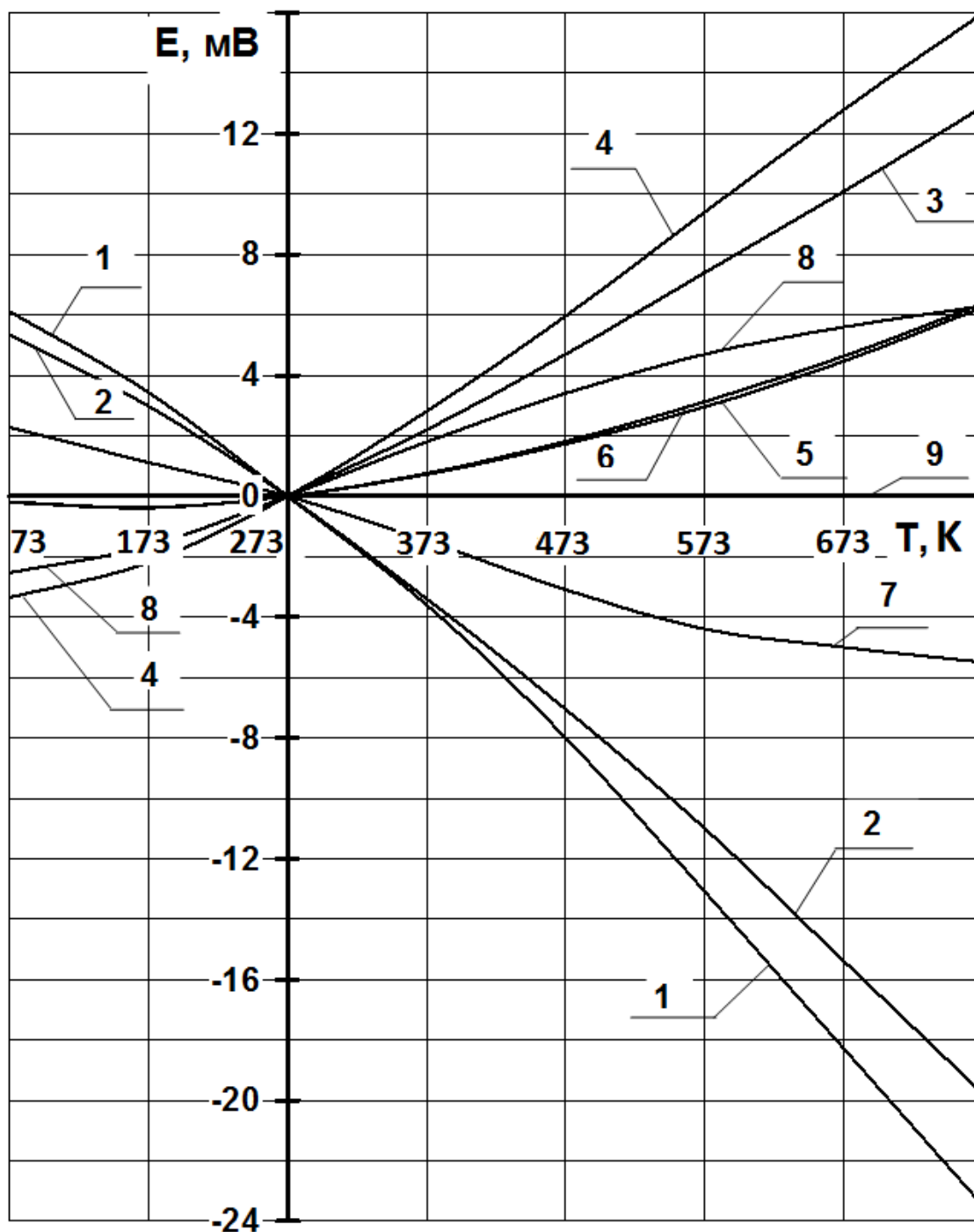
диапазоне температуры эксплуатации. Для этого выполнены исследования зависимостей указанных свойств от температуры с использованием справочных данных.

Зависимости ТЭДС $E(T)$ относительно платины восьми перспективных термоэлектрических материалов от температуры в диапазоне от 73 К до 773 К (-200...500°C) представлены на рисунке 3.6, а коэффициента Зеебека (термоэлектрической чувствительности) $\alpha_{1-2}(T)$ и приведенного электрического сопротивления $\rho_{12}(T)$ для десяти пар термоэлектродов в диапазоне от 73 К до 473 К приведены на рисунках 3.7 и 3.8 соответственно.

При изготовлении батарейных ПТП для электроизоляции термоэлементов с одновременным приданием термобатареи монолитной формы используют, как правило, полимерные компаунды с целью увеличения прочности, теплопроводности и термостойкости [5].

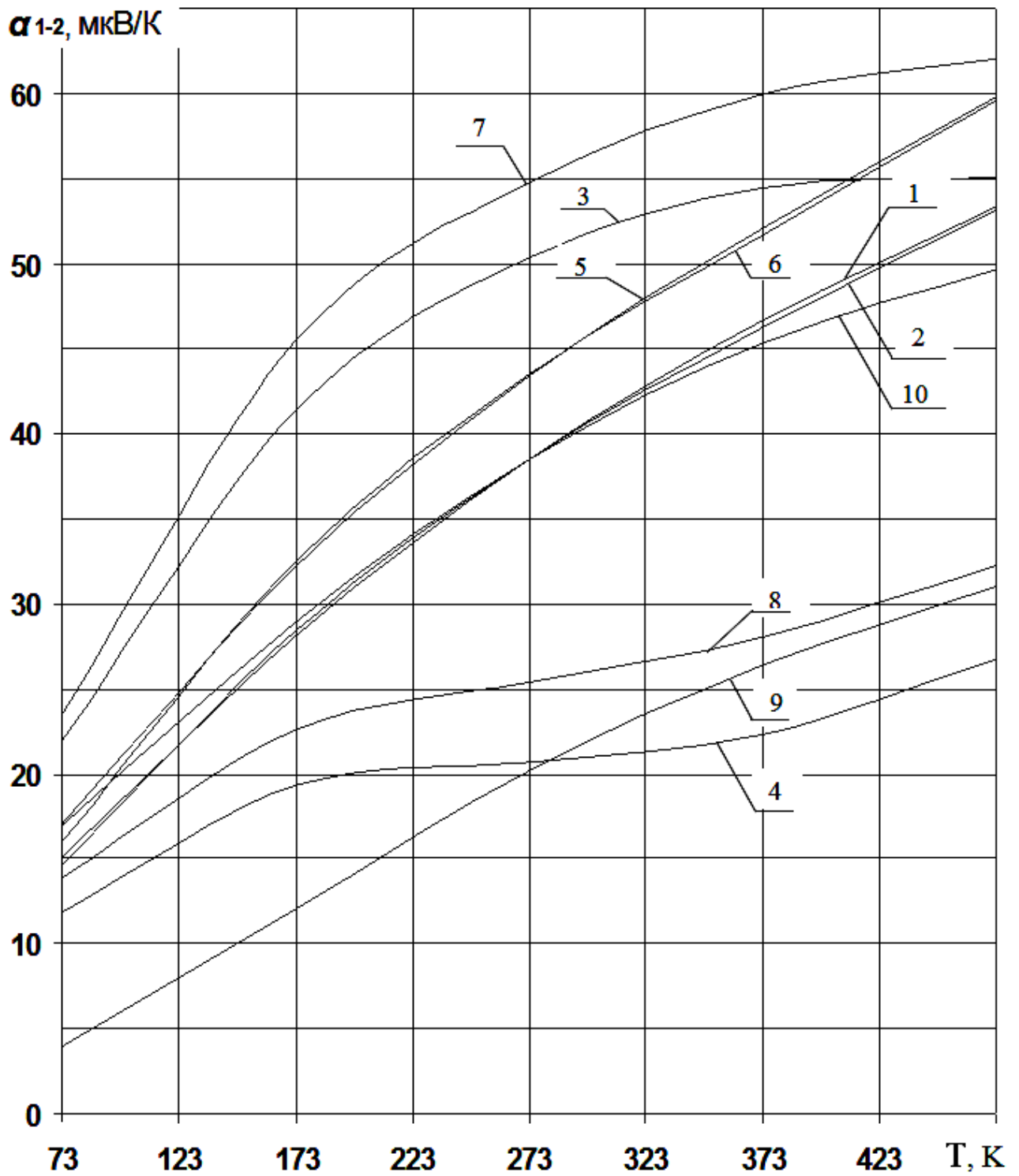
В ИТТФ в последние годы выбор был остановлен на двух материалах: аморфном (молотый кварц [26]) и кристаллическом (порошкообразный корунд). На рисунке 3.9 приведены зависимости теплопроводности эпоксидной смолы с отвердителем – изометилтетрагидрофталевым ангидридом и двух компонентов-наполнителей. Варьирование различными наполнителями и их концентрацией позволяет получать достаточно широкий диапазон коэффициента теплопроводности ПТП. На рисунке 3.10 приведены полученные экспериментально и расчетным путем по методикам В.И. Оделевского и Г.Н. Дульнева [202] температурные зависимости теплопроводности λ_3 заливочного компаунда ПТП на основе смолы марки УП-610 с наполнителем из порошкообразного корунда при объемной концентрации $m = 0,5$.

Иной характер температурной зависимости теплопроводности указанного компаунда по сравнению с данными, рассчитанными по методикам В.И. Оделевского и Г.Н. Дульнева, по-видимому, можно объяснить наличием контактов между частицами наполнителя и преобладающим влиянием его более высокого, но существенно уменьшающегося коэффициента теплопроводности при возрастании температуры на эффективную



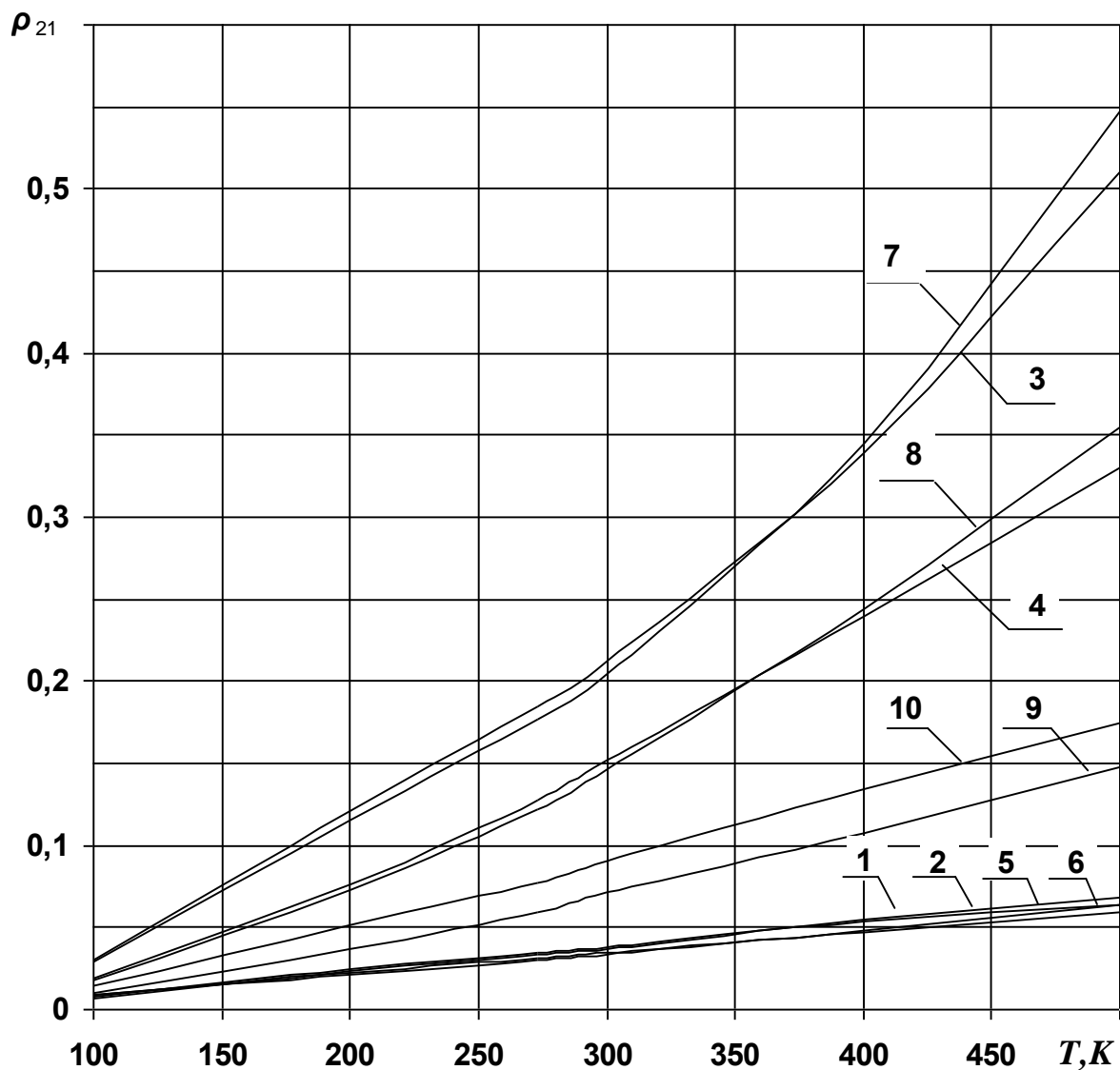
1 – копель; 2 – константан; 3 – нихром; 4 – хромель; 5 – серебро; 6 – медь;
7 – никель; 8 – железо; 9 – платина

Рисунок 3.6 – ТЭДС относительно платины различных термоэлектродных материалов в температурном диапазоне от минус 73 К до 773 К



1 – константан-медь; 2 – константан-серебро; 3 – константан-железо;
 4 – константан-никель; 5 – копель-медь; 6 – копель-серебро; 7 – копель-железо;
 8 – копель-никель; 9 – нихром-никель; 10 – хромель-никель

Рисунок 3.7 – Температурная зависимость термоэлектрической чувствительности различных термоэлектродных пар



1 – константан-медь;

2 – константан-серебро;

3 – константан-железо;

4 – константан-никель;

5 – копель-медь;

6 – копель- серебро;

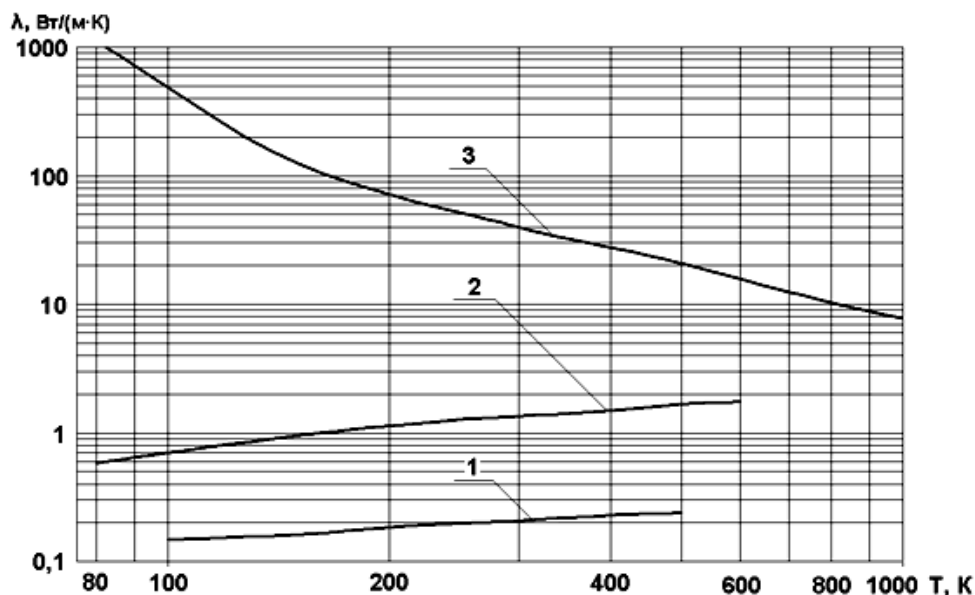
7 – копель- железо;

8 – копель-никель;

9 – нихром-никель;

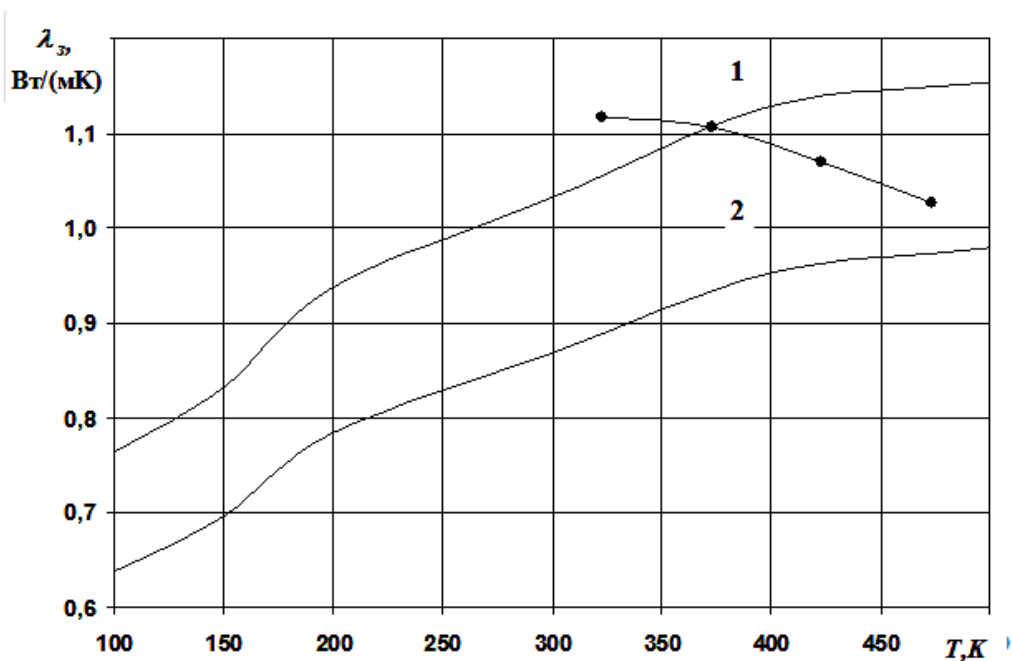
10 – хромель-никель

Рисунок 3.8 – Температурные зависимости приведенного электрического сопротивления для различных термоэлектродных пар



1 – эпоксидная смола с отвердителем – изометилтетрагидрофталевым ангидридом [5]; 2 – плавленный кварц [26]; 3 – корунд [214, 216]

Рисунок 3.9 – Температурные зависимости коэффициентов теплопроводности компонентов заливочного компаунда ПТП



● – экспериментальные данные; 1 – расчетные данные по В.И. Оделевскому; 2 – расчетные данные по Г.Н. Дульневу [202]

Рисунок 3.10 – Коэффициент теплопроводности заливочного компаунда: смолы УП-610 с корундовым наполнителем при концентрации $m = 0,5$

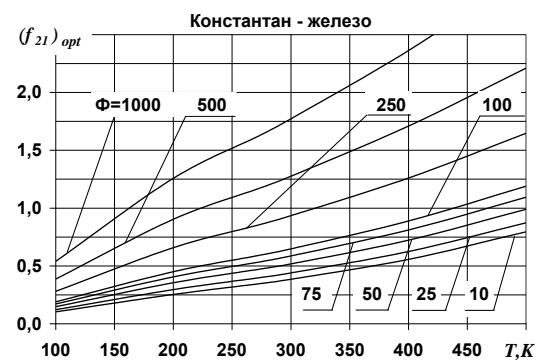
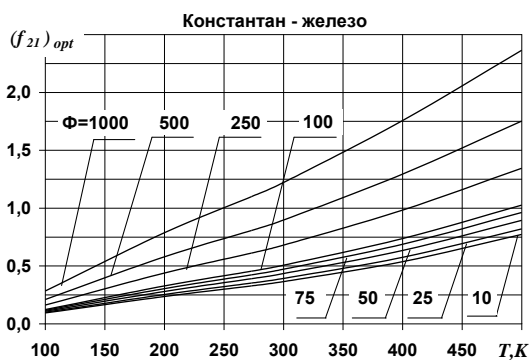
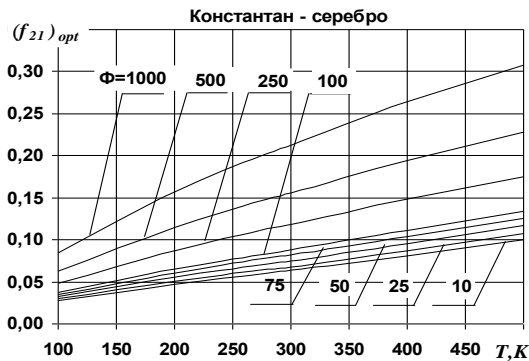
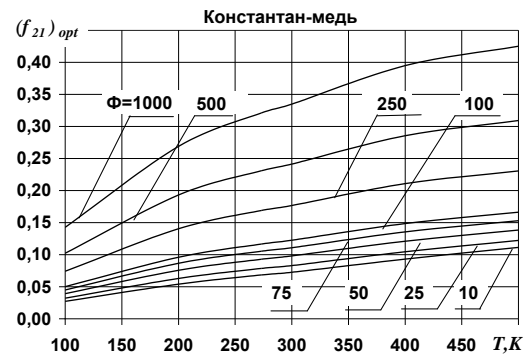
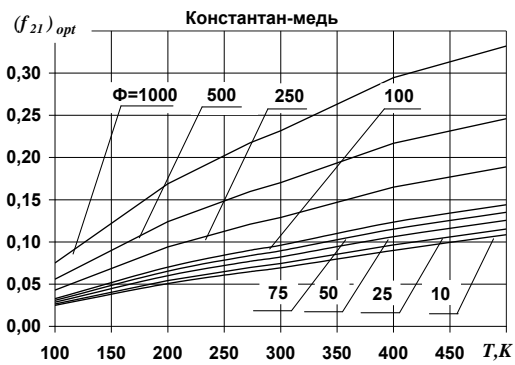
теплопроводность компаунда. В случае использования аморфного наполнителя, к каковым относится плавленый кварц, такого противоречия не обнаружено [5].

Температурные зависимости оптимального отношения площадей сечений покрывного и основного термоэлектродов $f_{21,opt}(T)$, полученные расчетом по формуле (1.3) с использованием данных, приведенных на рисунках 3.8-3.10, представлены семействами графиков на рисунках 3.11, 3.12 и 3.13.

Как видно на рис. 3.7 наименьшую температурную зависимость коэффициента Зеебека имеют термоэлектрические пары константан-никель и копель-никель. Эти пары термоэлектродов с учетом результатов, приведенных на рис. 3.6, являются парадоксальными в отличие от остальных изученных пар, поскольку константан, копель и никель имеют одинаковые знаки коэффициента Зеебека относительно платины, а их численные значения вдвое меньше, чем у традиционных пар константан-медь и копель-медь.

Однако, использование никеля в качестве парного термоэлектродного материала к константану и копелю имеет ряд преимуществ: во-первых, никель легко гальванически осаждается на проволоку из константана и копеля, а, во-вторых, никелевое покрытие более коррозионно стойкое в широком диапазоне температуры, в то время, как медное при 400 К начинает окисляться.

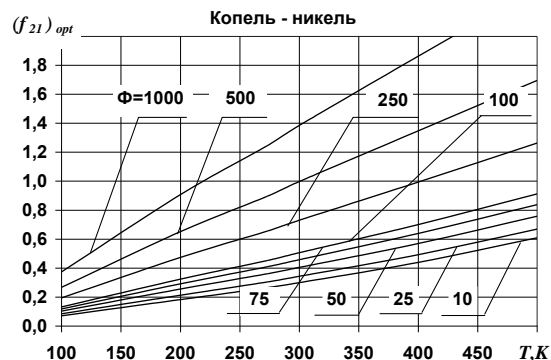
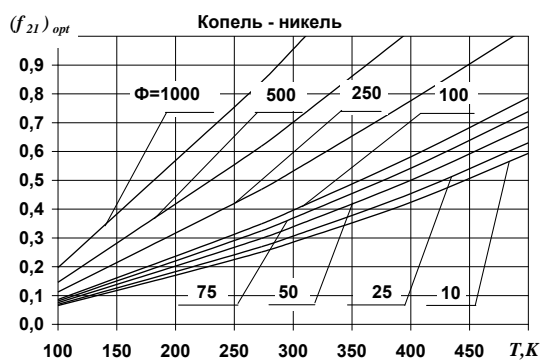
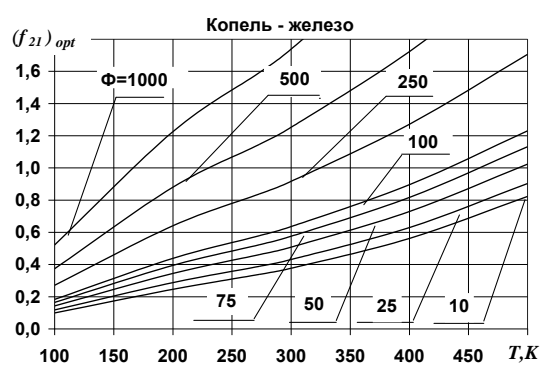
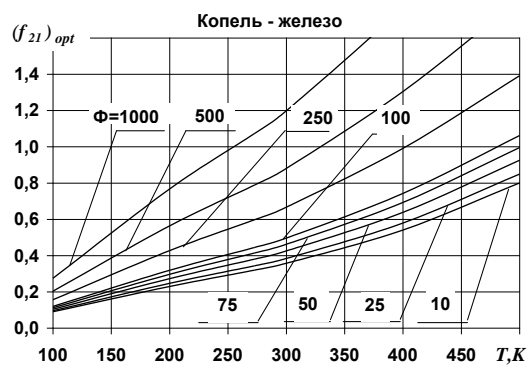
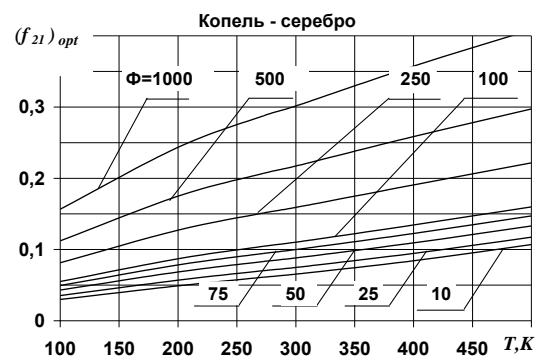
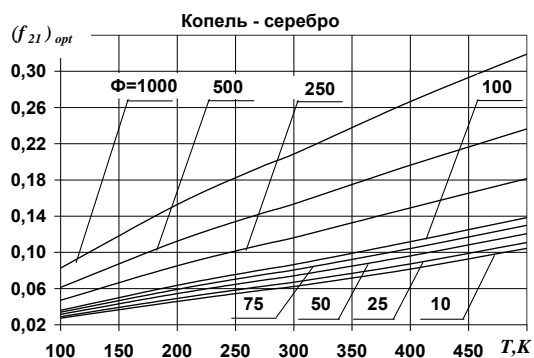
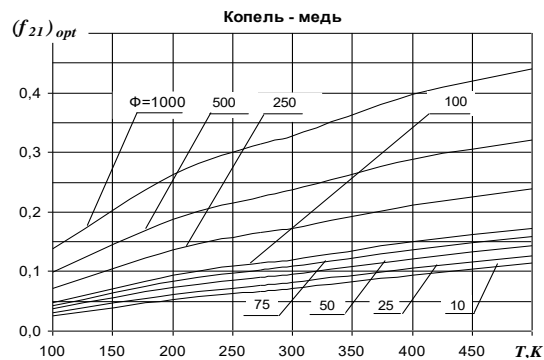
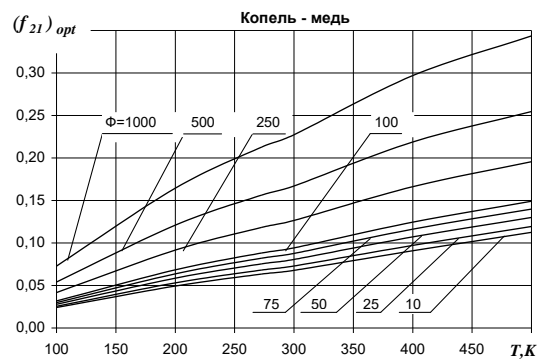
Для применения в биметаллических ПТП гальванических пар константан-никель, копель-никель, нихром-никель и хромель-никель были получены расчетным путем температурные зависимости их термоэлектрической чувствительности, представленные на рисунке 3.7 [39] и исследованы экспериментально [218, 219]. При этом каждая гальваническая пара представляла собой свитые между собой пары проволок из основного и парного термоэлектродных материалов: константана, копеля, нихрома и хромеля с никелем. Рабочий спай гальванических пар помещали в цилиндр, выполненный из нержавеющей стали и заполненный песком, что обеспечило равномерное температурное поле и исключило электрический контакт спая с корпусом цилиндра. Измерения проведены с применением компьютеризированного



a)

б)

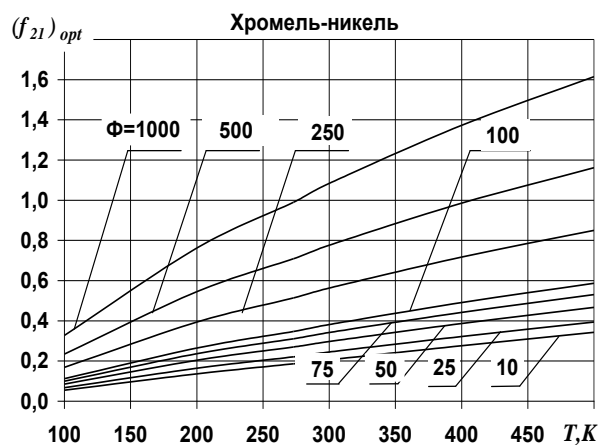
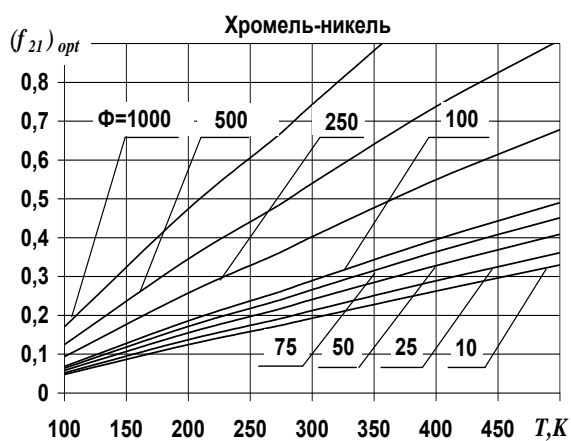
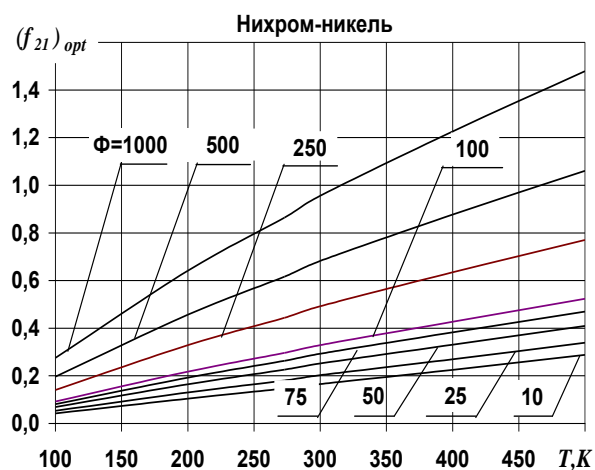
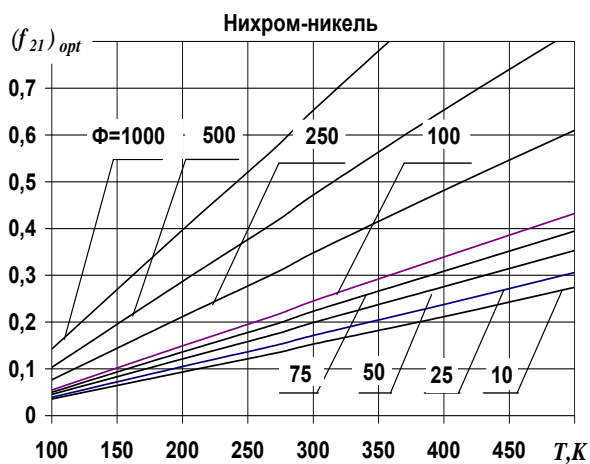
Рисунок 3.11 – Температурные зависимости оптимального отношения $(f_{21})_{opt} = f(T)$ для константан-медного, константан-серебряного, константан-железного и константан-никелевого ПТП с наполнителем заливочного компаунда из плавленого кварца (*a*) и корунда (*б*) при вариации формпараметра Φ



а)

б)

Рисунок 3.12 – Температурные зависимости оптимального отношения $(f_{21})_{opt} = f(T)$ для копель-медного, копель-серебряного, копель-железного и копель-никелевого ПТП с наполнителем заливочного компаунда из плавленого кварца (а) и корунда (б) при вариации формпараметра Φ



a)

б)

Рисунок 3.13 – Температурные зависимости оптимального отношения $(f_{21})_{opt} = f(T)$ для **нихром-никелевого** и **хромель-никелевого** ПТП с наполнителем заливочного компаунда из плавленного кварца (*a*) и корунда (*б*) при вариации формпараметра Φ

комплекса «Ресурс-96» [41], от которого измерительная информация посредством USB-интерфейса передается на персональный компьютер. Результаты измерений систематизированы на рисунке 3.14. 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. Эти графики соответствуют отношению $f_{21,opt} = 0,67$. Изготовленные из таких пар ПТП имеют практически независимую от температуры функцию преобразования. Например, на рисунке 3.15 экспериментальные зависимости коэффициента преобразования в диапазоне температуры (300 – 500) К для следующих типов ПТП: 1, 2 – эталонные на базе копель-никелевых термоэлементов, 3, 4 – константан-никелевые ПТП, используемые в космических исследованиях, а именно, в системах измерения для ракет-носителей «Днепр» и «Днепр-Восток» [220, 221].

По результатам исследований установлено, что значения коэффициента преобразования каждого ПТП в диапазоне температуры от 300 К до 500 К отличаются от среднеарифметического по диапазону не более, чем на 3 %.

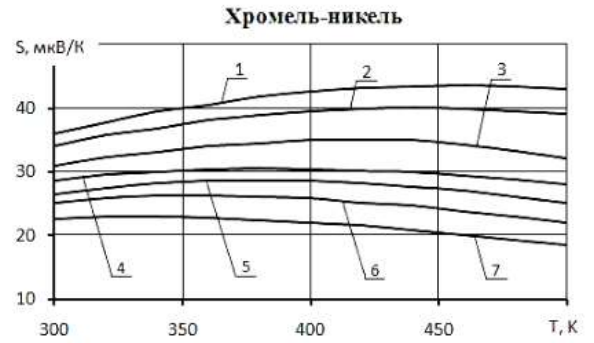
С использованием всех полученных в этом параграфе результатов рассчитаны и представлены на рисунках 3.16 – 3.18 семействами графиков температурные зависимости коэффициента преобразования измеряемого теплового потока в регистрирующую ТЭДС, приведенного к его значению при температуре 273 К, $K_q(T)/K_{273}$, для всех рассмотренных типов ПТП, изготовленных с использованием заливочного компаунда с наполнителем из плавленого кварца и порошкообразного корунда при вариациях значения отношения $f_{21,opt}$ (см. рис. 3.11 – 3.13).

Полученные результаты позволяют устанавливать область применения отдельных типов ПТП или производить оптимальный выбор типа ПТП для поставленных условий эксплуатации.

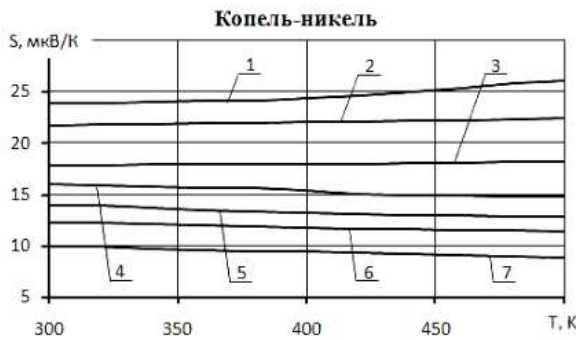
Так для измерений теплового потока на объектах при низких и криогенных значениях температуры целесообразно применять константан-серебряные и



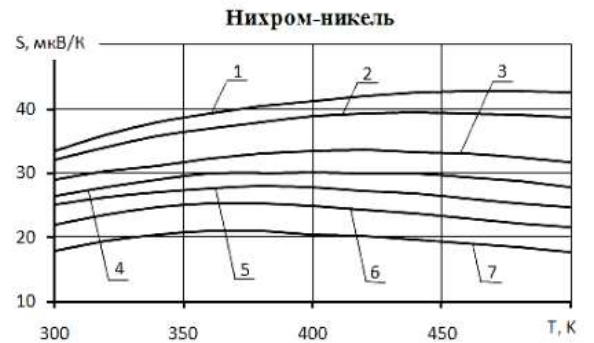
- а)** 1 - $f_{21,opt} = 0,559$; 2 - 0,605; 3 - 0,674;
4 - 0,722; 5 - 0,758; 6 - 0,785; 7 - 0,825.



- б)** 1 - $f_{21,opt} = 0,541$; 2 - 0,576; 3 - 0,632;
4 - 0,675; 5 - 0,708; 6 - 0,736; 7 - 0,778.

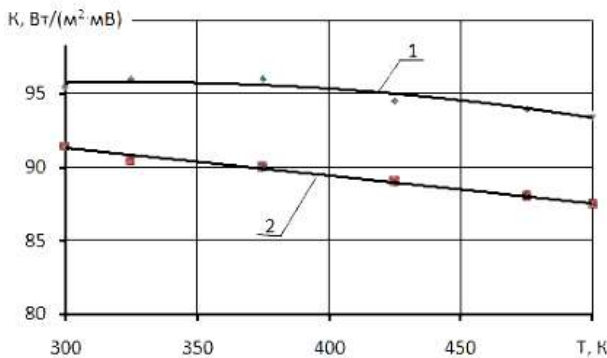


- б)** 1 - $f_{21,opt} = 0,557$; 2 - 0,602; 3 - 0,669;
4 - 0,717; 5 - 0,753; 6 - 0,780; 7 - 0,820.

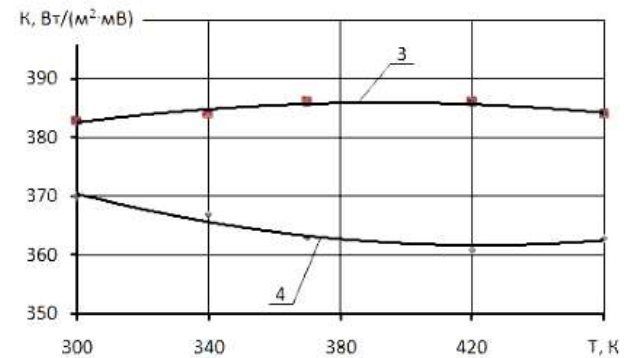


- а)** 1 - $f_{21,opt} = 0,529$; 2 - 0,555; 3 - 0,599;
4 - 0,634; 5 - 0,666; 6 - 0,691; 7 - 0,732.

Рисунок 3.14 – Температурные зависимости чувствительности $S=f(T)$ различных пар термоэлементов при вариации отношения $f_{21,opt}$



а)



б)

1,2 – эталонные ПТП

3,4 – ПТП для применения в космических аппаратах

Рисунок 3.15 – Температурная зависимость коэффициентов преобразования ПТП на базе копель-никелевых (а) и константан-никелевых (б) термоэлементов

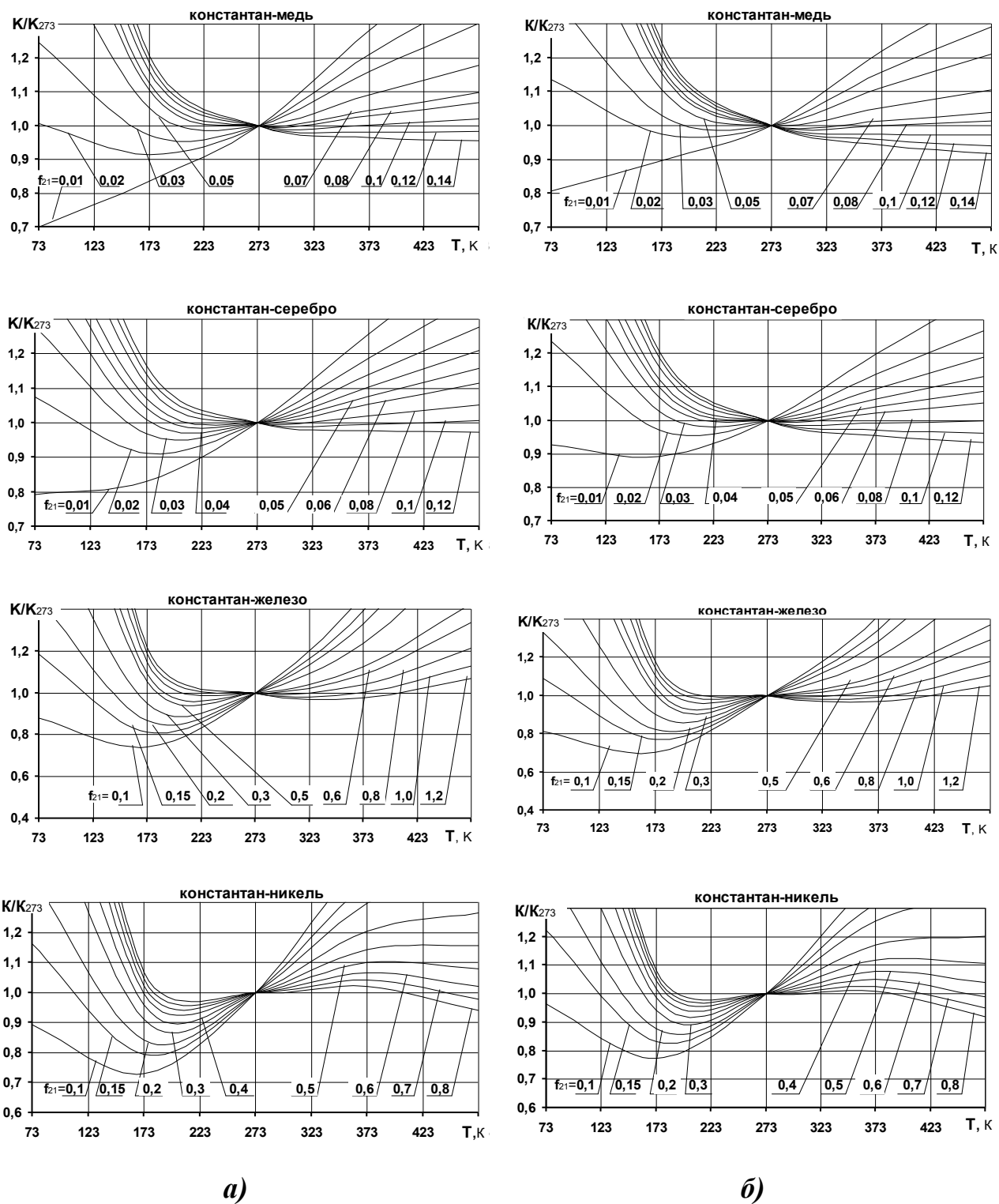
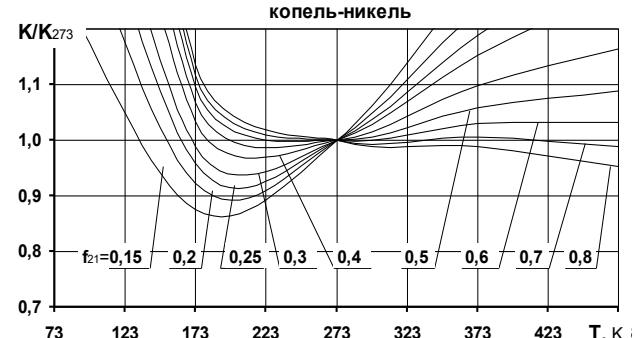
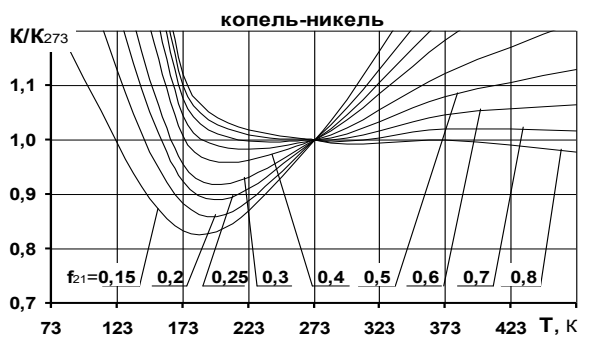
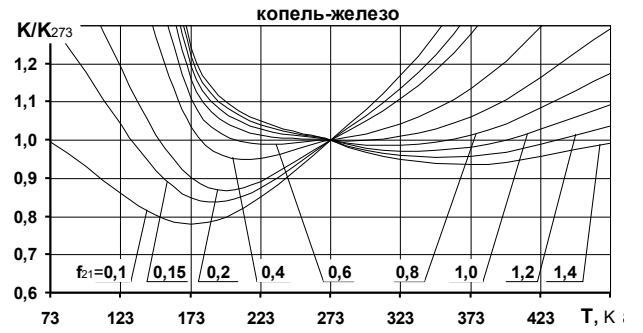
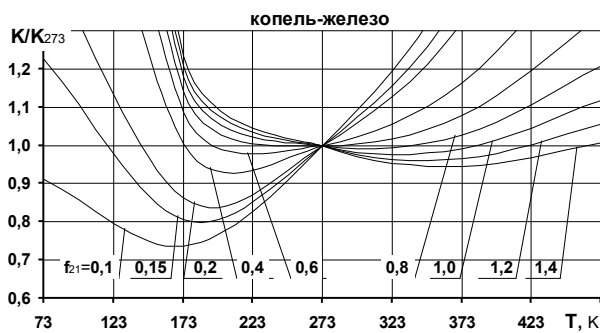
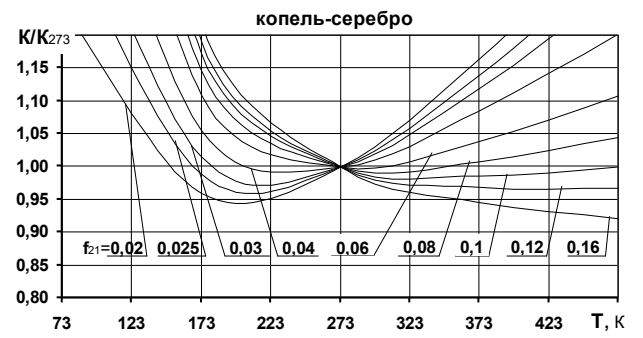
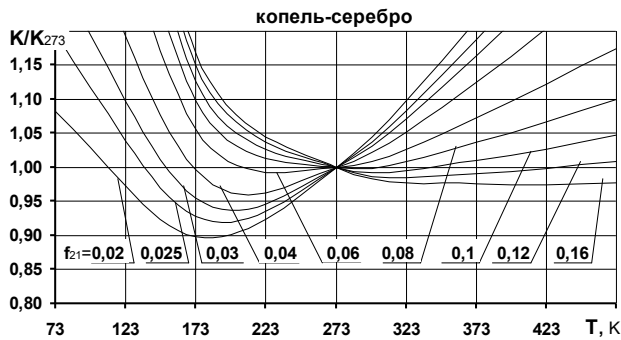
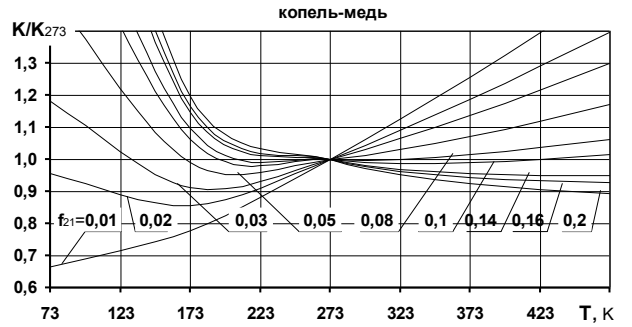
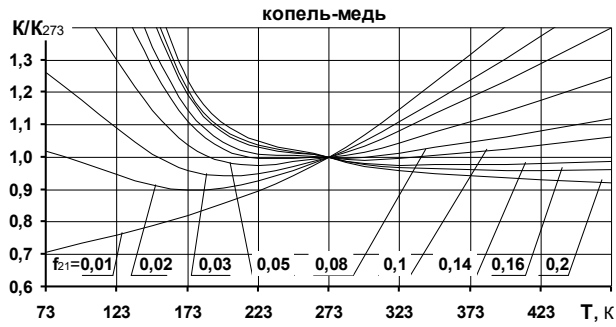


Рисунок 3.16 – Температурные зависимости приведенного коэффициента преобразования $K(T)/K_{273} = f(T)$ для константан-медного, константан-серебряного, константан-железного и константан-никелевого ПТП с наполнителем заливочного компаунда из плавленного кварца (*a*) и корунда (*б*) при вариации отношения f_{21} .



a)

б)

Рисунок 3.17 – Температурные зависимости приведенного коэффициента преобразования $K(T)/K_{273} = f(T)$ для **копель-медного**, **копель-серебряного**, **копель-железного** и **копель-никелевого** ПТП с наполнителем заливочного компаунда из плавленого кварца (*a*) и корунда (*б*) при вариации отношения f_{21}

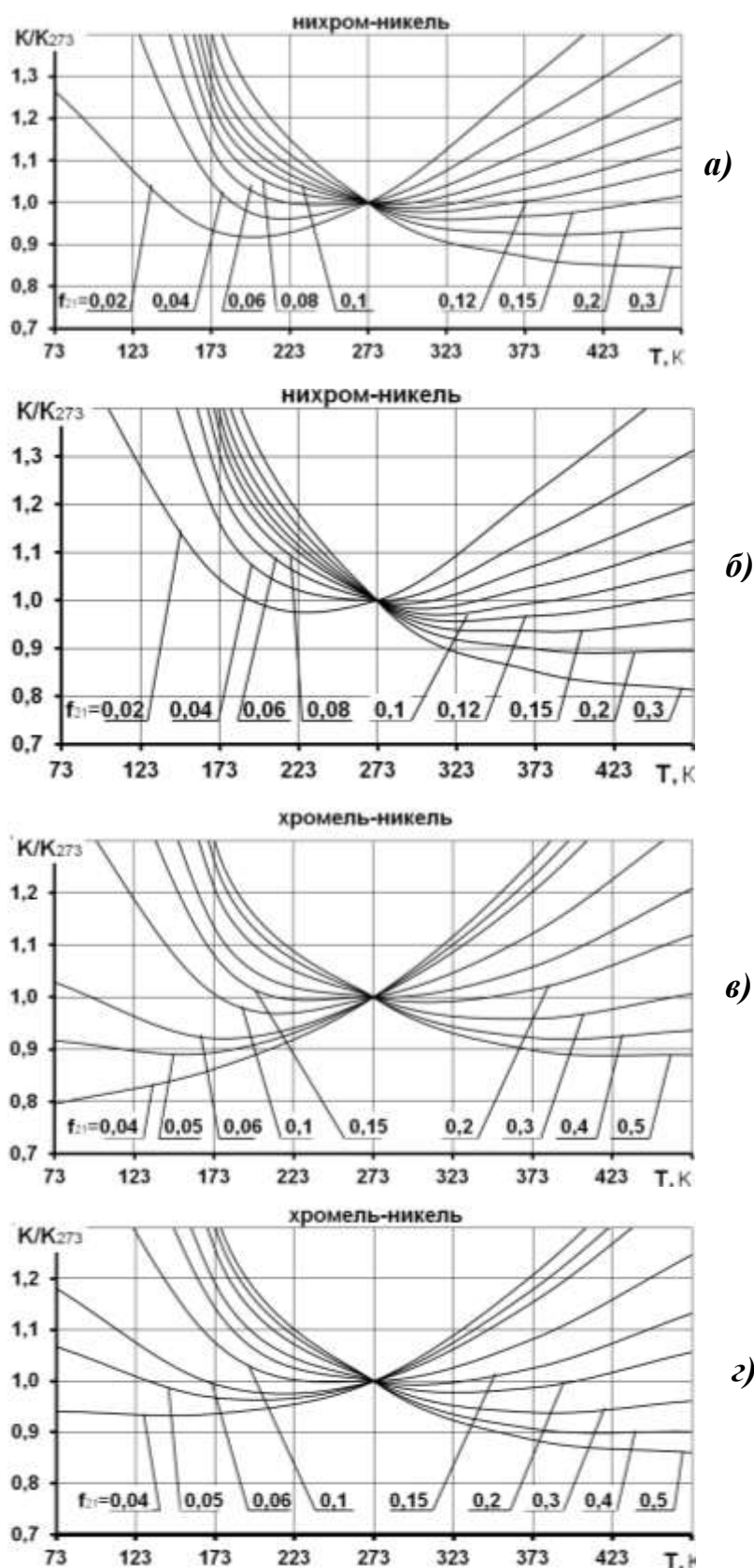


Рисунок 3.18 – Температурные зависимости приведенного коэффициента преобразования $K(T)/K_{273} = f(T)$ для **хромель-никелевого** и **нихром-никелевого** ПТП с наполнителем заливочного компаунда из плавленного кварца (**а, в**) и корунда (**б, г**) при вариации отношения f_{21}

копель-серебряные ПТП, ибо чувствительность этих типов в указанных диапазонах температуры имеет наименьшую температурную зависимость (см. соответствующие семейства графиков на рис. 3.16 и 3.17 в сравнении с рис. 3.18).

Однако, из-за сильного окисления медного и серебряного покрытий при температуре выше 400 К они не могут быть применимы в диапазонах более высоких значений. Поэтому при температуре выше 400 К применяют традиционные пары нихрома и хромеля с никелем. При этом, обладая более высокой коррозионной стойкостью они характеризуются большей температурной зависимостью их чувствительности (см. рис. 3.18).

Исследование временной стабильности метрологических характеристик ПТП выполнено путем анализа стабильности коэффициентов преобразования ПТП выполнено экспериментально по трем группам преобразователей.

I группа – константан-медные ПТП с компаундом на основе смолы ЭД-20 (порядка 200 штук), – в течение (7-10) лет применяемые в строительных сертификационных лабораториях Украины и Беларуси для контроля теплового сопротивления ограждающих конструкций, проходят ежегодную метрологическую поверку, при которой устанавливают пригодность для последующей эксплуатации путем определения погрешности измерения или степени отклонения коэффициента преобразования от значения, установленного при метрологической аттестации (первичной поверке).

Температурные условия эксплуатации этих ПТП достаточно мягкие: от 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 чувствительного элемента, трещины, сколы и т.п., а вторая половина – на метрологические отказы, вызванные изменением коэффициента преобразования и, соответственно, увеличением погрешности измерения выше установленной границы $\pm 4\%$. Аттестация и поверка ПТП этой группы проводятся на радиационном компараторе, для которого случайная

составляющая погрешности составляет 3%, поэтому медленные малые изменения коэффициента преобразования не могут быть обнаружены.

II группа – константан-серебряные ПТП, которые в течение 15 лет применяются в отделе теплотри 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. В результате этих поверок установлено, что изменения коэффициента преобразования не превышали 1,5%, то есть были не больше случайной составляющей воспроизведения и передачи единицы теплового потока в установке КГУ-1-25 – исходном образцовом средстве.

III группа – константан-никелевые ПТП с компаундом на базе полимера УП-610 с корундовым наполнителем. Группа из 8 таких ПТП после изготовления была подвергнута старению с целью стабилизации метрологических характеристик, которое проводилось методом термоциклирования с ежедневным разогревом ПТП в зажатом состоянии (для исключения изгибов) до температуры 500 К и последующем охлаждении до комнатной температуры. После остывания ПТП измеряли их коэффициенты преобразования. Результаты измерений в виде графиков представлены на рисунке 3.19.

Как видно из представленных 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.

Анализ данных по трем группам ПТП свидетельствует, что среднее время наработки ПТП на метрологический отказ может достигать нескольких

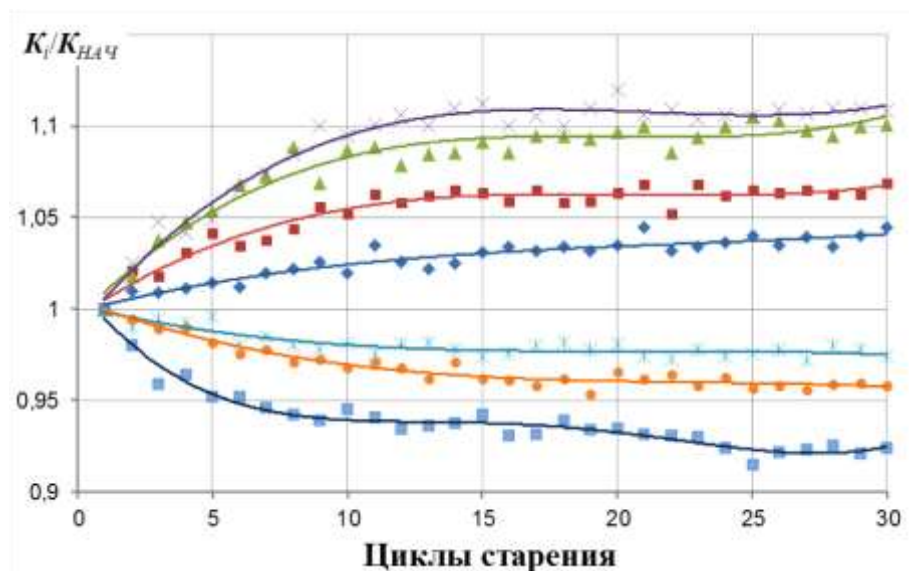


Рисунок 3.19 – Относительные изменения коэффициентов преобразования константан-никелевых ПТП в процессе старения термоциклированием

десятков лет. Для получения достоверных численных оценок характеристик стабильности и метрологической надежности ПТП необходимо продолжить длительный сбор статистических данных по большому количеству преобразователей.

Из проведенных исследований следует, что для существенного улучшения метрологических и эксплуатационных характеристик ПТП их предпочтительно изготавливать из константан-никелевых термоэлементов и компаунда на базе полимера УП-610 а также подвергать старению после изготовления путем термоциклирования, причем верхнюю температуру в термоциклах задавать на (10 - 15) К выше максимальной температуры эксплуатации.

Необходимо продолжать исследования долговременной стабильности метрологических характеристик ПТП, причем для таких исследований нужно создать оборудование, позволяющее проводить определение коэффициента преобразования со случайной погрешностью не более 0,5%.

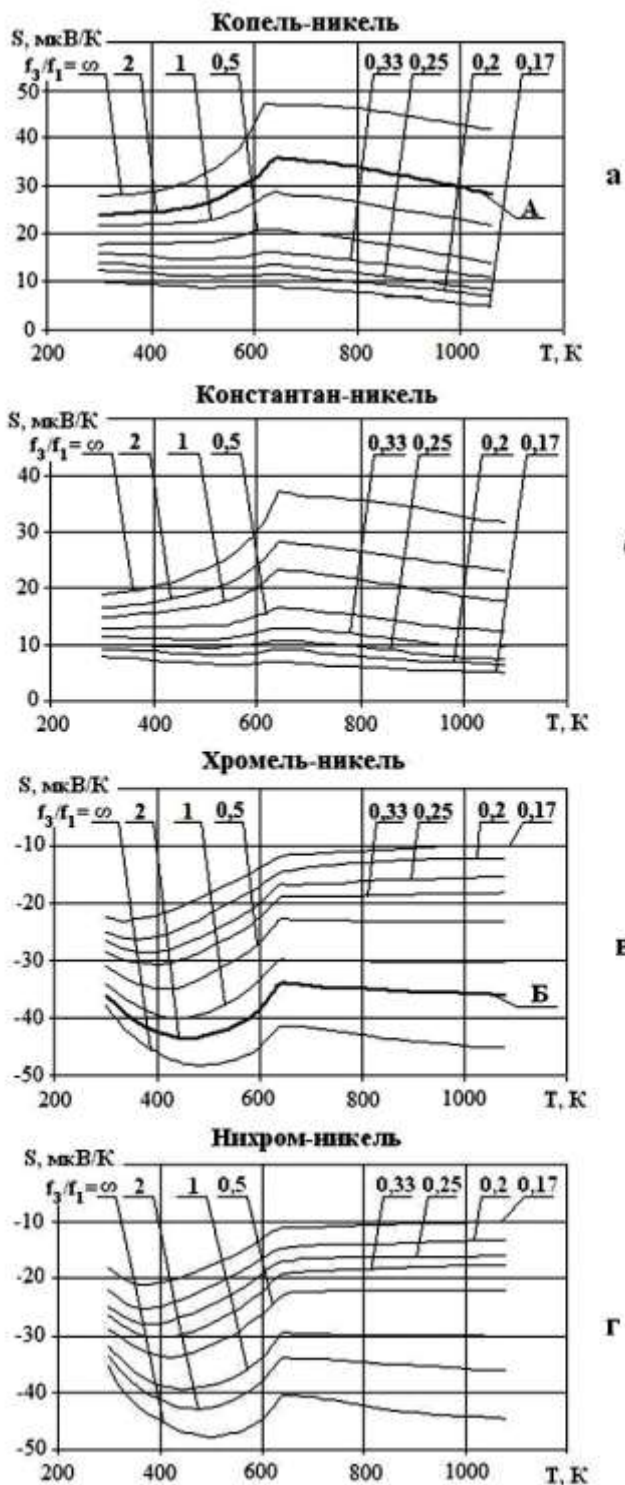
3.3 Биспиральные термоэлектрические ПТП

По результатам исследования температурной зависимости чувствительности термоэлементов с биметаллическим термоэлектродом с

покрытием из никеля в практике теплоточных измерений появились ПТП, которые также частично решили задачу расширения температурного диапазона с сохранением температурной независимости чувствительности индивидуальной статической функции преобразования. Дальнейшие поиски привели к созданию нового типа многоэлементного термоэлектрического ПТП вида вспомогательной стенки, получивший название «биспиральный ПТП» [222-224], основанный на использовании термоэлектродных проволок с никелевым покрытием, позволяющих существенно расширить температурный диапазон. Как показано в 3.2, никель имеет нелинейную зависимость коэффициента Зеебека от температуры с экстремумом при 631 К (точка Кюри) [211]. В связи с этим был проведен поиск термоэлектрических материалов, обеспечивающих термонеинзависимую чувствительность ПТП в существенно расширенном диапазоне температуры эксплуатации, для чего исследованы зависимости от температуры чувствительности различных пар термоэлектродов, один из которых выполнен биметаллическим, то есть состоит из проволок основного и парного термоэлектродного материала.

На рисунке 3.20 систематизированы результаты, полученные при экспериментальном исследовании характера температурной зависимости чувствительности ряда термоэлементов, изготовленных из константановой, копелевой, хромелевой и нихромовой термоэлектродных проволок в паре с никелевой проволокой, которая является имитацией гальванически осажденного парного термоэлектродного материала, при вариации отношения площади сечения никелевой проволоки f_2 к площади сечения соответствующего основного термоэлектрода f_1 в широком температурном диапазоне.

Как видно из представленных графиков, для константан-никелевой и копель-никелевой пар термоэлектродов имеются участки с относительно термонеинзависимой чувствительностью в диапазоне значений рабочей температуры от 300 К до 500 К. Дальнейшее повышение температуры



f_3/f_1 – отношение площади сечения никелевой проволоки к площади сечения соответствующей парной проволоки термоэлемента: константана, копеля, хромеля и нихрома.

Рисунок 3.20 – Экспериментальные зависимости чувствительности ряда термоэлементов от температуры при вариации отношения площадей сечений парного и основного термоэлектродных материалов.

приводит к существенному изменению характера функции преобразования ПТП, включая пики при температуре, соответствующей точке Кюри никеля, обусловленной фазовым переходом в никеле.

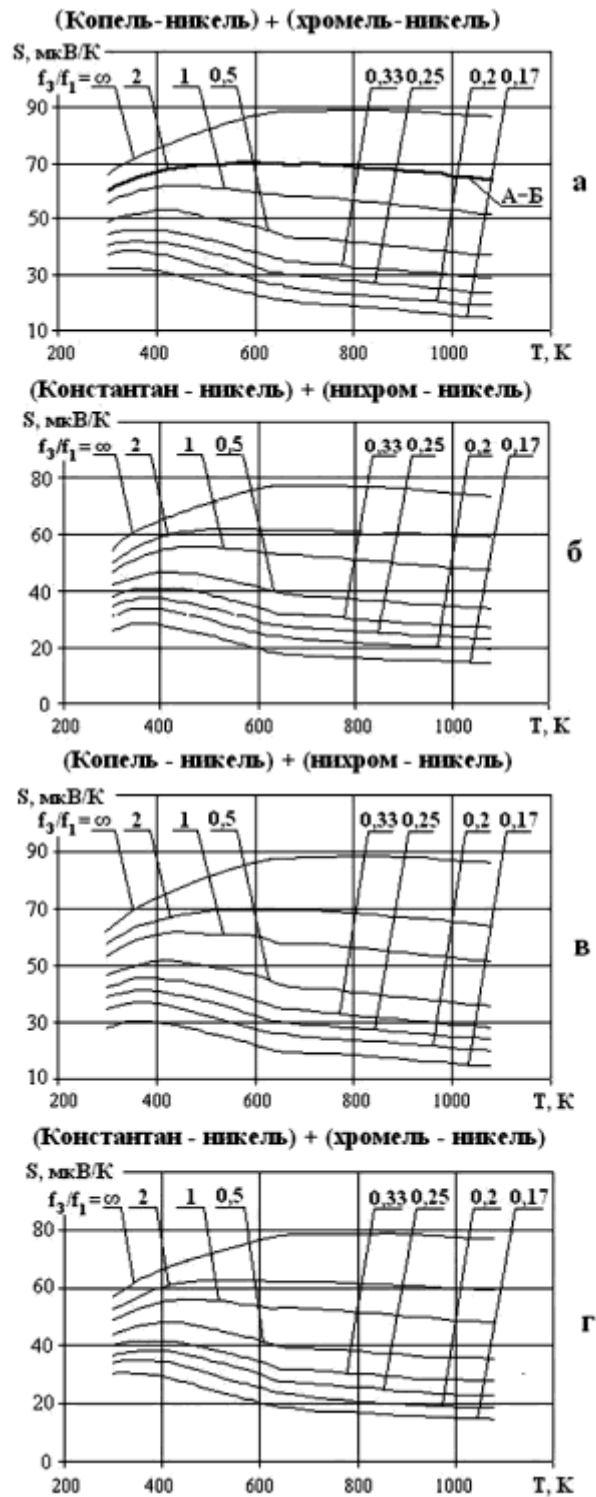
Аналогичные изменения, включая пики в точке Кюри, наблюдаются для хромель-никелевой и нихром-никелевой пар. Характер температурной зависимости чувствительности термоэлементов с биметаллическим электродом с покрытием из никеля положен в основу разработки новых ПТП, обладающих, чувствительностью независимой или мало зависимой от температуры в широком температурном диапазоне.

Для примера рассмотрим батарею, состоящую из двух разных термоэлементов: копель-никелевого (кривая А на рис. 3.20, *а*) и хромель-никелевого (кривая Б на рис. 3.20, *б*). Термоэлементы скомпонованы так, что они параллельны относительно теплового потока (между их спаями одинаковый перепад температуры), а электрически они соединены последовательно и дифференциально. Графики, представленные на рисунке 3.16, отражают температурные зависимости суммарной чувствительности батарей из двух термоэлементов исследованных пар термоэлектродов.

Батарея из копель-никелевого и хромель-никелевого термоэлементов соответствует кривая (А-Б) на рис. 3.21, *а*. По аналогичному принципу могут быть созданы многоэлементные ПТП.

Главной особенностью нового ПТП является то, что его батарея термоэлементов содержит две плоские лентовидные идентичные по конструкции спирали.

Обе спирали биметаллического ПТП обычного исполнения, изготовленные из неодинаковых термоэлектродных проволок с площадью сечения в первой спирали и во второй, но с электролитическим покрытием соответствующих полувитков из одинакового термоэлектрического материала с площадью сечения, в первой спирали во второй. Для обеспечения большей чувствительности обе основные проволоки (1 и 2) должны составлять термоэлектродную пару, например, хромелевая и



f_3/f_1 – отношение площади сечения никелевой проволоки к площади сечения соответствующей парной проволоки термоэлемента: константана, копеля, хромеля и нихрома.

Рисунок 3.21 – Зависимости от температуры суммарной чувствительности термоэлементов, включенных последовательно по электрическому сигналу

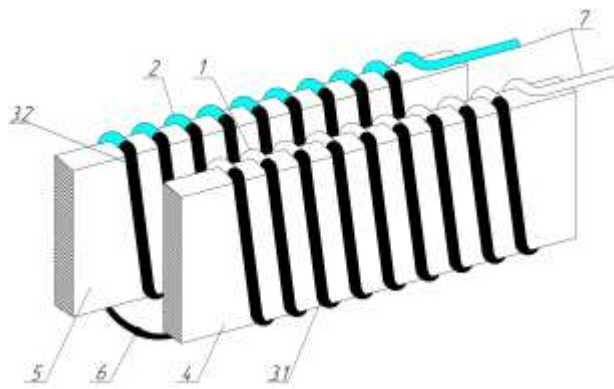
копелевая, хромелевая и константановая, нихромовая и копелевая, нихромовая и константановая, а покрытие с учетом ожидаемого диапазона температуры эксплуатации ПТП может быть выполнено из меди, серебра, никеля или железа.

При изготовлении биспирального ПТП возможны несколько конструктивных решений, схематически показанные на рисунке 3.22, *а* и *б* [222], когда спираль поставлена на «ребро» и на рисунке 3.23, когда спираль расположена «плашмя».

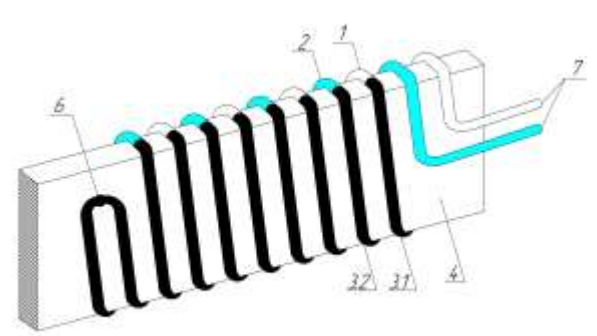
По первому варианту конструкции ПТП на рис. 3.22, *а* обе основные термоэлектродные проволоки 1 и 2 с электролитическим покрытием 3.1 и 3.2 соответствующих полувитков основных проволок навиты на отдельные каркасные ленты 4 и 5. Эти ленты выполнены из полосок электроизоляционного материала одинаковой 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 компаундным материалом (на рис. 3.22 не показан). Сигнал биспирального ПТП выводится через потенциалосъемные провода 7.

Конструкция ПТП по второму варианту (см. рис.3.22, *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 контакта между термоэлементами.

Конструкция ПТП, представленная на рис. 3.23, также может быть выполнена в двух вариантах, аналогичных уже описанным, т.е. из двух спиралей на индивидуальной ленточке-носителе каждая (вариант *а*) и на общей ленточке (вариант *б*), но со сдвигом на промежуток для исключения касания витков одной спирали с витками второй спирали.



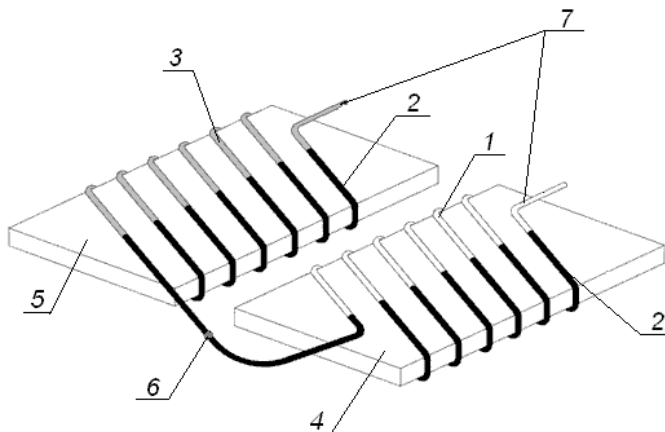
a)



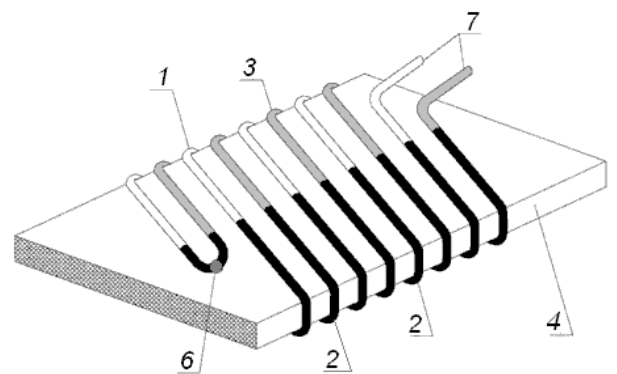
б)

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.

Рисунок 3.22 – Варианты исполнения батареи термоэлементов биспирального ПТП (спираль поставлена на «ребро»).



a)



б)

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.

Рисунок 3.23 – Варианты исполнения батареи термоэлементов биспирального ПТП (спираль расположена «плашмя»)

При прохождении через биспиральный ПТП теплового потока в стационарном тепловом режиме устанавливается разность температуры ΔT между параллельными плоскостями (верхней и нижней), где размещены спайи батареи термоэлементов, которая пропорциональна поверхностной плотности теплового потока q и тепловому сопротивлению R слоя материала между плоскостями со спаями:

$$\Delta T = R \cdot q. \quad (3.8)$$

Первая спираль термоэлементов, состоящая из основной термоэлектродной проволоки 1 с гальваническим покрытием 3.1 соответствующих полувитков (см. рис. 3.22), генерирует ТЭДС E_1 которую можно рассчитать по формуле:

$$E_1 = z_1 \cdot S_1 \cdot R \cdot q, \quad (3.9)$$

а вторая спираль, состоящая из основной проволоки 2 с покрытием 3.2, генерирует аналогично ТЭДС E_2 :

$$E_2 = z_2 \cdot S_2 \cdot R \cdot q, \quad (3.10)$$

где z_1 и z_2 – количество термоэлементов в первой и второй спирали соответственно; S_1 и S_2 – чувствительность одного термоэлемента в первой и второй спиралях термобатареи.

Значения чувствительностей S_1 и S_2 термоэлементов согласно [3] рассчитываются по формулам:

$$S_1 = (\alpha_1 - \alpha_3) / (1 + \rho_3 \cdot f_1 / \rho_1 \cdot f_{3.1}), \quad (3.11)$$

$$S_2 = (\alpha_2 - \alpha_3) / (1 + \rho_3 \cdot f_2 / \rho_1 \cdot f_{3.2}), \quad (3.12)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – коэффициенты Зеебека материалов основных проволок 1 и 2 и материала покрытия 3;

ρ_1, ρ_2, ρ_3 – их удельное электрическое сопротивление;

f_1, f_2 – площадь сечения основных проволок 1 и 2;

$f_{3.1}$ и $f_{3.2}$ – приведенная площадь сечения покрытия 3 основных проволок

1 и 2.

Исходя из формул (3.9) – (3.12) суммарный сигнал включенных последовательно и дифференциально спиралей 1 и 2 термобатарей биспирального ПТП равен:

$$E_{\Sigma} = E_1 - E_2 = R_T \cdot q \cdot (z_1 \cdot S_1 - z_2 \cdot S_2) = R_T \cdot q \cdot S_{\Sigma}, \quad (3.13)$$

где S_{Σ} – суммарная чувствительность термобатарей, то есть биспирального ПТП, рассчитываемая по формуле:

$$E_{\Sigma} = z_1 \cdot \frac{\alpha_1}{1 + \frac{\rho_3 \cdot f_1}{\rho_1 \cdot f_{3.1}}} - z_2 \cdot \frac{\alpha_2}{1 + \frac{\rho_3 \cdot f_2}{\rho_2 \cdot f_{3.2}}} + \alpha_3 \cdot \left(\frac{z_2}{1 + \frac{\rho_3 \cdot f_2}{\rho_2 \cdot f_{3.2}}} - \frac{z_1}{1 + \frac{\rho_3 \cdot f_1}{\rho_1 \cdot f_{3.1}}} \right). \quad (3.14)$$

Третий член в формуле (3.14) 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:

$$\frac{z_1}{1 + \frac{\rho_3 \cdot f_1}{\rho_1 \cdot f_{3.1}}} = \frac{z_2}{1 + \frac{\rho_3 \cdot f_2}{\rho_2 \cdot f_{3.2}}}, \quad (3.15)$$

благодаря чему можно рассчитать оптимизированную чувствительность ПТП:

$$S_{\Sigma, opt} = z_1 \cdot \frac{\alpha_1}{1 + \frac{\rho_3 \cdot f_1}{\rho_1 \cdot f_{3.1}}} - z_2 \cdot \frac{\alpha_2}{1 + \frac{\rho_3 \cdot f_2}{\rho_2 \cdot f_{3.2}}}. \quad (3.16)$$

Исходя из выражений (3.15) и (3.16), можно констатировать, что специальным подбором параметров биспирального ПТП можно добиться, чтобы его чувствительность не зависела от термоэлектрических свойств материала покрытия основных проволок. Однако, из-за того, что даже у специально подобранной пары термоэлектродных материалов основных термоэлектродных проволок (например, хромель и копель) имеется некоторая температурная зависимость коэффициентов Зеебека α_1 и α_2 , чувствительность $S_{\Sigma, opt}$ остается в некоторой степени термозависимой величиной. По результатам проведенных исследований видно, что если изменение

чувствительности копель-никелевого термоэлемента в диапазоне температуры от 300 К до 1070 К составляет $\pm 18\%$ (см. график А рис. 3.20), а хромель-никелевого термоэлемента $\pm 13\%$ (см. график Б рис. 3.20), то изменение чувствительности биспирального ПТП из этих термоэлементов составляет всего $\pm 4\%$ (см. график А-Б рис. 3.21).

Результаты исследований температурной зависимости чувствительности термоэлементов из различных термоэлектродных материалов, представленные на рис. 3.20 и рис. 3.21, позволяют подобрать пару термоэлектродных проволок в качестве основных для биспирального ПТП, выбрать толщину покрытия и другие параметры батарей термоэлементов, которые обеспечат минимизацию температурной зависимости чувствительности ПТП.

3.4 Полиметаллические термоэлектрические ПТП

В настоящее время, несмотря на существование целого ряда унифицированных термоэлектрических биметаллических ПТП, ставших стандартизованными средствами измерения с принятием национального стандарта ДСТУ 3756-98 [6], получившего также статус межгосударственного стандарта [7], часто возникает потребность в ПТП, характеристики которых должны удовлетворять 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 в разрушенных помещениях возникла потребность в ПТП, сохраняющих свои метрологические характеристики в условиях сильной радиации.

Временная стабильность чувствительности биметаллического ПТП зависит от его коррозионной стойкости, которую, как было уже сказано в 3.2, можно усилить нанесением гальванического защитного слоя поверх покрытия или промежуточного гальванического подслоя, поверх которого осаждение требуемого парного термоэлектродного материала выполняется более качественно.

Улучшить характеристики биметаллических ПТП можно путем нанесения на оба полувитка несущей проволоки термоэлемента ПТП гальванического покрытия из разных термоэлектродных материалов. Это открывает путь изготовления ПТП из термоэлектродных материалов, обладающими высокими значениями коэффициента Зеебека, но не выпускаемых в виде проволоки (например сурьма, висмут).

При изготовлении данного типа ПТП основная термоэлектродная проволока играет, фактически, роль несущей арматуры, полезный сигнал генерируют наносимые покрытия. Это позволяет освоить производство на базовой технологии батарейных биметаллических ПТП из термоэлектродных материалов, которые не поддаются волочению. Для получения соотношений для расчета оптимальных значений чувствительности ПТП и требуемой для этого толщины покрытий рассмотрена эквивалентная электрическая схема термоэлемента ПТП, приведенная на рисунке 3.24, где индекс «1» соответствует несущему термоэлектроду, «2» и «3» – двум гальваническим покрытиям [30, 225-227].

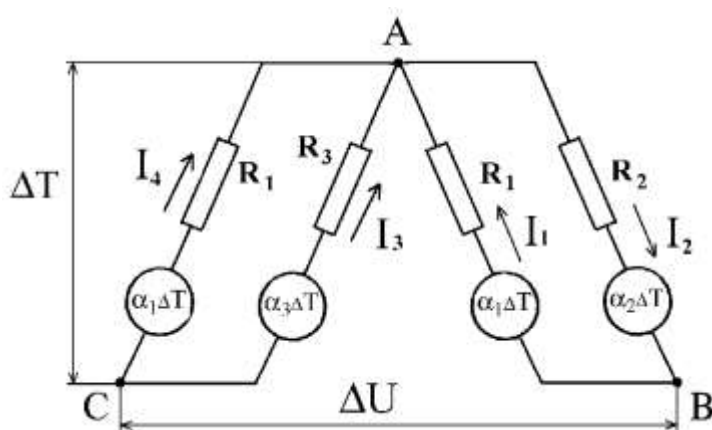


Рисунок 3.24 – Эквивалентная электрическая схема термоэлемента со слоями термоэлектрических покрытий на полуветках

На схеме видно, что каждый полувиток с гальваническим покрытием является замкнутым контуром, включающим в себя электрические сопротивления $R_{э,1}$, $R_{э,2}$ или $R_{э,3}$, а также 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 появляются вихревые токи I_1, I_2, I_3 , а между узлами В и С возникает разность потенциалов ΔU , для которой согласно правилам Кирхгоффа для цепей постоянного тока получена формула для расчёта разности потенциалов:

$$\Delta U_{CB} = \left(\frac{\alpha_3 - \alpha_1}{R_1 + R_3} + \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{R_1 + R_2} \right) R_1 \cdot \Delta T, \quad (3.17)$$

с использованием которой расчетное соотношение для приведенной чувствительности $S_V = q/(A \cdot h)$ этого типа ПТП приобретает вид:

$$S_V = \frac{1}{\lambda_1 f_1} \cdot \frac{\frac{\alpha_3}{1 + \rho_{31}/f_{31}} - \frac{\alpha_2}{1 + \rho_{21}/f_{21}} + \alpha_1 \left(\frac{1}{1 + \rho_{21}/f_{21}} - \frac{1}{1 + \rho_{31}/f_{31}} \right)}{2 + \lambda_{21} \cdot f_{21} + \lambda_{31} \cdot f_{31} + \lambda_{41} \cdot (\Phi - 2 - f_{21} - f_{31})}, \quad (3.18)$$

где $\rho_{i1} = \rho_i/\rho_1$ – приведенное электрическое сопротивление ($i=2; 3$);

$f_{i1} = f_i/f_1$ – приведенная площадь сечения гальванических покрытий;

$\lambda_{i,1} = \lambda_i/\lambda_1$ – отношение коэффициентов теплопроводности

гальванических покрытий $i = 2; 3$ и заливочного компаунда $i = 4$ и коэффициента теплопроводности несущей проволоки;

$\Phi = 2 + f_{21} + f_{31} + f_{41}$ – формпараметр полиметаллического ПТП.

Результаты расчетов по формуле (3.18) представлены на рисунках 3.25 и 3.26 в виде семейств графиков зависимости приведенной чувствительности от отношения площадей сечений f_{21} при вариации отношения f_{31} для пары висмут-сурьма с несущей термоэлектродной проволокой из константана и нихрома, 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.

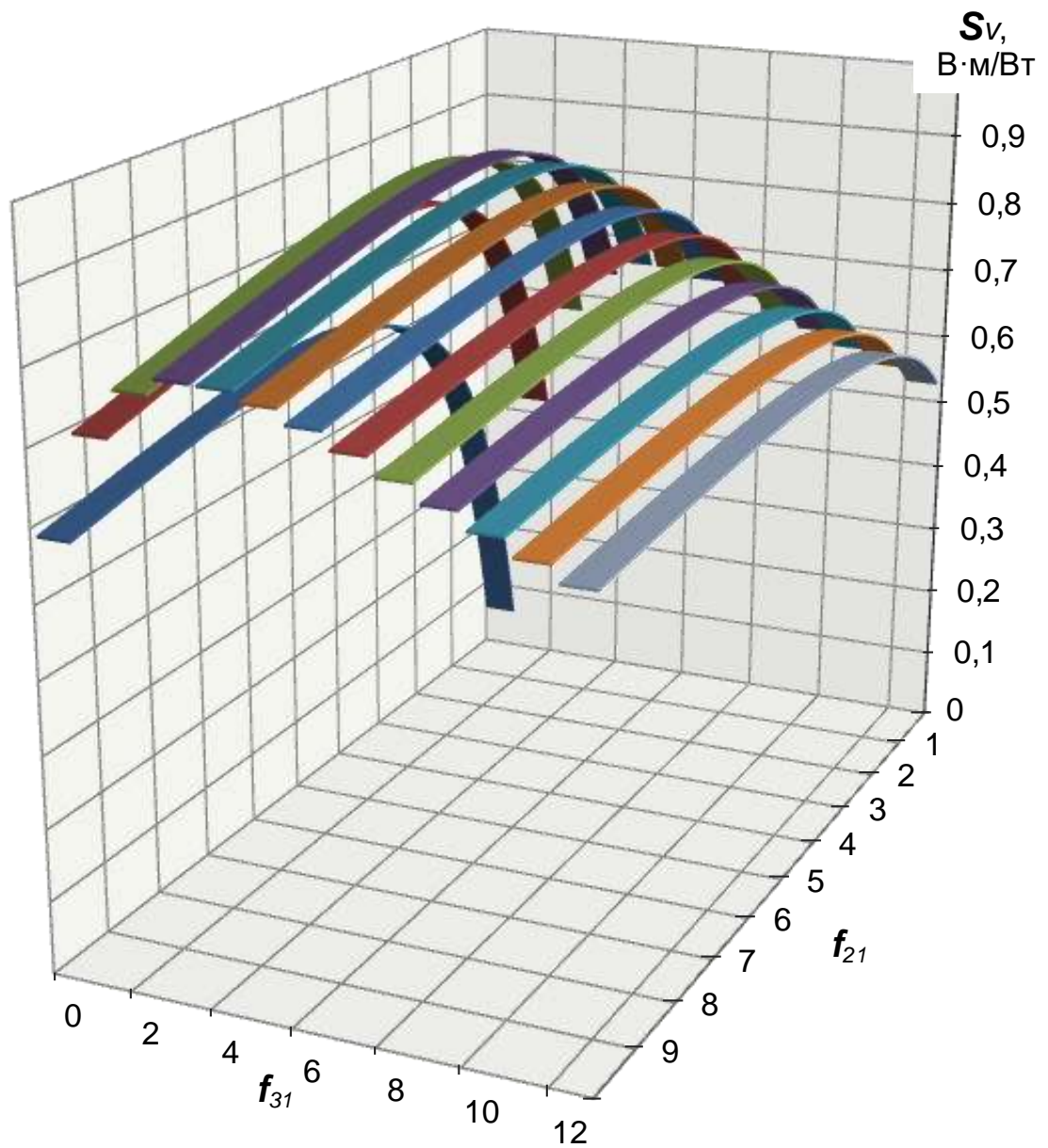
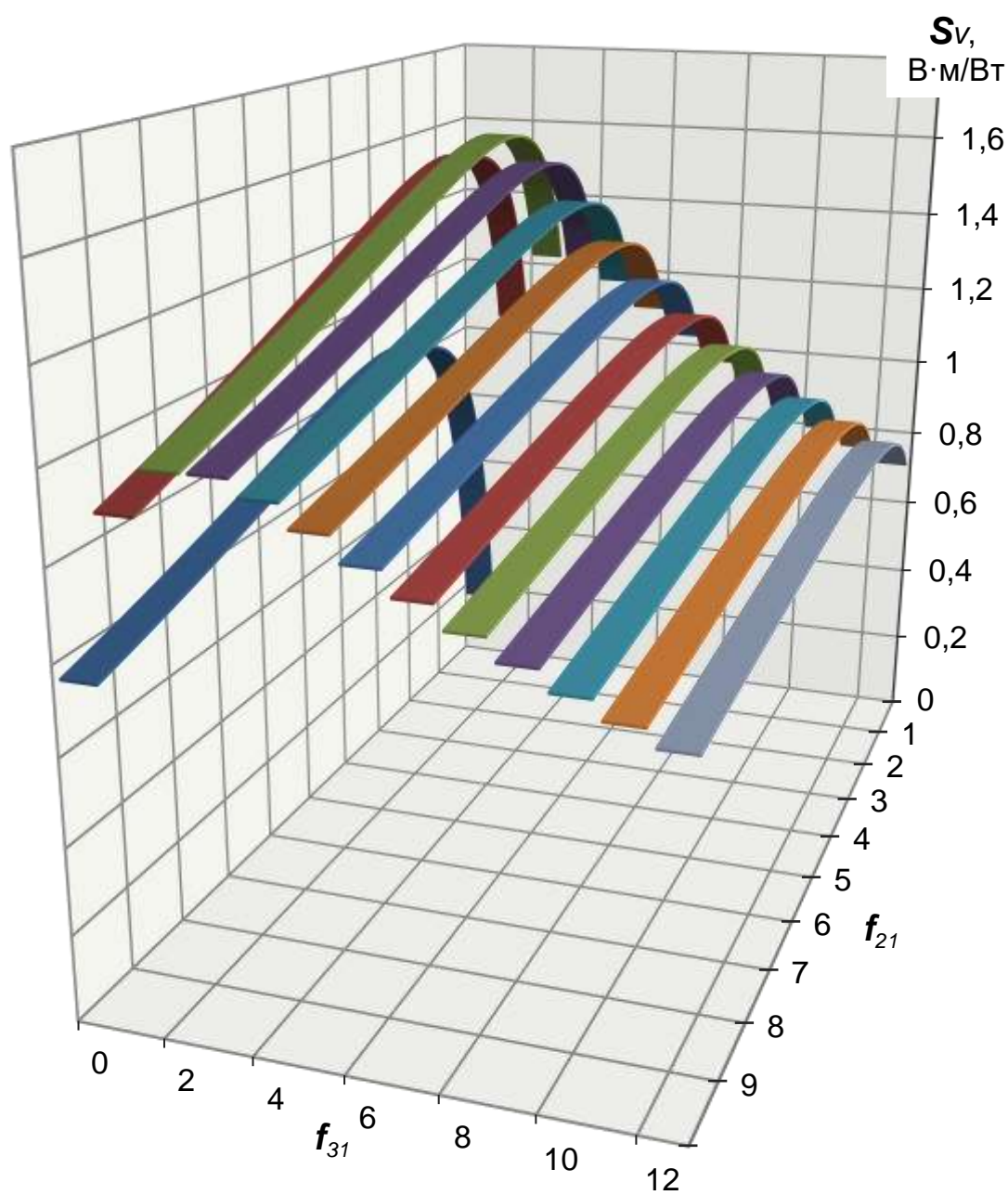


Рисунок 3.25 – Зависимости приведенной чувствительности для ПТП из пары **висмут-сурьма** на несущей **константановой** проволоке от отношения площадей сечений f_{21} при вариации отношения f_{31}



1 – $f_{31}=0$; 2 – 1; 3 – 2; 4 – 3; 5 – 4; 6 – 5; 7 – 6; 8 – 7; 9 – 10; 10 – 11.

Рисунок 3.26 – Зависимости приведенной чувствительности для ПТП из пары **висмут-сурьма** на несущей **нихромовой** проволоке из нихрома от отношения площадей сечений f_{21} при вариации отношения f_{31}

Таким образом, использование полиметаллических термоэлектродов при изготовлении ПТП позволяет защищать термоэлементы от коррозии и использовать термоэлектродные материалы, обладающие более высоким значением коэффициента Зеебека по сравнению с традиционными парами, но не выпускаемые в виде проволоки. Это открывает путь для улучшения стабильности характеристик ПТП и повышения его чувствительности при одновременном уменьшении электрического сопротивления.

3.5 ПТП для исследования нестационарных тепловых процессов

Прогресс науки и техники, а также актуальность решения злободневных задач в области энергетики и строительной индустрии требуют непрерывного совершенствования измерительных систем для сбора информации о режимах работы оборудования, их состоянии и энергетических потерях.

Например, при натурном теплотехническом обследовании состояния теплозащиты строящихся и поставленных на ремонт зданий постройки 60-80 годов появилась проблема, связанная с методической погрешностью измерения теплового потока с одной стороны, малой плотности (от 3 Вт/м² до 10 Вт/м²), 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 измерительной системы, которая способна давать адекватную информацию о параметрах быстротекущих тепловых процессов в условиях постоянно меняющейся температуры поверхности ОК, но которая, к сожалению, в Украине практически отсутствует.

ПТП конечной толщины, обладающие статической индивидуальной функцией преобразования, применимы только для измерения стационарного или медленно меняющегося теплового потока. Быстродействие или инерционность ПТП характеризуют временем реакции [6, 7] и постоянной времени [228]. Время реакции ПТП определяют как время с начала воздействия

ступенчато изменившегося теплового потока до момента достижения выходным сигналом некоторого заданного значения N , например, 0,99 от установившегося значения ($t_{0,99}$). Постоянная времени $\tau_{0,63}$ характеризует быстродействие ПТП весьма условно, так как нестационарные процессы в ПТП описываются, как правило, значительно более сложно, чем простое экспоненциальное изменение во времени. Время реакции по уровню 0,99 (время установления показаний) для ПТП с экспоненциальной переходной характеристикой связано с постоянной времени следующим образом: $t_{0,99} = 5 \cdot \tau_{0,63}$. Таким образом, для исследования нестационарных тепловых процессов постоянная времени ПТП должна быть не менее, чем в (5 – 10) раз меньше, чем характерное время изменения теплового потока. Для оценки характерного времени различных объектов применяется комплексный параметр $t_x = h^2/a$ в секундах, где h – толщина теплопроводящей стенки, a – температуропроводность материала стенки, например, $a \approx 0,1 \cdot 10^{-6}$ м/с² для теплоизоляторов и $a \approx 100 \cdot 10^{-6}$ м/с² для металлов.

Для тепловых процессов в объектах с хорошей теплоизоляцией при толщине $h > 10$ мм (стены зданий и сооружений, изолированные поверхности котлов, магистральных теплотрасс и другое хорошо изолированное оборудование) $t_x > 10^5$ с. В объектах с теплоизоляцией толщиной от 1 мм до 10 мм (различное технологическое оборудование, защищенное тонким слоем теплоизоляции, приборы и т.п.) t_x от 10 с до 10^5 с. В объектах с металлическими неизолированными стенками и разделительными перегородками толщиной $h > 1$ мм (радиаторы, разделительные перегородки теплообменников, двигатели, корпуса машин, судов и летательных аппаратов, а также технологическое оборудование с импульсным вводом энергии, приборы с динамичными режимами работы и пр.) t_x от 10^{-2} с до 10 с. Таким образом, для объектов первой группы характерное время теплового процесса может составлять несколько часов и более, для объектов второй группы

характерное время лежит в секундном диапазоне, а для объектов третьей группы – в миллисекундном (или субсекундном) диапазоне.

Измерение теплового потока на объектах первой группы полностью обеспечивается ПТП и многоканальными измерительными системами, выпускаемыми в ИТТФ [9, 10, 41, 229] и других организациях. Эти ПТП имеют собственную постоянную времени от 3 с до 5 с, а время измерения и передачи информации по одному каналу измерительной системы от 0,5 с до 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 имеющейся измерительной системы недостаточно для получения необходимого объема информации. Объекты третьей группы (миллисекундный или субсекундный диапазон) относятся, как правило, к наиболее интенсивно развивающимся отраслям науки и техники, и именно они не обеспечены быстродействующими СИТ для исследования сложного теплообмена.

Таким образом, создание ПТП и измерительно-регистрирующих систем, обеспечивающих измерение теплового потока в процессах, длительность которых лежит в секундном и субсекундном диапазонах, является в настоящее время очень актуальным.

Для создания быстродействующих ПТП наиболее перспективным является метод вспомогательной стенки [4, 5]. Однако, при измерении стационарного теплового потока с помощью таких ПТП его плотность определяется согласно закону Фурье по измеренной разности температуры его наружных (торцевых) поверхностей, то есть путем численного дифференцирования между двумя его сечениями ($n = 2$). Но такие измерения сопровождаются методической погрешностью, обусловленной конечной толщиной и теплоемкостью ПТП. Наиболее значительной она становится при нестационарных граничных

условиях теплообмена при измерении теплового потока малой плотности (порядка $10 - 30 \text{ Вт/м}^2$). В этих случаях целесообразно пользоваться расчетными соотношениями, полученными численным дифференцированием [11, 230] при увеличенном количестве сечений, равномерно распределенных по толщине ПТП. В [231, 232] приведены формулы для ПТП, выполненных с тремя ($n = 3$), четырьмя ($n = 4$) и пятью ($n = 5$) сечениями, исходя из которых получены расчетные соотношения для относительной плотности $q(x=0, \tau)/q_0$ измеряемого теплового потока, пронизывающего тепловоспринимающую поверхность ПТП. При этом теплоотдающая поверхность ПТП ($x = h$) термостатирована, а $q_0 = \text{const}$ – плотность потока, входящего в ПТП ($x = 0$).

Это соотношение имеет вид:

для количества сечений $n = 3$:

$$\frac{q(0, \tau)}{q_0} = \frac{3}{2}((\theta(0, \tau) - \theta(0,5, \tau)) - \frac{1}{3}(\theta(0,5, \tau) - \theta(1, \tau))) + r^*(\xi); \quad (3.19)$$

для количества сечений $n = 4$:

$$\begin{aligned} \frac{q(0, \tau)}{q_0} = & \frac{11}{6}((\theta(0, \tau) - \theta(1/3, \tau)) - \frac{7}{11}(\theta(1/3, \tau) - \theta(2/3, \tau))) + \\ & + \frac{2}{11}(\theta(2/3, \tau) - \theta(1, \tau)) + r^*(\xi); \end{aligned} \quad (3.20)$$

для количества сечений $n = 5$:

$$\begin{aligned} \frac{q(0, \tau)}{q_0} = & \frac{25}{12}((\theta(0, \tau) - \theta(1/4, \tau)) - \frac{23}{25}(\theta(1/4, \tau) - \theta(1/2, \tau)) + \frac{13}{25}(\theta(1/2, \tau) - \\ & - \theta(3/4, \tau)) - \frac{3}{25}(\theta(3/4, \tau) - \theta(1, \tau))) + r^*(\xi), \end{aligned} \quad (3.21)$$

где $\theta(\eta, \tau) = 1 - \eta - \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \sin(\mu_k(1 - \eta)) \cdot \exp(-\mu_k^2 \cdot Fo)$ – текущая температура

ПТП в безразмерной форме; $\eta = x/h$ – безразмерная координата;

$$A_k = (-1)^{k+1} \cdot 2/\mu_k^2; \quad \mu_k = (2k - 1)\pi/2;$$

$Fo = a\tau/h^2$ – критерий Фурье (безразмерное время);

$r^*(\xi)$ – остаточный член разложения.

На рисунке 3.27 представлены результаты вычислений по формулам (3.19) – (3.21) при пренебрежении остаточным членом ($r^* = 0$) в виде трех графиков (соответственно, 2, 3, 4).

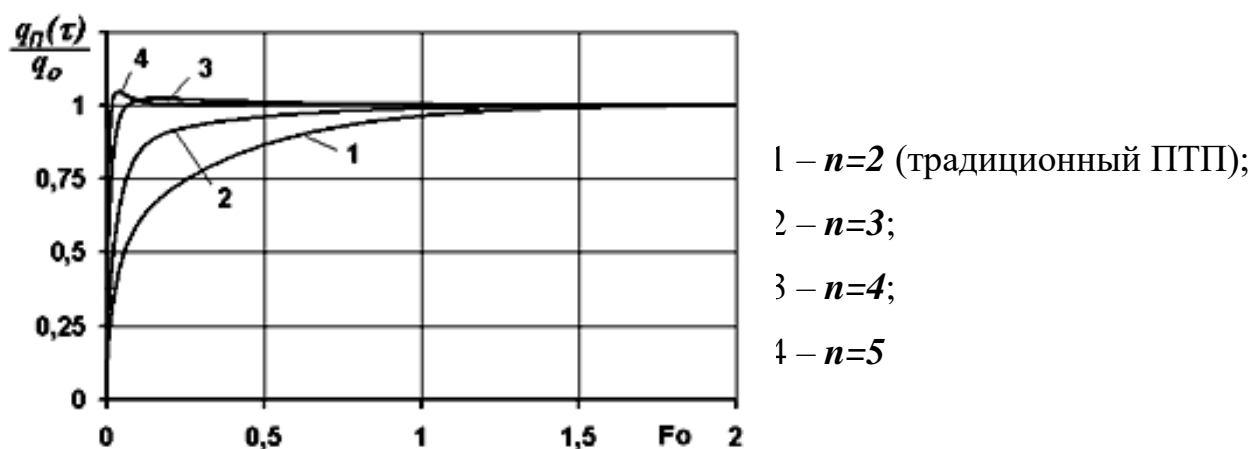


Рисунок 3.27 – Зависимости относительной плотности теплового потока $q(x=0, \tau)/q_0$ от безразмерного времени Fo при вариации количества сечений ПТП n , между которыми выполнено численное дифференцирование

Для сравнения там же представлен результат расчета для традиционного ПТП вида вспомогательной стенки (график 1), то есть для случая дифференцирования между двумя сечениями, для которого расчетная формула имеет вид:

$$q(x=0, \tau)/q_0 = \theta(0, \tau) - \theta(1, \tau). \quad (3.22)$$

Из полученных графиков следует, что при увеличении количества сечений по высоте, между которыми выполнено численное дифференцирование, существенно уменьшается время реакции ПТП на внешнее тепловое воздействие. Уменьшение инерционности ПТП таким путем требует введения в состав ПТП дополнительных измерителей разности температуры между соответствующими сечениями. Наиболее очевидным техническим решением этой задачи является изготовление ПТП из нескольких обычных ПТП, набранных в столбик, то есть расположенных относительно теплового потока последовательно и соединенных дифференциально по электрическому сигналу. Однако изготовление такого ПТП практически не приводит к ожидаемому

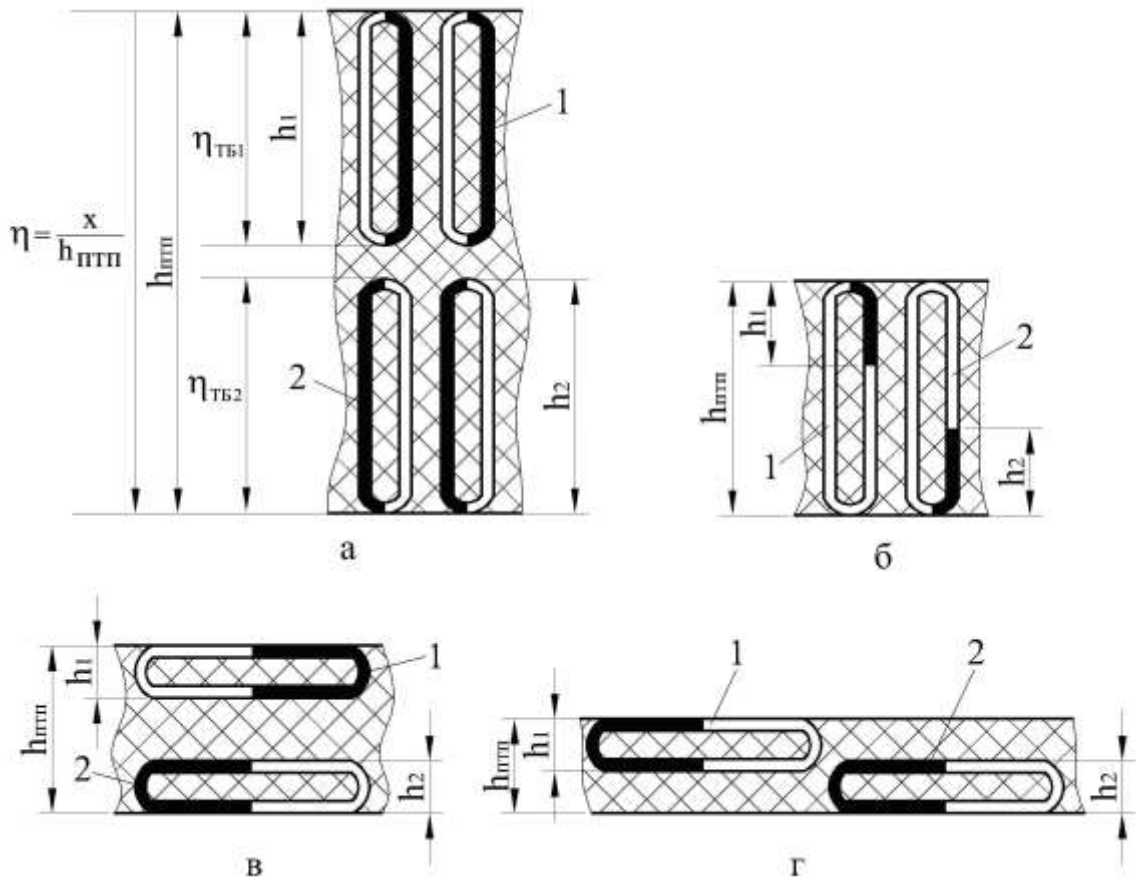
уменьшению его постоянной времени из-за увеличения общей толщины многослойного ПТП и уменьшения его эффективных теплопроводности и температуропроводности в связи с появлением дополнительных контактных сопротивлений при склейке набираемых в пакет ПТП.

Более совершенным способом коррекции инерционности ПТП является изготовление его с одной или несколькими корректирующими батареями термоэлементов (далее по тексту – ПТП_{КБ}) [231-237]. Принцип построения ПТП_{КБ} состоит в введении в конструкцию ПТП дополнительных термоэлементов, включаемых дифференциально, которые формируют сигнал, пропорциональный скорости изменения температуры определенного слоя вспомогательной стенки. Как показали исследования, ПТП_{КБ} может быть выполнен из двух слоев, то есть с количеством сечений $n = 3$, а уменьшение его инерционности не хуже, чем при наличии четырех или пяти.

Чаще всего ПТП_{КБ} выполняют из двух термобатарей: основной и корректирующей, «горячие» спаи которой размещены вблизи сечения «холодных» спаев основной термобатареи, при этом корректирующая термобатарея включена с основной дифференциально. Возможные принципиальные схемы устройства ПТП_{КБ} показаны на рисунке 3.28.

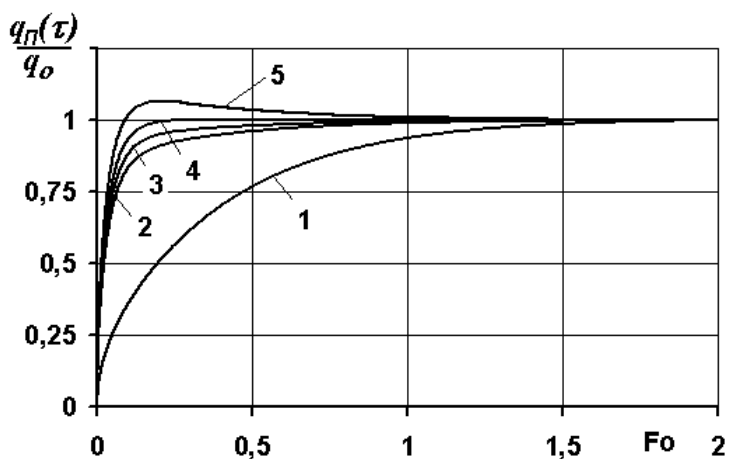
При разработке ПТП_{КБ} максимально использован опыт и элементы технологии изготовления термоэлектрических биметаллических ПТП [6, 7]. За основу конструкции ПТП_{КБ} взята традиционная лентовидная спираль из термоэлектродной проволоки с дискретно нанесенным покрытием парного термоэлектродного материала (см. рис. 1.8).

Как следует из выражений (3.19) – (3.21), для увеличения быстродействия ПТП необходимо суммировать сигналы, соответствующие разностям температуры в слоях пластины. В общем случае соотношение сигналов может быть различным. По аналогии с выражениями (3.19) – (3.21) для плотности измеряемого теплового потока, который формируется с помощью термобатарей, спаи которых расположены в сечениях $x/h = 0$, $x = \eta$, $x = 1 - \eta$ и $x = 1$ (см. рис. 3.28, б), имеем выражение:



1 – основная термобатарея, 2 – корректирующая термобатарея.

Рисунок 3.28 – Возможные принципиальные схемы устройства малоинерционного ПТП_{КБ}.



- 1 – для традиционного ПТП, то есть $n = 2, m = 0$;
- 2 – для двухслойного ПТП, то есть $n = 3, m = 0,5$;
- 3 – то же при $m = 0,56$;
- 4 – то же при $m = 0,62$;
- 5 – то же при $m = 0,705$.

Рисунок 3.29 – Зависимости относительной плотности теплового потока, измеряемой ПТП_{КБ} $q_{ИЗМ}(\tau)/q_0$ от безразмерного времени Fo для координаты $\eta = 0,5$ при вариации параметра m

$$\frac{q_{\text{ИЗМ}}(\tau)}{q_0} = (\theta(0, \tau) - \theta(\eta, \tau)) + m \cdot (\theta(0, \tau) - \theta(\eta, \tau)) - (\theta(1 - \eta, \tau) - \theta(1, \tau)), \quad (3.23)$$

где m – параметр, учитывающий вклад корректирующих термобатарей в суммарный сигнал ПТП_{КБ}.

На рисунке 3.29 представлены графически результаты вычислений по формуле (3.23) для двухслойных ПТП_{КБ}, для координаты $\eta = 0,5$ при вариации значений параметра m ($m = 0,5; 0,56; 0,62; 0,705$), которым соответствуют пять графиков (2-5). Для сравнения приведена зависимость (1) для традиционного ПТП.

Из анализа этих графиков следует, что при наличии только трех сечений (для случая $\eta = 0,5$), между которыми измеряются разности температуры, подбором числа m возможно получить результат по снижению инерционности ПТП_{КБ}, не уступающий результатам, полученным для случаев, соответствующих количеству сечений $n = 4; 5$ и более (см. рис. 3.27).

Таким образом, применение корректирующей термобатарей позволяет существенно уменьшать время реакции ПТП на тепловое воздействие. Наиболее целесообразным является применение ПТП_{КБ} в случаях, характеризующихся стационарными граничными условиями.

Для анализа возможной инерционности ПТП_{КБ} и зависимости ее от параметра m решена задача для стационарных краевых условий:

$$T(x, \tau = 0) = T_0 = \text{const} \quad - \lambda \cdot \frac{\partial T(x = 0; \tau)}{\partial x} = q_0 = \text{const}; \quad \frac{\partial T(x = h, \tau)}{\partial x} = 0.$$

Решение для температуры в этом случае имеет вид:

$$T(\eta, \tau) = T_0 + \frac{q_0 \cdot h}{\lambda} \cdot \theta(\eta, \tau), \quad (3.24)$$

$$\text{где } \theta(\eta; \tau) = Fo - \eta + 0,5\eta^2 + 1/3 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \cos(\mu_k \cdot (1 - \eta)) \cdot \exp(-\mu_k^2 \cdot Fo), \quad (3.25)$$

$$\text{при } \mu_k = k\pi, \quad A_k = (-1)^{k+1} \cdot 2/\mu_k^2. \quad \text{Для Фурье } Fo > 0,5 \quad \text{выражение} \quad (3.26)$$

упрощается и решение (3.20) принимает вид:

$$T(\eta; \tau) = T_0 + (Fo - \eta + 0,5\eta^2 + 1/3) \cdot q_0 \cdot h/\lambda. \quad (3.27)$$

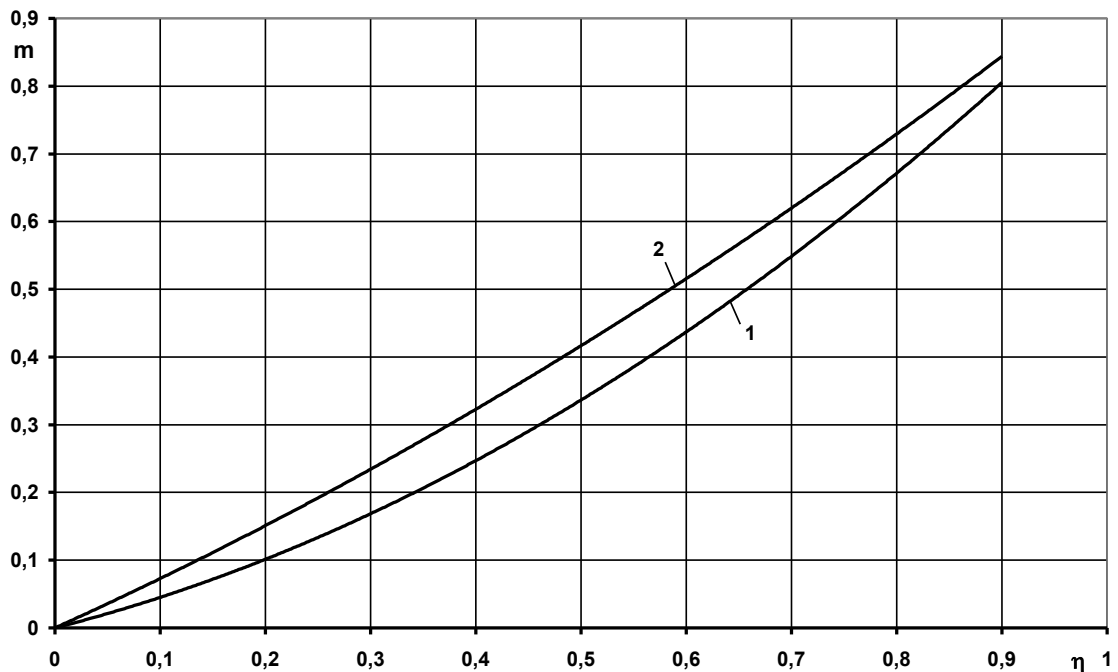
Полученная из решения этой задачи формула для определения значений параметра m имеет вид:

$$m = f(\eta) = (0,5\eta^2 - \eta + 0,5) / (1 - \eta - 0,5 \cdot (1 - \eta)^2), \quad (3.28)$$

где x – расстояние между сечениями, в которых расположены холодные спаи основной термобатареи ПТП и горячие спаи корректирующей.

Результаты счета по формуле (3.28) представлены на рисунке 3.30, при этом кривая 1 соответствует расчетным значениям параметра m , полученным по формуле (3.28), а кривая 2 дает значения параметра m , при котором обеспечивается оптимальная компенсация при математическом моделировании и которая может быть рассчитана по формуле:

$$m = 0,2612\eta^2 + 0,7027\eta. \quad (3.29)$$



1 – результаты расчета по формуле (3.28);

2 – результаты полиномиального подбора по формуле (3.29)

Рисунок 3.30 – Зависимости параметра $m = f(\eta)$ от координаты сечения

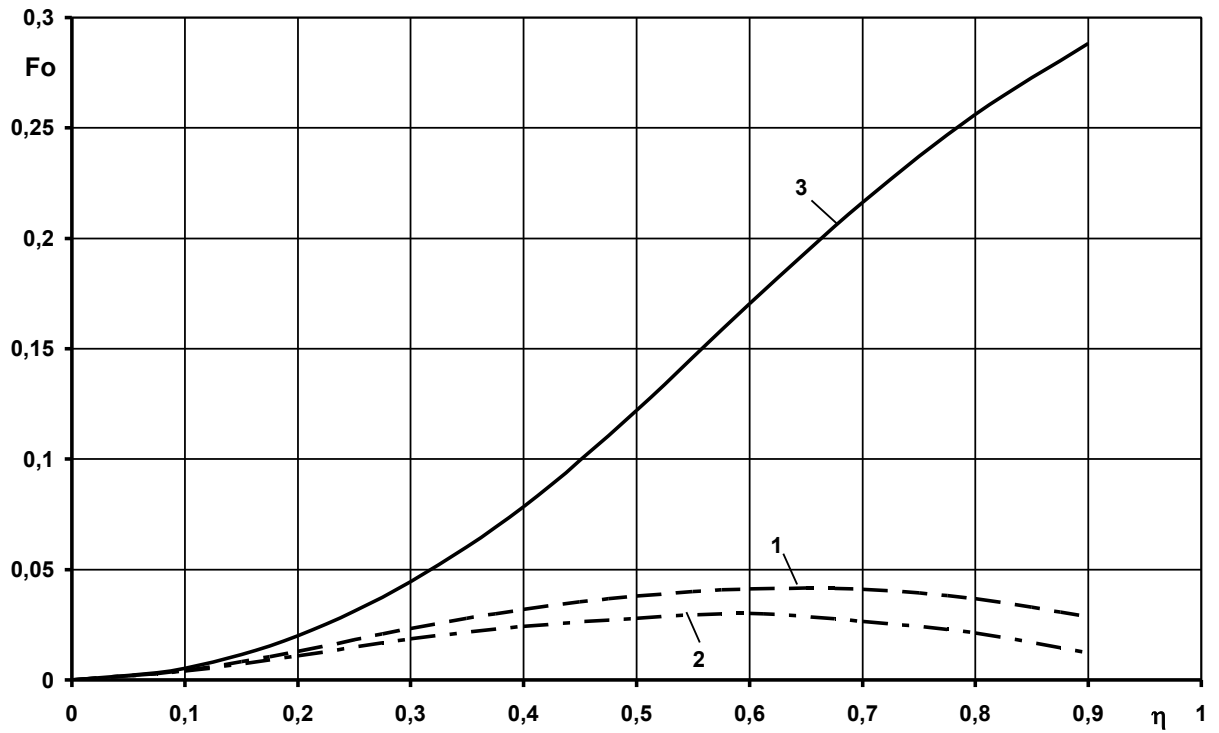
Следует учитывать, что значения параметра m , которые определяются по кривой 2, могут быть применены только к ПТП_{КБ}, устанавливаемым на термостатированную поверхность.

На рисунках 3.31 *а)* и *б)* представлены результаты счета по определению чисел Фурье, соответствующих реакции ПТП с корректирующей термобатареей на входное ступенчатое воздействие постоянным тепловым потоком по уровню $N=0,63$ (графики *а)*) и по уровню $N=0,95$ (графики *б)*). При этом графики «1» соответствуют счету для случаев с оптимальной компенсацией динамической погрешности основной термобатарей ПТП, то есть значения m взяты с кривой 1 рис. 3.30. Графики «2» соответствуют случаям с компенсацией при значениях параметра m , определенных с помощью кривой 2 рис. 3.30. Для сравнения на этих же рисунках приведены графики «3», соответствующие реакции обычного ПТП, то есть при $m=0$.

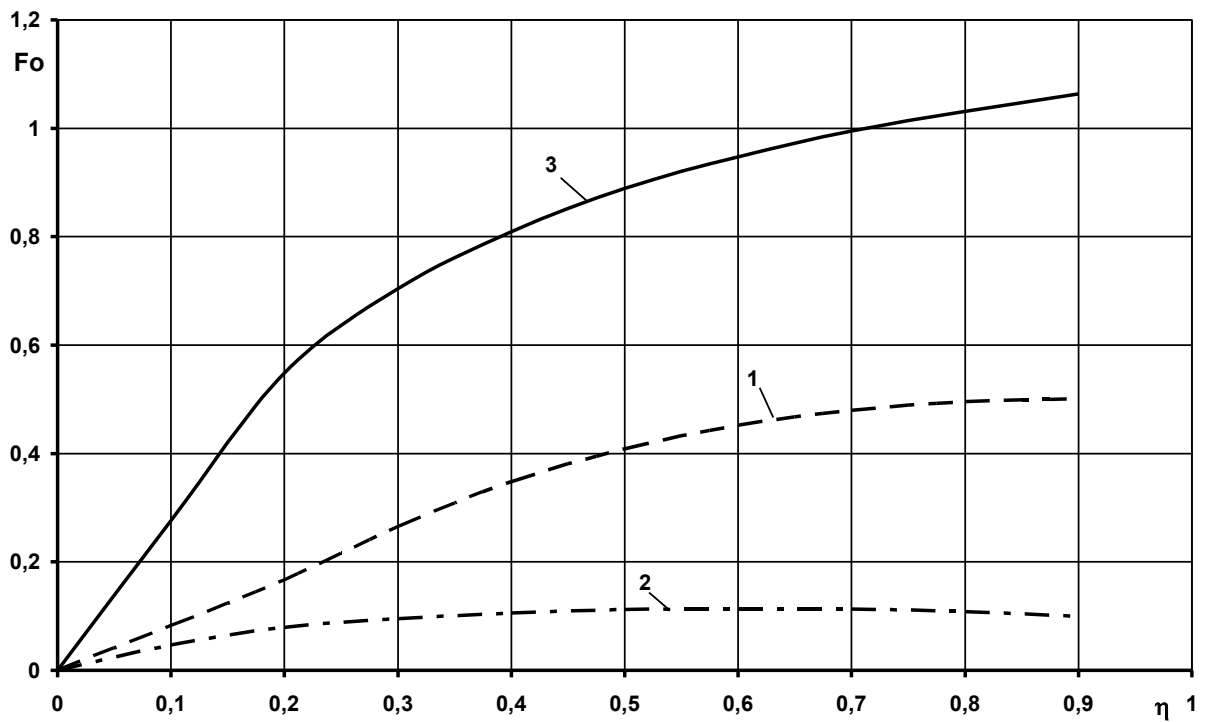
Из сопоставления графиков, приведенных на рис. 3.31 следует, что выигрыш от применения корректирующей термобатарей при значениях безразмерной координаты $\eta < 0,2$ – незначителен. Однако, в случаях обеспечения реакции ПТП с корректирующей термобатареей на тепловое воздействие по уровню $N=0,95$ (графики рис. 3.31, *б)*) видно, что введение корректирующей термобатарей дает эффект уменьшения инерционности ПТП практически для любого значения η .

Отсюда следует, что технологические требования к обеспечению определенного расстояния между сечениями, в которых должны быть размещены, соответственно, горячие спаи основной и холодные спаи корректирующей термобатарей, существенно снижаются. Однако, следует учитывать, что увеличение значения η приводит к снижению чувствительности ПТП за счет того, что при этом уменьшается доля основной термобатарей, участвующей в выработке полезного сигнала ПТП.

Кроме применения ПТП_{КБ} для измерений теплового потока при стационарных граничных условиях оказывается вполне оправданным их применение в случаях, характеризующихся нестационарными граничными



a)



б)

a – для уровня $N=0,63$, $б$ – для уровня $N=0,95$

Рисунок 3.31 – Реакция ПТП_{KB} на ступенчатое тепловое воздействие в зависимости от координаты $\eta = x/h$ для уровней $N=0,63$ и $0,95$ при вариации параметра m

условиями, например, в случаях изменения температуры поверхности, на которую установлен ПТП, или плотности теплового потока во времени.

В качестве примера рассмотрим случай применения ПТП_{КБ} для измерения плотности теплового потока на объекте, температура поверхности которого меняется по линейному закону. Для этого рассмотрена задача при следующих краевых условиях: $T(x=0; \tau) = T_0$; $T(x=h; \tau) = T_0 + b \cdot \tau$, где b – скорость изменения температуры; $\lambda \frac{\partial T(x=h; \tau)}{\partial x} = q_0$ – постоянное тепловое воздействие.

Решение этой задачи для температуры ПТП имеет вид [226, 229, 230]:

$$T(\eta; \tau) = T_0 + \theta_1(\eta; \tau) \cdot q_0 \cdot h / \lambda + \theta_2(\eta; \tau) \cdot b \cdot h^2 / a, \quad (3.30)$$

$$\text{где } \theta_1(\eta; \tau) = \frac{\lambda \cdot (T(\eta; \tau) - T_0)}{q_0 \cdot h} = \eta - \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \sin(\mu_k \eta) \cdot \exp(-\mu_k^2 \cdot Fo), \quad (3.31)$$

$$\theta_2(\eta; \tau) = \frac{a \cdot (T(\eta; \tau) - T_0)}{b \cdot h^2} = Fo - \eta - 0,5\eta^2 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{B_k}{\mu_k^2} \cdot \cos(\mu_k(1-\eta)) \cdot \exp(-\mu_k^2 \cdot Fo), \quad (3.32)$$

где $A_k = (-1)^{k+1} \cdot 2 / \mu_k^2$, $B_k = (-1)^{k+1} \cdot 2 / \mu_k$, $\mu_k = (2k-1)\pi / 2$.

Исходя из (3.30) для ПТП_{КБ} расчетная формула для относительной плотности измеряемого теплового потока через сечение $\eta = 1$ имеет вид:

$$\frac{q_{ИЗМ}(1; \tau)}{q_0} = 3 \cdot (((\theta_1(1; \tau) - \theta_1(0,5; \tau)) - \frac{1}{3}(\theta_1(0,5; \tau) - \theta_1(0; \tau))) + ((\theta_2(1; \tau) - \theta_2(0,5; \tau)) - \frac{1}{3}((\theta_2(0,5; \tau) - \theta_2(0; \tau))) \cdot b \cdot (c\rho \cdot h) / q_0), \quad (3.33)$$

где θ_1 и θ_2 – по формулам (3.31) и (3.32),

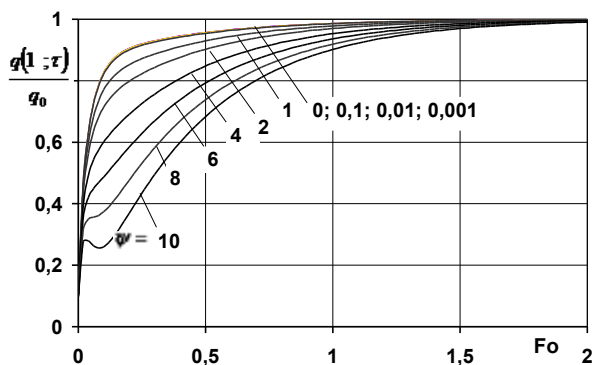
$b = \partial T / \partial \tau$ – скорость изменения температуры,

$c\rho$ – удельная объемная теплоемкость ПТП_{КБ},

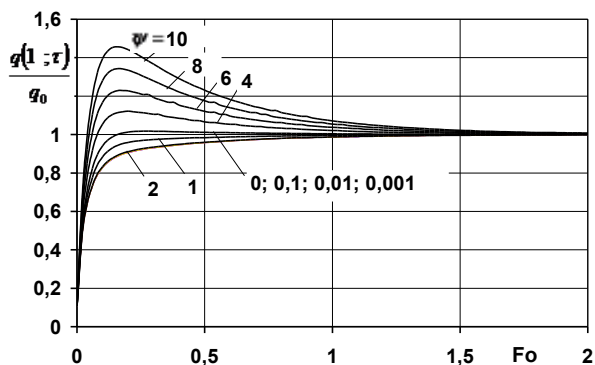
а для обычного ПТП ($n=2$) следующий:

$$\frac{q_{ИЗМ}(1; \tau)}{q_0} = (\theta_1(1; \tau) - \theta_1(0; \tau)) + (\theta_2(1; \tau) - \theta_2(0; \tau)) \cdot b \cdot (c\rho \cdot h) / q_0. \quad (3.34)$$

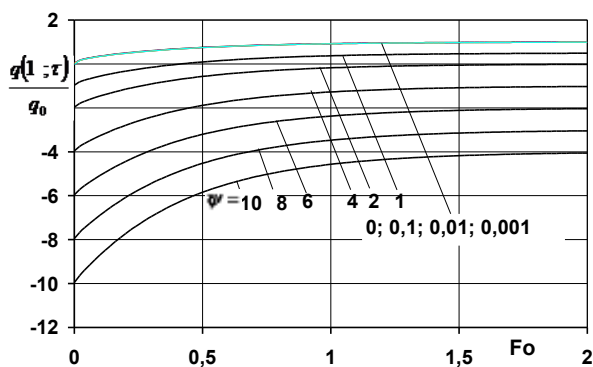
Результаты расчета по формулам (3.33) и (3.34) приведены на рисунке 3.32. На графиках **а)** и **б)** видно, что при измерении теплового потока с помощью ПТП_{КБ} значение динамической погрешности зависит не только от



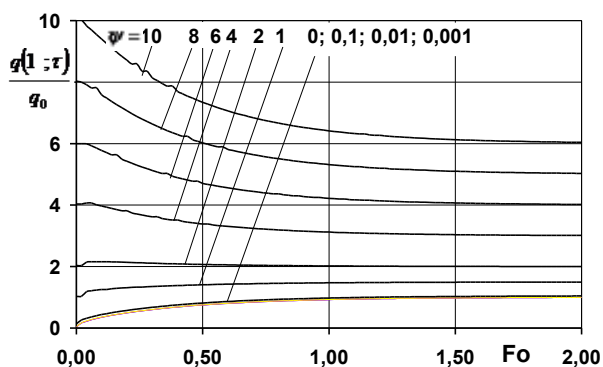
a



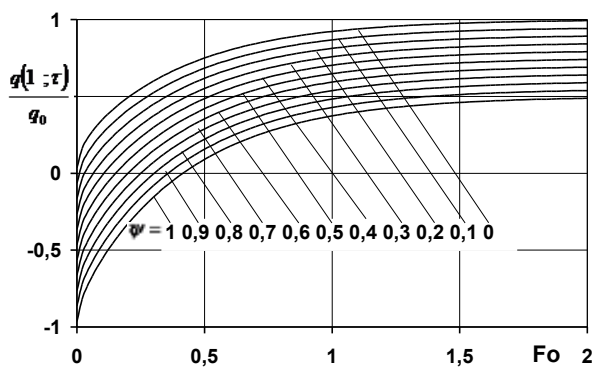
б



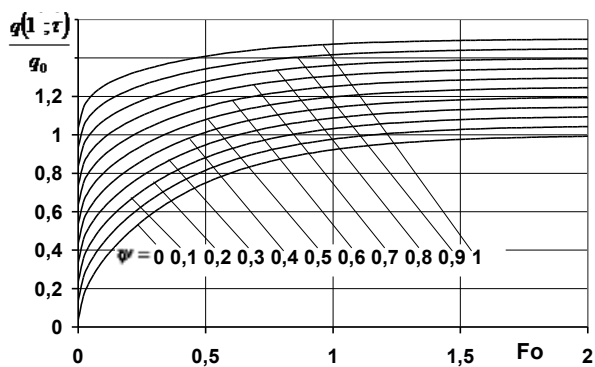
в



г



д



е

a, в, д – графики при нагреве контролируемой поверхности,

б, г, е – то же при охлаждении ($b < 0$),

a, б – графики для ПТП с корректирующей термобатареей,

в, г, д, е – графики для ПТП без корректирующей термобатареей

Рисунок 3.32 – Зависимости относительной плотности теплового потока от безразмерного времени Fo при вариации комплекса ψ

числа Фурье (то есть от времени измерения с начала теплового воздействия), но и от комплекса $\psi = b \cdot (c\rho \cdot h) / q_0$, значения которого проварьированы от 0 до 10. Если регистрация измеряемого теплового потока должна быть выполнена в первые секунды процесса, то необходимо применять такие ПТП, для которых значение комплекса $\psi < 1$. При допустимых больших временах измерения ($Fo > 2$) ПТП с любым значением комплекса ψ будет работать корректно, ибо в этом случае динамическая погрешность уже стремится к нулю. Не имеет значения, сопровождается ли процесс нагревом (скорость изменения температуры $b > 0$) или охлаждением ($b < 0$) поверхности объекта, на которой установлен ПТП_{КБ}.

Результаты, полученные для ПТП без корректирующей термобатарей, представленные на графиках *в*) и *з*) на рис. 3.32, свидетельствуют, что при всех значениях числа Фурье присутствует динамическая погрешность, причем весьма значительная. Поэтому даже при исследовании тепловых процессов с медленно меняющейся температурой поверхности необходимо предварительно определять значение комплекса ψ у применяемого ПТП, которое должно удовлетворять условию $\psi < 0,1$. У таких ПТП динамическая погрешность, хотя и присутствует, но соответствует обычным требованиям к техническим измерениям и может быть при необходимости учтена (см. графики *д*) и *е*) рис. 3.32).

Следует отметить, что традиционный ПТП при нагревании поверхности объекта может показывать тепловой поток противоположный действительному направлению. Поэтому при необходимости применять ПТП_{КБ} на поверхности объекта с переменной температурой надо учитывать влияние скорости изменения температуры и значение измеряемого теплового потока. Целесообразно применять ПТП, для которых $\psi < 0,1$.

Поскольку при натуральных обследованиях зданий и сооружений имеют место малые тепловые потоки, но значительные скорости изменения температуры поверхности, на которую устанавливают ПТП, для обеспечения

удовлетворительной точности измерений целесообразно пользоваться для определения теплотерь прибором, укомплектованным ПТП_{КБ}.

Динамические характеристики ПТП_{КБ}, применяемого для измерения теплового потока, плотность которого меняется во времени, исследованы методом математического моделирования, в основу которого положено решение задачи при таких условиях: $T(x, \tau = 0) = T_0$;

$$-\lambda \frac{\partial T(x=0, \tau)}{\partial x} = q_0 \cdot \tau; \quad T(x=h, \tau) = T_0.$$

В этом случае решение для температуры имеет вид:

$$T(\eta, \tau) = T_0 + q_0 \cdot \tau \cdot (h/\lambda) \cdot \theta(\eta, \tau), \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} \text{где: } \theta(\eta, \tau) = & \frac{4}{3} \sqrt{Fo} \cdot \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(1 + \frac{(2k-2+\eta)^2}{4Fo} \right) \cdot \exp\left(-\frac{(2k-2+\eta)^2}{4Fo}\right) - \right. \\ & \left. - \frac{2k-2-\eta}{4\sqrt{Fo}} \cdot \left(3 + \frac{(2k-2+\eta)^2}{2Fo} \right) \cdot \operatorname{erfc} \frac{2k-2+\eta}{2\sqrt{Fo}} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \left(1 + \frac{(2k-\eta)^2}{4Fo} \right) \times \right. \\ & \left. \times \exp\left(-\frac{(2k-\eta)^2}{4Fo}\right) + \frac{2k-\eta}{4\sqrt{Fo}} \cdot \left(3 + \frac{(2k-\eta)^2}{2Fo} \right) \operatorname{erfc} \frac{2k-\eta}{2\sqrt{Fo}} \right). \end{aligned} \quad (3.36)$$

Исходя из уравнения (3.36) расчетная формула для относительной плотности теплового потока, измеряемой ПТП_{КБ}, имеет вид:

$$\frac{q_{\text{ИЗМ}}(\eta=0; \tau)}{q_0 \cdot \tau} = 3((\theta(0; \tau) - \theta(0,5; \tau)) - m(\theta(0,5; \tau) - \theta(1; \tau))), \quad (3.37)$$

а для ПТП без корректирующей термобатарей:

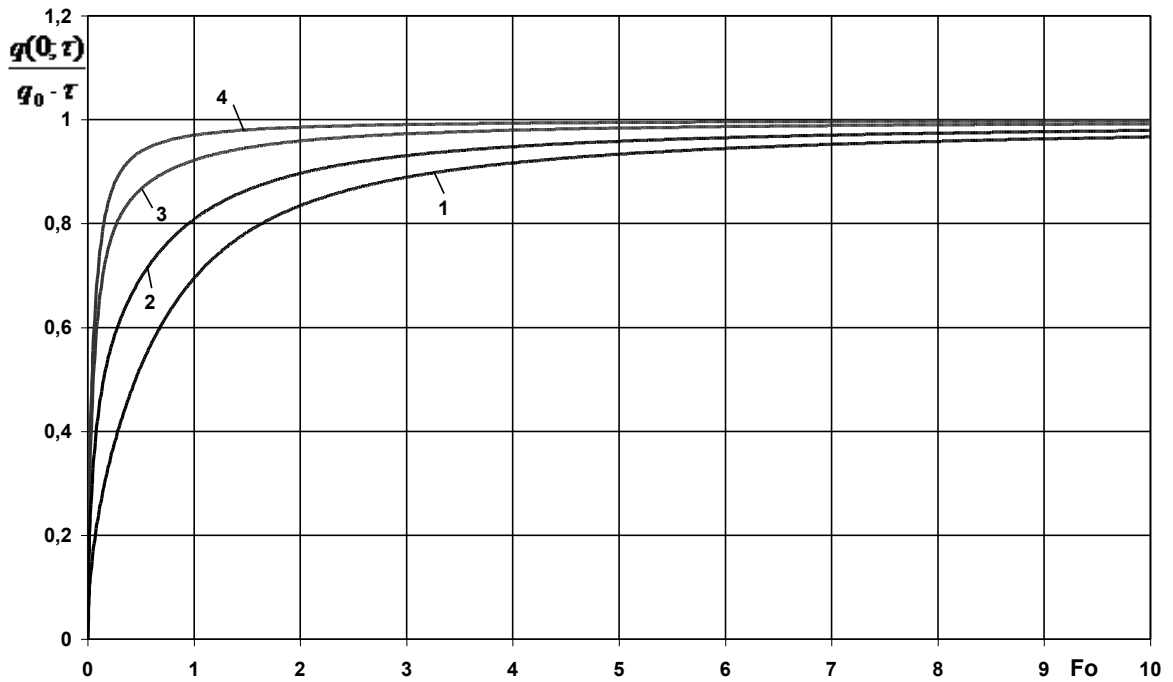
$$\frac{q_{\text{ИЗМ}}(\eta=0; \tau)}{q_0 \cdot \tau} = \theta(0; \tau) - \theta(1; \tau). \quad (3.38)$$

Результаты данного математического моделирования приведены на рисунке 3.33, при этом кривая «1» получена вычислениями по формуле (3.38), кривые «3» и «4» – по формуле (3.34), а кривая «2» – по формуле:

$$q(\eta=0; \tau)/(q_0 \cdot \tau) = 2 \cdot (\theta(0; \tau) - \theta(0,5; \tau)), \quad (3.39)$$

которая соответствует ПТП с основной термобатареей половинной высоты.

Графики рис. 3.33 показывают, что наименьшей динамической погрешностью обладают ПТП_{КБ}, для которых параметр $m=0,415$. Для времени



1 – результат вычисления по формуле (3.38); 2 – то же по (3.39)

3, 4 – по (3.28) при $m=0,33$ и $m=0,415$, соответственно

Рисунок 3.33 – Зависимости относительной плотности измеряемого теплового потока от безразмерного времени для различных ПТП

измерения, соответствующего числу Фурье $Fo > 5$, эта погрешность стремится к нулю. Несколько позже выдает результат, адекватный входному тепловому воздействию, ПТП_{КБ} при $m=0,33$ ($Fo > 8$). В то же время традиционный ПТП имеет динамическую погрешность даже при $Fo \rightarrow \infty$. Эти результаты подтверждают, что для измерения входящего теплового потока с помощью ПТП_{КБ}, установленного на термостатированную поверхность, его целесообразно устанавливать измерительный ПТП_{КБ}, его целесообразно выполнять с улучшенными динамическими характеристиками, которые могут быть обеспечены использованием значений параметра m , рассчитанных по формуле (3.28).

В приборах серии ИТП [95], наиболее распространенных для технических измерений теплотерь через ОК различных энергетических объектов, зданий и сооружений, применение ПТП_{КБ} позволяет существенно ускорить процедуру

измерения. Так как при таких измерениях приходится устанавливать ПТП на поверхности с различной шероховатостью, то между теплоотдающей поверхностью ПТП и поверхностью ОК присутствует контактное тепловое сопротивление R_K , которое может быть учтено через коэффициент теплообмена $\alpha' = 1/R_K$.

Для оценки влияния этого сопротивления на скорость выхода сигнала ПТП на установившееся значение, адекватное входному тепловому воздействию, рассмотрена задача при начальном условии: $T(x, \tau = 0) = T_0$ и следующих граничных условиях: $-\lambda \frac{\partial T(x=0, \tau)}{\partial x} = \frac{1}{R_K} (T_{\text{ПОВ}} - T_0)$, где $T_{\text{ПОВ}}$ – температура поверхности ОК; $-\lambda \frac{\partial T(x=h, \tau)}{\partial x} = \alpha(T_0 - T(h, \tau))$, где $T(h, \tau)$ – температура поверхности ПТП, контактирующей с ОС.

Решение для температуры имеет вид [231]:

$$T(\eta; \tau) = T_0 + \theta(\eta; \tau) \cdot \frac{Bi_1 + Bi_2 + Bi_1 \cdot Bi_2 \cdot (1 - \eta)}{Bi_1 + Bi_2 + Bi_1 \cdot Bi_2} \cdot (T_{\text{ПОВ}} - T_0), \quad (3.40)$$

$$\text{где: } \theta(\eta; \tau) = \frac{Bi_1 + Bi_2(1 - \eta)}{Bi_1 + Bi_2 + Bi_1 \cdot Bi_2} - \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot (\cos(\mu_k(1 - \eta)) + \frac{Bi_2}{\mu_k} \cdot \sin(\mu_k(1 - \eta))) \cdot \exp(-\mu_k^2 \cdot Fo), \quad (3.41)$$

где μ_k – корни характеристического уравнения: $ctg \mu_k = \frac{\mu_k^2 - Bi_1 \cdot Bi_2}{\mu_k \cdot (Bi_1 + Bi_2)}$;

$$A_k = \left(\left(1 + \frac{Bi_1}{Bi_2}\right) \cdot \frac{\sin \mu_k \cdot \cos \mu_k + \mu_k}{2 \sin \mu_k} + \frac{Bi_2}{\mu_k} \cdot \sin \mu_k \right)^{-1}; \quad Bi_1 = \frac{h}{\lambda \cdot R_T}, \quad Bi_2 = \frac{\alpha \cdot h}{\lambda}.$$

В этой задаче относительная плотность теплового потока при измерении её ПТП_{КБ}, выражается следующим отношением:

$$\frac{q(1, \tau)}{q(1, \infty)} = \frac{(T(1, \tau) - T(0,5, \tau)) - m(T(0,5, \tau) - T(0, \tau))}{(T(1, \infty) - T(0,5, \infty)) - m(T(0,5, \infty) - T(0, \infty))}, \quad (3.42)$$

а при измерении обычным ПТП:

$$\frac{q(1, \tau)}{q(1, \infty)} = \frac{T(1, \tau) - T(0, \tau)}{T(1, \infty) - T(0, \infty)}, \quad (3.43)$$

где $T(\eta, \tau)$ – по формуле (3.40) с учетом (3.41).

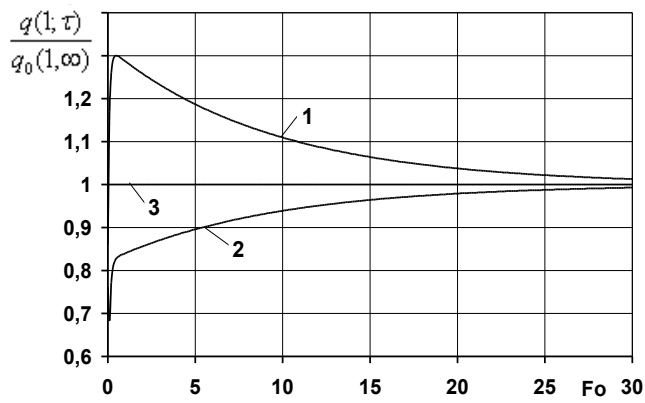
Результаты счета по формулам (3.42) и (3.43) приведены на рисунке 3.34 для случая измерений в условиях свободной конвекции ($Bi_2 = 0,01$) при вариации теплового контактного сопротивления R_K , что соответствует значениям $Bi_2/Bi_1 = \alpha \cdot R_K = 2 \cdot 10^{-2}; 1 \cdot 10^{-2}; 0,5 \cdot 10^{-2}; 0,1 \cdot 10^{-2}$.

Из графиков рис.3.34 следует, что применение ПТП с корректирующей термобатареей всегда дает выигрыш во времени по сравнению с обычным ПТП. При этом всегда следует обеспечивать при креплении ПТП на поверхности объекта минимальное контактное тепловое сопротивление, так как при плохом тепловом контакте время выхода на установившееся значение может увеличиться на порядок.

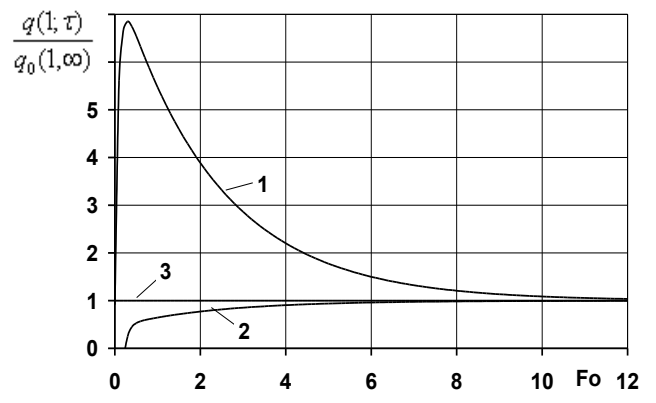
3.6 Выводы по главе 3

Предложено четыре возможных конструкции и технологии изготовления ПТП с тепловыми шунтами и температуровыравнивающими покрытиями, применение которых позволяет получать ПТП с требуемым тепловым сопротивлением в широком диапазоне его значений и выполнять измерения с большей точностью.

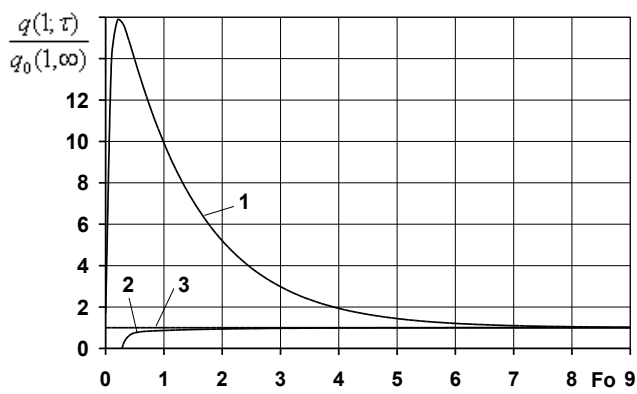
Исследовано тепловое сопротивление батарейного гальванического ПТП вида вспомогательной стенки, выполненного с тепловыми шунтами и температуровыравнивающим покрытием обеих поверхностей ПТП. Получены расчетные формулы с применением методики дробления элементарной ячейки ПТП изотермическими и адиабатными плоскостями, по которым выполнен вычислительный эксперимент.



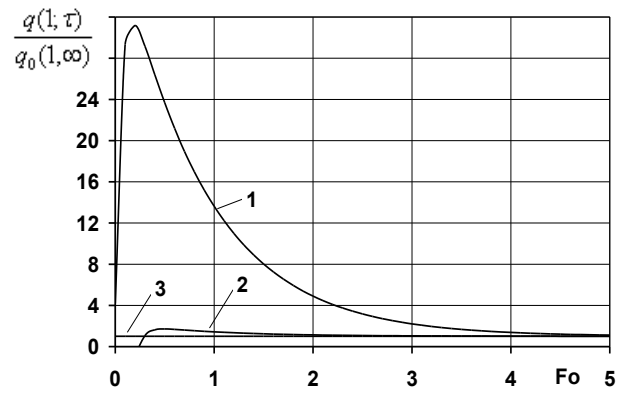
a)



b)



v)



z)

$$a - \alpha \cdot R_K = 0,1 \cdot 10^{-2}; \quad b - 0,5 \cdot 10^{-2}; \quad v - 1 \cdot 10^{-2}; \quad z - 2 \cdot 10^{-2} .$$

- 1 – измерение ПТП без корректирующей термобатарей;
- 2 – то же с корректирующей термобатарей;
- 3 – уровень, равный значению отношения $q(1, \tau)/q(1, \infty)$ при $Fo \rightarrow \infty$

Рисунок 3.34 – Зависимость отношения $q(1, \tau)/q(1, \infty)$ от безразмерного времени для $Bi_2 = 0,01$ при вариации значения комплекса $\alpha \cdot R_K$

ГЛАВА 4

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ И
ПЕРЕДАЧИ РАЗМЕРА ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА
И ЕГО ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ

В связи с тем, что в Украине ПТП имеют широкое распространение, особенно в стройиндустрии и энергетике, в сертификационных центрах и лабораториях Украины по тепловым испытаниям материалов, композиций и изделий, нельзя не признать, что в Украине вопросы метрологического обеспечения теплоточных измерений являются весьма актуальными.

Вопрос о погрешности измерений с применением плоских ПТП оставался долгое время открытым, так как каждый разработчик и производитель применяли свои методы и средства их метрологического обеспечения [123]. Как уже выше было сказано, лишь в 1989 году в СССР была утверждена Государственная поверочная схема для СИТ поверхностной плотности теплового потока (далее – плотности) в диапазоне значений от 10 Вт/м² до 2000 Вт/м² [122] с пределами допускаемых относительных погрешностей рабочих СИТ от 4 % до 10 %, формально действующая и сейчас на территории Украины по межгосударственному соглашению стран-участниц СНГ в области метрологии, стандартизации и сертификации. Однако она практически не может быть реализована по ряду причин и, главное, из-за отсутствия эталонной базы.

Метрологическая аппаратура, созданная в ИТТФ (еще в СССР) и аттестованная в ранге «исходных образцовых средств» [132, 170], обеспечивала измерение теплового потока и его плотности с помощью рабочих ПТП с погрешностью не хуже 5 %, а эталонных ПТП имели погрешность 1,5 % и 2,5 %, то есть не уступала установке высшей точности УВТ-53-А88 [162, 163] по методу определения функции преобразования, способам задания тепловых режимов, диапазонам задаваемых значений теплового потока или его плотности и интервалам рабочей температуры. К настоящему времени эта аппаратура выработала технический ресурс и морально устарела. С

возрастанием требований к уровню точности, диапазону измерения теплового потока и его поверхностной плотности, а также к пределам рабочей температуры ПТП существенно возросли требования и к эталонным СИТ для воспроизведения и передачи размера единицы измерения указанных тепловых величин. Кроме того, в настоящее время востребованный диапазон измерения плотности контактными ПТП составляет от 10 Вт/м^2 (в строительной индустрии) до $20 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$ (в ракетно-космической технике).

Все сказанное подтверждает не только необходимость, но и большую актуальность разработок метрологических установок нового поколения, включая эталонные, которые обеспечивают наивысшую для современного состояния науки, техники и технологии точность воспроизведения и передачи размера единицы теплового потока и его плотности от эталонов рабочим СИТ.

4.1 Требования к эталонной метрологической аппаратуре нового поколения и пути их выполнения

При разработке измерительной аппаратуры эталонного уровня вне зависимости от реализуемого метода измерения и способа задания и воспроизведения единицы измерения теплового потока и его плотности следует исходить из того, что главное ее назначение – обеспечить воспроизведение единицы измерения и передачу ее размера нижестоящим по поверочной схеме СИТ с наивысшей на данный момент точностью.

Таким образом, в эталонной теплотрической установке для метрологического обеспечения контактных СИТ воспроизводимый тепловой поток должен быть равномерным, однонаправленным и полностью проходящим через аттестуемый ПТП. Эти требования являются основополагающими для того, чтобы результат измерения аттестуемым ПТП $q_{\text{изм}}$ был адекватен действительному значению q_0 воспроизведенного в установке теплового потока с максимальной точностью. Практически же в известных установках (см. 1.4) реальные погрешности измерения достаточно высоки (не менее 4 %) по сравнению с точностными возможностями

электрических измерений. Причина этого кроется в наличии многих влияющих факторов, приводящих к неидентичности заданного и измеренного с помощью ПТП значений теплового потока.

К факторам, которые влияют на точность воспроизведения и передачи размера единицы плотности теплового потока при кондуктивном способе задания теплового потока, относятся контактное тепловое сопротивление между торцевыми поверхностями ПТП и соприкасающимися с ними поверхностями, источника и стока теплоты; нестабильность условий теплообмена с ОС на боковой поверхности ПТП из-за изменения температуры при прохождении теплоточного диапазона; собственное тепловое сопротивление ПТП и соотношение между эффективным поперечным размером ПТП и его высотой.

Совокупность этих влияющих факторов приводит к необходимости при разработке эталонной метрологической аппаратуры удовлетворять целому ряду требований как к устройству теплового блока установки, так и к эталонным ПТП.

Из анализа известных методов и средств градуирования плоских ПТП и опыта эксплуатации градуировочной аппаратуры следует, что наибольшими преимуществами и возможностями по обеспечению высокой точности задания и воспроизведения плотности теплового потока обладают кондуктивные установки в сочетании с абсолютным методом измерения. Исследование различных авторов [5, 36, 39, 102-110, 187, 190, 238-243] подтвердили, что наименьшие погрешности присущи именно кондуктивным установкам.

Принципиальная схема устройства для определения индивидуальной статической функции преобразования ПТП кондуктивным методом, представлена на рисунке 4.1. Согласно этой схеме устройство состоит из источника и стока теплоты, между которыми устанавливается аттестуемый ПТП с обеспечением надежного теплового контакта между их контактирующими поверхностями, форма и размеры которых должны быть одинаковыми. Одномерность теплового поля на входе в ПТП обеспечивается рядом

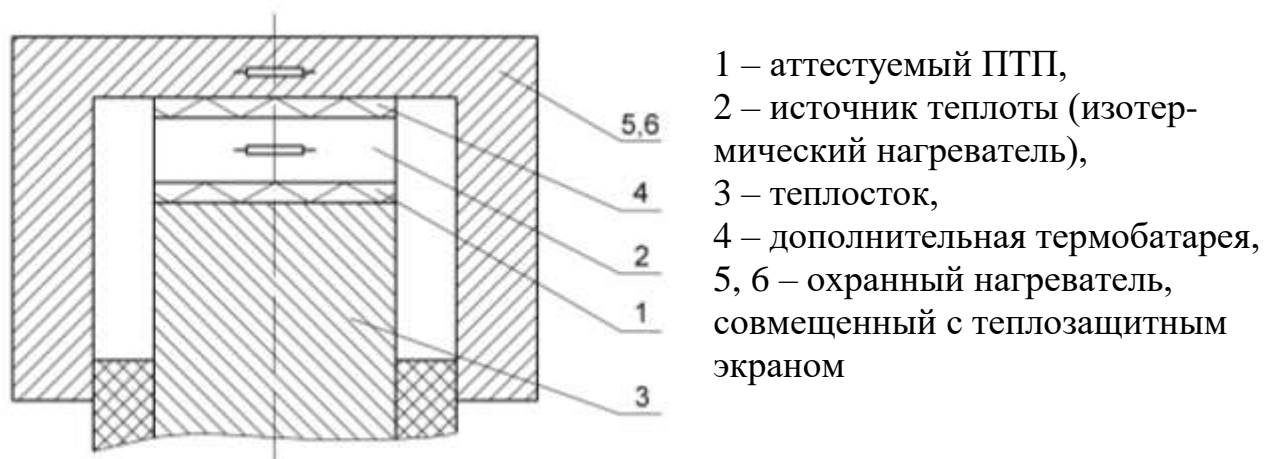


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема устройства задания одномерного теплового потока кондуктивным способом.

конструктивных и технологических решений. Так, для градуирования по плотности источник теплоты должен быть с равномерно распределенными по теплоотдающей поверхности нагревателя резистивными элементами, а по тепловому потоку – изотермическим, что достигается за счет применения температуровыравнивающих пластин из высокотеплопроводного металла по плоским поверхностям нагревателя [5]. Такие конструктивные решения источника теплоты позволяют создать в первом случае граничные условия II-го рода: $q=\text{const}$ и во втором – I-го рода: $T=\text{const}$.

Однако, технология изготовления нагревателя с равномерно распределенными резистивными элементами является весьма тонкой, низкопроизводительной и трудно воспроизводимой при тиражировании. В связи с этим были выполнены исследования [5], результаты которого показали правомочность применения изотермического нагревателя и для градуирования ПТП по плотности, хотя при этом резко возрастают требования к степени одномерности и однонаправленности теплового потока через аттестуемый ПТП и к степени однородности его теплового сопротивления [36].

Требование к обеспечению одномерности и однонаправленности теплового потока на входе в ПТП выполняется применением нагревателя, который, контактируя с тепловоспринимающей поверхностью ПТП одной плоской

поверхностью, имеет адиабатическую оболочку вокруг остальной его поверхности, а на выходе ПТП – изготовлением теплостока из высокотеплопроводного металла. Для соблюдения одномерности поля теплового потока внутри ПТП он должен иметь однородное тепловое сопротивление.

Адиабатные условия по не контактирующей с ПТП поверхности нагревателя, задающего тепловой поток, можно создать с помощью охранного нагревателя, компенсирующего ту долю теплового потока, которая уходит в противоположную от ПТП сторону. Для измерения этой доли с целью контроля качества адиабатизации можно дополнительно воспользоваться вспомогательной термобатареей в качестве нуль-индикатора, или источника информации для определения поправки на недорегулирование мощности охранного нагревателя.

Строгая адиабатизация нерабочих поверхностей основного нагревателя в совокупности с теплозащитными экранами, предотвращающими тепловые потери по боковой поверхности всей сборки, позволяет создать условия для корректного применения абсолютного метода определения функции преобразования аттестуемого ПТП.

Обязательным элементом комплекта эталонной измерительной установки является эталонный ПТП (далее – *ПТП_э*). Он выполняет функции хранения единицы измерения и, при необходимости, передачи ее размера рабочим ПТП в установках компараторного типа.

Как уже отмечалось выше, первое требование к *ПТП_э* состоит в идентичности формы и размеров тепловоспринимающей и теплоотдающей поверхностей *ПТП_э* и поверхностей посадочного места в градуировочной головке установки. Во-вторых, *ПТП_э* должен иметь однородное тепловое сопротивление для исключения локальных искажений теплового потока в нем, а также приняты меры, препятствующие искажениям поля теплового потока на границе чувствительного элемента *ПТП_э*. Проще всего это достигается изготовлением *ПТП_э* с охранной зоной по периметру чувствительного элемента, при этом охранная зона должна быть изготовлена из таких же

материалов и по той же технологии, что и термобатарея ПТТЭ.

Путем принятия определенных решений при конструировании установки могут быть созданы предпосылки по обеспечению одномерности и однонаправленности теплового потока через аттестуемый ПТП. Решить же вопрос об идентичности измеренного и заданного значений теплового потока без аналитического исследования влияющих факторов практически невозможно.

Аналитическое исследование [34, 36, 39, 40] возможных методических погрешностей воспроизведения и передачи размера единицы плотности теплового потока в кондуктивной метрологической установке (см. рис. 4.1) выполнено путем решения задачи о передаче теплоты через ПТП, помещенный в тепловой блок установки, с использованием известного уравнения теплопроводности [6, 7] при соответствующих граничных условиях. Схема физической модели задачи приведена на рисунке 4.2.

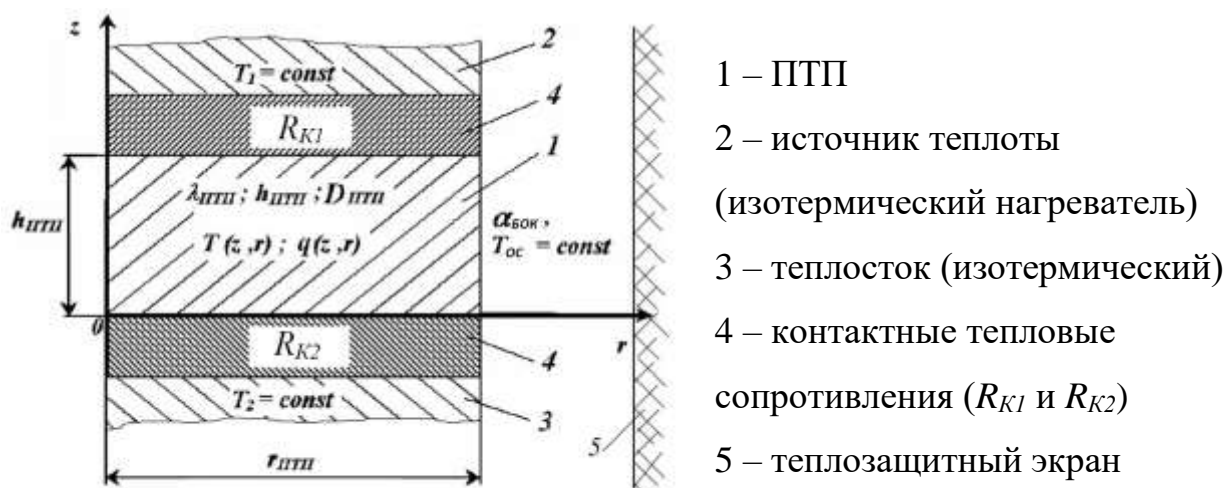


Рисунок 4.2 – Схема физической модели ПТП, помещенного в кондуктивную измерительную установку

Сформулированная задача направлена на определение стационарного осесимметричного распределения теплового потока в ПТП, представляющем собой ограниченный короткий цилиндр высотой $h_{ПТП}$ и диаметром $D_{ПТП} = 2r_{ПТП}$ [188, 238, 243, 245]. В сечениях $z = 0$ и $z = h_{ПТП}$, соответствующих торцам ПТП, заданы тепловые сопротивления R_{K1} и R_{K2} , которые обусловлены контактным сопротивлением между каждым торцом ПТП и соприкасающейся с ним

поверхностью источника и стока теплоты, которые имеют в общем случае постоянные неодинаковые температуры T_1 и T_2 . Между боковой поверхностью цилиндра и теплозащитным экраном происходит теплообмен через газовую прослойку постоянной температуры T_{OC} с эффективным коэффициентом теплообмена α , то есть с тепловым сопротивлением теплообмену на боковой поверхности $R_{БОК} = 1/\alpha_{БОК}$.

При условии осевой симметрии и независимости ТФС ПТП от температуры стационарное распределение температуры в массиве ПТП $T(z,r)$ описывается уравнением теплопроводности (2.1.6) в безразмерных цилиндрических координатах $\zeta = z/h_{ПТП}$, $0 \leq \zeta \leq 1$; и $\rho = r/r_{ПТП}$, $0 \leq \rho \leq 1$ при $K = D_{ПТП}/h_{ПТП}$ и граничных условиях (2.1.7) на торцевых и боковой поверхностях ПТП с учетом того, что $R_{ПТП}/R_{\alpha,ВЕРХ} = R_{ПТП}/R_{K1}$ на верхней поверхности ($\zeta = 1$) и $R_{ПТП}/R_K = R_{ПТП}/R_{K2}$ на нижней ($\zeta = 0$), а число $Bi_{бок} = \alpha_{бок} \cdot r_{ПТП}/\lambda_{ПТП}$ при $\rho = 1$. Далее принято, что $R_{K1} = R_{K2} = R_K$. Исходя из того, что дифференциальное уравнение (2.1.6) линейно, для его решения применены методы разделения переменных и интегральных преобразований (см. подраздел 2.1 и приложение В).

Анализ влияющих факторов на степень адекватности измеренного $q_{ИЗМ}$ и действительного q_0 значений выполнен с использованием теплоточного критерия степени искажения плотности среднеинтегрального теплового потока:

$K^q = q_{ИЗМ}/q_0$, выражение для которого имеет вид:

$$K_{CP}^q = (1 + R_{K1}/R_{ПТП} + R_{K2}/R_{ПТП}) \cdot q_{CP}/\Delta\mathcal{G}, \quad (4.1)$$

где: q_{CP} – см. (2.1.11), $\Delta\mathcal{G} = \mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_2$.

С использованием формулы (4.1) выполнены вычислительные эксперименты при вариации некоторых параметров. Полученные результаты систематизированы в таблицах 4.1-4.4

В таблице 4.1 даны результаты счета по формуле (4.1) в виде графиков, относительного радиуса $r/h_{ПТП}$ в сечениях $\zeta=1$ и $\zeta=0$, соответствующих торцам

Таблица 4.1 – Распределение приведенной плотности среднеинтегрального по поверхности ПТП теплового потока на входе и выходе в зависимости от относительного текущего радиуса при вариации

геометрического параметра ПТП, температуры отнесения и контактного теплового сопротивления в отсутствие теплообмена на боковой поверхности

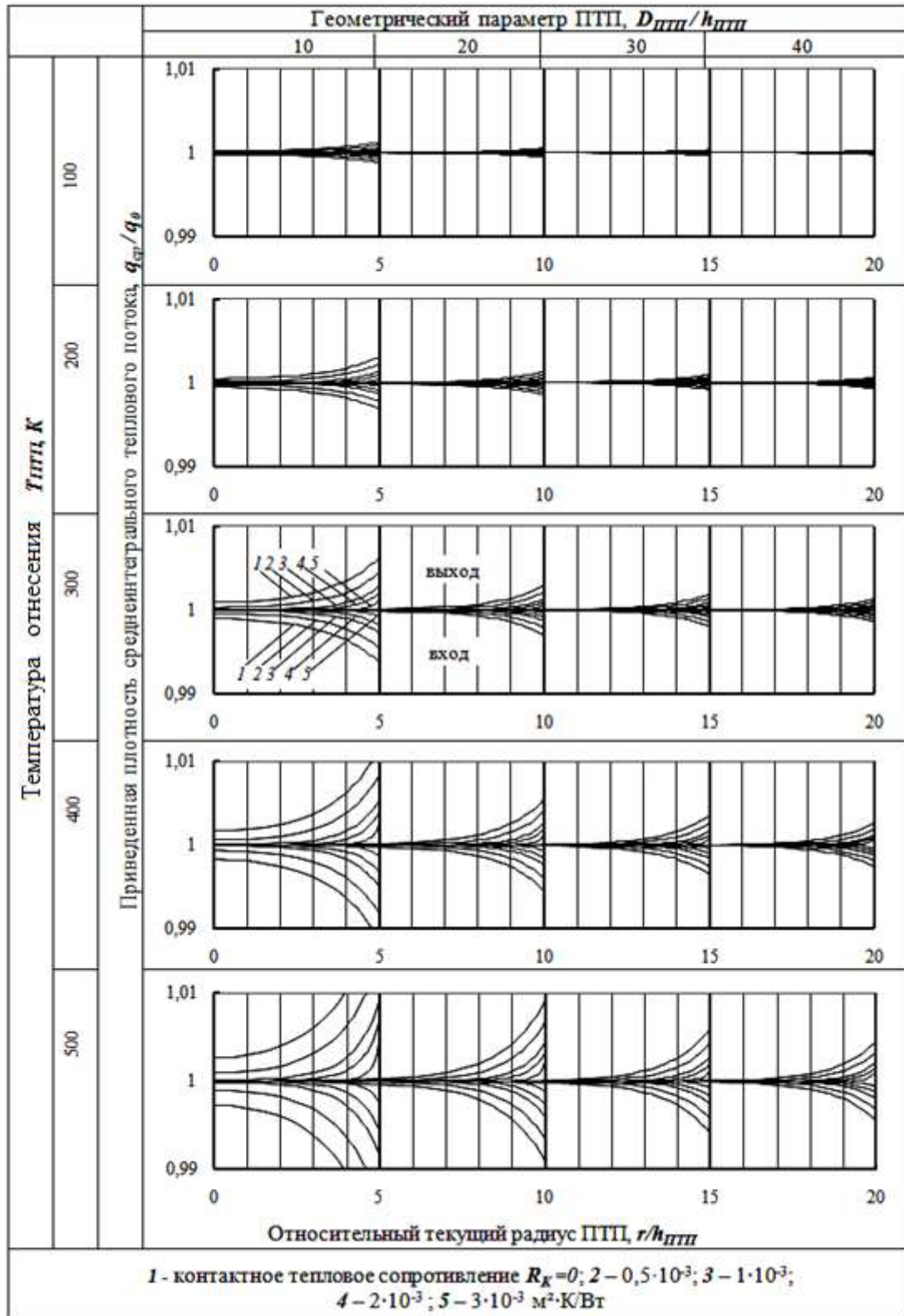


Таблица 4.2 – Распределения приведенной плотности среднеинтегрального по поверхности ПТП теплового потока на входе и выходе в зависимости от относительного текущего радиуса при вариации геометрического параметра ПТП, контактного и бокового тепловых сопротивлений

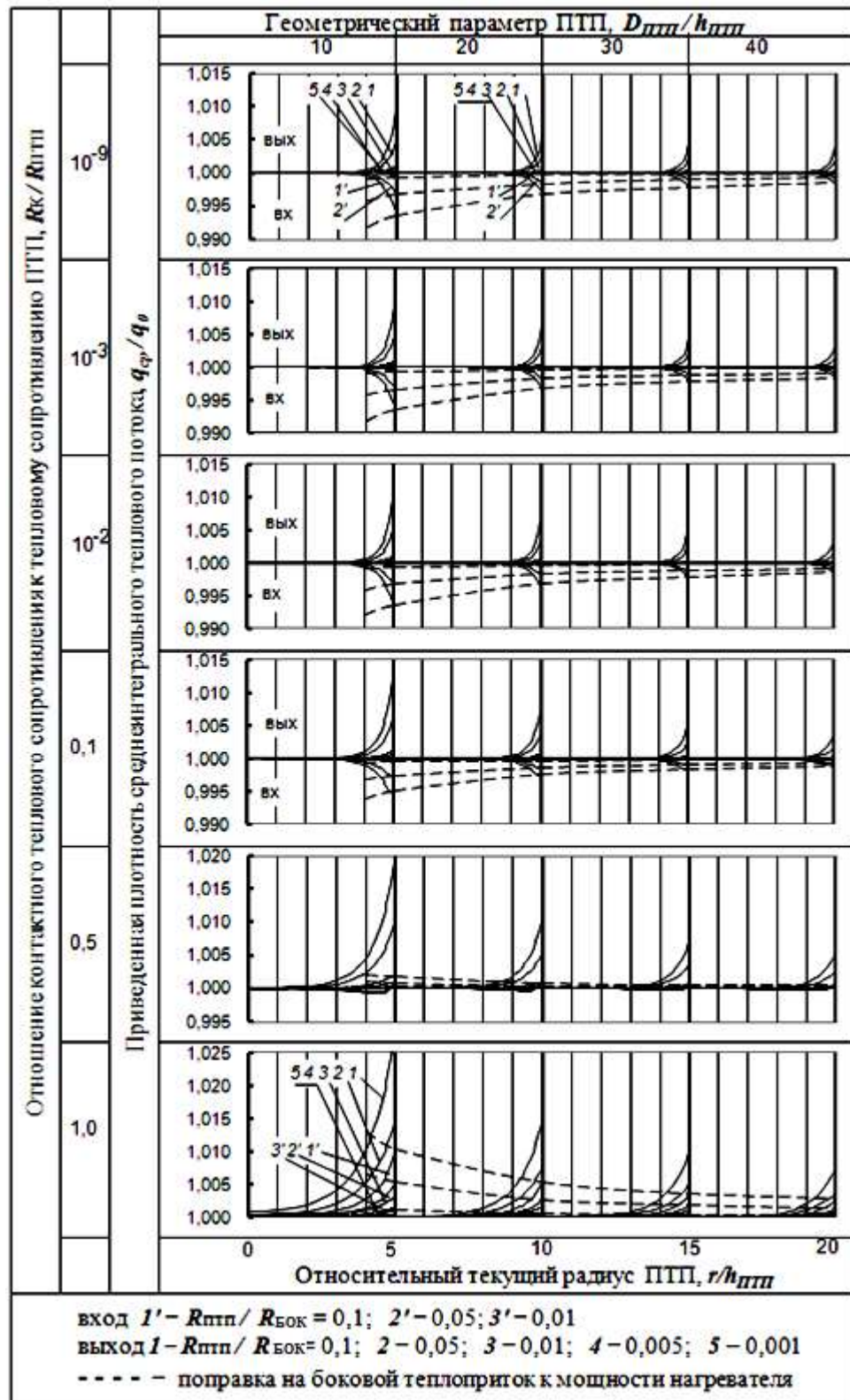


Таблица 4.3 – Распределения приведенной плотности среднеинтегрального по поверхности ПТП теплового потока в зависимости от относительного текущего радиуса при вариации геометрического параметра ПТП, температуры отнесения и контактного теплового сопротивления при относительной высоте

термобатареи $h_{ТБ}/h_{ПТП} = 0,8$ (при условии заполнения газом рабочего объема устройства)

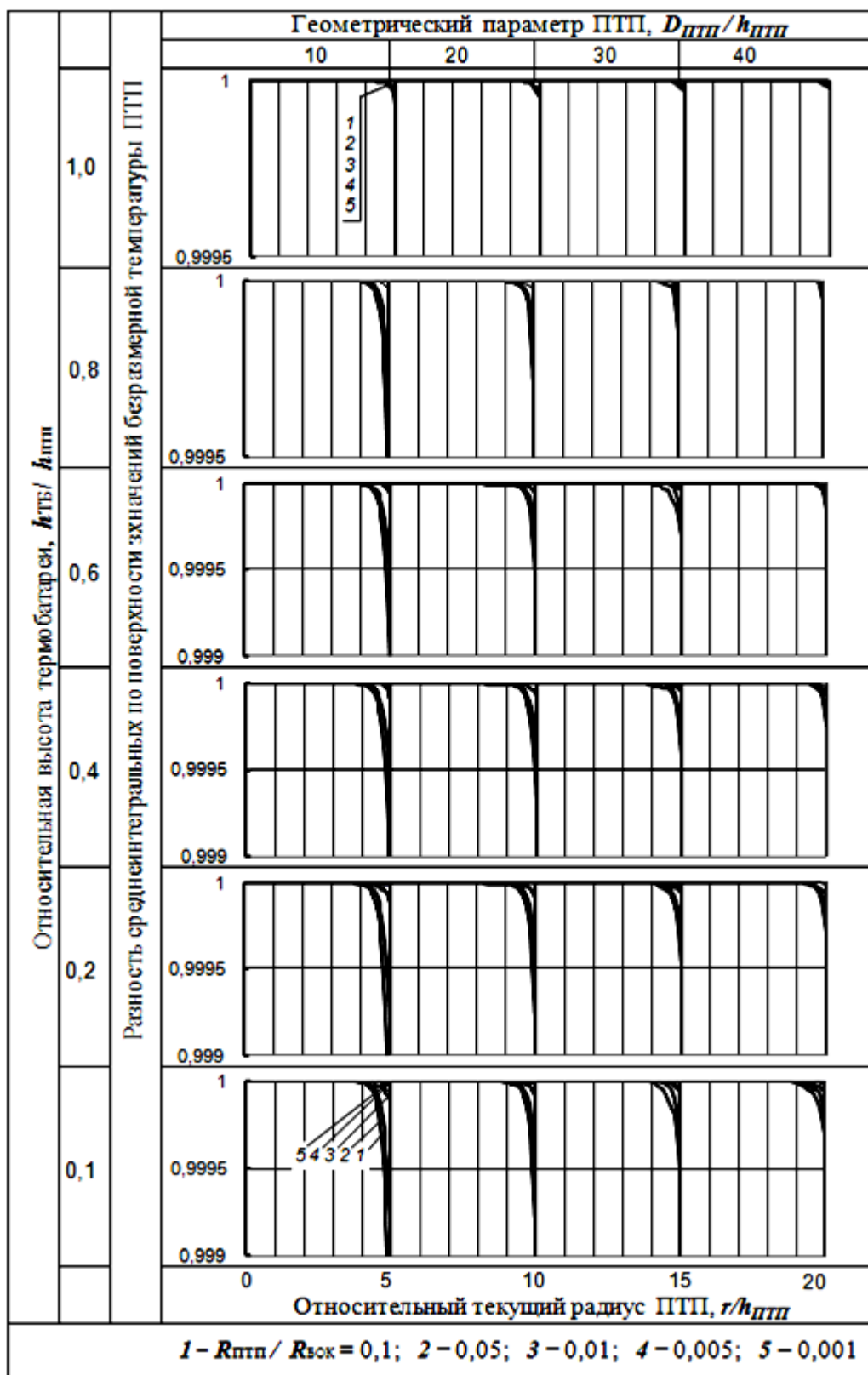
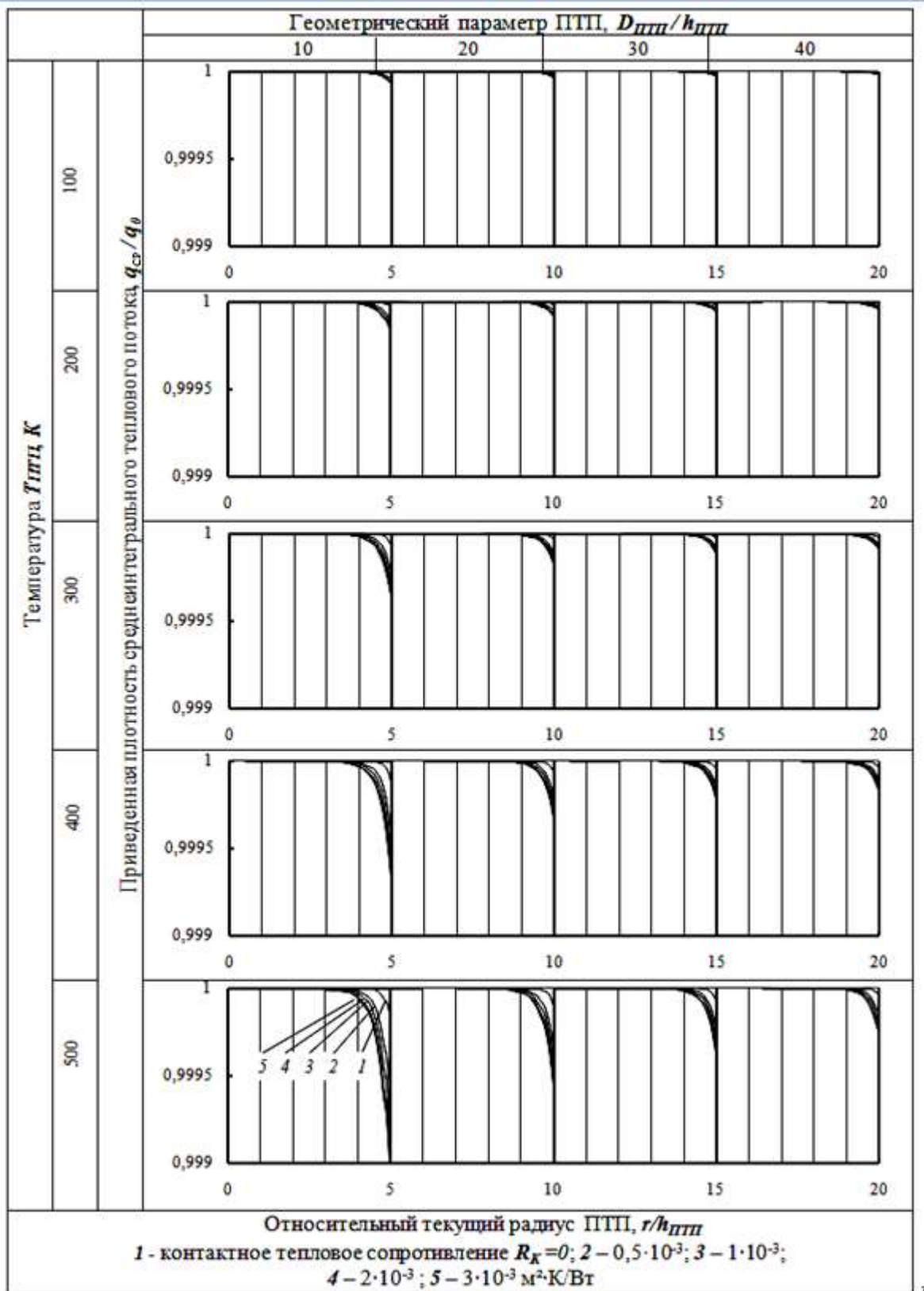


Таблица 4.4 – Распределения приведенной плотности среднеинтегрального по поверхности ПТП теплового потока на выходе из ПТП в зависимости от относительного текущего радиуса при вариации геометрического параметра ПТП, температуры соотнесения и контактного теплового сопротивления при

относительной высоте термобатареи $h_{ТВ}/h_{ПТП} = 0,8$ и условия вакуума в рабочем объеме устройства



представляющих распределения приведенной по поверхности ПТП плотности среднеинтегрального теплового потока q_{CP}/q_0 в зависимости от текущего радиуса ПТП («Вход») и («Выход»), для случая отсутствия бокового

теплообмена. Варианты расчетов обозначены в таблице и отражают вариацию геометрического параметра ПТП: $D_{ПТП}/h_{ПТП} = 10; 20; 30; 40$; контактного теплового сопротивления $R_K = 0,5 \cdot 10^{-3}; 1 \cdot 10^{-3}; 2 \cdot 10^{-3}$ и $3 \cdot 10^{-3}$ м²·К/Вт и температуры отнесения $T_{ПТП} = 100; 200; 300; 400$ и 500 К. Эти результаты показывают, что искажения теплового потока далее пяти толщин ПТП в глубину от боковой поверхности не проникают. Если ПТП_Э выполнить с охранной зоной, ширина которой не меньше пяти толщин ПТП, то методическая погрешность, обусловленная искажениями теплового потока, может быть оценена в 0,1 % и менее, что практически может не учитываться.

В таблице 4.2 представлены аналогичные результаты счета с учетом теплообмена в газовой прослойке между боковой поверхностью ПТП и теплозащитным экраном при $T_{OC}=300$ К. Учет теплового сопротивления сделан в безразмерной форме через отношения $R_{ПТП}/R_{БОК}$ и $R_K/R_{ПТП}$. Как следует из графиков, поле теплового потока обладает одномерностью в центральной зоне и зависит не только от условий теплообмена на боковой поверхности ПТП, но и от его геометрического параметра и ТФХ. Расширению этой зоны способствует выполнение ПТП с охранной зоной вокруг чувствительного элемента. Эти графики позволяют производить выбор эффективных размеров охранной зоны и термобатареи ПТП и его теплопроводности. С увеличением коэффициента теплопроводности ПТП и геометрического параметра $D_{ПТП}/h_{ПТП}$ зона одномерности теплового потока расширяется. Из этой же таблицы следует, что в некоторых конкретных случаях нет необходимости добиваться минимальных значений контактного или бокового теплового сопротивления.

На графиках таблицы 4.2 пунктиром показаны поправки, учитывающие влияние боковых теплопритоков к мощности основного нагревателя. Эта поправка в зависимости от теплового сопротивления в газовой прослойке между боковой поверхностью ПТП и защитным экраном может достигать 0,5%. Минимизировать ее можно путем увеличения геометрического параметра ПТП и поддержания отношения $R_K/R_{ПТП}$ на уровне 0,5 и ниже, при котором эта поправка не превышает 0,1%.

Следует еще принять во внимание, что сигнал чувствительного элемента ПТП вида вспомогательной стенки соответствует плотности среднеинтегрального теплового потока и по поверхности чувствительного элемента, и по высоте. В связи с этим выполнен вычислительный эксперимент, результаты которого представлены в таблицах 4.3 и 4.4.

Приведенная среднеинтегральная плотность рассчитана по разности значений температуры тепловоспринимающей и теплоотдающей поверхностей ПТП для двух возможных вариантов эксперимента: при заполненном газом (табл. 4.3) или вакуумированном (табл. 4.4) рабочем объеме градуировочного устройства. Их анализ подтверждает, что сигнал ПТП вида вспомогательной стенки соответствует среднеинтегральному значению по поверхности и высоте чувствительного элемента. Влияние теплообмена по боковой поверхности ПТП в этом случае значительно меньше, чем при рассмотрении отдельно входящего и выходящего теплового потока. Зона распространения искажений теплового поля не превышает двух толщин ПТП в самом неблагоприятном случае (при максимальной интенсивности теплообмена по боковой поверхности ПТП, что имеет место при высоких значениях температуры).

С увеличением коэффициента теплопроводности и геометрического параметра ПТП зона одномерности теплового потока по поверхности ПТП существенно расширяется. Кроме того, следует учитывать, что в ПТП разность температуры измеряется термоэлементами, спаи которых расположены в заливочном компаунде на определенной глубине от наружных поверхностей ПТП, как показано на рис. 2.3. Там же приведены результаты исследования распределения плотности теплового потока на выходе из термобатареи в зависимости от относительного текущего радиуса ПТП при вариации относительной высоты термобатареи $h_{ТВ}/h_{ПТП}$ (см. табл. 2.2 - 2.4).

Эти результаты справедливы и для рассматриваемой задачи при условии замены R_α на R_K между нагревателем и ПТП. Основной вывод из этих результатов состоит в том, что толщина внешних защитных слоев по обе стороны термобатареи, вмонтированной в ПТП, не влияет на краевой эффект.

4.2 Метрологическая установка нового поколения для воспроизведения размера единицы плотности теплового потока (УВТ-1)

При отсутствии в Украине Государственного эталона единицы измерения теплового потока и его плотности метрологическая установка для воспроизведения, хранения и передачи размера единицы соответствующей физической величины с наивысшей на данный момент развития науки, техники и технологии точностью измерения может быть согласно Закону Украины о метрологической деятельности [169] аттестована в статусе Первичного эталона, даже если она разработана не в организации системы Госстандарта.

Проведенные аналитические исследования по созданию метрологической аппаратуры нового поколения для обеспечения единства и достоверности измерения поверхностной плотности теплового потока, отвечающей современному уровню требований к точностным характеристикам [31, 33, 34, 36, 39, 40] показали, что имеются резервы повышения точности метрологических работ в области теплоточных измерений. Результаты исследования пространственных искажений полей теплового потока при различных соотношениях размеров и характеристик ПТП, условий теплообмена и взаимного расположения ПТП и объекта контроля (ОК), методов поддержания граничных условий теплообмена, а также применение современных теплоизоляционных материалов, методов активной адиабатизации и усовершенствованных систем регулирования тепловых режимов в измерительных установках позволили добиться уменьшения погрешности задания и воспроизведения плотности теплового потока в 1,5 – 2 раза и разработать метрологическую установку нового поколения – УВТ-1, которая по точности измерения соответствует современному эталонному уровню [246]. На настоящий момент в Украине уже имеется эталонное СИТ, состоящее из эталонной измерительной установки и набора ПТП_э, входящих в ее состав и предназначенных для хранения единицы измерения плотности теплового потока и передачи ее размера аттестуемым и поверяемым рабочим

ПТП и другим измерителям теплового потока посредством кондуктивного и радиационного компарирования [247-250].

4.2.1 Устройство и принцип действия установки

Установка УВТ-1 представляет собой блочно-модульный компьютеризированный комплекс, состоящий из теплового и электронного блоков и персонального компьютера (ПК) с соответствующим программным обеспечением (ПО). Внешний вид установки представлен на рисунке 4.3.

В установке УВТ-1 реализован абсолютный метод определения индивидуальной статической функции преобразования ПТП в температурном диапазоне при кондуктивном способе подведения заданного значения плотности теплового потока, при этом тепловой поток через ПТП является однонаправленным и одномерным. Эту задачу выполняет тепловой блок, принципиальная схема которого приведена на рис. 4.1, а конструктивные схемы – на рисунке 4.4.

Центральным узлом теплового блока является градуировочная головка (см. рис. 4.4 б), которая содержит основной электрический нагреватель, вспомогательный преобразователь ПТП_В, состоящий из двух идентичных термобатарей ПТП_{В1} и ПТП_{В2}, конструктивно совмещенных в одном элементе, и охранный нагреватель, корпус которого выполнен из высокотеплопроводного металла в виде единого узла с боковым экраном.

Для исключения влияния на тепловое поле аттестуемого ПТП_Э внешних факторов боковая поверхность градуировочной головки окружена теплозащитным экраном. В узел теплозащитного экрана входит нагреватель, термометр сопротивления ТСЗ (элемент системы регулирования подаваемой на него мощности) и термопара ПТ6 (для контроля температуры этого экрана), то



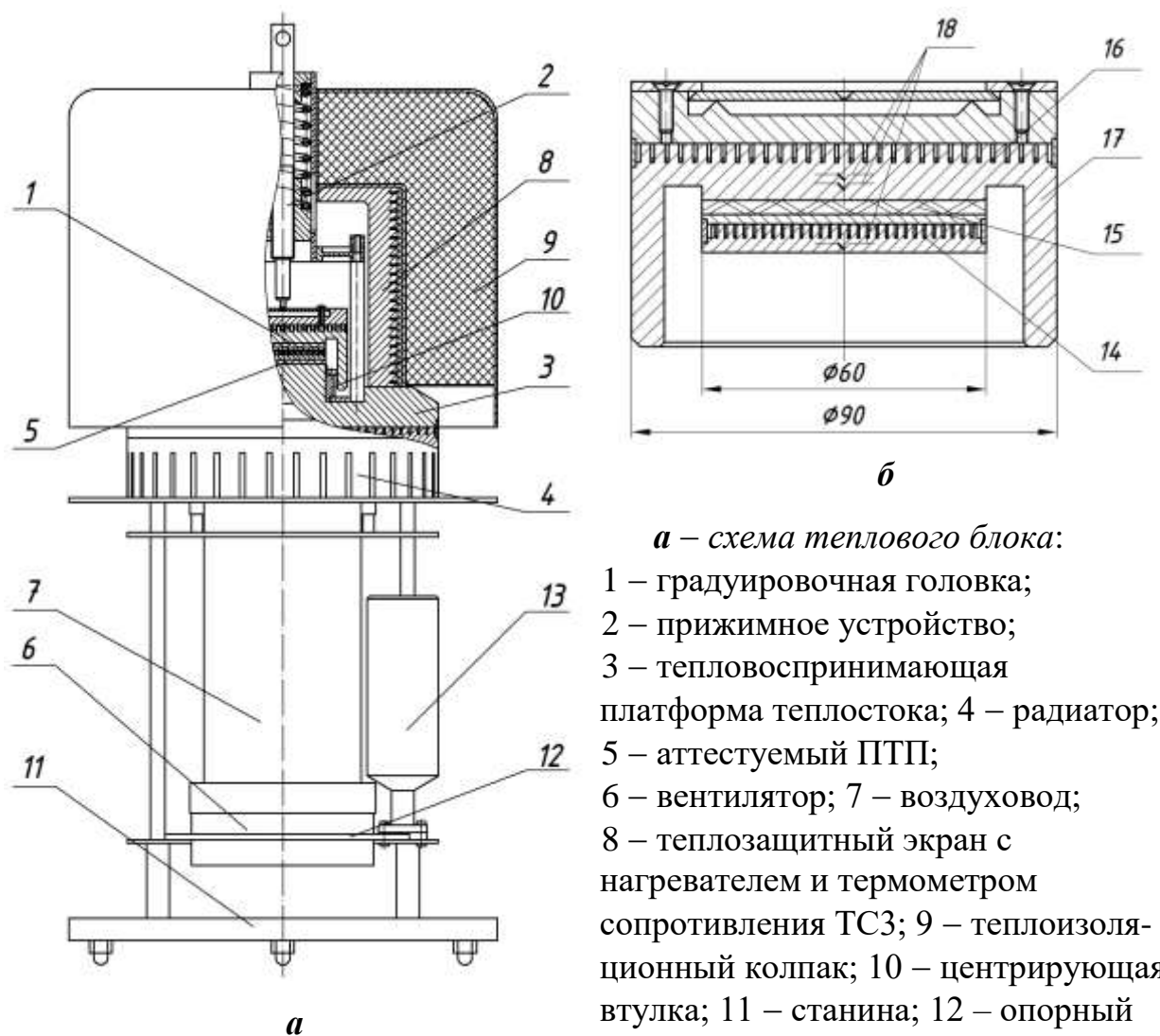
а)



б)

а – эталонная установка УВТ-1; *б* – эталонные преобразователи ПТП_э

Рисунок 4.3 – Внешний вид метрологической установки УВТ-1



а – схема теплового блока:

- 1 – градуировочная головка;
- 2 – прижимное устройство;
- 3 – тепловоспринимающая платформа теплостока;
- 4 – радиатор;
- 5 – аттестуемый ПТП;
- 6 – вентилятор; 7 – воздуховод;
- 8 – теплозащитный экран с нагревателем и термометром сопротивления ТСЗ;
- 9 – теплоизоляционный колпак;
- 10 – центрирующая втулка;
- 11 – станина;
- 12 – опорный фланец;
- 13 – устройство термостатирования термопар;

б – схема градуировочной головки:

- 14 – градуировочный нагреватель;
- 15 – термобатареи вспомогательного ПТПВ, конструктивно совмещенные в одном элементе;
- 16 – охранный нагреватель;
- 17 – температуровыравнивающий экран;
- 18 – термопары ПТ1, ДПТ2 и ПТ2 (сверху вниз)

Рисунок 4.4 – Конструктивные схемы теплового блока и градуировочной головки установки УВТ-1.

есть в тепловом блоке используется активная теплоизоляция для предотвращения боковых тепловых потерь (притоков) градуировочной головки.

В собранном состоянии конструкция теплового блока сверху закрыта теплоизоляционным колпаком. Тепловой блок установлен на станине, где также расположена плита с клеммами, к которым подключают кабели: измерительный и соединительный с электронным блоком установки УВТ-1. На опорном фланце смонтирован также тепловой блок узла термостатирования опорных спаев термопар (УТОС). Входящие в УТОС нагреватель и термометр сопротивления ТС2 являются элементами системы автоматического регулирования температуры УТОС на установленном уровне.

Аттестуемый ПТП помещают в зазор между основным нагревателем и теплопринимающей платформой теплостока. Воспринятая теплостоком теплота отводится посредством радиатора по воздуховоду вентилятором 7. Хороший воспроизводимый тепловой контакт обеспечивают прижимным устройством 2 с применением контактной смазки.

Одномерность и однонаправленность теплового потока через ПТП обеспечены тем, что поверхность нагревателя 14, не контактирующая с теплопринимающей поверхностью ПТП, адиабатизирована. Одномерность теплового потока на выходе ПТП обеспечена изготовлением теплопринимающей платформы 3 теплостока из высокотеплопроводного материала, а для соблюдения одномерности поля теплового потока внутри ПТП он выполнен с равномерным тепловым сопротивлением за счет изготовления ПТП с охранной зоной такой же структуры, что и зона термобатарей ПТП.

Адиабатные условия по поверхности задающего тепловой поток нагревателя, не контактирующей с ПТП, создаются работой охранного нагревателя, компенсирующего ту долю теплового потока, которая уходит в противоположную от ПТП сторону. Тепловые потери (притоки) через боковую поверхность ПТП минимизированы.

Вспомогательный ПТП_В обеспечивает абсолютный метод измерения коэффициента преобразования ПТП. Термобатарея ПТП_{В1}, являясь элементом системы регулирования мощности, подаваемой на охранный нагреватель, генерирует сигнал, пропорциональный тепловому потоку, уходящему от

основного нагревателя в противоположную от аттестуемого ПТП сторону. Сигнал второй термобатарей ПТП_{B2} используется для контроля качества адиабатизации нерабочей поверхности основного нагревателя.

При равенстве нулю сигнала термобатарей ПТП_{B2}, весь тепловой поток через ПТП приходит к теплостоку. При неполной адиабатизации по показаниям ПТП_{B2} в стационарном тепловом режиме может быть определена поправка на недокомпенсацию, вычисляемую по формуле:

$$\Delta q = K_{B2} \cdot E_{B2}, \quad (4.2)$$

где K_{B2} и E_{B2} – Коэффициент преобразования и сигнал термобатарей ПТП_{B2}.

Кроме того, в корпусе охранного нагревателя установлен спай ДПТ2 дифференциальной термопары ДПТ, по сигналу которой регулируется мощность охранного нагревателя по заданному постоянному значению разности температуры между узлами охранного нагревателя и теплопотока.

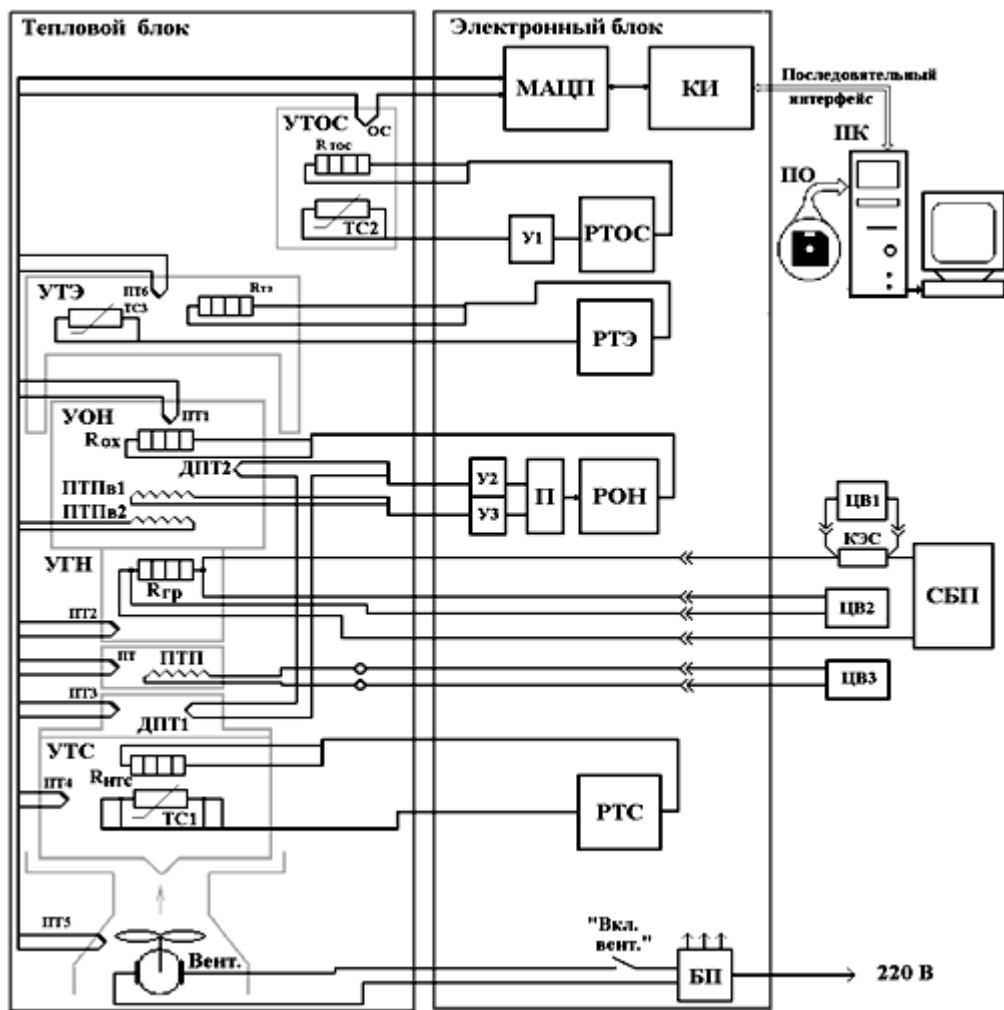
Узел теплостока предназначен не только для отведения прошедшего через аттестуемый ПТП теплового потока, но и для задания фиксированного температурного режима из установленного диапазона значений температуры отнесения. Платформа 3 теплостока снабжена термопарой ПТЗ для контроля температуры ее тепловоспринимающей поверхности, а также в совокупности с термопарой ПТ2, встроенной в основной нагреватель, для определения температуры отнесения при отсутствии в ПТП встроенной термопары. Кроме того в платформе размещен спай ДПТ1 дифференциальной термопары ДПТ, применяемой при настройке установки УВТ-1 с целью калибровки термобатарей ПТП_{B2}.

Необходимый уровень температуры аттестации задают нагревателем теплостока, установленным в радиаторе, и контролируют термопарой ПТ4. Необходимую мощность питания нагревателя задают и поддерживают на определенном уровне с помощью системы регулирования, элементом которой является термометр сопротивления ТС1. Для контроля температуры охлаждающего воздуха в воздуховоде 7 служит спай термопары ПТ5.

Регулирование требуемых режимов по температуре и плотности теплового потока, прием и обработка первичной измерительной информации и передача ее в ПК для дальнейшей обработки по соответствующей программе выполняются с помощью специализированного электронного блока, состоящего из элементов, работающих в соответствии с функциональной схемой, приведенной на рисунке 4.5.

Электронный блок содержит многоканальный аналого-цифровой преобразователь (МАЦП), конвертор интерфейсов, четыре электронных регулятора температуры соответственно, охранного нагревателя, теплостока, теплозащитного экрана и УТОС, а также блок питания. МАЦП предназначен для преобразования сигналов всех измерительных первичных преобразователей температуры (ПТ1-ПТ6) и теплового потока (ПТПЭ, ПТПВ1, и ПТПВ2). Конвертер интерфейсов осуществляет передачу информации от МАЦП по последовательному интерфейсу в ПК. Регулятор охранного нагревателя управляет подводимой к нему мощностью электропитания. В связи с предусмотренной возможностью регулирования мощности двумя способами (по сигналам дифференциальной термопары ДПТ или термобатарей ПТПВ1) регулятор имеет двухпозиционный переключатель два предварительных усилителя. Регулятор теплостока регулирует мощность электропитания его нагревателя по показанию термометра ТС1 с целью термостатирования радиатора. Регулятор теплозащитного экрана предназначен для регулирования по показаниям термометра ТС3 его температуры экрана значения которой контролируют термопарой ПТ6. Регулятор УТОС с предварительным усилителем сигнала термометра ТС2 предназначен для задания с помощью нагревателя, вмонтированного в корпус УТОС, фиксированного значения температуры и поддержания ее на стабильном уровне (50°C).

В качестве перечисленных регуляторов применены стандартные регуляторы-измерители модели РТ-0102, а термометров сопротивления ТС1, ТС2 и ТС3 – входящие в комплект этих регуляторов термопреобразователи Pt1000.



Тепловой блок: УТОС – узел термостатирования опорных спаев термопар; $R_{тоc}$ – нагреватель УТОС; ТС2 – термометр сопротивления опорных спаев; ОС - опорные спаи термопар; УТЭ – узел теплозащитного экрана; $R_{тэ}$ – нагреватель теплозащитного экрана; ТС3 – термометр сопротивления; ПТ6 – термопара контроля температуры теплозащитного экрана; УОН – узел охранного нагревателя; $R_{ох}$ – охранный нагреватель; ПТ1 – термопара контроля температуры $R_{ох}$; ДПТ2 – спай дифференциальной термопары ДПТ; ПТПв1, ПТПв2 – термобатареи вспомогательного преобразователя теплового потока; УГН – узел градуировочного нагревателя; $R_{гр}$ – градуировочный нагреватель; ПТ2 – термопара контроля температуры $R_{гр}$; ПТП – аттестуемый преобразователь теплового потока; ПТ – термопара контроля температуры ПТП; УТС – узел теплостока; $R_{нтс}$ – нагреватель теплостока; ТС1 – термометр сопротивления; ПТ3 – термопара контроля температуры тепловоспринимающей платформы; ПТ4 – термопара контроля температуры радиатора; ДПТ1 – спай дифференциальной термопары ДПТ; Вент. – вентилятор; ПТ5 – термопара контроля температуры воздуха в воздуховоде.

Электронный блок: МАЦП – многоканальный аналого-цифровой преобразователь, КИ – конвертор интерфейсов, РТОС, РОН, РТС, РТЭ – регуляторы, У1, У2, У3 – предварительные усилители, П – переключатель сигналов, БП – блок питания.

СБП – стабилизированный блок питания; ЦВ1, ЦВ2, ЦВ3 – универсальные цифровые вольтметры, КЭС – катушка электрического сопротивления.

ПК – персональный компьютер; ПО – программное обеспечение.

Рисунок 4.5 – Функциональная схема эталонной установки УВТ-1.

В блоке питания напряжения сети (220 В, 50 Гц) преобразуется в постоянное и переменное напряжение, необходимые для работы электронных устройств электронного блока.

Для автоматизации работы установки УВТ-1 применен ПК, который осуществляет прием информации от электронного блока, от оператора данные об аттестуемом ПТП, требуемом температурном режиме, контролирует наступление установившегося состояния, осуществляет усреднение результатов измерений плотности теплового потока и температуры, вычисление коэффициента преобразования ПТП для каждой фиксированной точки температуры отнесения и выдает окончательный результат об индивидуальной статической функции преобразования аттестуемого ПТП во всем температурном диапазоне в виде таблицы или графическом изображении [34].

С учетом результатов аналитического исследования степени влияния различных факторов (см. 4.1) и благодаря точному регулированию параметров тепловых режимов можно реализованный в УВТ-1 метод определения статистической функции преобразования ПТП с уверенностью отнести к методам полной компенсации (см. 1.4.1).

4.2.2 Методика определения функции преобразования

Коэффициент преобразования аттестуемого ПТП в каждой фиксированной точке температурного диапазона при заданном значении плотности теплового потока вычисляют по формуле:

$$K = \bar{q} / \bar{E}, \quad (4.3)$$

где \bar{q} – усредненная плотность теплового потока, воспроизводимого в установке, равная W/A , где W – мощность питания основного нагревателя, A – площадь его рабочей поверхности;

\bar{E} – усредненный сигнал аттестуемого ПТП за цикл измерений в установившемся состоянии.

Значение \bar{q} вычисляют по результатам измерения падения напряжения на

выводах основного нагревателя (U_{OH}) и образцовой катушки электрического сопротивления (далее – КЭС), включенной в измерительную цепь нагревателя (U_0), по формуле:

$$q = U_{OH} \cdot U_0 / (0,25\pi D_{OH}^2 R_0), \quad (4.4)$$

где: R_0 – номинал стандартной меры электрического сопротивления КЭС,

D_0 – диаметр рабочей поверхности эталонного нагревателя.

Методика проведения экспериментов по определению индивидуальной статической функции преобразования в диапазоне рабочей температуры состоит в следующем.

Измеряют диаметр эталонного ПТПЭ, и устанавливают его на посадочное место. Последовательно задают пять уровней температуры теплостока из рабочего диапазона температуры от комнатной до 463 К (верхняя граница температурного диапазона 473 К). На каждом температурном уровне теплостока последовательно задают пять значений плотности теплового потока от 100 Вт/м² до 20 кВт/м², исключая режим $q_i = 20$ кВт/м² при 190 °С, для предотвращения перегрева ПТП и всей градуировочной головки. Таким образом, проводят при одной установке ПТП на посадочное место 24 режима. Путем трехкратной перезарядки аттестуемого ПТП на посадочном месте получают 72 цикла измерений. В каждом цикле измерений, соответствующем конкретному тепловому режиму аттестации ($T_i = const, q_i = const$), при наступлении установившегося состояния измеряют падение напряжения на выводах основного нагревателя и образцовой КЭС; температуру аттестуемого ПТП и бокового теплозащитного экрана; усредненный за цикл измерений (~20 мин) сигнал термобатареи ПТП_{B2} и аттестуемого ПТП ($\bar{E}_{i-j,n}$), а также скорость измерения температуры.

По экспериментальным данным для каждого режима вычисляют n -ое значение коэффициента преобразования $K_{ПТП,n}$ по формуле:

$$K_{ПТП,n}(T_{i-j,n}) = (\bar{q}_{i-j} / \bar{E}_{i-j})_n, \quad n=1, 2, \dots, 72. \quad (4.5)$$

Таким образом, для каждого эталонного ПТП формируется массив из 72 значений коэффициента преобразования во всем диапазоне воспроизводимых плотностей теплового потока и рабочих значений температур. При этом в найденных значениях присутствуют носящие случайный характер вариации, вызванные невоспроизводимостью контактных сопротивлений, малыми смещениями ПТП относительно поверхностей теплостока и основного нагревателя при разных перезакладках и флуктуациями теплового режима.

На основе проведенных измерений и данных массива расчетных значений коэффициента преобразования аттестуемого ПТП методом наименьших квадратов находят аппроксимационный полином 3, 4 или 5-ой степени температурной зависимости индивидуальной статической функции преобразования каждого эталонного ПТП:

$$K_{ПТП}^{АП}(T) = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 + a_4 \cdot T^4 + a_5 \cdot T^5, \quad (4.6)$$

где $a_0 \dots a_5$ – коэффициенты полинома.

Для каждого найденного значения $K_{ПТП,n}$ вычисляют его относительное отклонение $\delta_{K,n}$ от соответствующего значения аппроксимирующего полинома:

$$\delta_{K,n} = \frac{K_{ПТП,n}(T_{i-j,n}) - K_{ПТП}^{АП}(T_{i-j,n})}{K_{ПТП}^{АП}(T_{i-j,n})} \quad (4.7)$$

Как видно на рисунке 4.6, разброс этих отклонений, полученных, например, по результатам измерений в 40 режимах (5 вариаций температуры и 8 – плотности теплового потока при каждой температуре) на одной позиции ПТП в посадочном месте градуировочной головки, носит случайный характер.

По результатам испытаний партии ПТП при ступенчатом изменении температуры в диапазоне от 305 К до 480 К установлено, что экспериментальные значения коэффициента преобразования отличаются от среднего арифметического значения по диапазону не более чем на $\pm 3\%$. В качестве примера на рисунке 4.7 представлены результаты экспериментального определения температурной зависимости функции преобразования для эталонного ПТП №1 из исследованной партии и график аппроксимационного полинома 4-ой степени.

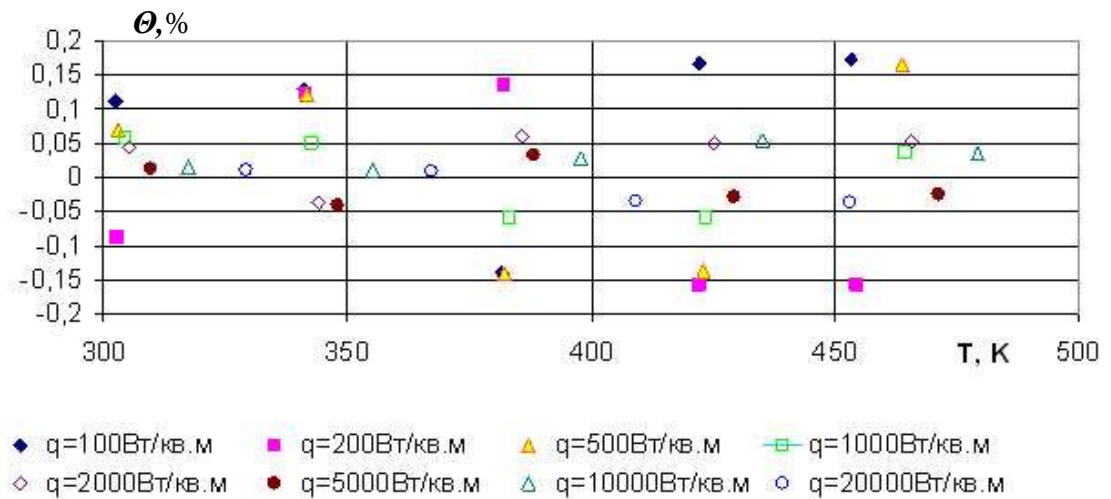


Рисунок 4.6 – Относительное отклонение экспериментальных значений коэффициента преобразования ПТП_Э от аппроксимирующего полинома в зависимости от температуры при вариации плотности теплового потока

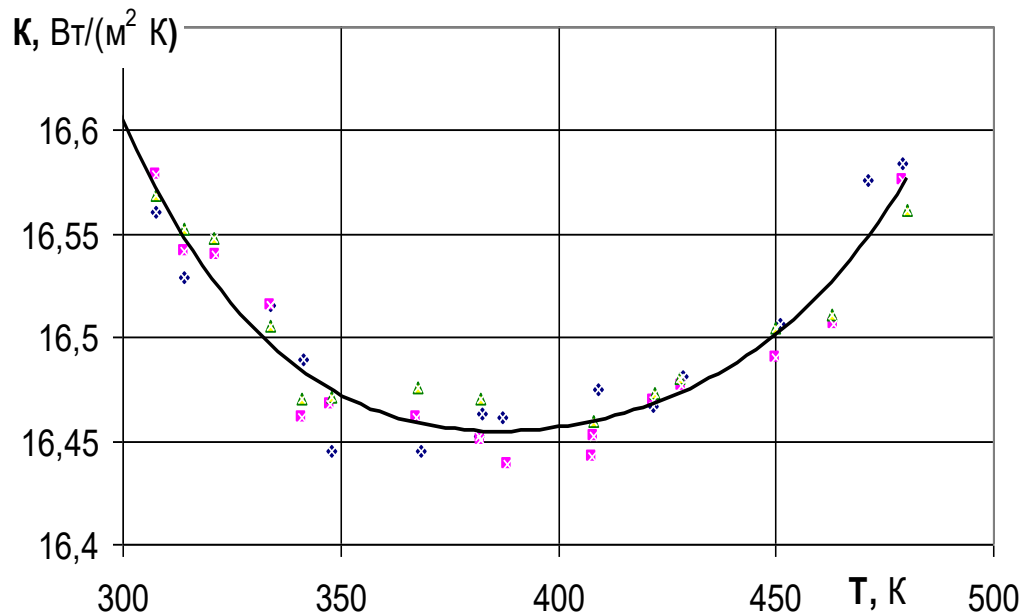


Рисунок 4.7 – Экспериментальные значения коэффициента преобразования эталонного ПТП_Э №1 и график полинома, аппроксимирующего оценочную статистическую функцию преобразования

Эти результаты использованы далее для оценки СКО случайной погрешности аттестации эталонных ПТП, обусловленной невозпроизводимостью контактного теплового сопротивления, неточностью установки ПТП и флуктуациями тепловых режимов.

4.2.3 Метрологические и эксплуатационные характеристики установки и анализ погрешностей

К эксплуатационным характеристикам установки, влияющим на метрологические характеристики, относится целый ряд технических параметров, которые определяют удобство эксплуатации установки, позволяют правильно выбрать режим измерения и момент начала измерений, а также используют при расчете составляющих погрешности измерения. К ним относятся линейный размер посадочного места в градуировочной головке; технические характеристики отдельных элементов конструкции и системы ее электроизоляции; электрическое сопротивление термобатарей вспомогательного ПТПв и коэффициент преобразования контрольной термобатарей ПТПв2; температура термостатирования опорных спаев термопар; длительность стабилизации теплового режима установки.

Значение этих характеристик определяются при монтаже, настройке и метрологической аттестации установки УВТ-1, которую проводят по программе и методике, установленной в [251].

Метрологическими характеристиками эталонной установки являются диапазон значений поверхностной плотности воспроизводимого теплового потока в соответствующем диапазоне температуры; их неисключенные систематические (НСП) и случайные (СКО) погрешности воспроизведения единицы измерения плотности теплового потока и погрешность передачи её размера.

Наиболее существенными источниками погрешностей являются следующие.

Стабильность температуры термостатирования опорных спаев термопар, контроль которой осуществляется, не смотря на то, что её значение само по себе не влияет на метрологические характеристики установки, однако, его надо знать

при определении температуры, измеряемой с помощью термопар. Экспериментально установлено, что это значение лежит в диапазоне $(49,95 \pm 0,05)^\circ\text{C}$. При этом длительность процесса разогрева термостата и стабилизации температуры УТОС не превышает 25 минут. Среднее значение температуры УТОС внесено в программу обработки результатов измерения температуры термопарами.

Качество адиабатизации нерабочих поверхностей основного нагревателя, контролируемое по значению тепловых потерь (см. формулу (4.2)). Вспомогательный ПТП_В, как было сказано в 4.2.1, состоит из двух термобатарей ПТП_{В1} и ПТП_{В2}, при этом ПТП_{В1} является нуль-индикатором. Вследствие же неидеальности системы регулирования и возможных искажений теплового поля измеряемый тепловой поток может незначительно отличаться от нуля. Для измерений этих тепловых отклонений предназначена термобатарея ПТП_{В2}, по сигналу которой вычисляют поправку Δq по формуле 4.2. Коэффициент преобразования ПТП_{В2} определяют с применением ПТП_Э, (с известной функцией преобразования в диапазоне рабочих значений температуры) в градуировочных опытах, в которых с помощью регулятора охранного нагревателя задается режим постоянной разности температуры между теплостоком и охранным нагревателем. В таком режиме, создается тепловой поток плотностью порядка 5000 Вт/м^2 через термобатарею ПТП_{В2} и ПТП_Э. Коэффициент преобразования термобатареи ПТП_{В2} определяют не менее, чем в пяти точках температурного диапазона, и по полученным значениям строят график температурной зависимости $K_{В2}(T)$ и находят соответствующий аппроксимационный полином, который вводят в ПО ПК.

Динамические характеристики установки.

Все измерения в установке УВТ-1 проводят в стационарном тепловом режиме. Хотя с точки зрения удобства эксплуатации нужно минимизировать время выхода на режим, однако высоких точностных характеристик установки можно достичь только в глубоко стационарном состоянии. Стабильность поддержания теплового режима прямо влияет на погрешность воспроизведения

заданного значения плотности теплового потока. Поэтому проводится контрольная запись значений температуры теплостока и охранный нагревателя, а также сигнала контрольной термобатарей ПТП_{В2}. В характере изменения температуры можно видеть две составляющие: медленное изменение – дрейф и относительно высокочастотные флуктуации, влияние которых нивелируется усреднением в процессе измерения, который длится порядка 20 минут. Дрейф температуры в течение проведенных экспериментальных исследований не превышал 0,05 К/час, поэтому его можно игнорировать.

Тепловые потери (притоки) по проводам. Несмотря на ряд реализованных конструкторских решений и весьма точное регулирование параметров теплового режима в зазоре между боковой поверхностью градуировочной головки и температуровыравнивающим экраном происходит теплообмен, который приводит к теплотерям (притокам) по проводам ПТП_Э. Для определения их влияния на погрешность аттестации ПТП_Э решена задача, в которой провода рассмотрены как стержни неограниченной длины, выполненные из достаточно теплопроводного материала (посеребренная медь). Температура по сечению провода практически постоянна и меняется только по мере удаления рассматриваемого сечения от основания провода в месте выхода из боковой поверхности ПТП.

Согласно [252] стержень бесконечной длины с охлаждаемой боковой поверхностью в сечении, отстоящем на расстоянии x от основания, имеет температуру $T(x)$ и тепловой поток по проводам $\Phi_{ПР}$, описываемые следующими уравнениями:

$$T(x) = T_{OC} + (T_1 - T_{CO}) \cdot \exp(-m \cdot x), \quad (4.8)$$

$$\Phi_{ПР} = (T_1 - T_{OC}) \cdot \sqrt{\alpha \cdot \lambda_{ПР} \cdot P \cdot \Omega}, \quad (4.9)$$

T_1 – температура основания провода; T_{OC} – температура ОС; α – эффективный коэффициент теплообмена боковой поверхности провода с ОС; P и Ω – периметр и площадь сечения провода; $\lambda_{ПР}$ – коэффициент теплопроводности провода; $m = \sqrt{\alpha \cdot P / (\lambda_{ПР} \cdot \Omega)}$.

Из уравнения (4.8) следует формула для приведенной температуры провода:

$$\frac{T_x - T_{OC}}{T_1 - T_{OC}} = \exp(-m \cdot x). \quad (4.10)$$

Результаты счета по формуле (4.10) представлены в виде графиков изменения приведенной температуры вдоль провода при вариации температуры на рисунке 4.8. Эти графики используются для определения оптимально длинны проводов ПТП. В установке УВТ-1 эта длинна составляет 0,1 м, при этом сведены к минимуму теплотери по проводам. Максимальная погрешность, обусловленная тепловым потоком по двум проводам ПТП, оценена по формуле:

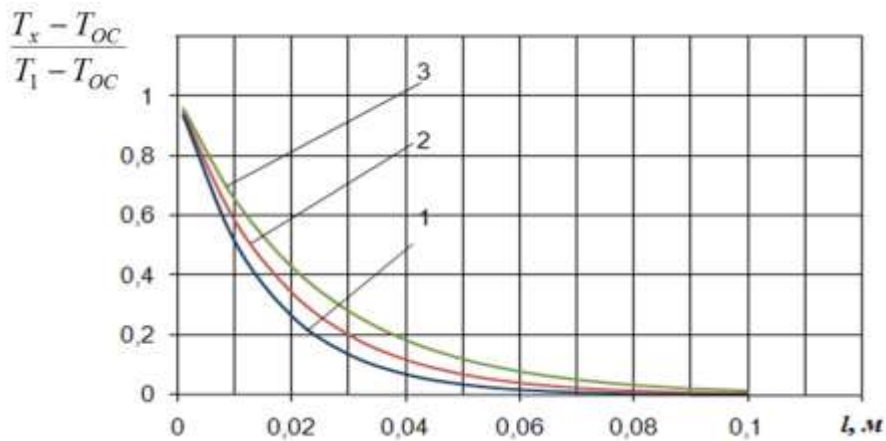
$$\frac{\Phi_{ПП}}{\Phi_{ППП}} = \frac{2R_{\Sigma} \cdot \sqrt{\alpha \cdot \lambda_{ПП} \cdot P \cdot \Omega}}{0,25 \cdot \pi \cdot D_{ППП}^2}, \quad (4.11)$$

где R_{Σ} – суммарное тепловое сопротивление ПТП и контактных сопротивлений по обе стороны от ПТП.

На рисунке 4.9 приведены графики температурной зависимости максимальной погрешности, обусловленной теплотокнами по проводам ПТП, полученные расчетом по формуле (4.11) при вариации суммарного теплового сопротивления.

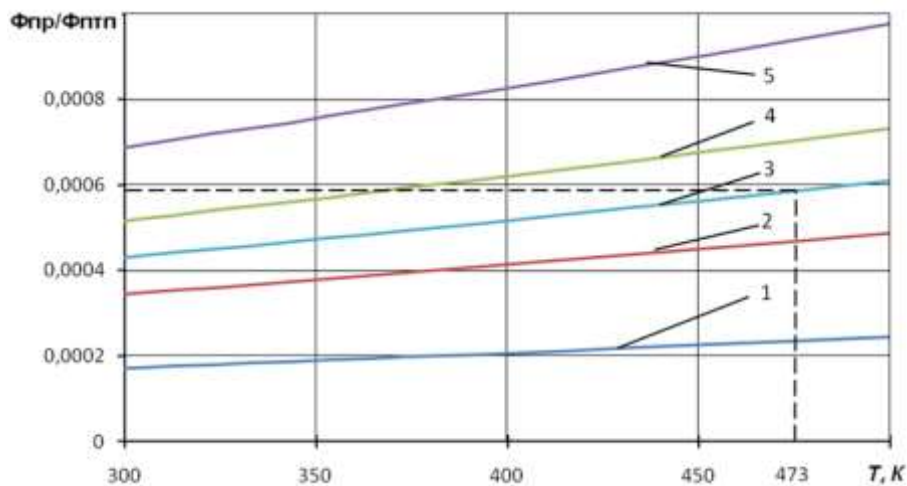
Из графиков следует, что максимальная оценка этой погрешности, являющейся одной из составляющих НСП, обусловленная теплотокнами по проводам, составляет 0,06 % при максимальной рабочей температуре 473 К и суммарном тепловом сопротивлении на уровне 0,0025 м²·К/Вт.

Теплообмен на боковой поверхности ПТП хотя и минимизирован при конструировании градуировочной головки, тем не менее приводит к неучитываемым боковым теплотерям. Степень влияния бокового теплообмена которая зависит от размеров и ТФС аттестуемого ПТП и от контактного теплового сопротивления, теоретически исследовано в 4.1. Результаты экспериментального исследования температурной зависимости контактного теплового сопротивления по обе стороны от ПТП, полученные с применением эталонной меры теплопроводности при трех ее перезакладках, приведены на рисунке 4.10. Из рисунке следует, что максимальное значение



- 1 – $T = 500 K$;**
- 2 – $400 K$;**
- 3 – $300 K$**

Рисунок 4.8 – Изменение приведенной температуры по длине провода ПТП при вариации температуры



- 1 – $R_{\Sigma} = 1 \cdot 10^{-3} m^2 \cdot K / W$;**
- 2 – $2 \cdot 10^{-3} m^2 \cdot K / W$;**
- 3 – $2,5 \cdot 10^{-3} m^2 \cdot K / W$;**
- 4 – $3 \cdot 10^{-3} m^2 \cdot K / W$;**
- 5 – $4 \cdot 10^{-3} m^2 \cdot K / W$**

Рисунок 4.9 – Зависимости максимальной погрешности, обусловленной теплопритоками по потенциальным проводам, от температуры при вариации суммарного теплового сопротивления.

контактного сопротивления для исследованного диапазона температуры не превышает $5 \cdot 10^4 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$. Для различных значений контактного теплового сопротивления рассчитана составляющая НСП, обусловленной боковым теплообменом в диапазоне температуры от 200 К до 500 К и приведена на рисунке 4.11. Эта составляющая НСП при максимальной температуре и $R_{\text{к}}=5 \cdot 10^4 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ не превышает 0,2%.

Поскольку измерительная установка УВТ-1 создана как материальная часть будущего национального Эталона поверхностной плотности теплового потока, анализ её погрешностей выполнен в соответствии с требованиями ГОСТ 3.381 [254] и ДСТУ ГОСТ 8.009 [253]. Границы составляющих НСП оценены расчетно-экспериментальным путем по результатам исследований характеристик и параметров установки при анализе источников погрешностей воспроизведения плотности теплового потока и воздействия влияющих факторов.

Случайная погрешность, характеризуемая средним квадратическим отклонением (СКО), оценена на основании данных экспериментальных исследований и анализа влияющих факторов в опытах совмещенных с определением функции преобразования эталонных ПТП_э, входящих в комплект установки, и установлением диапазонов значений воспроизводимой плотности теплового потока и рабочей температуры.

К источникам составляющих НСП установки УВТ-1 относятся:

- ошибки стандартных приборов измерения линейных размеров основного нагревателя, эталонного ПТП и посадочного места; падения напряжения на выводах основного нагревателя и образцовой КЭС; сигналов термоэлектрических преобразователей температуры и плотности теплового потока;
- погрешность стандартной образцовой КЭС;
- погрешность адиабатизации нерабочих поверхностей основного нагревателя;
- нестабильность температуры градуировочной головки;
- тепловые потери (притоки) по проводам ПТП;
- теплообмен на боковой поверхности ПТП_э.

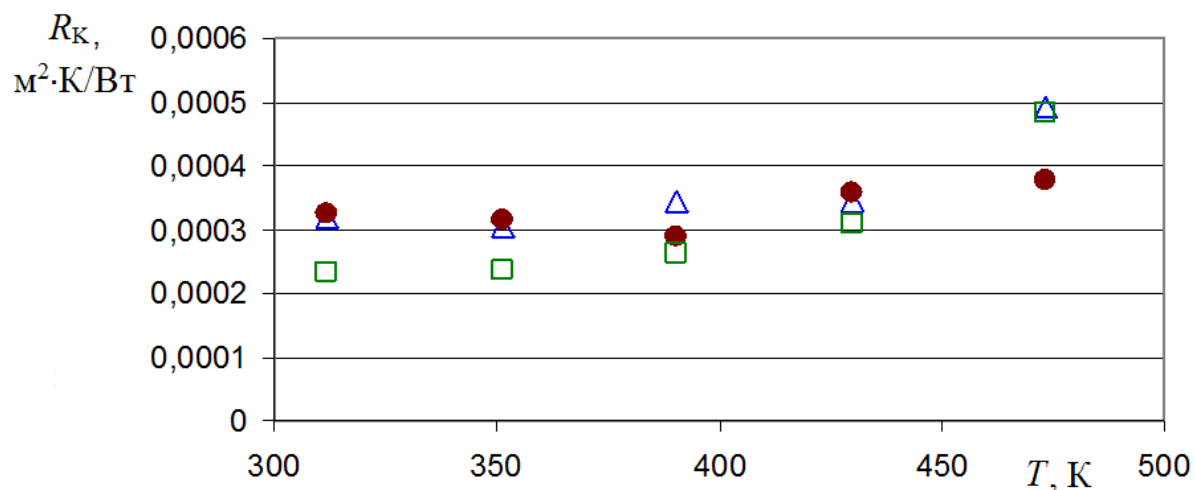
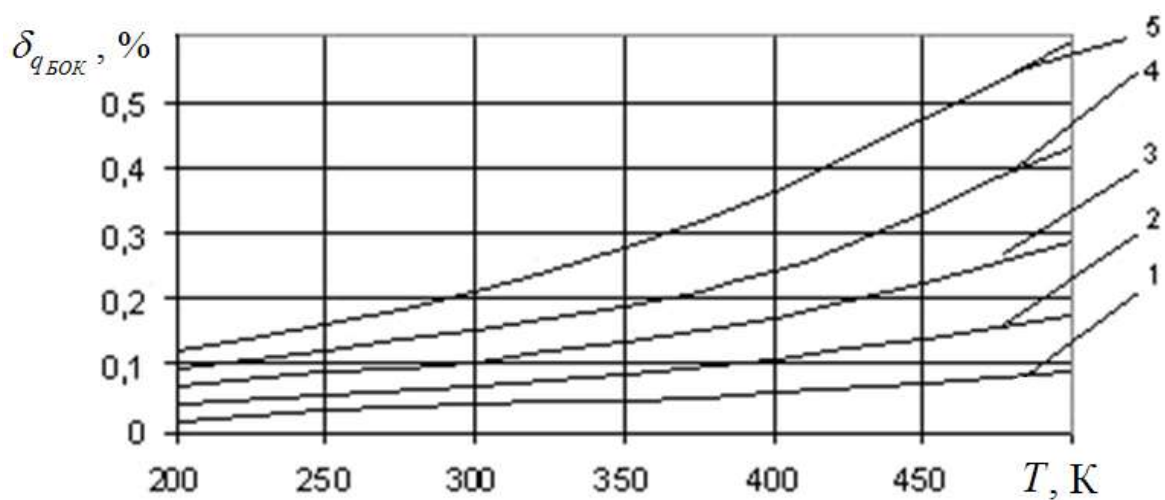


Рисунок 4.10 – Экспериментальные значения контактного теплового сопротивления для трех перезакладок (Δ , \bullet , \square) эталонной меры теплоемкости



1 – $R_K = 0$; 2 – 0,0005; 3 – 0,001; 4 – 0,002; 5 – 0,003 $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{Вт}$

Рисунок 4.11 – Систематическая погрешность, обусловленная боковым теплообменом и контактным тепловым сопротивлением

К источникам составляющих СКО относятся: невозпроизводимость сопротивления между контактирующими поверхностями основного нагревателя, аттестуемого ПТП и теплостока; неточность установки ПТП на посадочное место и флуктуации тепловых режимов.

Составляющие погрешности воспроизведения в установке УВТ-1 единицы плотности теплового потока и передачи её размера эталонному ПТП_Э тщательно исследованы при государственной метрологической аттестации эталонной установки УВТ-1 по утвержденной Программе и методике ПМА 081/24.407-08 [251] (см. приложение Г и [255]). Результаты измерения погрешностей при метрологической аттестации систематизированы в таблицах 4.5 и 4.6.

Оценка границ относительной НСП установки УВТ-1 при числе составляющих НСП более 4 выполнена по формуле [254]:

$$\theta_0 = \pm k \cdot \left(\sum_{i=1}^6 \theta_i^2 \right)^{1/2}, \quad (4.12)$$

где k – коэффициент зависимости НСП от выбранной доверительной вероятности при равномерном распределении. При доверительной вероятности 0,99 коэффициент $k = 1,4$ [254].

Оценка относительного СКО результата воспроизведения и передачи единицы плотности теплового потока в установке УВТ-1 при 24 независимых наблюдениях выполнена с использованием экспериментальных данных определения индивидуальной статистической функции преобразования ПТП по формуле:

$$S_0 = \left(\sum_{j=1}^N \delta_{k,j}^2 \right) / (N \cdot (N - 1)), \quad N = 24 \quad (4.13)$$

где $\delta_{k,j}$ – по формуле (4.7).

Границы относительной НСП, обусловленной присутствием ПТП в градуировочной головке $\theta_{ПТП}$, рассчитаны по формуле, аналогичной формуле (4.12) при $i=7, 8, 9$ и 10 , а СКО суммы составляющих НСП при аттестации ПТП_Э по формуле:

Таблица 4.5 – Бюджет погрешностей воспроизведения плотности теплового потока в эталонной установке УВТ-1

п/п	Источники составляющих погрешностей	НСП		СКО	
		Обозначение	Значение, %	Обозначение	Значение, %
1	Неточность измерения диаметра основного нагревателя (посадочного места)	θ_1	0,067		-
2	Неточность измерения падения напряжения на выводах основного нагревателя	θ_2	0,008	S_2	0,05
3	Неточность измерения падения напряжения на выводах КЭС	θ_3	0,008	S_3	0,05
4	Погрешность КЭС	θ_4	0,01		-
5	Несовершенство адиабатизации нерабочих поверхностей основного нагревателя	θ_5	0,08	S_5	0,08
6	Нестабильность температуры градуировочной головки	θ_6	0,06	S_6	0,1

Таблица 4.6– Бюджет погрешностей передачи размера единицы плотности теплового потока аттестующему ПТП

п/п	Источники составляющих погрешности	НСП		СКО	
		Обозначение	Значение, %	Обозначение	Значение, %
1	Неточность измерения диаметра аттестуемого ПТП	θ_7	0,067		-
2	Неточность измерения выходного сигнала аттестуемого ПТП	θ_8	0,123	S_8	0,185
3	Наличие теплообмена на боковой поверхности аттестуемого ПТП	θ_9	0,200		-
4	Наличие тепловых потоков по подводным проводам ПТП	θ_{10}	0,06		-

$$S_{\theta_{\text{ПТП}}} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \sum_{i=7}^{10} \theta_i^2}. \quad (4.14)$$

СКО результата измерений в j -ой точке диапазона измеряемой плотности теплового потока вычислено по формуле (4.15) [254], которая имеет такой вид, исходя из того, что при аттестации ПТП учитывается только один коэффициент влияния ($K_{\text{ПТП}}$):

$$S_{\text{ПТП}, j} = K \cdot S_{8, j}. \quad (4.15)$$

Максимальное из этих полученных значений принимается за относительное СКО результата измерения – $S_{\text{ПТП}}$.

Исходя из результатов вычислений по формулам (4.14) и (4.15) рассчитывается СКО суммы НСП и случайных погрешностей:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\theta_{\text{ПТП}}}^2 + S_{\text{ПТП}}^2}, \quad (4.16)$$

откуда получены доверительные границы относительной погрешности метода аттестации ПТП в эталонной установке.

$$\Delta_M = r \cdot S_{\Sigma}, \quad (4.17)$$

где r – коэффициент зависимости от выбранной доверительной вероятности при равномерном распределении погрешностей, которые согласно ДСТУ ГОСТ 8.009 [253] при вероятности 0,99 равен 2.

Метрологические характеристики эталонной установки УВТ-1, которая введена в состав отечественного поверочного эталона единицы измерения поверхностной плотности теплового потока:

- диапазон значений единицы измерения, воспроизводимой в диапазоне температуры от 300 К до 473 К, составляет (100 - 20000) Вт/м²;

- СКО результата измерений при воспроизведении единицы плотности теплового потока S_0 при 24 независимых наблюдениях не превышает 0,15% при доверительной вероятности 0,99%;

- границы НСП установки при воспроизведении единицы измерения плотности теплового потока θ_0 составляют $\pm 0,18\%$;

- погрешность метода передачи размера единицы плотности теплового потока аттестуемому ПТП не превышает 0,5%;

– неопределенность измерения по типу $A - \bar{U}_A = 0,15\%$; по типу $B - \bar{U}_B = 0,1\%$;
суммарная стандартная неопределенность – $\bar{U}_C = 0,18\%$; Расширенная неопределенность –
 $U = 0,36\%$ с коэффициентом охвата $k=2$ при доверительной вероятности $0,95\%$.

4.3 Эталонные преобразователи теплового потока

Эталонные преобразователи теплового потока (ПТПЭ), входящие в состав установки УВТ-1 и являющиеся хранителями размера единицы поверхностной плотности теплового потока [247, 249], предназначены для периодического контроля стабильности и правильности работы установки, и её периодических проверок. Кроме того имеются еще ПТПЭ, которые предназначены для передачи размера единицы плотности теплового потока от эталонной установки Первичного эталона рабочим средствам измерения: рабочим ПТП и приборам на их основе. Эти ПТПЭ, обладающие высокими метрологическими характеристиками, после их метрологической аттестации на Эталоне, предназначены для выполнения функций рабочего эталона в рабочих установках-компараторах.

В основе конструкции эталонного термоэлектрического многоэлементного ПТП вида вспомогательной стенки лежит традиционная технология изготовления батареи термоэлементов путем гальванического покрытия одной стороны плоской спирали из термоэлектродной проволоки парным электродным материалом [4, 5, 41] с последующим формованием в виде плоских дисков с применением электроизоляционного компаунда.

ПТПЭ по сути является передаточным звеном при метрологической аттестации рабочих СИТ, обеспечивая передачу им размера единицы плотности теплового потока с минимальной погрешностью. В связи с этим при проектировании ПТПЭ подбирается такое сочетание конструктивного исполнения, геометрических размеров и ТФС ПТП с учетом параметров теплообмена между ПТПЭ и ОС или окружающими его элементами как в эталонной измерительной установке, так и в рабочих установках, чтобы

обеспечить одномерность измеряемого теплового потока через чувствительный элемент ПТП_Э при различных условиях его применения.

Из анализа результатов полученных в [39] и описанных выше, а также с учетом температурного диапазона эксплуатации следует, что для изготовления ПТП эталонного уровня можно использовать термоэлектрические пары [31, 32, 218]. Однако, низкая коррозионная стойкость медного покрытия исключает использование в эталонном ПТП константан-медной и копель-медной пар, а целесообразно использовать константан-серебрянную и копель-серебрянную пары, если температура его эксплуатации предполагается ниже 300 К.

Поскольку в данное время в Украине наиболее востребованным является диапазон температуры от 200 К до 500 К, то перспективными парами для ПТП_Э являются пары на основе никеля. Сведения о термоэлектрических свойствах никеля весьма разноречивы, особенно в окрестности точки Кюри (631 К), что по-видимому связано с различиями в чистоте, структуре и предыстории исследованных образцов. В связи с этим нами были проведены экспериментальные исследования температурных зависимостей коэффициента Зеебека (α) гальванических пар копель-никель и константан-никель. В качестве никелевого термоэлектрода использованы никелевые покрытия различной толщины, гальванически нанесенные на проволоку-основу. Результаты, приведенные на рисунке 4.12, получены для пары копель-никель в диапазоне температуры от 300 К до 770 К при вариации параметра f_{21} [249]. Эти результаты показывают, что в диапазоне температуры от 323 К до 473 К исследованная зависимость имеет практически линейный характер.

В ПТП_Э, для низких и криогенных значений температуры (менее 300 К), целесообразно использовать константан-серебрянную или копель-серебрянную пары, так как чувствительность именно этих типов ПТП имеет наименьшую температурную зависимость [39].

Чувствительность ПТП, как было показано выше (см. 3.1), зависит не только от термоэлектрической чувствительности пары термоэлектродов, но и от

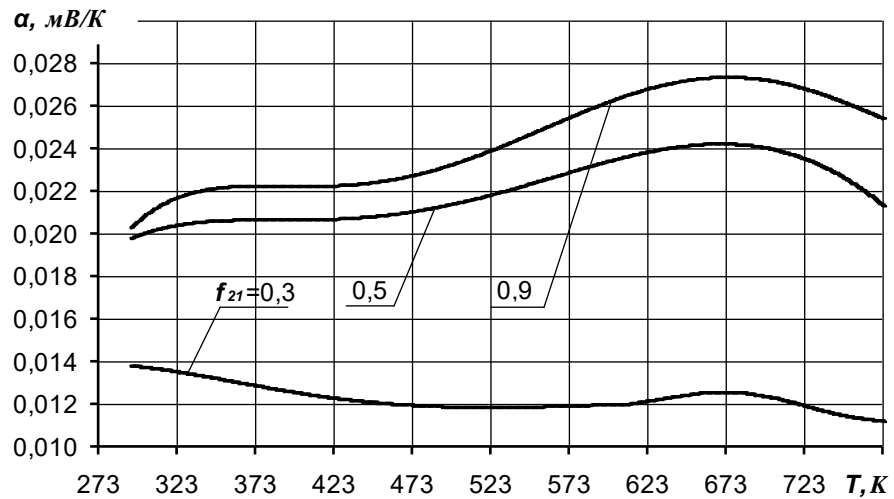


Рисунок 4.12 – Зависимости коэффициента Зеебека копель-никелевой пары от температуры при вариации параметра f_{21} .

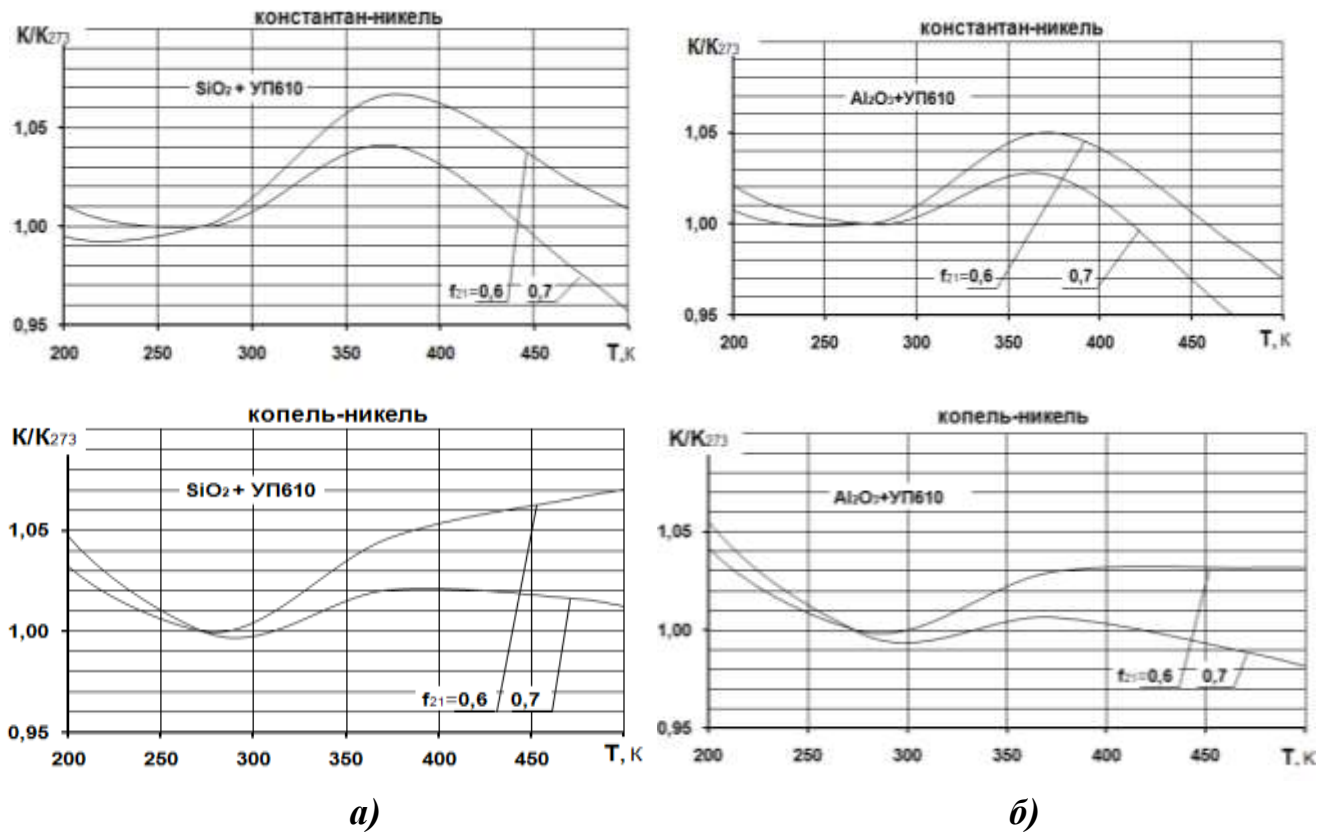


Рисунок 4.13 – Температурные зависимости приведенного коэффициента преобразования $K(T)/K_{273}$ для копель-никелевого и константан-никелевого ПТП с наполнителем заливочного компаунда из плавленого кварца (а) и корунда (б) для двух значений отношения $(f_{21})_{opt} = 0,6$ и $0,7$.

отношений их электрического сопротивления (f_{21}), коэффициентов теплопроводности ($\lambda_{21}/\lambda_{31}$), площади сечений металлов и компаунда ($\lambda_{21}/\lambda_{31}$) [4,

5, 32, 33, 39]. Как правило, параметры ПТП выбираются такими, чтобы оптимизировать те или иные характеристики. Для ПТП, предназначенных для работы в широком температурном диапазоне, важно обеспечить температурную независимость чувствительности.

На рисунке 4.13 представлены результаты исследования температурных зависимостей коэффициента преобразования обоих перспективных для ПТП_Э пар (константан-никель и копель-никель) при вариации параметра f_{2l} (0,6 и 0,7) и материала заполнителя компаунда (плавленый кварц и корунд) [249].

Сравнение этих результатов показывает, что для ПТП_Э наиболее приемлемой является пара копель-никель с отношением площади сечений покрытия и основного термоэлектрода $f_{2l} = 0,6-0,7$, так как изменение чувствительности у такого ПТП от температуры минимальное (менее 5 %) в указанном температурном диапазоне. Кроме того, после 370 К эта характеристика для копель-никелевого ПТП линейризуется, что особенно наглядно продемонстрировано на рис. 4.13 б.

Все конструктивные параметры ПТП рассчитываются по методике [101] с учетом сформулированных требований к ПТП эталонного уровня.

Для наиболее востребованного в данное время диапазона температуры от 200 К до 500 К, эталонные ПТП изготовлены из копелевой проволоки мягкой поставки диаметром $d_l = (0,09 - 0,10)$ мм, при этом плотность укладки термоэлементов $n \approx 5$ шт/мм², толщина гальванического покрытия никелем порядка 20 мкм, что имеет место при значении технологического параметра – $R_{эл.ПТП}/R_{эл.СП} = 0,585 \pm 0,002$, где $R_{эл.ПТП}$ и $R_{эл.СП}$ – электрическое сопротивление готового ПТП и заготовки спирали термоэлементов.

В качестве заливочного электроизоляционного материала для ПТП_Э, эксплуатация которого может быть как при низких, так и умеренных и высоких значениях температуры, использован эпоксидный компаунд УП-610 с молотым плавленым кварцем в качестве наполнителя для ПТП, предназначенного для работы при низких и умеренных значениях температуры, а с порошкообразным корундом – при высоких. Заливочным компаундом заполняется не только

межвитковое пространство, но формируются защитные слои по торцевым поверхностям ПТП_Э (толщиной порядка 0,2 мм). Это обеспечивает надежную защиту спаев от окисления и эффективную электроизоляцию термоэлементов, несмотря на резкое падение электрического сопротивления полимерного связующего с увеличением температуры.

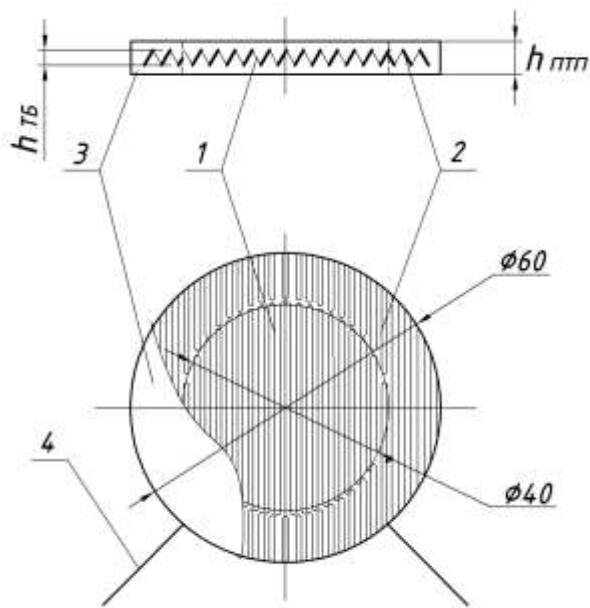
После введения в действие национального и межгосударственного стандартов [6, 7] каждый термоэлектрический гальванический ПТП вида вспомогательной стенки имеет стандартизованное условное обозначение. Не составляют исключение и эталонные ПТП, изготовленные в соответствии с общими техническими условиями, регламентированными в [6, 7]. Они имеют условное обозначение: ПТП–1А.28.2.11.Д.00.1.56.000.–ДСТУ 3756 (ГОСТ 30619).

Согласно этому ПТП_Э, конструктивная схема которого приведена на рисунке 4.14, представляет собой бескорпусную монолитную конструкцию, выполненную в форме диска, с учетом размера посадочного места в установке УВТ-1 диаметр зоны чувствительного элемента ПТП составил 40 мм при диаметре ПТП 60 мм. Охранная зона заполнена идентичной спиралью термоэлементов. Толщина ПТП равна 2 мм, а коэффициент теплопроводности 1,5 Вт/(м·К).

Основные технические характеристики набора эталонных ПТП, изготовленных для укомплектования эталонной установки УВТ-1, систематизированы в таблице 4.7.

Результаты исследований, представленные в главах 2 – 4 позволили сформулировать следующие рекомендации по конструктивному исполнению ПТП_Э:

- ПТП_Э должен быть изготовлен с охранной зоной по периметру чувствительного элемента, ширина которой не меньше пяти толщин ПТП_Э;
- геометрический параметр ПТП_Э должен быть однородным должен удовлетворять условию $D_{\text{ПТП}}/h_{\text{ПТП}} \geq 30$;
- тепловое сопротивление ПТП_Э должно быть однородным, что может быть обеспечено одинаковыми ТФС чувствительной и охранной зон;



- 1 – батарея термоэлементов;
 2 – охранная зона;
 3 – заливочный компаунд;
 4 – выводы ПТП в металлическом защитном экране;

Рисунок 4.14 – Конструктивная схема ПТПЭ

Таблица 4.7 – Характеристики эталонных ПТП

Характеристика ПТПЭ	Размерность	ПТПЭ1	ПТПЭ2	ПТПЭ3
Диапазон измерения плотности теплового потока	Вт/м ²	100÷20000	100÷20000	100÷20000
Предел основной допускаемой погрешности измерения плотности теплового потока	%	1,0	1,0	1,0
Диапазон рабочей температуры	К	300÷500	300÷500	300÷500
Электрическое сопротивление	кОм	0,693	1,727	3,914
Коэффициент эффективной теплопроводности	Вт/(м·К)	1,5	1,5	1,5
Время реакции по уровню 0,63	с	8	8	8
Термостойкость	К	530	530	530
Диаметр	мм	60	60	60
Толщина	мм	2	2	2
Масса	г	16	16	16
Длина выводов не менее	мм	600	600	600
Коэффициент преобразования при температуре (300±3) К	Вт/(м ² ·мВ)	20,2	19,5	45,2

- толщина защитного электроизоляционного покрытия торцевых поверхностей термобатареи ПТПЭ должна быть не менее 0,1 мм с каждой стороны;
- отношение значений ТФС термоэлементов и заливочного компаунда, а также параметры термобатареи ПТПЭ должны обеспечивать термостойкость в заданном температурном диапазоне и стабильность функции преобразования ПТПЭ.

4.4 Поверочная схема для средств измерения плотности теплового потока в Украине (проект)

При определении любой физической величины единство, правильность и достоверность результатов измерений обеспечивают путем испытаний и проверки применяемых СИТ из числа находящихся в обращении в данной области измерений.

Процедура поверки предусматривает экспериментальное определение метрологических характеристик СИТ: первично – путём метрологической аттестации [251] и повторно – периодических поверок согласно нормативным документам ДСТУ 3215 и ДСТУ 2708 [256, 257]. Единство измерений физической величины различными СИТ обеспечивается поверочной схемой [258], которая для данной области измерения устанавливает иерархию СИТ, предоставляя более высокие места наиболее точным средствам измерения. Поверочные схемы устанавливают систему передачи размера единицы физической величины от Государственного эталона Рабочим эталонам и далее – рабочим средствам измерения.

Как сказано в разделе 1, на территории бывшего СССР для средств измерения поверхностной плотности теплового потока в 1988 году была введена в действие Государственная поверочная схема МИ 1855-88 [122], представленная в таблице 1.4 (см. 1.4.2.2). В настоящее время заменена обновленной схемой для СИТ плотности теплового потока от 1 Вт/м² до 10000 Вт/м² при температуре от 200 К до 420 К [161].

Поверочная схема МИ 1855-88 [122] опиралась на измерительную установку высшей точности [162, 163] для воспроизведения, хранения и передачи единицы поверхностной плотности теплового потока УВТ-53-А-88 в диапазоне значений от 10 Вт/м^2 до $2 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$ при температуре от 200 К до 400 К. Она устанавливала последовательное подчинение Государственному эталону Рабочих эталонов, в качестве которых указаны кондуктивный и радиационный компараторы, и рабочих СИТ – Рабочим эталонам с указанием пределов соответствующих погрешностей воспроизведения единицы измерения плотности теплового потока и передачи ее размера нижестоящему по схеме СИТ.

В этот же период в ИТТФ АН УССР был разработан ряд измерительных метрологических установок типа КГУ [5, 132, 165, 170] в том числе установка КГУ-1-25 для воспроизведения, хранения и передачи размера единицы плотности теплового потока в диапазоне от 10^3 Вт/м^2 до 10^4 Вт/м^2 при температуре от 100 К до 500 К, в которой реализован также абсолютный метод и которая по метрологическим характеристикам оказалась на уровне измерительной установки высшей точности УВТ-53-А-88. Установка КГУ-1-25 по результатам государственной метрологической аттестации получила статус исходного образцового средства измерения (по современной терминологии [184] – это статус исходного эталона) и поставлена во главе локальной поверочной схемы, представленной таблицей 1.6 [170]. Эта схема распространяется на контактные средства измерения поверхностной плотности теплового потока в диапазоне значений от 10^3 Вт/м^2 до 10^4 Вт/м^2 при температуре от 100 К до 500 К. В тот же период в ИТТФ были разработаны еще одна образцовая установка КГУ-3-20 для аттестации ПТП по тепловому потоку (Вт) и соответствующая локальная поверочная схема (см. табл. 1.7 [33, 36]). На этих установках было основано метрологическое обеспечение теплоточных измерений в независимой Украине. Однако, как отмечено выше, эти установки прослужили более чем 20 лет, устарели и утратили свой эталонный уровень.

В Украине сложились условия, которые потребовали существенного обновления системы метрологического обеспечения теплоточных измерений.

В этом направлении в ИТТФ на протяжении ряда лет были осуществлены фундаментальные аналитические исследования [5, 33, 34, 36, 39, 40, 42, 132, 165, 170, 185, 188-194] которые показали что имеются резервы повышения точности метрологических работ в области теплоточных измерений. Результаты исследования пространственных искажений полей теплового потока при различных соотношениях размеров и характеристик ПТП, условий теплообмена и взаимного расположения ПТП и объекта, на который установлен ПТП, методов поддержания граничных условий теплообмена, а также применение современных теплоизоляционных материалов, методов активной адиабатизации и усовершенствованных систем регулирования тепловых режимов в градуировочных установках (см. главы 2 и 3) позволили добиться уменьшения погрешности воспроизведения плотности теплового потока и разработать измерительную установку, которая по точности соответствует современному эталонному уровню.

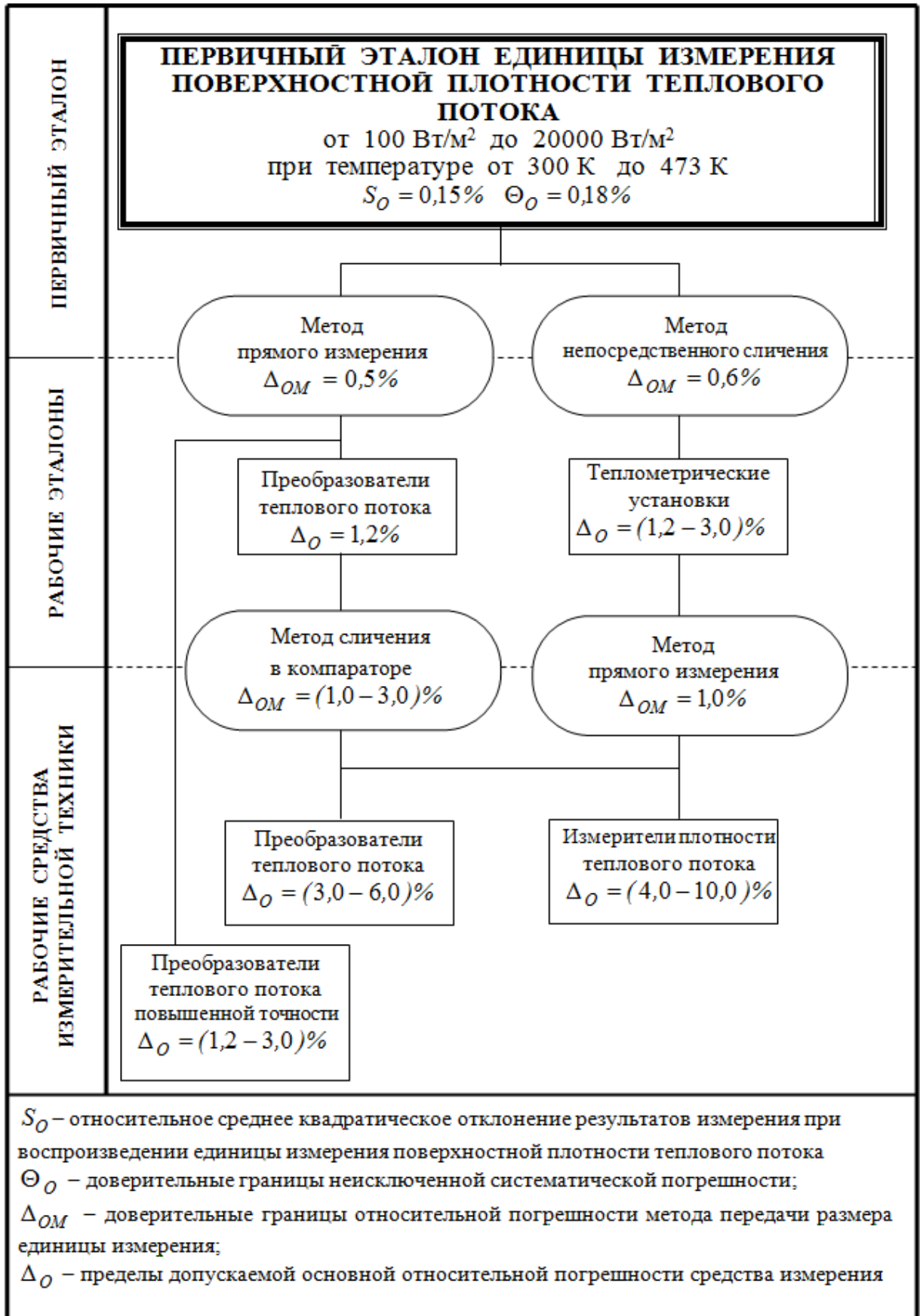
Учитывая выше сказанное и широкое применение ПТП в измерительной практике, нельзя не признать для Украины весьма актуальным и необходимым создание как эталонного метрологического комплекса – Первичного эталона, так и государственной поверочной схемы для средств измерения плотности теплового потока.

Проект впервые созданной в Украине поверочной схемы представлен в таблице 4.8 для средств измерения плотности теплового потока [258, 259].

На основании результатов фундаментальных аналитических и прикладных исследований предложены составляющие элементы для приборного обеспечения этой поверочной схемы. Верхнее поле этой схемы согласно [258] отведено Первичному эталону [259], второе сверху – Рабочему эталону [260] и третье – рабочим СИ плотности теплового потока [6].

В качестве первичного эталона предназначенного для воспроизведения единицы измерения поверхностной плотности теплового потока, хранения и передачи ее размера рабочим эталонам и рабочим средствам измерения с наивысшей на данный период развития науки и техники точностью, предложен

Таблица 4.8. – Поверочная схема для средств измерения поверхностной плотности теплового потока в Украине (проект)



метрологический комплекс, содержащий измерительную установку эталонного уровня УВТ-1, обладающую на данный момент высшей точностью, и набор ПТП_Э. Достоверность метрологических характеристик разработанной эталонной установки УВТ-1 подтверждена Свидетельством №24.495.08 от 5 декабря 2008 года о государственной метрологической аттестации эталонной установки УВТ-1 (см. приложение Д).

В качестве Рабочих эталонов по схеме предполагается применять ПТП_Э и теплотрические установки, которые получают размер единицы поверхностной плотности воспроизводимого теплового потока непосредственно от первичного эталона и предназначены для его передачи рабочим СИТ. Эти ПТП_Э могут быть идентичными для обеспечения взаимозаменяемости а также различными с целью обеспечения передачи размера единицы рабочим ПТП иных типов с сохранением высокой точности при переходе от аттестации одного типа рабочих ПТП к другому. В качестве ПТП_Э выступают термоэлектрические ПТП описанные в 4.3.

От ПТП_Э единица плотности теплового потока передается рабочему СИТ либо методом прямых измерений, либо методом сличения в компараторе (кондуктивном или радиационном).

Рабочие СИ поверхностной плотности теплового потока, аттестуемые или поверяемые с применением рабочего эталона – это первичные ПТП общего назначения по ДСТУ 3756 [6], применяемые в комплекте со вторичным измерительным прибором, например стандартным милливольтметром, и цифровые измерители теплового потока типа ИТП [9, 10, 42, 179, 180]. При необходимости применения для каких-либо целей ПТП повышенной точности их целесообразно аттестовывать методом прямых измерений на эталонной измерительной установке Первичного эталона.

Таким образом, разработанный впервые в Украине проект Поверочной схемы, устанавливающей соподчинение средств измерения, участвующих в передаче размера единицы поверхностной плотности теплового потока, положены в основу проекта Национального стандарта, а метрологическая

аппаратура нового поколения – Государственного Первичного эталона единицы поверхностной плотности теплового потока.

4.5 Радиационный компаратор РГУ-2

В качестве метрологической установки нового поколения является разработанная диссертантом эксплуатируемая в отделе теплотрии ИТТФ установка РГУ-2, которая предназначена для воспроизведения единицы измерения плотности потока теплового излучения и передачи ее размера аттестуемому ПТП путем компарирования по Рабочему эталону [36, 259].

Преимуществом радиационной установки, реализующей метод компарирования по эталонному ПТП, является возможность градуирования ПТП, площадь контактной поверхности которого не одинакова с площадью ПТП_э.

В метрологической установке радиационного типа нормированный тепловой поток задается от ИТИ. Тепловоспринимающие поверхности эталонного и аттестуемого (градулируемого) ПТП должны иметь одинаковую степень черноты, а поле теплового потока в зоне размещения ПТП – равным, причем вклад кондуктивно-конвективной составляющей в нормированный поток теплового излучения на несколько порядков меньше основного радиационного потока [239].

Наиболее производительной и универсальной является радиационная установка [260], которая базируется на применении плоских конструкций нагревателя и теплостока, на поверхности которого устанавливают оба ПТП. Особенностью этой схемы является применение бокового полированного зеркально отражающего экрана, термостатируемого при той же температуре, что и теплосток. ИТИ, выполненный из металла в виде плоской модели АЧТ, за счет V-образных кольцевых проточек, вместе с экраном обеспечивает при удовлетворительной равномерности поля потока теплового излучения практически полное отсутствие конвективной составляющей в зоне расположения ПТП.

Установка РГУ-2 предназначена для аттестации ПТП различной формы с поперечным размером от 10 мм до 200 мм и высотой от 1 мм до 10 мм. Может быть также применена для нестандартизованных СИТ, имеющих ПТП в

качестве чувствительного элемента.

Метод определения коэффициента преобразования ПТП состоит в том, что тепловое излучение фиксированной плотности от ИТИ одновременно подводится к обоим ПТП, расположенным на термостатированном теплостоке. При этом обеспечиваются равноудаленность от ИТИ и одинаковые значения степени черноты их тепловоспринимающих поверхностей. Если оба ПТП идентичны по форме, размерам и ТФС, то в виду равенства плотности потока теплового излучения, воспринятого их поверхностями, коэффициент преобразования аттестуемого ПТП рассчитывают по формуле (1.10). За значение искомого коэффициента принимается среднее арифметическое результатов полученных в n точках рабочего диапазона измерения, при этом за температуру отнесения принимается значение, вычисленное по формуле:

$$T_{ОТН} = T_{ТС} + 0,5 \cdot R_{ПТП} \cdot K_{Э} \cdot E_{Э} \quad (4.18)$$

где $T_{ТС}$ – температура поверхности теплостока;

$R_{ПТП}$ – тепловое сопротивление аттестуемого ПТП, равное $h_{ПТП} / \lambda_{ПТП}$.

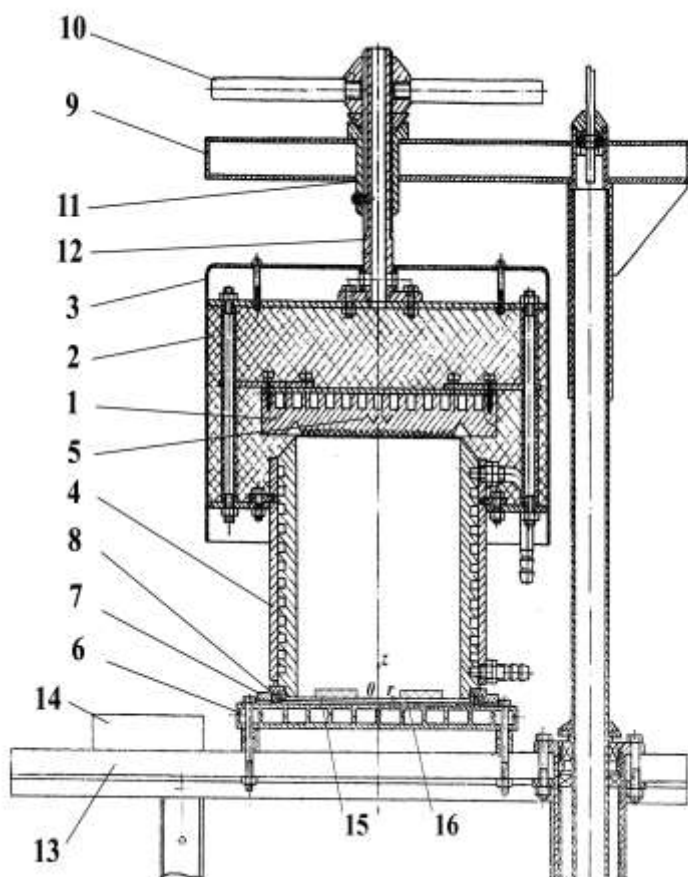
Установка РГУ-2, внешний вид которой показан на рисунке 4.15, является совокупностью функционально объединенных блоков, устройств и стандартизированных приборов и аппаратов сервисного назначения, обеспечивающих все моменты градуировки. Основной частью является тепловой блок конструктивная схема которого приведена на рисунке 4.16, в котором размещают рабочие ПТП и эталонный ПТПэ, а также обеспечивают необходимые режимы по тепловому излучению и температурному уровню измерений. Тепловой блок содержит ИТИ, теплосток и систему термостатирования.

ИТИ представляет собой конструкцию, состоящую из излучателя в виде плоской модели АЧТ, и термостатированного зеркально отражающего экрана цилиндрической формы. Нижняя часть излучателя соединена с экраном, служащим для исключения влияния ОС на поле теплового излучения. Внутренняя поверхность экрана отполирована для обеспечения условий максимального отражения теплового излучения и создания однородного



- 1 – стойка теплового блока,
- 2 – тепловой блок,
- 3 – термостат,
- 4 – стойка с сервисными приборами

Рисунок 4.15 – Внешний вид радиационной градуировочной установки РГУ-2



- 1 – излучатель;
- 2 – корпус;
- 3 – кожух;
- 4 – бленда;
- 5 – спаи ТХА;
- 6 – теплосток;
- 7 – кольцо;
- 8 – уплотнительный элемент;
- 9 – кронштейн;
- 10 – рукоятка;
- 11 – осевой винт;
- 12 – направляющая;
- 13 – столешница, стойки теплового блока;
- 14 – клеммная колодка;
- 15 – эталонный ПТП;
- 16 – рабочий ПТП.

Рисунок 4.16 – Конструктивная схема теплового блока установки РГУ-2

теплового поля на тепловоспринимающей поверхности теплостока в зоне размещения ПТП и ПТП_э.

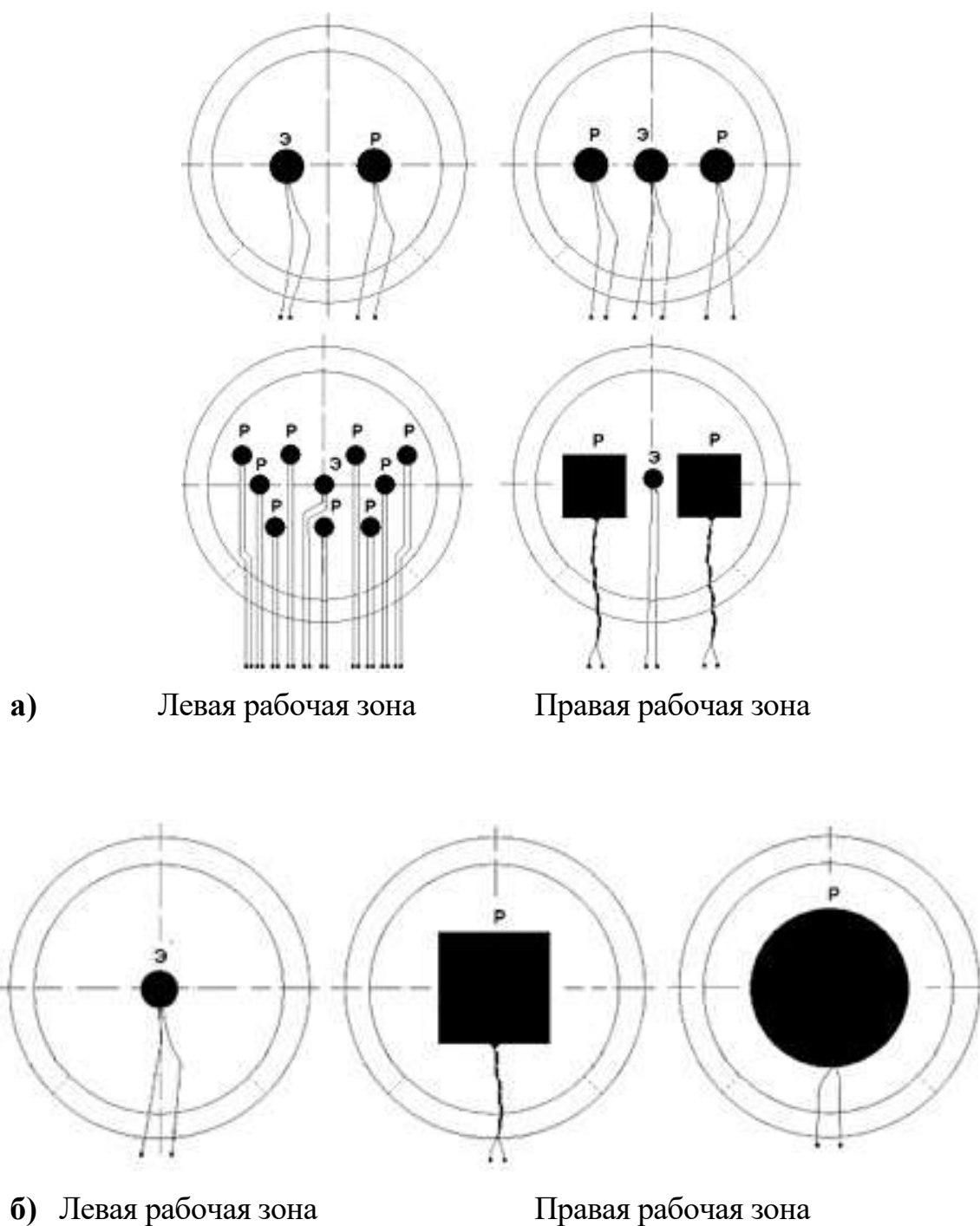
Теплосток является плоским теплообменником с внутренними фрезерованными каналами для циркуляции термостатированного хладагента. Поверхность теплостока имеет две рабочие зоны, ограниченные двумя одинаковыми кольцами, назначение которых выделить два идентичных равномерно облучаемых поля, на которых размещают ПТП. Кольца являются, двумя посадочными местами для ИТИ, закрепленного на Г-образном кронштейне, с помощью которого осуществляют перемещение вверх-вниз и повороты ИТИ на левое и правое поля теплостока.

Система термостатирования теплового блока не только поддерживает теплоотдающие поверхности ПТП и ПТП_э, при одинаковой температуре, но и отводит теплоту, аккумулированную корпусом ИТИ, экраном и теплостокком. Возможные схемы размещения ПТП в рабочей зоне теплостока показаны на рисунке 4.17. При радиационном компарировании также следует применять высокотеплопроводные смазки для существенного снижения контактного теплового сопротивления между теплостокком и ПТП.

В приборной стойке (поз 4 рис. 4.15) скомпонованы приборы сервисного назначения: высокоточный регулятор температуры (ВРТ-3), посредством которого задается и поддерживается режим работы излучателя ИТИ; вольтметр цифровой двухканальный Щ1526 для измерения сигналов ПТП и ПТ; коммутатор измерительных сигналов (Ф7078К), обеспечивающий последовательный опрос сигналов нескольких ПТП и блок связи с ПК.

Выбор конструктивных размеров основных элементов установки РГУ-2 и ПТП_э основан на результатах аналитического решения ряда задач [39, 42], посвященных исследованию факторов, влияющих на погрешность воспроизведения единицы теплового потока и передачи её от эталонного ПТП_э рабочему ПТП при радиационном способе подведения теплоты. К ним относятся:

– вклад неконтролируемых конвективной или конвективно-кондуктивной составляющих в нормированный поток теплового излучения;



Э – эталонный ПТП, Р – рабочий аттестуемый ПТП

а) – варианты схем размещения эталонного и малогабаритных рабочих ПТП;
 б) – схема размещения эталонного и крупногабаритного ПТП.

Рисунок 4.17. – Возможные схемы размещения ПТП в рабочей зоне теплостока

- соотношения между размерами полости ИТИ (диаметра тепловоспринимающей поверхности теплостока и высоты экрана), ПТП, а также его чувствительного элемента и охранной зоны;
- характер распределения локальных угловых коэффициентов по поверхности, на которой установлен градуируемый ПТП;
- наличие отражающего экрана;
- соотношение значений температуры излучателя и термостатирования теплостока и экрана;
- тепловое сопротивление ПТП и контактное тепловое сопротивление;
- интенсивность теплообмена на боковой поверхности ПТП.

Для правильного выбора размеров полости ИТИ решена задача о распространении кондуктивного теплового потока через газовую среду (воздух) в полости. Расчеты для приведенной плотности теплового потока $q(z=0)/q_0$ (сечение $z=0$ соответствующее тепловоспринимающей поверхности теплостока) выполнены для полости в зависимости от безразмерного радиуса теплостока r/r_{TC} при вариации относительной высоты экрана $h_{ЭК}/r_{TC}$ по формуле [190, 239]:

$$\frac{q(z=0)}{q_0} = 2 \cdot (h_{ЭК}/r_{TC}) \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_m \cdot \rho)}{J_1(\mu_m)} \cdot \frac{1}{sh(\mu_m \cdot h_{ЭК}/r_{TC})}, \quad (4.19)$$

где q_0 – плотность теплового потока через однородную неограниченную пластину; $J_0(x)$ и $J_1(x)$ – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков; μ_m – корни характеристического уравнения $J_1(\mu_m) = 0$; $h_{ЭК}/r_{TC}$ – относительная высота экрана; r_{TC} – радиус тепловоспринимающей поверхности теплостока;

Полученные результаты счета по формуле (4.19), представленные на рисунке 4.18, показывают, что приведенная плотность теплового потока $q(z=0)/q_0 < 0,1$ для значений относительной высоты экрана $h_{ЭК}/r_{TC} > 2$ (кривые 1-4). Эти результаты были подтверждены экспериментами, проведенными на макете излучающей полости при равенстве температуры экрана и теплостока и состоящими из прямых измерений плотности теплового потока по дну полости (аналог поверхности теплостока) при вариации ее

относительной высоты.

Теплообмен излучением между поверхностями ИТИ и теплостока рассчитывается по известной зависимости:

$$q = \sigma \cdot \varepsilon_{\text{ИПР}} \cdot \varphi_{1-2} (T_{\text{ИТИ}}^4 - T_{\text{ТС}}^4), \quad (4.20)$$

где $\varepsilon_{\text{ИПР}}$ – приведенная степень черноты, φ_{1-2} – угловой коэффициент теплообмена излучением, который определяется для полости в отсутствие зеркально полированного термостатированного экрана и при его наличии, соответственно, по следующим формулам [261]:

$$\varphi_{1-2} = 1 + 0,5 \cdot (h_{\text{ЭК}} / r_{\text{ТС}})^2 - 0,5 \cdot (h_{\text{ЭК}} / r_{\text{ТС}}) / \sqrt{(h_{\text{ЭК}} / r_{\text{ТС}})^2 + 4} \quad (4.21)$$

$$\varphi_{1-2, \text{зерк}} = 0,5(1 + \varphi_{1-2}), \quad (4.22)$$

результаты счета по которым приведены на рисунке 4.19.

Исходя из результатов вычислительных экспериментов принято решение о размерах теплового блока. Учитывая номенклатуру типоразмеров ПТП, выпускаемых и подлежащих аттестации и поверкам, значение для относительной высоты экрана полости взято равным 2,34 при диаметре рабочей части поверхности теплостока 200 мм. Наличие зеркально отражающего термостатированного экрана приводит к увеличению расчетного среднего углового коэффициента более чем в четыре раза.

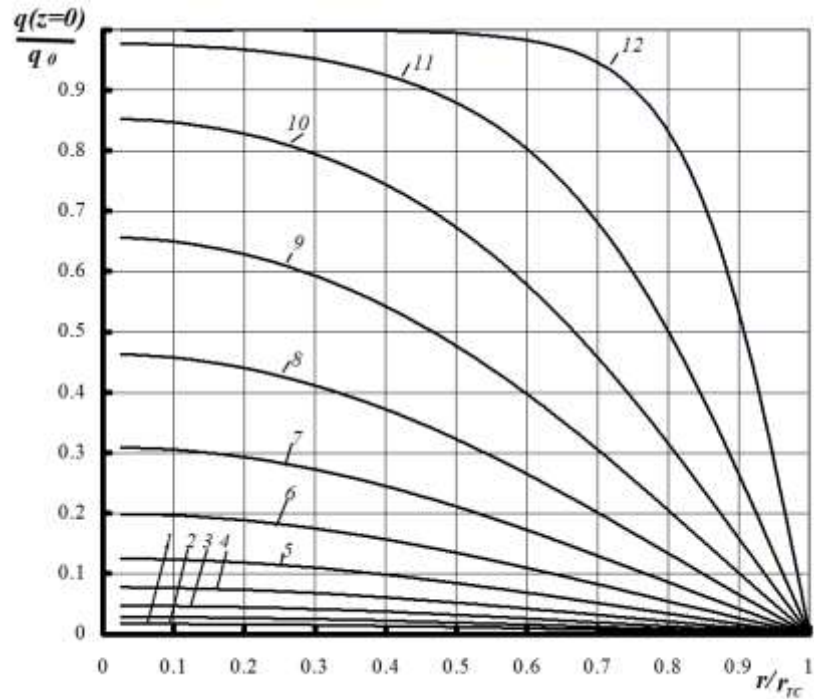
Для анализа степени равномерности теплового потока по поверхности теплостока рассмотрены распределения относительных угловых коэффициентов $\varphi_{1-2} / \varphi_0$ и $\varphi_{1-2, \text{зерк}} / \varphi_0$ по этой поверхности. Вычисления выполнены по формуле [262]:

$$\varphi_{1-2} / \varphi_0 = \frac{0,5}{\varphi_0} \cdot \left(1 - \frac{X - 1}{\sqrt{(X + 1)^2 - (2 \cdot \rho)^2}} \right) \quad (4.23)$$

где φ_0 – значение углового коэффициента в центре поверхности,

$$X = (h_{\text{ЭК}} / r_{\text{ТС}})^2 + \rho^2, \quad \rho = r / r_{\text{ТС}}, \quad \text{а } \varphi_{1-2, \text{зерк}} / \varphi_0 \text{ – по формуле (4.22).}$$

На рисунке 4.20 приведены результаты численного эксперимента, полученные для значения $h_{\text{ЭК}} / r_{\text{ТС}} = 2,34$. Они показывают, что применение



1 – $h_{ЭК}/r_{ТС}=3,0$; 2 – 2,75; 3 – 2,5; 4 – 2,25; 5 – 2,0; 6 – 1,75; 7 – 1,5; 8 – 1,25; 9 – 1,0; 10 – 0,75; 11 – 0,5; 12 – 0,25.

Рисунок 4.18. – Зависимость приведенной плотности кондуктивного теплового потока через воздушную среду от безразмерного радиуса теплостока при вариации относительной высоты $h_{ЭК}/r_{ТС}$

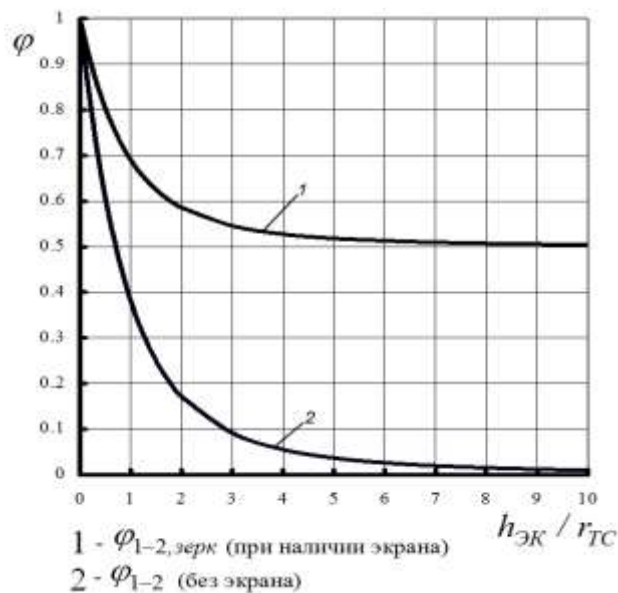


Рисунок 4.19. – Зависимости угловых коэффициентов от относительной высоты экрана

термостатированного отражающего экрана способствует улучшению равномерно распределения локальных угловых коэффициентов по тепловоспринимающей поверхности теплостока почти на порядок. При этом неравномерность на площадке $0,6 r_{TC}$ не превышает 1 %, а на площадке $0,8 r_{TC}$ – 2 % и при необходимости может быть учтена соответствующей поправкой.

Степень равномерности теплового поля в зоне ограниченной кольцом, исследована теоретически и экспериментально. При этом исследованно распределение приведенной плотности $q(\rho)/q_0$ вдоль радиальной координаты. Эти результаты графически представлены на рисунке 4.21. Как видим, на площадке с радиусом $0,6 r_{TC}$ неравномерность теплового поля превышает 1%, а на площадке с радиусом $0,9 r_{TC}$ – 2% (r_{TC} радиус рабочей зоны теплостока, равный 100 мм). Таким образом максимальная методическая погрешность из-за неравномерности поля теплового излучения на облучаемой поверхности теплостока внутри кольца порядка 2% может быть учтена поправкой.

Зависимость относительного углового коэффициента от высоты аттестуемого ПТП приведена на рисунке 4.22 для случая применения экрана (см. график 1) и без него (см. график 2). Как видим, при варьировании высоты ПТП от 0 до 10 мм при наличии экрана изменение относительного углового коэффициента порядка 2%. В силу линейности этой зависимости неодинаковость высот ПТП и ПТП_Э легко учитывается поправкой, либо устраняется с помощью дополнительной прокладки из высокотеплопроводного материала.

Требования к конструкции ПТП, аттестуемого путем радиационного компарирования, определены по результатам аналитического исследования влияния таких факторов, как относительный радиус ПТП ($r/h_{ПТП}$) условия теплообмена на тепловоспринимающей и боковой поверхностях ПТП и соотношения $R_{ПТП}/R_K$. Для получения искомых распределений плотности теплового потока и температуры использовано решение задачи, описанное в [42],

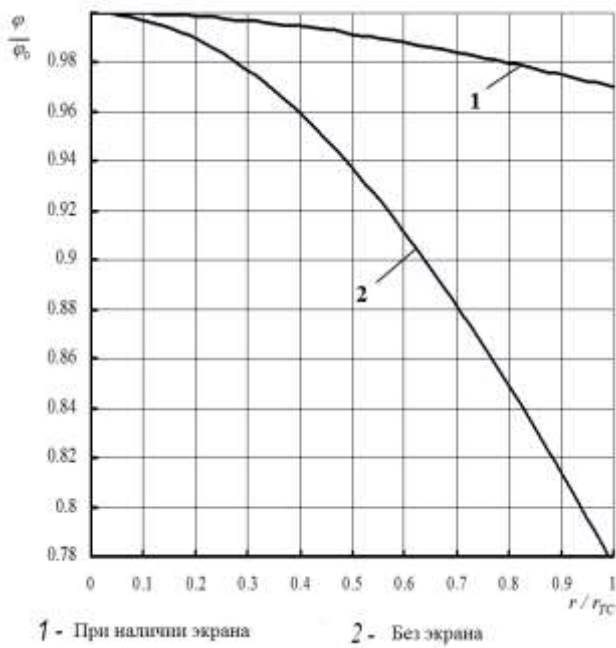


Рисунок 4.20 – Распределение локальных угловых коэффициентов по поверхности теплостока

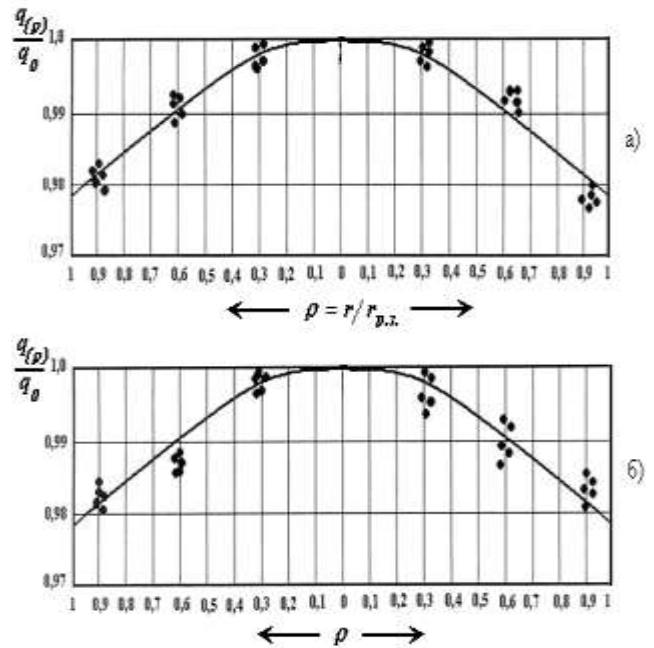
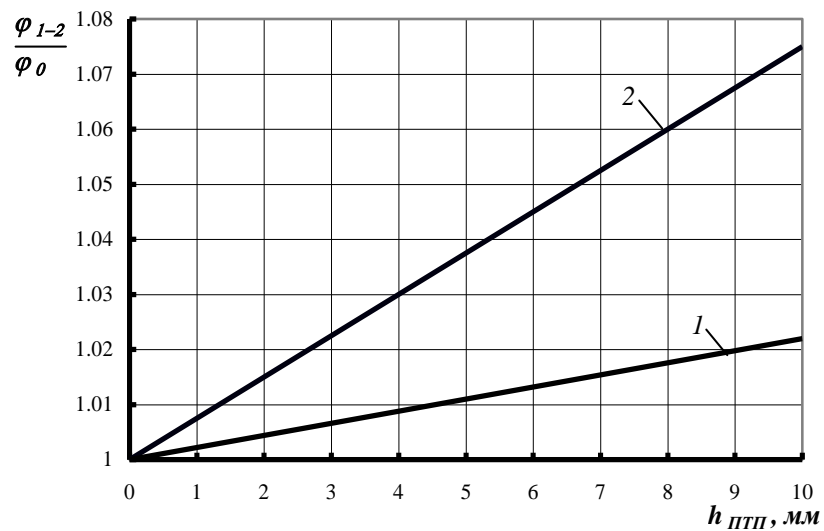


Рисунок 4.21 – Распределение приведенной плотности потока теплового излучения в двух взаимно перпендикулярных направлениях (а и б)

— - теоретическая кривая;
 ● - экспериментальные точки



1 – при наличии экрана, 2 – без экрана

Рисунок 4.22 – Зависимость угловых коэффициентов от высоты аттестуемого ПТП.

с учетом радиационного теплообмена между ИТИ и поверхностями ПТП через эффективные коэффициенты теплообмена:

$$q = \alpha_{\text{эф}} \cdot (T_{\text{ИТИ}} - T_{\text{ПТП}}), \quad (4.24)$$

$$\text{где } \alpha_{\text{эф,ВЕРХ}} = \alpha_{\text{ВЕРХ}} = \varepsilon_{\text{ПР,ВЕРХ}} \cdot \sigma \cdot \varphi_{1-2,\text{ВЕРХ}} \cdot (T_{\text{ИТИ}} + T_{\text{ПТП,ВЕРХ}})(T_{\text{ИТИ}}^2 + T_{\text{ПТП,ВЕРХ}}^2) \quad (4.25)$$

$$\text{и } \alpha_{\text{эф,БОК}} = \alpha_{\text{БОК}} = \varepsilon_{\text{ПР,БОК}} \cdot \sigma \cdot \varphi_{1-2,\text{БОК}} \cdot (T_{\text{ИТИ}} + T_{\text{ПТП,БОК}})(T_{\text{ИТИ}}^2 + T_{\text{ПТП,БОК}}^2). \quad (4.26)$$

Тепловая модель данной задачи приведена на рисунке 4.23.

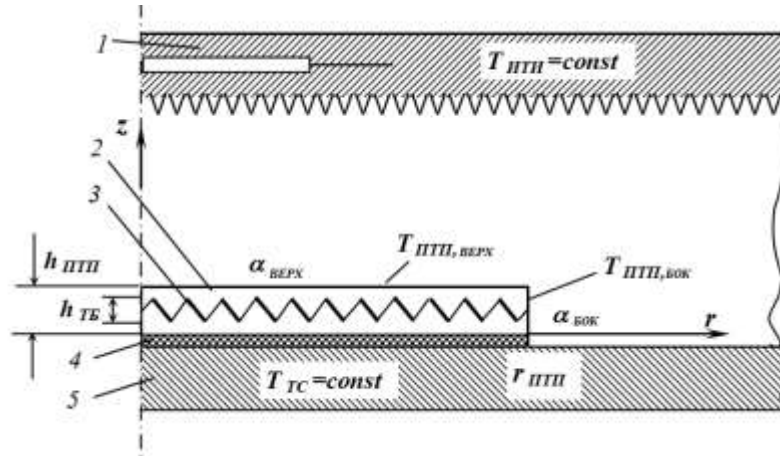


Рисунок 4.23 – Тепловая модель радиационного компарирования.

Учитывая специфику метрологической установки радиационного типа, можно утверждать, что $\alpha_{\text{БОК}} \leq \alpha_{\text{ВЕРХ}}$. При этом предельный случай, когда $\alpha_{\text{БОК}} = \alpha_{\text{ВЕРХ}} = \alpha_{\text{эф}}$, с точки зрения обеспечения точности измерений является самым неблагоприятным случаем. Система обладает осевой симметрией, и математическая задача описывается известным уравнением теплопроводности [179]. При этом граничные условия на нижнем и верхнем торцах ПТП в безразмерных координатах имеют вид:

$$\beta \cdot \frac{\partial \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \zeta} = \vartheta(\zeta, \rho) + 1 \quad \text{при } \zeta = 0, \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \zeta} + Bi_{\text{ВЕРХ}} \vartheta(\zeta, \rho) = 0 \quad \text{при } \zeta = 1$$

где $\beta = R_K / R_{\text{ПТП}}$ – отношение значений теплового сопротивления;

$$Bi_{\text{ВЕРХ}} = \alpha_{\text{ВЕРХ}} \cdot h_{\text{ПТП}} / \lambda_{\text{ПТП}}.$$

Из решения этой задачи, приведенного в [39, 42], получены выражения для функций приведенных локальной $q_{ЛОК} / q_0$ и среднеинтегральной $q_{СР} / q_0$ плотности теплового потока, расчеты по которым систематизированы в таблицах 4.9 и 4.10. При этом построены зависимости $q_{ЛОК} / q_0$ на входе в ПТП и выходе из него для трех значений числа $Bi_{ВЕРХ}$ (0,1; 0,01; 0,001) относительно текущего радиуса $r / h_{ПТП}$ при вариации геометрического параметра $D_{ПТП} / h_{ПТП} = 10; 20; 30$ и 40 и отношения значений теплового сопротивления $R_K / R_{ПТП}$. Кроме того, построены зависимости $q_{СР} / q_0$ от текущего относительного радиуса при тех же значениях числа $Bi_{ВЕРХ}$ и параметра $D_{ПТП} / h_{ПТП}$ но при вариации относительной высоты термобатареи $h_{ТБ} / h_{ПТП}$ для двух значений отношения $R_K / R_{ПТП}$ (1 и 0), приведенные в таблицах 4.11 и 4.12.

Анализ этих результатов подтверждает необходимость изготовления эталонного ПТП обязательно с охранной зоной шириной не менее пяти высот ПТП. Желательно, чтобы и рабочий ПТП, если он подвергается аттестации методом радиационного компарирования, тоже имел охранную зону. Размер охранной зоны рабочего ПТП выбирается, исходя из условий его дальнейшего применения с использованием рекомендаций, приведенных в [42].

При проектировании установки РГУ-2 решена задача по обеспечению возможности задания плотности потока теплового излучения в диапазоне от 10 Вт/м^2 до 10^4 Вт/м^2 . Были рассчитаны и на рисунке 4.24 представлены функции распределения плотности потока теплового излучения в зависимости от температуры излучателя в диапазоне значений от 250 К до 550 К (рис. 4.24 *а*), от 250 К до 750 К (рис. 4.24 *б*) с шагом в 20 К при вариации температуры термостатирования теплостока.

Как показывают графики в установке РГУ-2 путем изменения температуры ИТИ и термостатирования теплостока можно задавать нормированную плотность теплового излучения как в широком диапазоне ее значений, так и в температурном интервале.

Таблица 4.9 – Распределения приведенной плотности теплового потока на входе в ПТП и выходе из него $q_{ЛОК}/q_0$ в зависимости от относительного радиуса ПТП при вариации значений числа $Bi_{ВЕРХ}$, отношения значений теплового сопротивления $R_K/R_{ПТП}$ и геометрического параметра $D_{ПТП}/h_{ПТП}$

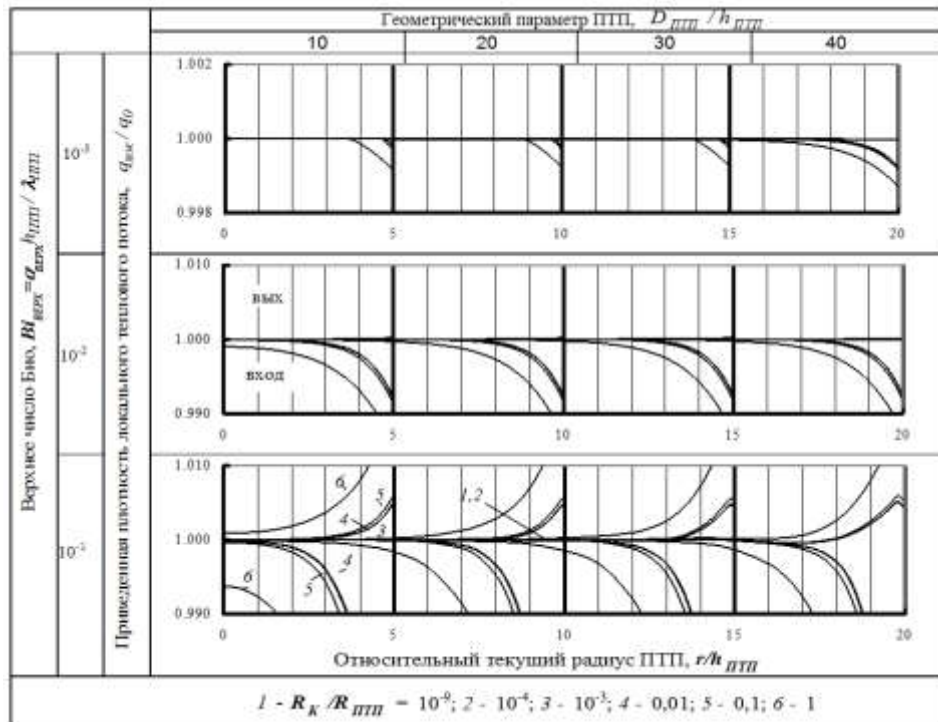


Таблица 4.10 – Распределения приведенной плотности среднеинтегрального теплового потока q_{CP}/q_0 в зависимости от относительного радиуса ПТП при вариации значений числа $Bi_{ВЕРХ}$, отношения значений теплового сопротивления $R_K/R_{ПТП}$ и геометрического параметра $D_{ПТП}/h_{ПТП}$

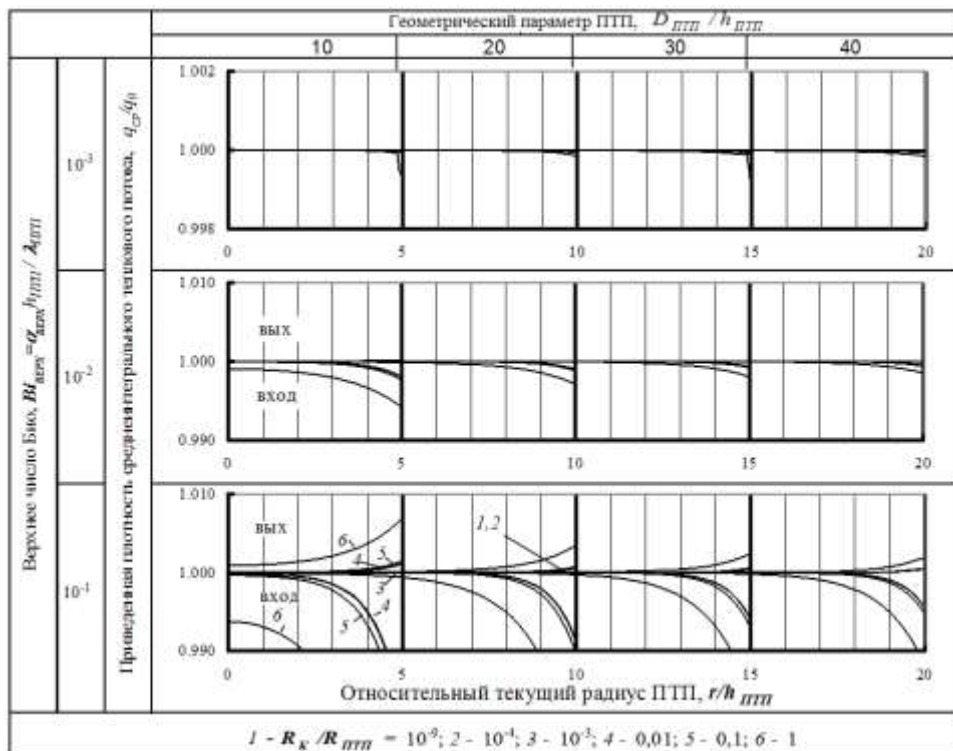


Таблица 4.11 – Распределения приведенной плотности среднеинтегрального теплового потока q_{CP} / q_0 в зависимости от относительного радиуса ПТП при вариации числа Био $Bi_{ВЕРХ}$, геометрического параметра $D_{ПТП} / h_{ПТП}$ и относительной высоты термобатареи $h_{ТБ} / h_{ПТП}$ для отношения $R_K / R_{ПТП} = 1$

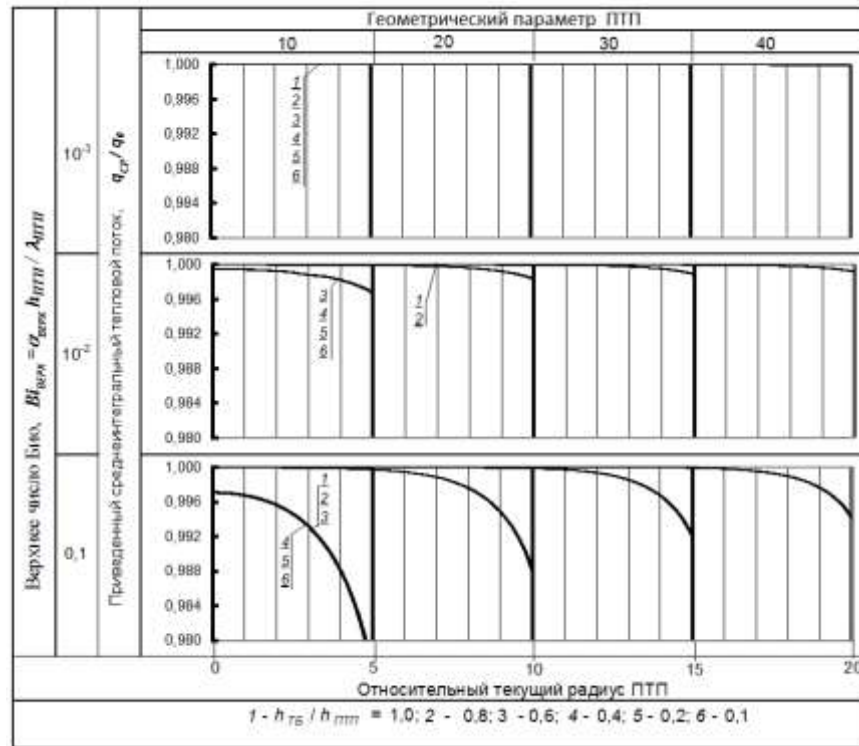
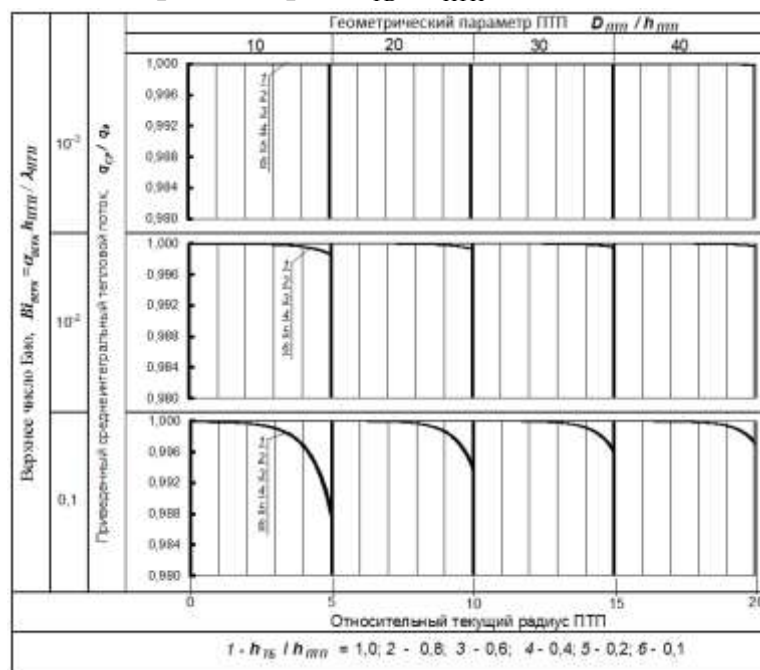


Таблица 4.12 – Распределения приведенной плотности среднеинтегрального теплового потока q_{CP} / q_0 в зависимости от относительного радиуса ПТП при вариации числа Био $Bi_{ВЕРХ}$, геометрического параметра $D_{ПТП} / h_{ПТП}$ и относительной высоты термобатареи $h_{ТБ} / h_{ПТП}$ для отношения $R_K / R_{ПТП} = 0$



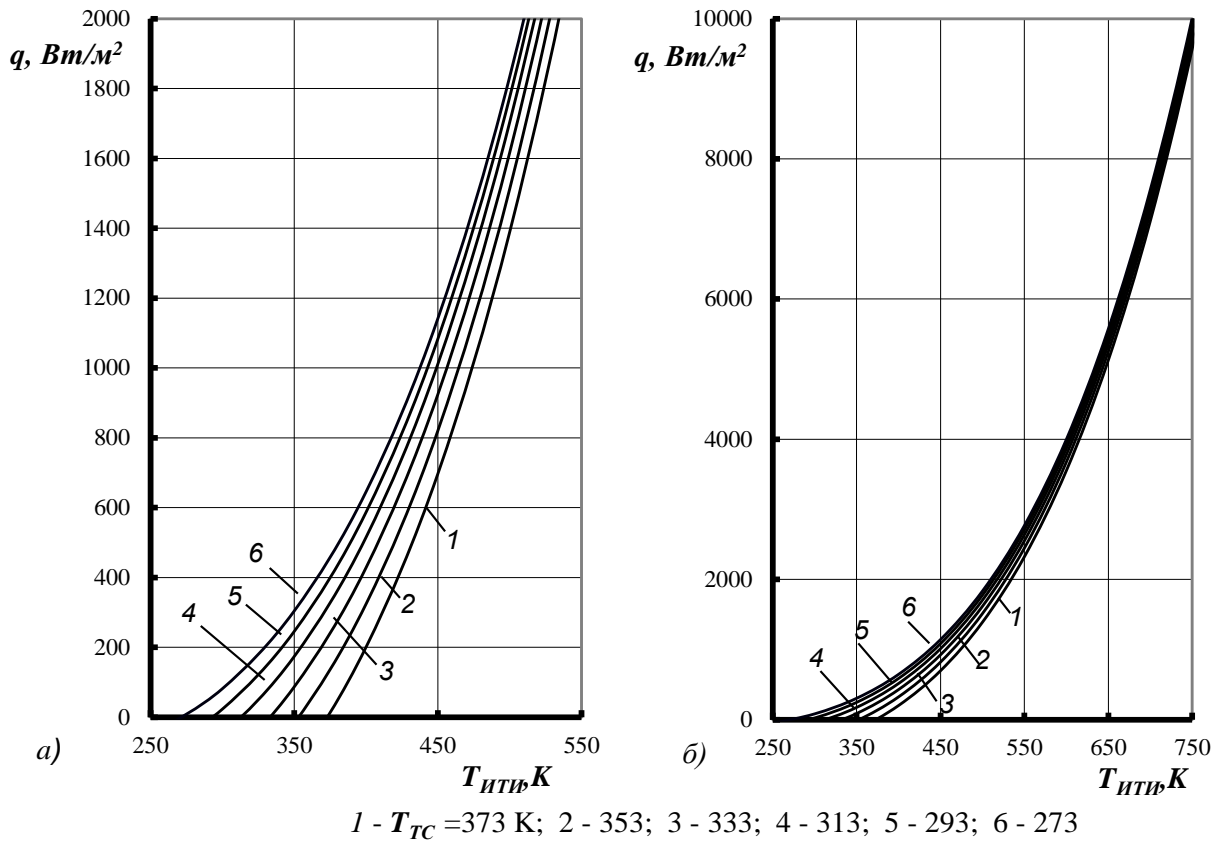


Рисунок 4.24 – Зависимости плотности теплового потока от температуры излучателя $T_{итп}$ при вариации температуры термостатирования $T_{ТС}$.

Установка РГУ-2 обеспечивает весь диапазон значений плотности потока теплового излучения, необходимый для аттестации не только приборов серии ИТП, но и всей номенклатуры ПТП (кроме специальных), пользующихся спросом в Украине и странах СНГ.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТАНОВКИ РГУ-2:

- диапазоны значений плотности воспроизводимого теплового потока теплового излучения от 10 Вт/м^2 до 10^4 Вт/м^2 ;
- диапазон устанавливаемых значений рабочей температуры (300–350) К;
- пределы допускаемой основной относительной погрешности компарирования при определении функции преобразования ПТП – $\pm 0,5\%$;
- диапазон устанавливаемых значений температуры термостатирования теплостока и отражающего экрана от 300 до 350 К;
- погрешность стабилизации установленного фиксированного значения температуры термостатирования $\pm 0,1$ К;

- внутренний диаметр установочных колец, ограничивающих рабочие зоны теплостока, предназначенные для размещения ПТП – 210 мм;
- диаметр рабочей зоны, неоднородность теплового потока в которой не более 2% – 190 мм;
- возможное количество одновременно устанавливаемых в рабочей зоне ПТП – от 1 до 20 в зависимости от их габаритных размеров;
- продолжительность выхода установки на стационарное состояние – 60 мин;
- продолжительность измерений по определению значений функции преобразования ПТП в одной точке диапазона плотности теплового потока (5-10) минут после наступления стационарного состояния.

4.6 Выводы по главе 4

1) Исследована степень влияния на одномерность плотности теплового потока, проходящего через ПТП при воспроизведении и передаче размера единицы плотности теплового потока, таких факторов, как собственное тепловое сопротивление ПТП, контактное сопротивление на его торцовых поверхностях и условия теплообмена на боковой поверхности в зависимости от геометрического параметра ПТП, относительной высоты термобатареи, температуры отнесения и наличия или отсутствия газовой среды в рабочем объеме градуировочного устройства, при этом установлено, что:

- для ПТП, размещенного в градуировочном устройстве, отношение значений теплового сопротивления $R_K / R_{ПТП}$ из диапазона от 0,1 до 0,5;
- уровень искажений теплового поля не зависит от относительной высоты ПТП, а зависит существенно от условий теплообмена на боковой поверхности ПТП;
- для предотвращения искажений теплового потока в аттестуемом ПТП его следует изготавливать с охранной зоной вокруг чувствительного элемента, ширина которой должна быть не менее пяти высот ПТП, а тепловое сопротивление равно сопротивлению теплочувствительной зоны.

2) Разработана метрологическая установка нового поколения для аттестации ПТП с наивысшей точностью воспроизведения и передачи единицы измерения плотности теплового потока за счет того, что:

– в конструкции установки реализованы системы активной адиабатизации нерабочих поверхностей основного нагревателя и многослойной активной теплоизоляции боковой поверхности градуировочной головки, а эталонные ПТП_э выполнены с равномерным тепловым сопротивлением; а также обеспечено соосное размещение аттестуемого ПТП с поверхностями посадочного места между основным нагревателем и теплостоком и стабилизация теплового сопротивления между контактирующими поверхностями основного нагревателя, ПТП и теплостока;

– процессы измерения, накопления и обработки измерительной информации благодаря применению ПК автоматизированы;

3) Впервые сформулированы требования к эталонным ПТП_э, индифферентным к краевым эффектам в условиях кондуктивного, конвективного и радиационного теплообмена, учет которых позволяет обеспечить корректную передачу размера единицы измерения поверхностной плотности теплового потока рабочим эталонам и рабочим средствам измерения. Стабильность метрологических характеристик и термостойкость ПТП_э в широком температурном диапазоне при длительной эксплуатации обеспечена использованием впервые нетрадиционных термоэлектрических пар.

4) Впервые для области теплоточных измерений в Украине разработана поверочная схема для СИ плотности теплового потока (проект).

5) Разработана метрологическая радиационная установка нового поколения РГУ-2 для градуирования, аттестации и поверки различных ПТП методом компарирования по эталонному ПТП_э.

Сказанное позволяет утверждать, что выполненный комплекс аналитических и прикладных исследований можно считать основой метрологического обеспечения теплоточных измерений в Украине.

ГЛАВА 5

ТЕПЛОМЕТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

Совокупность фундаментальных разработок, выполненных в отделе теплотметрии ИТТФ, позволила решить множество прикладных задач теплотметрии в интересах различных отраслей, главным образом, строительной, энергетической, аэрокосмической, пожарной безопасности, как в научных исследованиях, так и в промышленности [263].

За прошедший период, особенно за последние 20 лет, в условиях дефицита и удорожания энергоресурсов и коммерциализации отношений между их поставщиками и потребителями, тенденция развития СИТ существенно изменились. В связи с появлением новых проблем, связанных с внедрением технологий и мероприятий по тепло- и ресурсосбережению, доминирующее положение стали занимать приборы, позволяющие проводить оперативный контроль, оптимизацию и регулирование процессов теплообмена, а также минимизацию тепловых потерь (или притоков).

Благодаря достижениям теплотметрии, электроники и метрологии на базе первичных ПТП и ПТ создана гамма современных метрологически аттестованных теплотметрических приборов и компьютеризированных комплексов [10], систематизированных на рисунке 5.1. Исходя из сферы применения, эти СИТ являются исследовательскими, предназначенными для работы в лабораторных условиях, и на эксплуатационные – для получения информации при тепловых испытаниях на стройплощадках, заводских стендах, других натуральных условиях. Детальная информация о наиболее востребованных в настоящее время теплотметрических приборах и комплексах приведена ниже.

5.1 Аппаратура для измерения высокоинтенсивного теплового потока

Во многих отраслях промышленности, в частности в авиа-, авто- и вагоностроении, индустрии строительных материалов, службе пожарной безопасности и других, предусмотрены испытания на воспламеняемость,

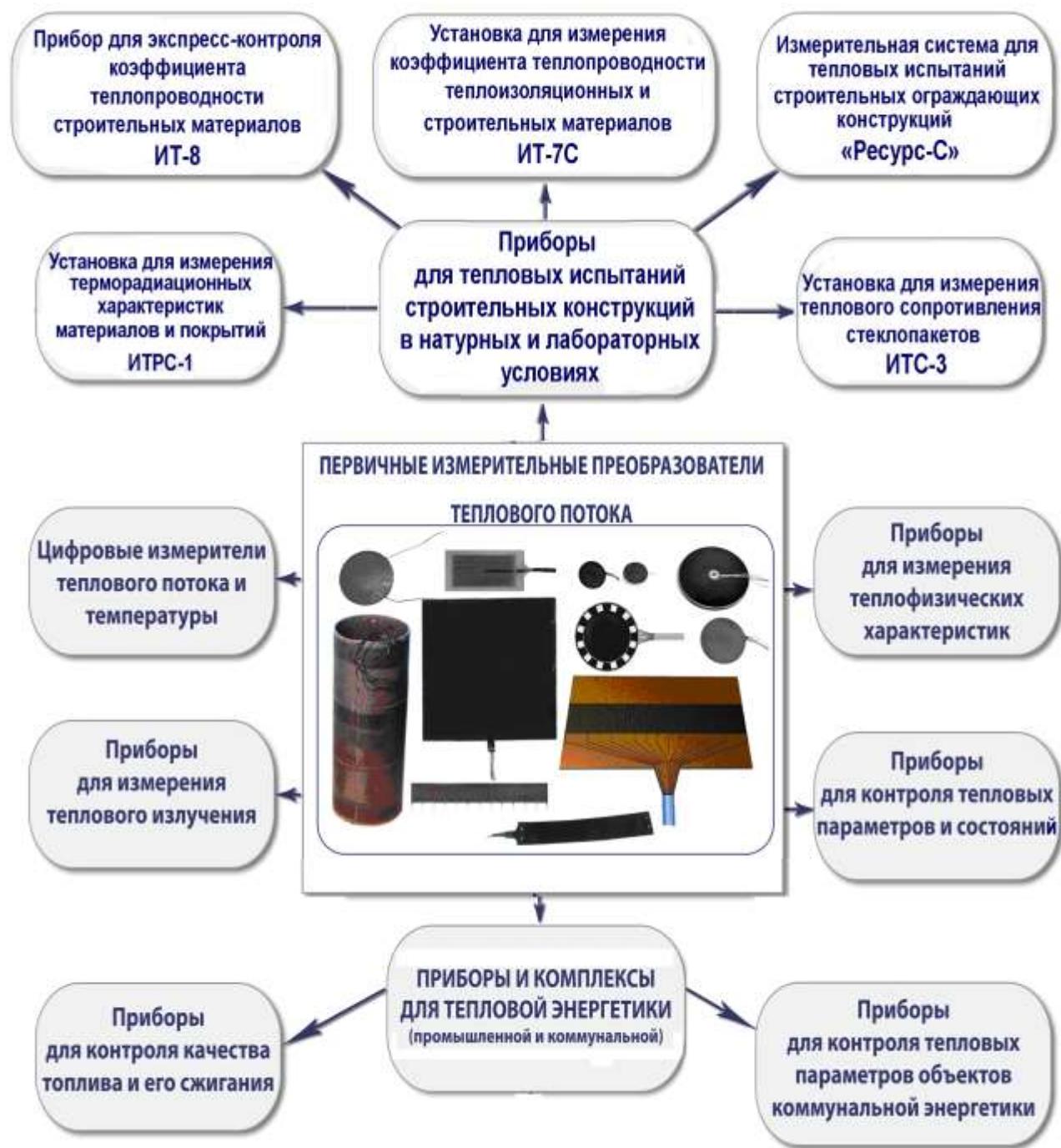


Рисунок 5.1 – Аппаратура, разработанная в ИТТФ для решения прикладных задач теплотрии в различных сферах научной и производственной деятельности

горючесть, способность ограничения распространения огня различных материалов и изделий, которые при испытаниях подвергают воздействию открытого пламени, помещая испытываемый объект в пламя горелки. Существует ряд стандартов [264-267] на огневые испытания, в которых предусмотрено измерение таких параметров, как температура и поверхностная плотность теплового потока.

Для выполнения одной из таких задач в ИТТФ разработан автоматизированный комплекс аппаратуры, предназначенной для применения при исследовании высокоинтенсивного теплообмена для измерения и регистрации параметров пламени при огневых испытаниях, а также аттестации и периодических проверок специальных ПТП [36, 268-270].

5.1.1 ПТП для измерения плотности теплового потока при высокой интенсивности теплообмена

При огневых испытаниях объект помещают в пламя горелки с заданными параметрами. Одним из параметров горелки, которые необходимо измерять, является поверхностная плотность теплового потока от пламени, значение которой может быть от 1,0 кВт/м² до 200 кВт/м². Задача измерения таких значений плотности теплового потока на верхнем пределе диапазона осложнена тем, что невозможно применение ПТП типа вспомогательной стенки в обычном исполнении [4, 5]. Большое тепловое сопротивление ПТП, выполненных с применением электроизоляционного заливочного компаунда, основанного на смолах с коэффициентом теплопроводности не более 0,5 Вт/(м·К), не позволяет выдерживать тепловые нагрузки более 10 кВт/м². Как было показано в 3.1, существенное уменьшение эффективного теплового сопротивления ПТП может быть достигнуто путем размещения между тепловоспринимающей и теплоотдающей поверхностями ПТП шунтов из материала с высокой теплопроводностью. При этом шунты должны быть равномерно распределены в теле ПТП, а наружные поверхности термобатареи снабжены температуровыравнивающими покрытиями [32, 205, 269]. Значение эффективного теплового сопротивления ПТП ($R_{эф}$) в этом случае лежит, как

показано на рис. 3.4, между значениями, рассчитанными, соответственно, для изотермической (R^I) и адиабатной (R^A) моделей дробления ПТП на элементарные ячейки [202, 269]. Как видим, с увеличением теплопроводности шунта, различие между R^I и R^A нивелируются, а значение эффективного теплового сопротивления ПТП $R^{\text{эф}}$ может быть вычислено как среднее арифметическое их значений [202]. Как видим, введение в ПТП шунта, выполненного из материала с более высокой теплопроводностью, чем теплопроводность заливочного компаунда, может привести к уменьшению эффективного теплового сопротивления ПТП на два порядка (см. рис. 3.5).

В 3.1 показано, что в зависимости от измерительной задачи (условий эксплуатации и требований к значению эффективного теплового сопротивления) ПТП с тепловым шунтом имеют различное конструктивное исполнение [32, 204, 205]. Для использования ПТП при огневых испытаниях его целесообразно выполнять в цельнометаллическом корпусе со сквозными отверстиями для размещения ленточной термобатареи.

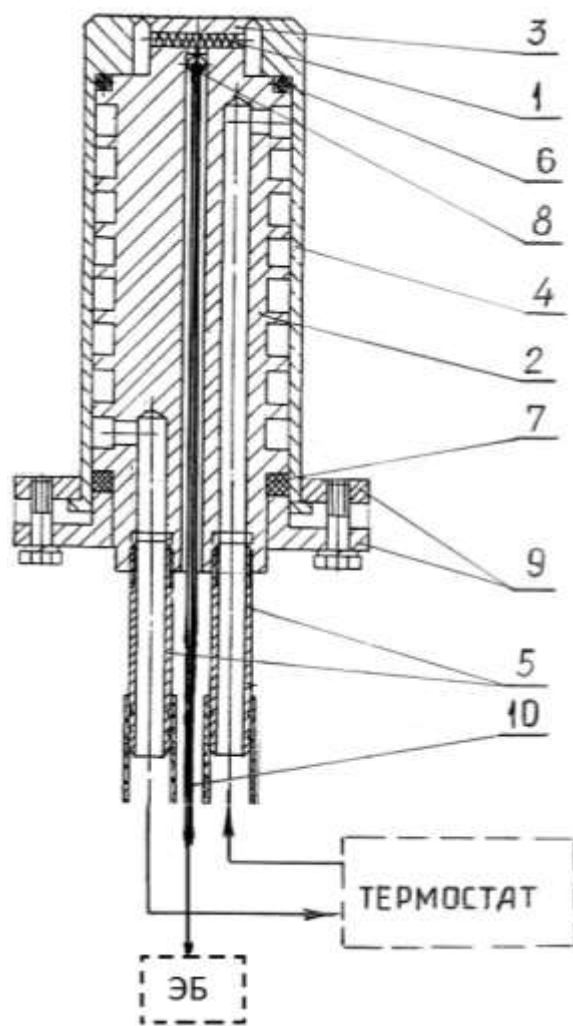
На рисунке 5.2 представлен внешний вид и конструктивная схема ПТП, предназначенного для таких испытаний. Он содержит чувствительный элемент, представляющий собой монолитную жесткую плоскую конструкцию, выполненную в форме диска, установленного в торце цилиндрического корпуса и снабженного тепловоспринимающей пластиной. Внутри диска высверлены сквозные каналы, в которые уложена батарея идентичных гальванических термоэлементов. Во избежание перегрева чувствительного элемента корпус ПТП выполнен водоохлаждаемым. Для этого между корпусом и кожухом предусмотрена полость, через которую осуществляется прокачка жидкого хладагента (воды) постоянной температуры для охлаждения и термостатирования корпуса. ПТП имеет встроенную ТХА, у которой рабочий спай размещен в корпусе под чувствительным элементом. Провода чувствительного элемента и термопары выведены наружу через нижний торец ПТП.

Функция преобразования ПТП обладает нелинейностью порядка 10%. Это обусловлено широким диапазоном измерения и большой плотностью теплового



a)

- 1 – чувствительный элемент ПТП;
- 2 – корпус;
- 3 – тепловоспринимающая пластина;
- 4 – кожух;
- 5 – штуцера;
- 6, 7 – кольца уплотнительные;
- 8 – рабочий спай термопары;
- 9 – крепежные фланцы;
- 10 – измерительный кабель;
- ЭБ – электронный блок



б)

Рисунок 5.2 – Внешний вид (*a*) и конструктивная схема (*б*) ПТП для измерения теплового потока при высокоинтенсивном теплообмене

потока, что влечет за собой изменение физических свойств конструкционных материалов, что и является причиной нелинейности характеристики ПТП.

Для устранения влияния нелинейности характеристики ПТП на точность измерений проведено исследование коэффициента преобразования ПТП (K) и рассчитаны коэффициенты аппроксимационного полинома для вычисления измеренной плотности теплового потока по формуле:

$$q = a_0 + a_1 \cdot K \cdot E + a_2 \cdot (K \cdot E)^2, \quad (5.1)$$

где значение K берется для середины диапазона значений плотности теплового потока.

Описанный ПТП, разработанный с учетом требований ДСТУ 3756 (ГОСТ 30619) [6, 7], является не стандартизированным средством измерения поверхностной плотности теплового потока от пламени горелки. Его условное обозначение записывается следующим образом:

ПТП-1Б.11.2.1.11.Д.51.0.55.11.0 - ДСТУ 3756.

Основные характеристики ПТП №1 приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Основные технические характеристики ПТП №1

Техническая характеристика	Размерность	Числовое значение
Диапазон значений измеряемой поверхностной плотности теплового потока	кВт/м ²	30 – 170
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения	%	±2
Диапазон рабочей температуры	°С	20 – 95
Назначенный ресурс работы в пламени горелки	ч.	200
Площадь тепловоспринимающей поверхности	м ²	4,89·10 ⁻⁴
Габаритные размеры	мм	Ø80×180
Масса	кг	1,5

5.1.2 Автоматизированная установка для измерения параметров пламени при огневых испытаниях

Автоматизированная измерительная установка модели КИТП-1 [36, 268], внешний вид которой показан на рисунке 5.3, а функциональная схема на рисунке 5.4, может работать в двух режимах: рабочем – при проведении огневых испытаний материалов и изделий и метрологическом – для выполнения метрологической аттестации и периодических поверок.

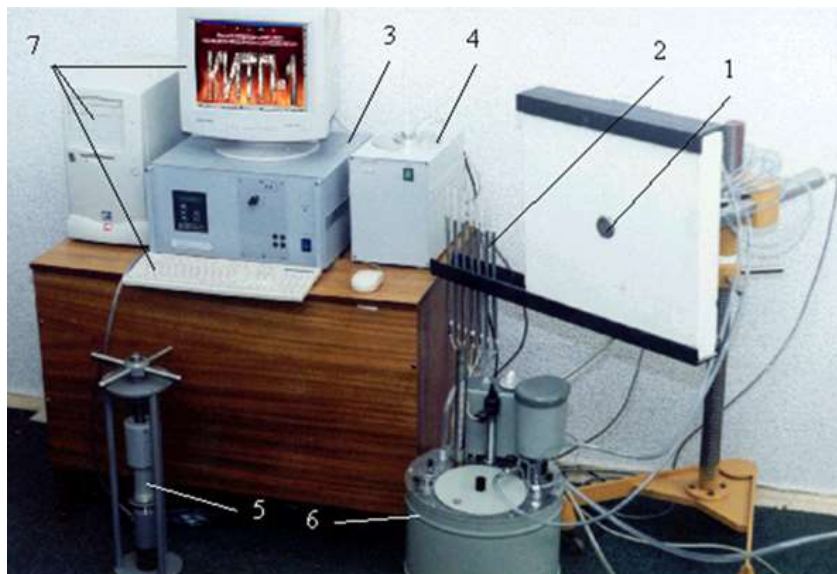
Установка в режиме эксплуатации реализует прямой метод измерения поверхностной плотности теплового потока от пламени горелки с применением термоэлектрического измерительного ПТП специальной конструкции (см. рис. 5.4) и температуры в нескольких точках по сечению температурного поля пламени горелки. Для измерения температуры применяют идентичные ПТ – хромель-алюмелевые термопары (ТХА).

В состав установки входят ПТП и комплект ТХА с устройством термостатирования опорных спаев (УТОС); специализированный электронный блок; жидкостный циркуляционный термостат и ПК с соответствующим ПО, а так же градуировочный калориметр (см. рис. 5.3, поз. 5).

Комплект термопар ТХА, установленных на одинаковом расстоянии друг от друга, и предназначенных для одновременного измерения температуры в семи точках для контроля равномерности температурного поля по сечению пламени горелки, выполнен в виде гребенки. Каждая термопара изготовлена в виде цилиндрического зонда с оголенным спаем. Диаметр термоэлектродных проводов и их изоляция выбраны, исходя из соображений минимальной методической погрешности и длительности эксплуатации при огневых испытаниях [44]. Схема крепления преобразователей показана на рисунке 5.5.

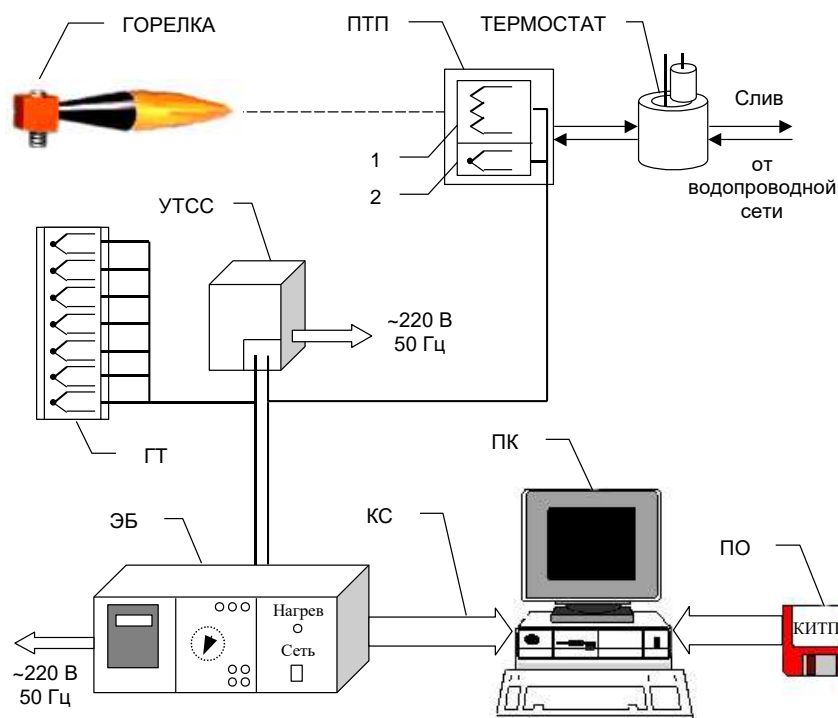
Для проведения огневых испытаний ПТП и гребенку термопар помещают в огневую камеру на специальной передвижной платформе (см. рис. 5.3, поз. 6).

Специализированный электронный блок предназначен для приема сигналов ПТП и ПТ, преобразования их из аналогового вида в цифровой, обработки и передачи их в ПК, а также для индикации в цифровом виде



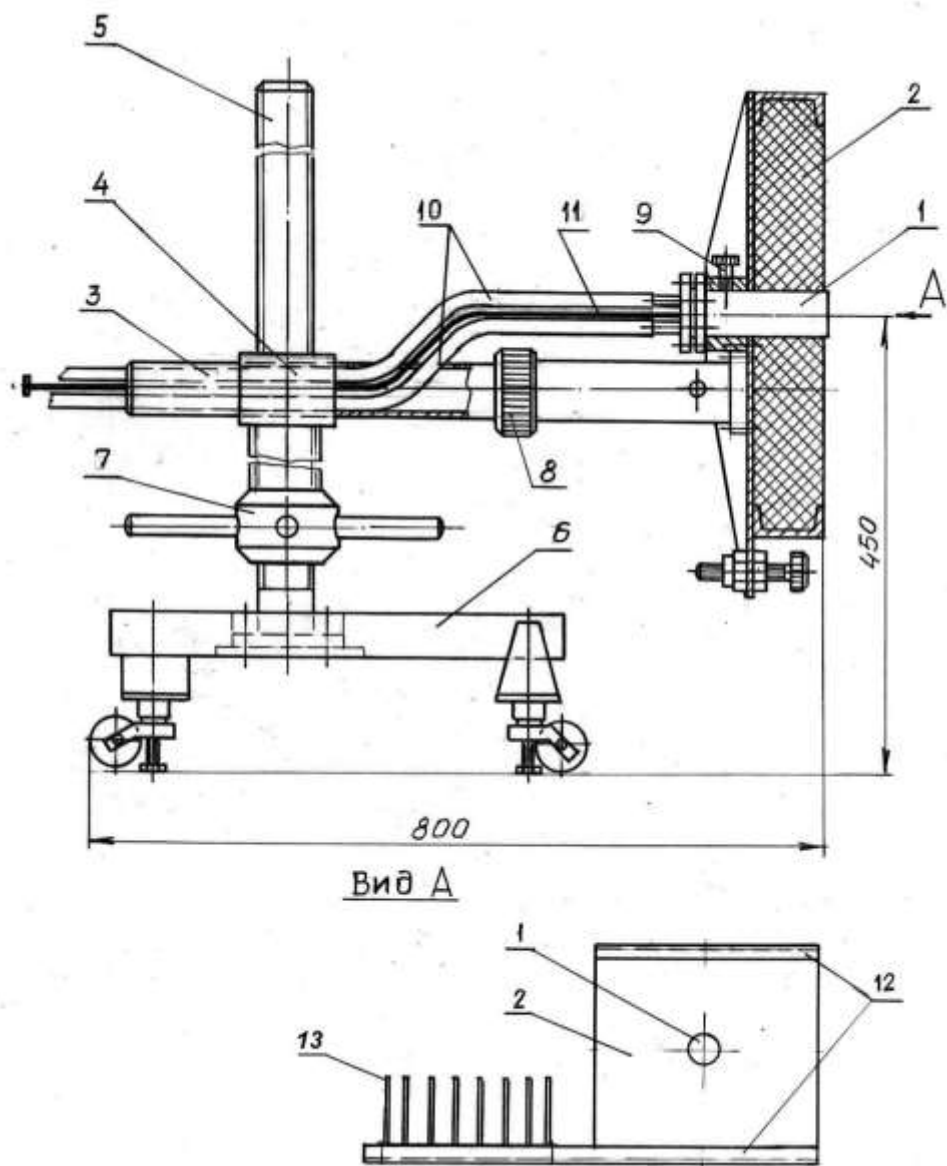
- 1 – ПТП,
 2 – гребенка термопар,
 3 – специализированный электронный блок,
 4 – устройство термостатирования опорных спаев термопар,
 5 – градуировочный калориметр,
 6 – термостат,
 7 – ПК

Рисунок 5.3 – Общий вид установки модели КИТП-1.



ПТП – преобразователь теплового потока: 1 –теплочувствительный элемент, 2 – термопара; ГТ –гребенка термопар; УТСС – устройство термостатирования свободных спаев термопар; ЭБ – электронный блок; КС – кабель связи с компьютером; ПК – персональный компьютер; ПО – программное обеспечение.

Рисунок 5.4 – Функционально-структурная схема установки КИТП-1



1 – ПТП; 2 – защитная плита; 3 – штанга; 4 – держатель; 5 – ходовой винт;
 6 – передвижная платформа; 7 – ходовая гайка; 8 – муфта скользящая; 9 – винт;
 10 – шланги ПТП; 11 – измерительный кабель ИК-1; 12 – направляющие
 профили; 13 – гребенка термопар

Рисунок 5.5 – Схема крепления ПТП и гребенки термопар в передвижном узле крепления

текущих значений плотности теплового потока от пламени горелки, температуры корпуса ПТП и представительных значений температуры по сечению пламени в точках, где установлены первая, четвертая и седьмая ТХА.

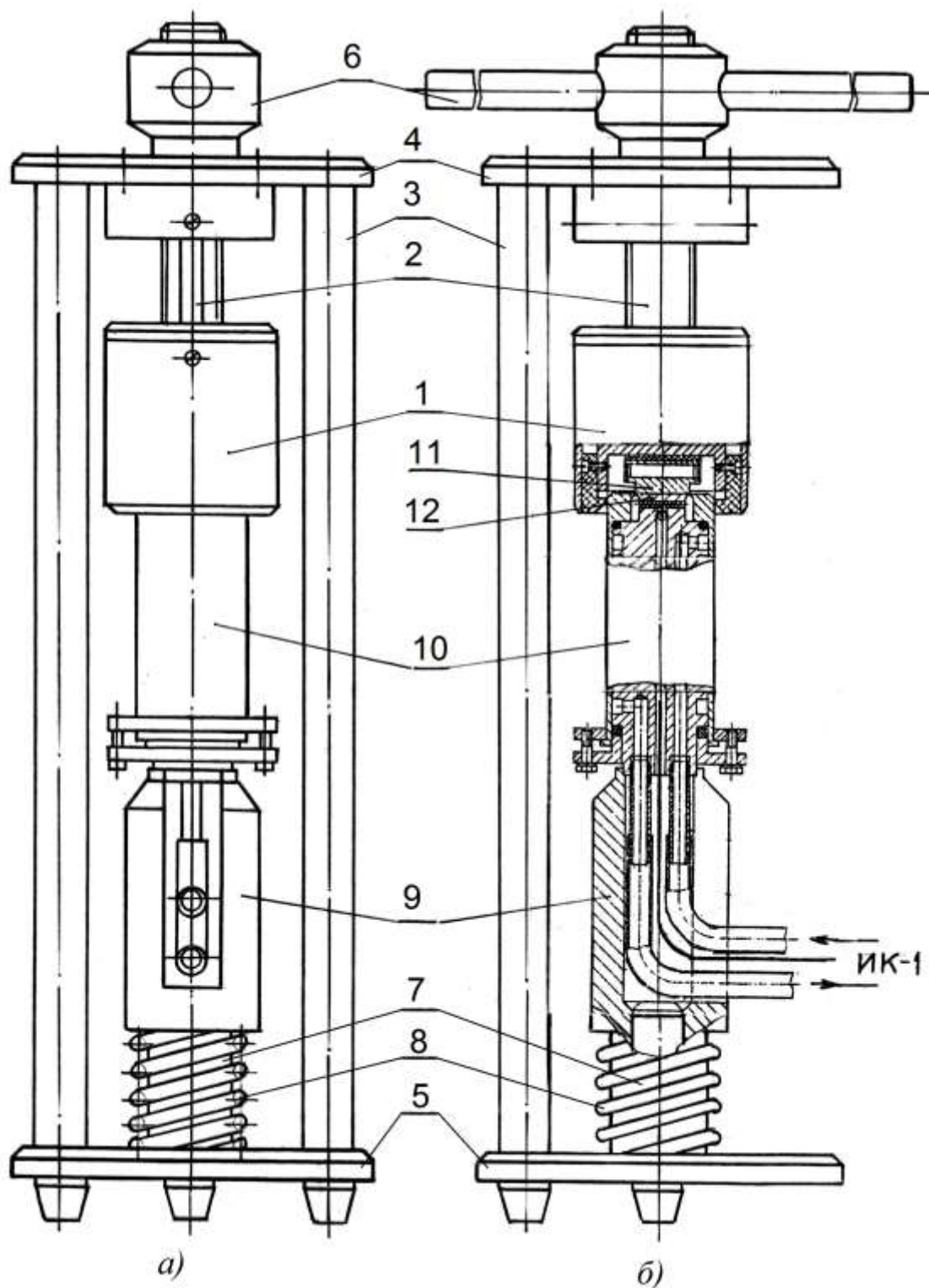
Текущие значения измеряемых величин высвечиваются на цифровом индикаторе, размещенном на передней панели электронного блока. Выбор режима работы установки и ввод в микропроцессор коэффициента преобразования ПТП производятся с клавиатуры, также размещенной на передней панели электронного блока.

Для выполнения метрологических работ установка КИТП-1 укомплектована специальным градуировочным калориметром, внешний вид которого показан на рис. 5.3 (поз. 8), а конструктивная схема на рисунке 5.6.

Градуировочный калориметр представляет собой настольную конструкцию, центральным узлом которой является тепловая головка, возможность вертикального перемещения которой вверх-вниз обеспечена с помощью пары «винт 2 – гайка 6». На основании калориметра укреплен вертикально шток с пружиной и подставкой, выполняющей роль держателя аттестуемого ПТП.

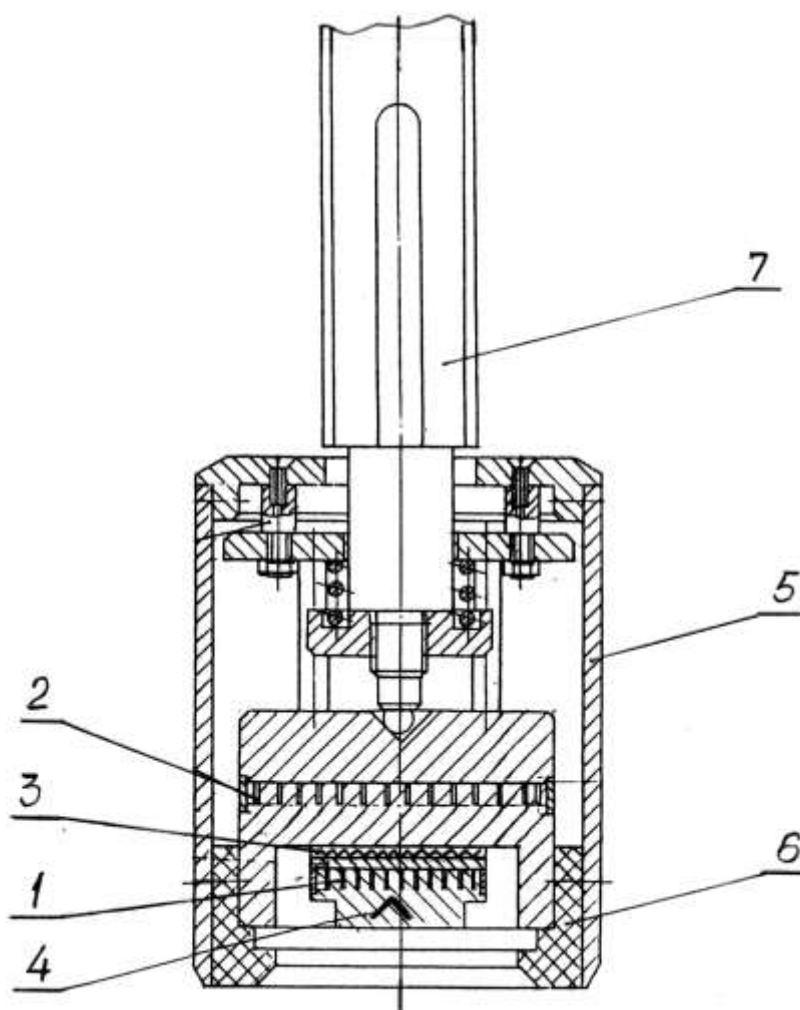
Тепловая головка, конструктивная схема которой приведена на рисунке 5.7, содержит градуировочный и компенсационный электронагреватели, между которыми установлена измерительная термобатарея. В корпусе тепловой головки установлен также рабочий спай ТХА, используемой для измерения температуры корпуса градуировочного нагревателя. Сборка «1-3-2» защищена от ОС кожухом, сцентрирована втулкой и шарнирно закреплена на ходовом винте. Потенциалосъемные провода измерительной термобатареи, выводы термопары, коммутационные провода обоих электронагревателей выведены из корпуса тепловой головки единым кабелем.

Нормированные значения плотности теплового потока задаются подведением электрической энергии постоянной мощности к градуировочному электронагревателю, теплоотдающая поверхность которого приводится в соприкосновение с тепловоспринимающей поверхностью аттестуемого ПТП.



1 – тепловая головка; 2 – ходовой винт; 3 – тяги; 4 – верхний диск; 5 – нижний диск-основание; 6 – гайка с рукояткой; 7 – шток; 8 – пружина; 9 – подставка; 10 – аттестуемый ПТП; 11 – градуировочный нагреватель; 12 – тепловоспринимающая поверхность чувствительного элемента ПТП

Рисунок 5.6 – Конструктивная схема градуировочного калориметра (а) и схема размещения в нем ПТП (б)



- 1 – градуировочный (задающий) электронагреватель;
- 2 – компенсационный электронагреватель;
- 3 – измерительная термобатарея;
- 4 – термопара ТХА;
- 5 – защитный кожух;
- 6 – центрирующая втулка;
- 7 – ходовой винт;
- 8 – теплоотдающая поверхность градуировочного нагревателя

Рисунок 5.7 – Конструктивная схема тепловой измерительной головки градуировочного калориметра

За счет работы компенсационного нагревателя и электронного регулятора весь тепловой поток направлен через аттестуемый ПТП. Между соприкасающимися поверхностями источника теплоты и аттестуемого ПТП обеспечивается хороший тепловой контакт. Значения температуры задаются напряжением постоянного тока, соответствующим заданному нормированному значению температуры согласно номинальной статической характеристике преобразования ПТ.

Для обеспечения работы установки в метрологическом режиме в электронном блоке имеются источник стабилизированной мощности и регулятор теплового потока. Первый обеспечивает получение десяти значений стабильного во времени постоянного напряжения в диапазоне (5-50) В. Второй предназначен для исключения тепловых потерь от градуировочного нагревателя и состоит из усилителя сигнала измерительной термобатарей, регулятора, широтно-импульсного модулятора, ключевого усилителя, двух трансформаторов и вторичного источника питания. Регулятор является управляющим узлом системы автоматической компенсации теплового потока в градуировочном калориметре. В нем формируется управляющее воздействие по отклонению от нуля текущего значения сигнала измерительной термобатарей. Закон регулирования – пропорционально-интегральный.

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

В связи со спецификой применения комплекса КИТП-1 и специального ПТП, обусловленной высокими тепловыми нагрузками, большое внимание уделено метрологическому обеспечению. Для проведения метрологической аттестации и периодических проверок в комплексе КИТП-1 предусмотрен

специальный градуировочный калориметр, описание которого дано выше, а также разработан нормативный документ «Программа и методика метрологической аттестации» комплекса [270].

Метрологические характеристики комплекса КИТП-1 исследованы путем многократных наблюдений в пяти точках рабочего диапазона измеряемых значений плотности теплового потока (в середине диапазона и в отстоящих от начала и конца диапазона на 5% и 25% ширины диапазона) и преобразования сигналов ТХА в соответствующие значения температуры для двух диапазонов: от 10 °С до 100 °С и от 900 °С до 1200 °С, при этом в каждом из них – аналогично в пяти точках.

По результатам аттестации комплекса КИТП-1 установлено, что при измерении плотности теплового потока пределы допускаемой основной относительной погрешности не превышают $\pm 2\%$. При преобразовании сигналов термопар в значения измеряемой температуры пределы допускаемой основной абсолютной погрешности не превышают $\pm 1,1$ К.

Экспериментальный образец установки после государственной метрологической аттестации в УкрЦСМ был передан для эксплуатации в испытательный центр научно-технического комплекса «Антонов» (2000 г.).

Свидетельство об аттестации и акт внедрения комплекса КИТП-1 приведены, соответственно, в приложениях Г и Е.

Основные характеристики комплекса КИТП-1 систематизированы в таблице 5.2

Таблица 5.2 – Основные технические характеристики комплекса КИТП-1

Наименование характеристики	Размерность	Числовое значение
1	2	3
Диапазон значений измеряемой поверхностной плотности теплового потока	кВт/м ²	30 – 170
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения поверхностной плотности теплового потока	%	± 2
Диапазон значений измеряемой температуры	°С	900 – 1200

Продолжение табл. 5.2.

1	2	3
Диапазон значений контролируемой и индицируемой температуры	°С	10 – 100 0 – 1300
Пределы допускаемой основной относительной погрешности преобразования сигналов ТХА в значения температуры	К	±1,1
Температура термостатирования опорных спаев термопар	°С	49,9
Основная абсолютная погрешность термостатирования	К	± 0,15
Диапазон значений нормированной поверхностной плотности теплового потока, задаваемой градуировочным калориметром (ГК)	кВт/м ²	10 – 200
Электрическое сопротивление градуировочного нагревателя ГК при температуре (25 ± 1) °С	Ом	23,3
Электрическое сопротивление компенсационного нагревателя ГК при температуре (25 ± 1) °С	Ом	20,4
Электрическое сопротивление измерительной термобатареи ГК при температуре (25 ± 1) °С	Ом	190 ± 1

5.2 Теплометрические приборы для измерения радиационного теплового потока и обеспечения огневых испытаний

Многие технологические процессы протекают при наличии теплового излучения, что вызывает потребность измерения и непрерывного контроля плотности потока различных составляющих теплового излучения: результирующего, падающего и поглощенного. Ряд стандартов по методикам проведения огневых испытаний изделий [264 – 267] требует также проводить во время испытаний контроль радиационного теплового потока. Это привело к созданию различного испытательного и сертификационного оборудования.

Для оснащения сертификационной испытательной установки, предназначенной для определения коэффициента дымообразования при огневых испытаниях веществ, материалов и изделий [266] разработан прибор, позволяющий определять поверхностную плотность падающего теплового излучения [271], являющийся абсолютным полостным приемником интегрального теплового излучения (радиометром). В его основе лежит преобразование поглощенной энергии интегрального теплового излучения в

электрический сигнал постоянного тока, генерируемый термоэлектрическим чувствительным элементом. При этом измеренная плотность теплового потока ($q_{ИЗМ} = K \cdot E / A$), по сути является плотностью потока результирующего теплового излучения $q_{РЕЗ}$, равного разности поглощенной составляющей $q_{ПОГЛ}$ и собственного теплового излучения $q_{СОБ}$:

$$q_{ИЗМ} = q_{РЕЗ} = q_{ПОГЛ} - q_{СОБ}, \quad (5.2)$$

$$\text{где } q_{ПОГЛ} = \alpha \cdot q_{ПАД}, \quad (5.3)$$

$$q_{СОБ} = \varepsilon_{ПР} \cdot \sigma \cdot T_{РАД}^4 \quad (5.4)$$

$\varepsilon_{ПР} = \alpha \geq 0,98$ – приведенная степень черноты радиометра, равная интегральной поглощательной способности;

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

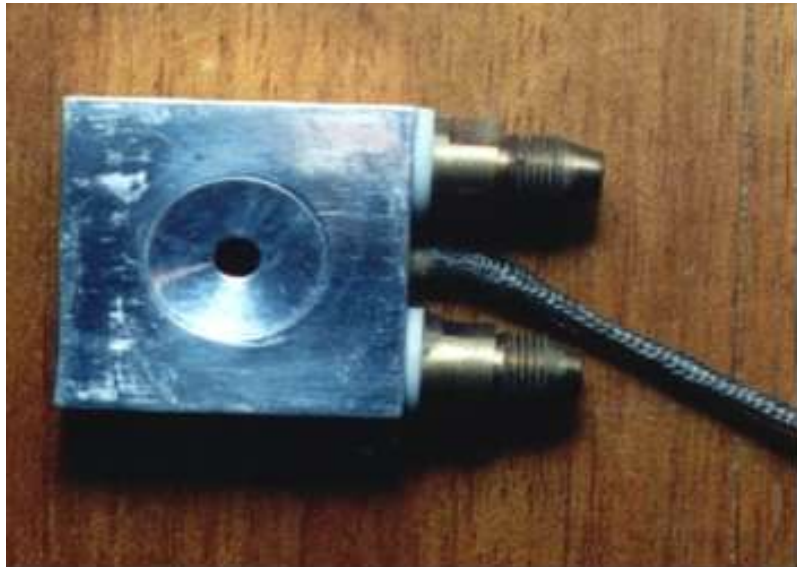
Если измерить плотность $q_{РЕЗ}$ и температуру $T_{РАД}$, можно получить информацию обо всех составляющих потока теплового излучения. Исходя из формул (5.2) – (5.4), расчетная формула для нахождения плотности потока падающего теплового излучения имеет вид:

$$q_{ПАД} = K \cdot E / (\alpha \cdot A) + \chi, \quad (5.5)$$

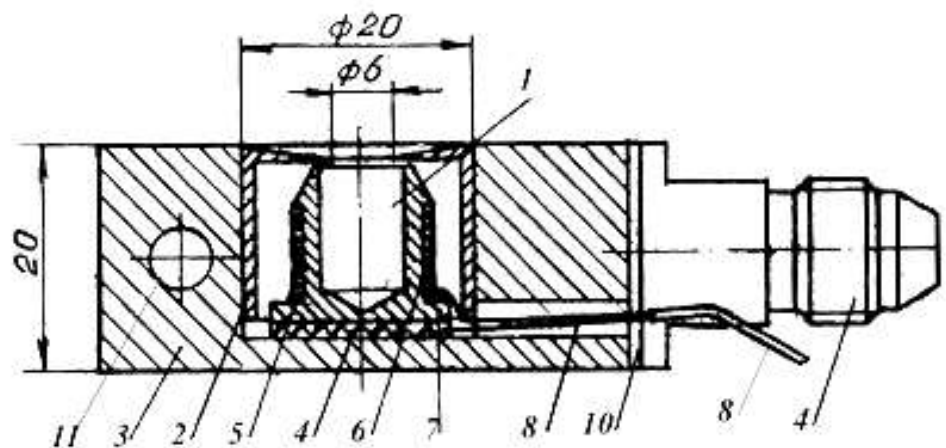
где $\chi = \sigma \cdot T_{РАД}^4$ – температурная поправка.

Эта методика измерения реализуется с помощью радиометра РАП-12 [271], внешний вид и конструктивная схема которого приведены на рисунке 5.8. Приемник содержит чувствительный элемент 1 и диафрагму 2, установленные в водоохлаждаемом корпусе 3, снабженном штуцерами 9 для подведения и эвакуации воды, термостатированной в циркуляционном термостате. Чувствительный элемент 1 является центральным узлом прибора и состоит из термоэлектрических ПТП 4 и ПТ 5, а также электронагревателя 6, установленных на наружной поверхности теплового коллектора 7. Такая конструкция корпуса обеспечивает термостатирование чувствительного элемента с одновременным интенсивным охлаждением, позволяющим измерять поток теплового излучения плотностью до 70 кВт/м².

a)



б)



1 – чувствительный элемент, 2 – диафрагма, 3 – корпус, 4 – ПТП, 5 – ПТ, 6 – электрический нагреватель, 7 – тепловой коллектор, 8 – кабель, 9 – штуцера, 10 – уплотнительные прокладки; 11 – канал водяного охлаждения.

Рисунок 5.8 – Внешний вид (*a*) и конструктивная схема (*б*) приемника теплового излучения радиометра РАП-12

Основным достоинством прибора является его высокая технологичность благодаря применению в качестве измерителя теплового потока стандартного термоэлектрического ПТП по [6, 7], а в качестве измерителя температуры – термопары стандартной градуировки ХК.

Градуировка, метрологическая аттестация и поверки радиометра проводятся по методу энергетического замещения радиационного теплового потока нормированной электрической мощностью, для чего на боковой поверхности теплового коллектора 7 расположен электрический нагреватель 6.

Высокая отражательная способность внутренней поверхности диафрагмы, форма и размеры полости приемника, выполненные с учетом рекомендаций [274, 275], обеспечивают максимальную концентрацию прошедшего через входное отверстие диафрагмы потока теплового излучения на тепловоспринимающей поверхности теплового коллектора. Этому же способствует и большая поглощательная способность внутренней тепловоспринимающей поверхности теплового коллектора, которая покрыта V-образными канавками и чернью марки черное тело [4]. Высокая теплопроводность материала коллектора обеспечивает надежный тепловой контакт тепловоспринимающей поверхности с ПТП и способствует наилучшей передаче потока как прошедшего от внешнего источника теплового излучения, так и от встроенного электронагревателя к ПТП при градуировании.

Возможно изготовление рабочего прибора без электронагревателя. Тогда он будет полостным относительным приемником теплового излучения, а его градуирование в этом случае может быть только радиационным. Допускаемая погрешность измерения рабочим приемником, устанавливаемая при метрологической аттестации достигает 6 – 8 %, выполняемой согласно локальной поверочной схеме. Принципиально, метрологическая аттестация рабочего СИ, основанная на методах сравнения, приводит обязательно к увеличению его допускаемой погрешности на значение погрешности примененного эталонного СИ. Поэтому при разработке современных рабочих средств измерения, требования к метрологическим характеристикам которых в

настоящее время существенно возросли, целесообразно применять абсолютные методы как для градуирования, так и при аттестации и поверках.

При сертификационных огневых испытаниях различных веществ, материалов и изделий на пожаровзрывоопасность регламентировано [264-267] измерение радиационного теплового потока, воздействующего на контролируемое изделие. Для приборного обеспечения указанных стандартов в ИТТФ разработан прибор модели РАП-12М [10, 273], являющийся абсолютным полостным водоохлаждаемым приёмником интегрального теплового излучения, который применяют с циркуляционным термостатом и стандартным измерителем напряжения постоянного тока, например, мультиметром М 890 G (модификация прибора РАП-12М.1), либо со специализированным цифровым показывающим устройством (ЦПУ) (модификация прибора РАП-12М.2). Специализированный ЦПУ предназначен для измерения и масштабирования сигналов ПТП и ПТ приёмника и представления измерительной информации в цифровом виде на жидкокристаллическом табло в единицах измеряемой физической величины: плотности потока теплового излучения в $\text{кВт}/\text{м}^2$ и температуры в $^{\circ}\text{C}$.

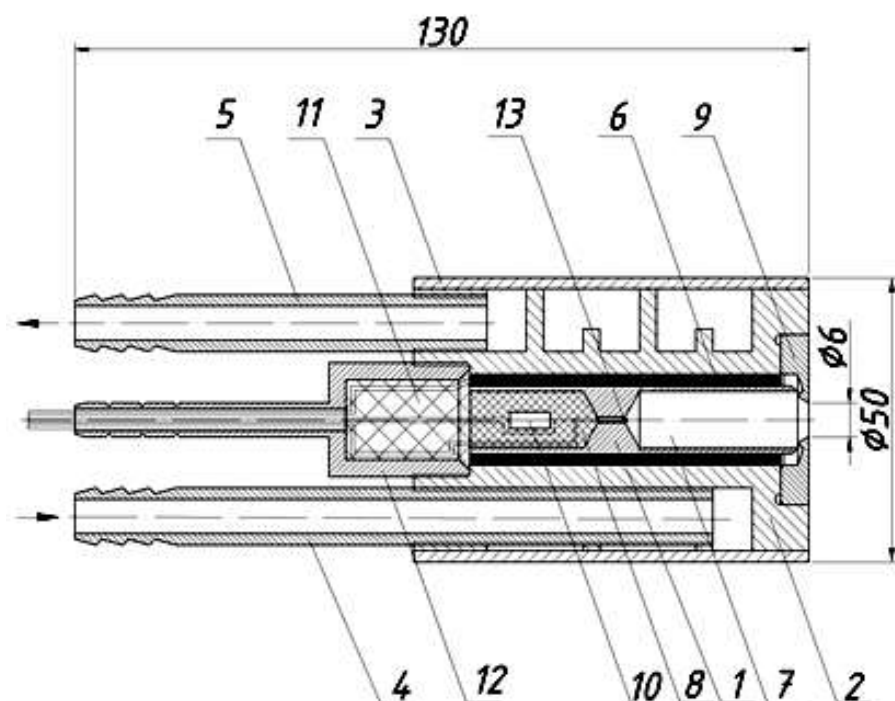
Прибор РАП-12М, внешний вид и схема которого приведены на рисунке 5.9, имеет одну приёмную теплотметрическую ячейку, которая представляет собой тепловой коллектор 1, установленный в проточном теплообменнике, образованном корпусом 2 приёмника, кожухом 3 и снабженном штуцерами 4, 5. Приемник имеет градуировочный нагреватель 10, (стандартный металлопленочный резистор типа МЛТ номиналом 200 Ом), установленный в полости 8 теплового коллектора при помощи заливочного компаунда. Он предназначен для задания нормированного теплового потока при проведении градуирования, метрологической аттестации и поверок приборов РАП-12М. Термостатирование приемника с одновременным охлаждением осуществляют путём циркуляции хладагента из проточного водяного термостата через теплообменник.

Приборы РАП-12М применяют для измерения потока теплового излучения

а)



б)



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

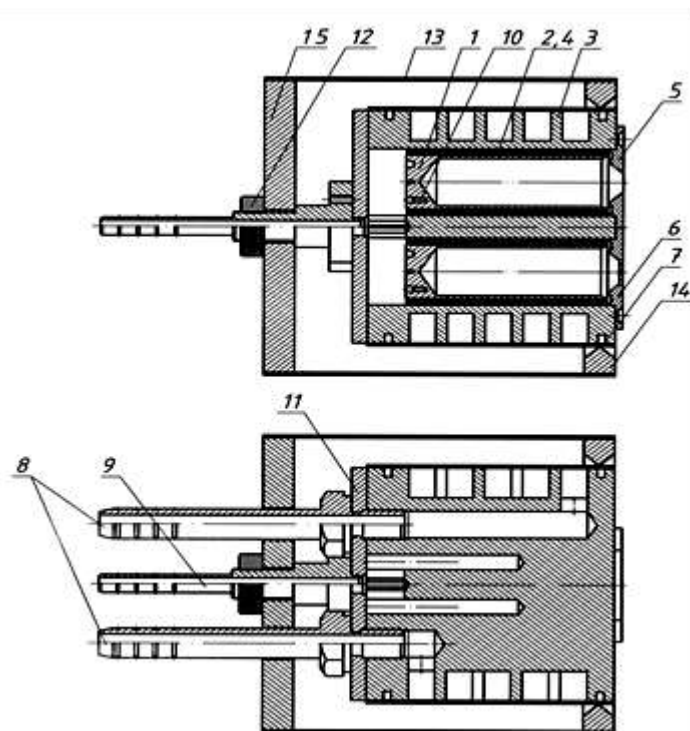
Рисунок 5.9 – Внешний вид (а) и устройство (б) приемников РАП-12М

с плотностью до 70 кВт/м^2 . Основной их недостаток состоит в наличии дрейфа нуля при изменении температуры прокачиваемого хладагента, что особенно заметно проявляется при измерении теплового потока малой плотности.

В связи с этим разработан прибор модели РАП-12Д, представленный на рисунке 5.10, который является абсолютным дифференциальным водоохлаждаемым приемником интегрального теплового излучения [272].



а



б

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

Рисунок 5.10 – Внешний вид приемника РАП-12Д с вторичным цифровым измерительным устройством (*а*) и его устройство (*б*).

Прибор может быть укомплектован специализированным цифровым измерительным устройством. Приемник имеет две идентичные

теплометрические ячейки, установленные на тепловых коллекторах 1 и расположенные в одном проточном теплообменнике 2.

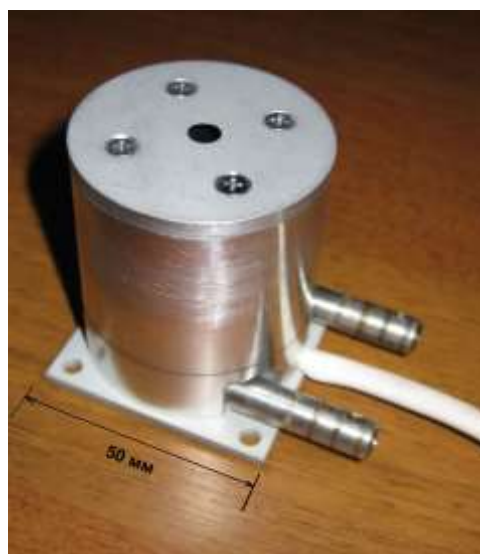
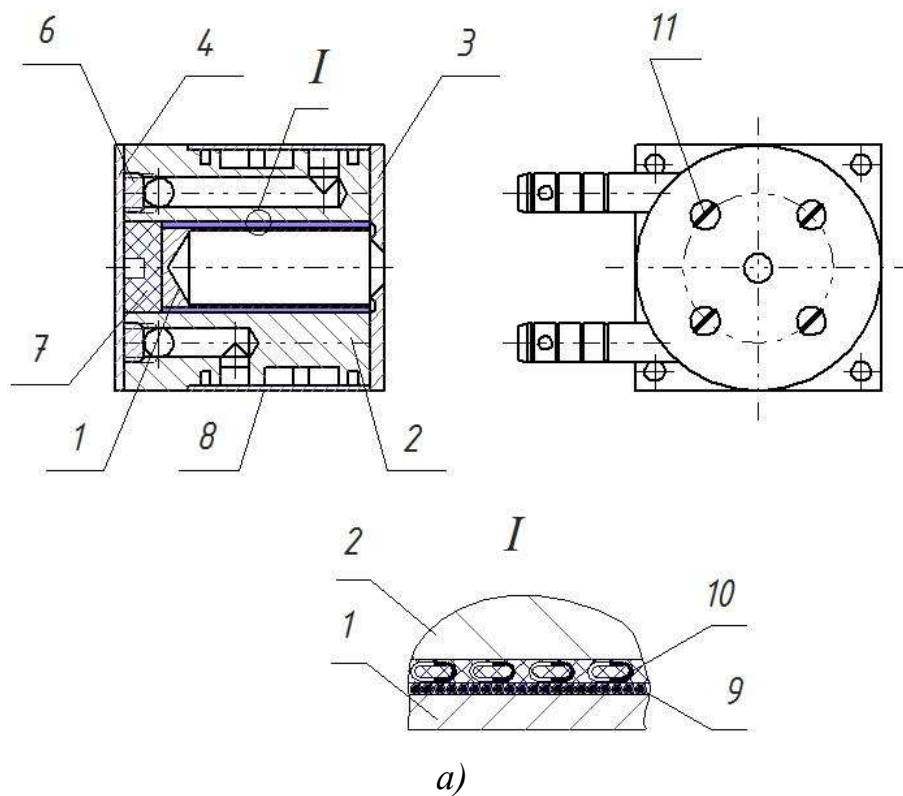
Отличие ячеек приемника РАП-12Д от теплометрической ячейки приемника РАП-12М состоит в том, что по боковой поверхности теплового коллектора 1 каждой ячейки размещен электронагреватель 3. Между нагревателями и теплообменником расположены дифференциально соединенные ПТП 4 в виде цилиндрических оболочек. Их дифференциальное включение позволяет скомпенсировать влияние неконтролируемых изменений температуры охлаждаемого корпуса, вызванных изменением температуры хладагента и ОС. Поэтому приборы модели РАП-12Д, предназначенные для огневых испытаний имеют широкий диапазон измерения радиационного теплового потока от $1,0 \text{ кВт/м}^2$ до 100 кВт/м^2 . Погрешность измерения в поддиапазоне $1 \div 20 \text{ кВт/м}^2$ составляет $\pm 6\%$, а в поддиапазоне $20 \div 100 \text{ кВт/м}^2$ – $\pm 3\%$. Радиометры РАП-12М и РАП-12Д нашли применение при испытаниях различных материалов на огнестойкость и скорость распространения пламени по ГОСТ 12.1.044 [264] и ДСТУ Б В.2.7-70 [267].

По аналогичной дифференциальной схеме, обеспечивающей возможность измерения относительно небольшого потока теплового излучения, разработан приемник РАП-12СР для исследования потока солнечного излучения, воздействующего на строительные конструкции зданий и сооружений [276].

Для нескольких промышленных предприятий и сертификационных лабораторий, проводящих огневые испытания продукции с использованием малогабаритных установок, разработан прибор РАП-12 УМ с приемником малых размеров, конструкция и внешний вид которого показан на рисунке 5.11.

Каждый радиометр при выпуске проходит государственную метрологическую аттестацию по утвержденной ГП «Укрметртестстандарт» методике ПМА [277].

На предприятиях Украины и Беларуси внедрено 15 приборов серии РАП-12 различных модификаций.



1 – диафрагма; 2 – тепловой коллектор; 3 – корпус; 4 – оболочка коллектора; 5 – калибровочный нагреватель; 6 – теплочувствительный элемент - ПТП; 7 – кожух; 8 – крышка; 9 – теплоизоляционная шайба; 10 – винты крепления крышки к приемнику; 11 и 12 – входной и выходной штуцера охлаждения; 13 – термоэлектрический преобразователь температуры.

Рисунок 5.11 – Конструкция (а) и внешний вид приемника РАП-12УМ (б), а также прибора со специализированным цифровым измерительным устройством РАП-12 УМ.2 (в).

5.3 Теплометрическое обеспечение строительной отрасли в Украине

Удорожание энергии обязывает искать пути ее решительной экономии, в том числе за счет улучшения теплозащитных качеств жилых, административных и промышленных зданий и сооружений. В связи с этим в Украине установлены новые требования к теплозащите зданий [278].

Новые нормативные значения теплового сопротивления теплопередаче наружных стен, покрытий и перекрытий, полов, окон, балконных и входных дверей превышают предшествующие в 2 – 2,5 раза. Для количественной оценки теплотехнических характеристик строительных ограждающих конструкций (ОК) и степени их соответствия новым нормативным требованиям актуальными становятся измерения и контроль теплового потока через ОК, теплового сопротивления теплопередаче и коэффициентов теплопроводности новых теплоизоляционных строительных материалов и изделий. Для решения этих задач в ИТТФ разработаны методы, приборы, установки и измерительные комплексы, рассмотренные ниже.

5.3.1 Переносной прибор для экспресс-контроля коэффициента теплопроводности строительных материалов ИТ-8

Необходимость экономного отношения к энергии и энергоресурсам вызвала рост спроса на теплоизоляционные материалы. Для контроля их качества можно использовать не только дорогостоящие стационарные приборы, цикл измерения в которых составляет от нескольких часов до нескольких суток, но и приборы-тестеры, позволяющие определять коэффициент теплопроводности за (5 – 30) мин., доступные по цене, как производителю, так и потребителю строительных материалов. Таким средством, позволяющим определять коэффициент теплопроводности твердых, пористых, волокнистых и сыпучих строительных материалов, является прибор ИТ-8 и его модификация ИТ-8М, разработанные в ИТТФ [279].

Работа прибора основана на закономерностях теплообмена в полуограниченном теле при локальном тепловом воздействии на его

поверхность известным тепловым потоком [279-283]. Основная теоретическая зависимость [280] заложенная в основу метода, имеет вид:

$$\mathcal{G}(\rho, \zeta) = \frac{q_0 \cdot r_{II}}{\lambda} \cdot I(\rho, \zeta), \quad (5.6)$$

где $\mathcal{G}(\rho, \zeta) = T(\rho, \zeta) - T_\infty$ – избыточная температура, равная разности температуры поверхности образца в пятне воздействия и в зоне образца с неискаженным температурным полем; q_0 – плотность заданного потока теплового воздействия через пятно с радиусом r_{II} ;

$$I(\rho, \zeta) = \int_0^\infty \frac{\exp(-\zeta \cdot x) J_1(x) \cdot J_0(\rho \cdot x)}{x + Bi} dx, \quad Bi = \alpha_{\text{эф}} \cdot r_{II} / \lambda, \quad \alpha_{\text{эф}} - \text{эффективный}$$

коэффициент теплообмена с ОС;

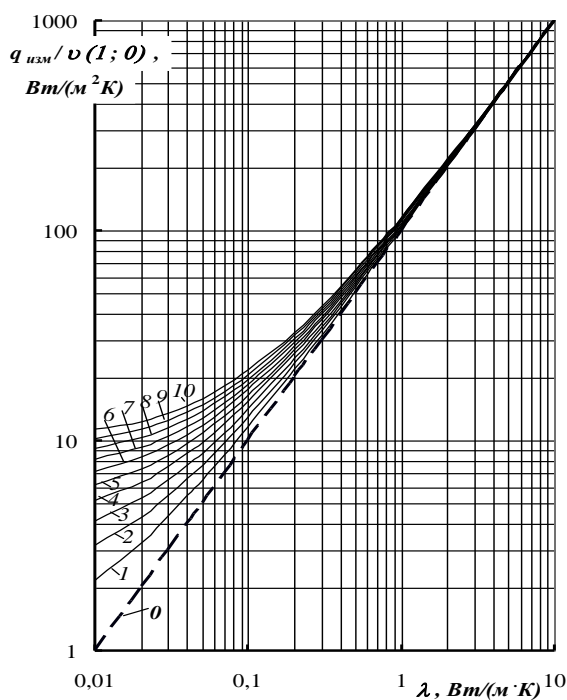
λ – коэффициент теплопроводности массива.

Если измеряется среднеинтегральная температура на поверхности образца в зоне теплового воздействия $\mathcal{G}_{CP}(\rho = 1; \zeta = 0)$, с учетом влияния контактного теплового сопротивления R_K , выражение (5.6) принимает вид:

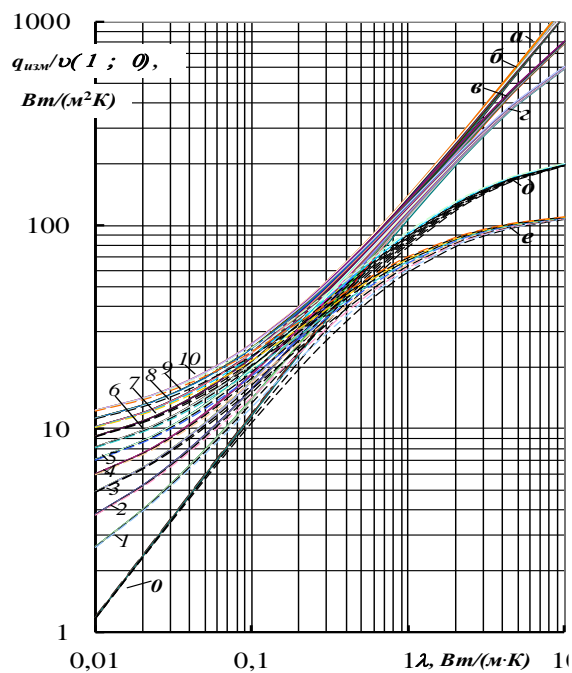
$$q_{\text{ИЗМ}} / \mathcal{G}_{CP}(1; 0) = \frac{1}{(r_{II} / \lambda + R_K) \cdot I_{CP}(1; 0)}, \quad (5.7)$$

$$\text{где } I_{CP}(\zeta) = 2 \int_0^\infty \frac{\exp(-\zeta \cdot x)}{x + Bi} \cdot \frac{J_1^2(x)}{x} dx.$$

Аналитическое решение позволило исследовать зависимость от теплопроводности массива отношения двух измеряемых величин $q_{\text{ИЗМ}} / \mathcal{G}(1; 0)$ при радиусе пятна воздействия, равном радиусу ПТП ($r_{II} = r_{\text{ПТП}}$), в отсутствие контактного теплового сопротивления. С этой целью выполнены расчеты при вариации значений коэффициента теплообмена в диапазоне (0 – 10) Вт/(м²·К) с шагом в 1 Вт/(м²·К). Результаты счета представлены на рисунке 5.12. Из анализа графиков на рис. 5.12, **a** следует, что условия теплообмена поверхности массива с ОС влияют на значение отношения $q_{\text{ИЗМ}} / \mathcal{G}(1; 0)$ в случае исследования материала с коэффициентом теплопроводности $\lambda < 1$ Вт/(м²·К).



а)



б)

а) - в отсутствие контактного теплового сопротивления ($R_K = 0 \text{ м}^2\text{К/Вт}$)

0 - $\alpha_{эф} = 0$; 1 - 1; 2 - 2; 3 - 3; 4 - 4; 5 - 5; 6 - 6; 7 - 7; 8 - 8; 9 - 9; 10 - 10 $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$

б) - при наличии контактного теплового сопротивления **а** - $R_K = 0$ и $R_K = 10^{-5}$;
б - 10^{-4} ; **в** - $5 \cdot 10^{-4}$; **г** - 0,001; **д** - 0,005; **е** - 0,01 $\text{м}^2\text{К/Вт}$.

Рисунок 5.12 – Зависимость $q_{ИЗМ} / \Delta\theta(0)$ в центре площадки контакта радиусом $r_{III} = 10$ мм от коэффициента теплопроводности материала при вариации эффективного коэффициента теплообмена и контактного теплового сопротивления

Поэтому при работе с такими материалами необходимо принимать меры по снижению влияния теплообмена.

Поскольку вклад радиационной составляющей в коэффициент теплообмена существенен, целесообразно уменьшить степень черноты поверхности, что возможно теплоизоляцией поверхности образца (например, покрытием из пенофола), либо применением специального экрана [281] с малой степенью черноты (0,05 - 0,10). Уменьшения и стабилизации коэффициента $\alpha_{эф}$ можно также добиться размещением прибора под образцом.

Характер изменения зависимости отношения $q_{ИЗМ} / \mathcal{G}(1;0)$ от теплопроводности массива при вариации эффективного коэффициента теплообмена и контактного теплового сопротивления показан на рисунке 5.12, б, откуда следует, что с увеличением коэффициента теплопроводности материала возрастает влияние контактного сопротивления. Поэтому необходимо предпринять ряд мер, снижающих это влияние. Для решения этой проблемы выполнены расчеты зависимости отношения $q_{ИЗМ} / \mathcal{G}(1;0)$ от теплопроводности материала для различных радиусов пятна теплового воздействия при вариации эффективных коэффициентов конвективного теплообмена и контактного теплового сопротивления.

Результаты счета показали, что при радиусе $r_{II}=10$ мм для материалов с коэффициентом теплопроводности $\lambda < 1$ Вт/(м²·К), влияние на отношение $q_{ИЗМ} / \mathcal{G}(1;0)$ в основном оказывает коэффициент теплообмена. С уменьшением радиуса пятна теплового воздействия преобладает влияние контактного теплового сопротивления, причем во всем диапазоне коэффициента теплопроводности.

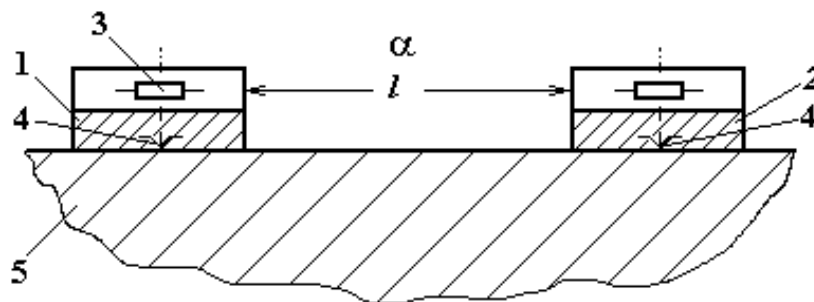
Таким образом, для уменьшения влияния контактного теплового сопротивления на результаты измерения необходимо увеличивать радиус пятна воздействия. Если это невозможно, то предпринимать меры по уменьшению значения контактного теплового сопротивления, например, шлифовкой контактной поверхности образца до соответствующего класса обработки;

использованием высокотеплопроводных смазок или применением дополнительных выносных дифференциальных термопар [282].

В выражении (5.6), место определения T_{∞} четко не обозначено, что в реальных условиях измерений на образцах ограниченных размеров является одним из источников методической погрешности. Так источником случайной составляющей погрешности является временной дрейф температуры массива во время эксперимента. При создании СИ коэффициента теплопроводности методом локального теплового потока применен широко распространенный в калориметрии дифференциальный метод [284], заключающийся в наличии элемента сравнения, в качестве которого взят идентичный ПТП-референт, как показано на рис. 5.13.

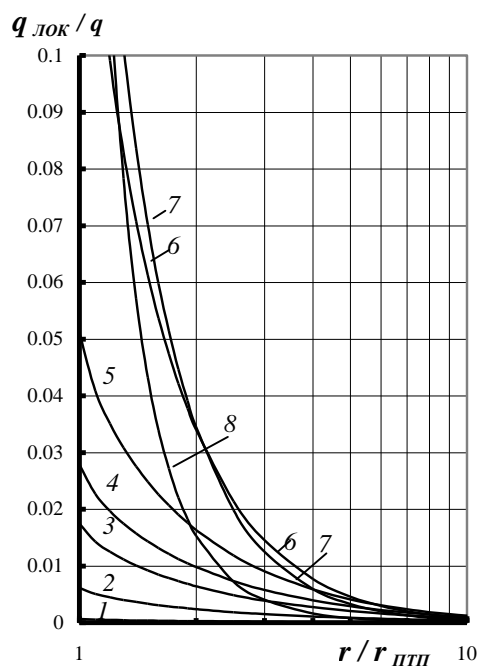
Для определения расстояния l , при котором зона расположения ПТП-референта не подвержена искажениям из-за локального теплового воздействия, выполнен анализ характера изменения приведенной плотности локального теплового потока $q_{\text{лок}}/q_0$ в радиальном направлении по поверхности и по глубине полубесконечного массива. На рисунке 5.14, *а* представлены результаты счета для радиального направления, при вариации числа Био. Для тех же значений числа Био выполнены аналогичные расчеты для направления в глубину массива, результаты которых приведены на рисунке 5.14, *б*. Анализ результатов показывает, что ПТП-референт должен находиться от основного пятна теплового воздействия на расстоянии не менее 5 радиусов, то есть $l \geq 5r_{\text{ПТП}}$, а образцы материалов с известной теплопроводностью, применяемые при градуировке и аттестации СИ также должны иметь толщину не менее 5 радиусов.

Корректность результатов измерения описанным методом зависит от ТФХ и геометрических размеров чувствительного элемента ПТП и его охранной зоны. Результаты аналитического исследования характеристик и параметров ПТП, предназначенных для применения в теплофизических приборах, описаны в работах [185, 193, 194, 197].

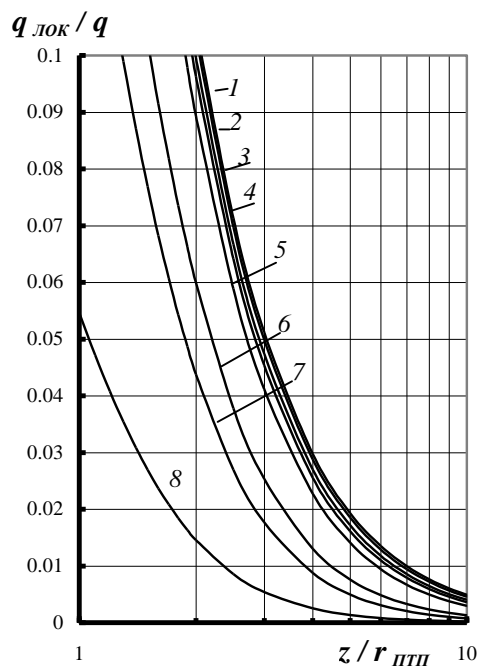


1 – основной ПТП; 2 – ПТП-референт; 3 – рабочий источник теплового воздействия; 4 – термопара; 5 – массив

Рисунок 5.13 – Дифференциальная схема измерений при реализации метода локального теплового воздействия



a)



б)

1 - $Bi = 0,001$; 2 - 0,01; 3 - 0,03; 4 - 0,05; 5 - 0,1; 6 - 0,5; 7 - 1,0; 8 - 5,0

Рисунок 5.14 – Характер изменения приведенной плотности локального теплового потока на поверхности за пределами пятна в радиальном направлении (а) и по глубине (б) полубесконечного массива при вариации числа Био

Основываясь на полученных теоретических результатах, был разработан прибор ИТ-8 и его модификация ИТ-8М, внешний вид и различные случаи применения которого представлены на рисунке 5.15.

Диаметр пятна воздействия в приборе взят равным 20 мм, что позволило исследовать пористые материалы с диаметром пор и сыпучие материалы с размером частиц до 3 мм. Так как влияние контактных тепловых сопротивлений начинает заметно сказываться при $\lambda > 1$ Вт/(м·К), при измерении твердых материалов рекомендуется использовать контактные смазки, либо дополнительные преобразователи температуры. Нестабильность теплообмена с ОС, влияние которого особенно велико при исследовании образцов с теплопроводностью $\lambda < 1$ Вт/(м·К), устраняется использованием специального экрана с малой степенью черноты ($\varepsilon \leq 0,10$) и размещением прибора под образцом. Влияние дрейфа температуры снижается за счет выполнения прибора с двумя идентичными измерительными головками, разнесенными на расстояние более трех диаметров пятна воздействия. Так же прибор может работать в двух положениях: «Образец сверху» – при измерении образцов сыпучих, пористых и гомогенных материалов; «Образец снизу» – пористых и гомогенных материалов.

При исследовании образцов, толщина которых менее 70 мм, коэффициент теплопроводности исследуемого материала $\lambda_{ОБР}$ определяют по формуле:

$$\lambda_{ОБР} = \chi \cdot \lambda_{ИЗМ} \cdot \quad (5.8)$$

где χ – поправочный коэффициент.

Зависимости поправочного коэффициента от теплопроводности при вариации толщины образца приведены на рисунке 5.16.

Для теоретической оценки времени локального теплового воздействия на поверхность образца, необходимого для проведения корректного измерения коэффициента теплопроводности использованы решения и рекомендации, приведенные в [11, 285]. Однако в них не учтено влияние теплообмена с ОС. Поэтому для определения времени выхода на режим разработанного прибора проведены эксперименты с использованием рабочих эталонов. Полученные



а)



б)



в)



г)

а) – внешний вид прибора ;

б) – применение прибора для исследования сыпучих материалов в емкости

в) – прибор, установленный на образец;

г) – прибор с образцом, установленным сверху.

Рисунок 5.15 – Внешний вид прибора ИТ-8М и варианты его расположения относительно исследуемого образца

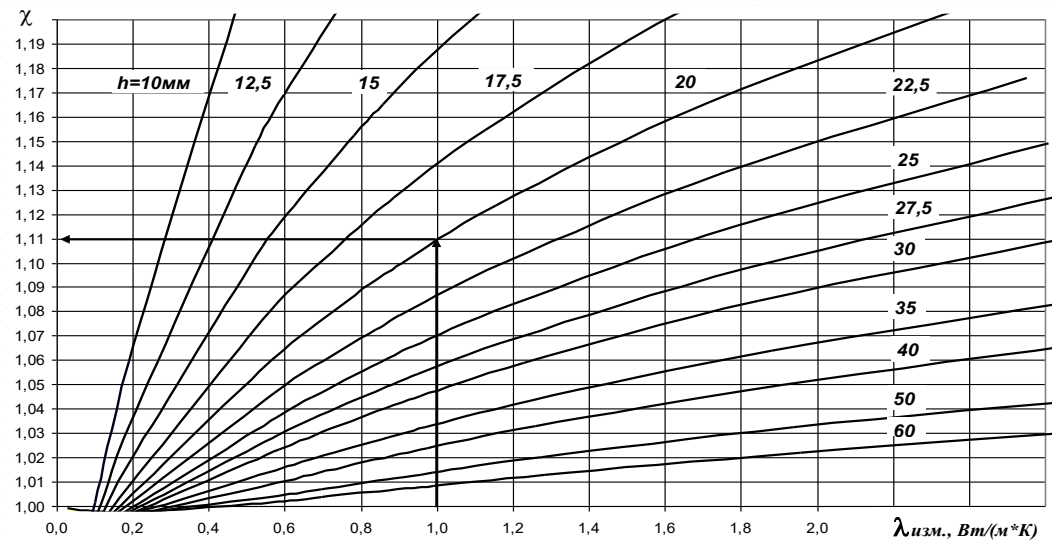
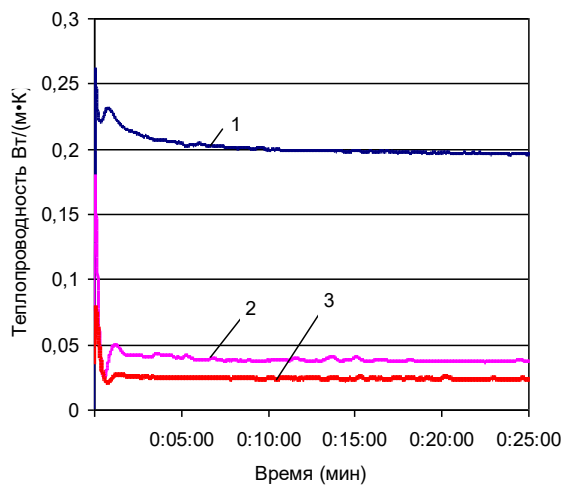
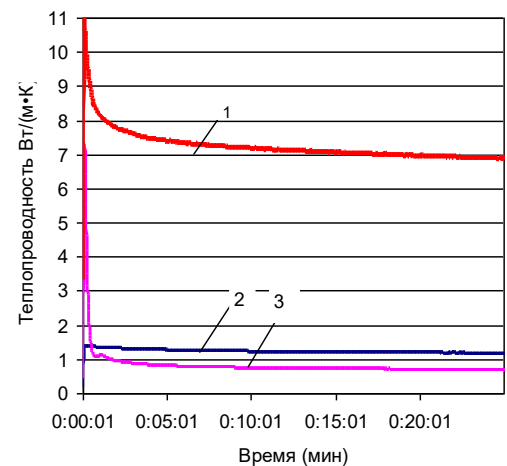


Рисунок 5.16 – Зависимость поправочного коэффициента от толщины образца и измеренного значения теплопроводности.



- 1 - оргстекло ($\lambda = 0,196$);
 2 - пенополистирол ПС-30 ($\lambda = 0,038$);
 3 - пенополиуретан ($\lambda = 0,023$).

Рисунок 5.17 – Характер выхода на режим прибора ИТ-8М для материалов с коэффициентом теплопроводности $\lambda < 0,2$ Вт/(м·К)



- 1 – сплав ВТ-6 ($\lambda = 6,708$);
 2 – стекло ЛК-5 ($\lambda = 1,165$);
 3 – стекло ТФ-1 ($\lambda = 0,698$).

Рисунок 5.18 – Характер выхода на режим прибора ИТ-8М для материалов с коэффициентом теплопроводности $\lambda > 0,2$ Вт/(м·К)

результаты приведены на рисунках 5.17 и 5.18. Из них видно, что через 25 минут после начала эксперимента процессы можно рассматривать как стационарные.

Прибор ИТ-8М аттестован по утвержденной в ГП «Укрметртестстандарт» Программе и методике ПМА 081/24.263-2004 [285]. По результатам метрологической аттестации прибору ИТ-8 приписана основная относительная погрешность измерения 8% в диапазоне коэффициентов теплопроводности (0,03 - 1,5) Вт/(м·К).

Изготовлено и внедрено 4 прибора этого типа: №1 – 2003 г., НПП «Познякижилстрой»; №2 – 2007 г., НПП «Будпластик»; №3 – 2008 г., ГП «Укрметртестстандарт»; №4 – 2010 г., ИТТФ НАН Украины.

5.3.2 Лабораторная установка для измерения коэффициента теплопроводности теплоизоляционных и строительных материалов ИТ-7С

В настоящее время измерение коэффициентов теплопроводности твердых и сыпучих строительных материалов и материалов, предназначенных для тепловой изоляции промышленного оборудования и ограждающих конструкций (ОК), регламентировано рядом стандартов [287-291]. Установленные стандартами [289, 290] пределы относительной допускаемой погрешности определения коэффициента теплопроводности и теплового сопротивления, равные $\pm 3\%$, сложно обеспечить по нескольким причинам. Основной вклад в погрешность вносит погрешность аттестации существующих эталонных образцов теплопроводности [292, 293], имеющих пределы допускаемой погрешности от $\pm 3\%$ до $\pm 5\%$ [294]. Другой существенной причиной погрешности является неоднородность теплового потока на входе и выходе из образца в силу неэффективности защиты его боковой поверхности.

Как правило, в приборах для исследования теплопроводности, выполненных по асимметричной или симметричной схеме [289, 290], в качестве тепломера применяют термоэлектрические генераторного типа ПТП вида вспомогательной стенки, изготовленные в форме пластины или диска

конечных размеров [6, 7]. При этом ввиду различий между ТФХ ПТП и исследуемого образца возможны искажения одномерности теплового потока. В связи с этим имеется отличие измеренной плотности теплового потока от ее действительного значения, которое зависит от соотношения размеров и ТФХ ПТП и образца, а также от условий теплообмена по боковой поверхности [37, 42, 295].

Результаты аналитических исследований тепловых и температурных полей в исследуемом образце при граничных условиях, имеющих место в приборе для измерения коэффициента теплопроводности [42, 185, 186, 192] были применены при проектировании установки ИТ-7С, являющейся материальной базой для внедрения стандартов [289-291]. В установке реализована симметричная схема исполнения измерительной ячейки и метод, сущность которого состоит в создании постоянного направленного перпендикулярно торцевым рабочим поверхностям образца теплового потока, в измерении его поверхностной плотности, разности температуры рабочих поверхностей и толщины образца [289, 290, 295-302]. Коэффициент теплопроводности по результатам измерения вычисляют по формуле:

$$\lambda = h \cdot (2 \cdot (T_1 - T_2) / (q_1 + q_2) - R_K)^{-1}, \quad (5.9)$$

где T_1 и T_2 – значения температуры поверхностей образца;

q_1 и q_2 – значения плотности теплового потока, измеренные ПТП на входе и выходе образца, при этом $q_i = K_i \cdot E_i$, где $i = 1$ и 2 ;

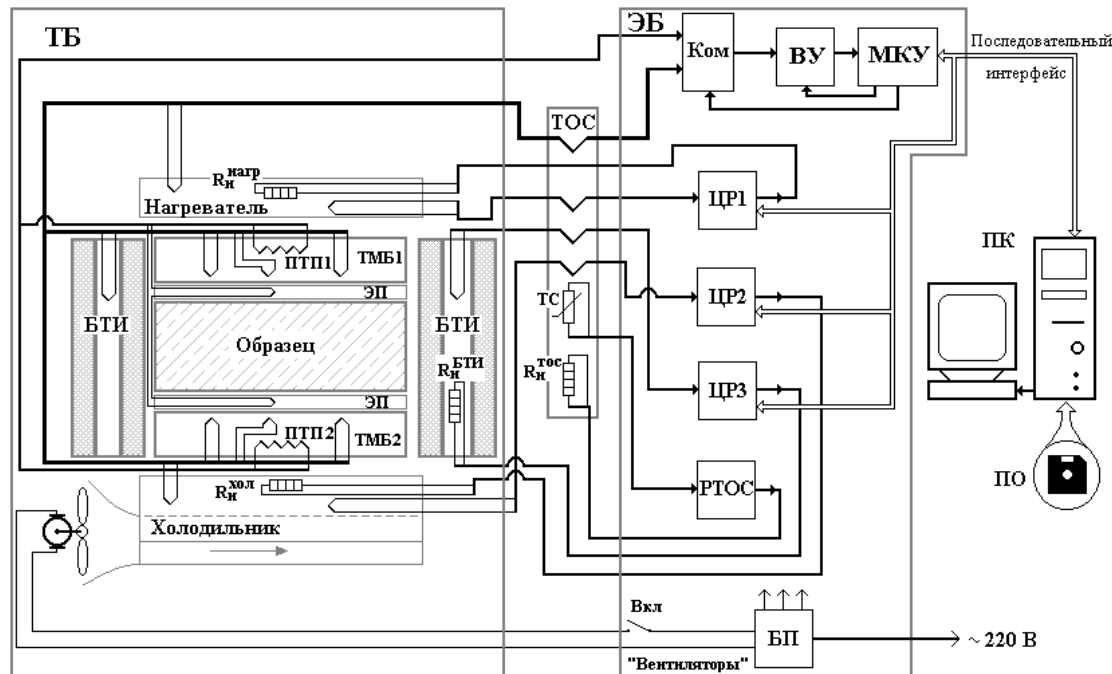
R_K – контактное сопротивление, определяемое при градуировании установки.

Установка ИТ-7С, внешний вид и функциональная схема которой представлены на рисунке 5.19 а и б, состоит из теплового блока, в котором размещают образец исследуемого материала и обеспечивают требуемые температурный и тепловой режимы; электронного блока, содержащего средства регулирования тепловых режимов, приема и обработки первичной измерительной информации и передачи ее в ПК для дальнейшей обработки по соответствующей программе; блока термостатирования опорных спаев



- 1 – тепловой блок;
- 2 – электронный блок;
- 3 – блок опорных спаев термопар;
- 4 – подъемно-опускная платформа;
- 5 – климатическая камера

а)



б)

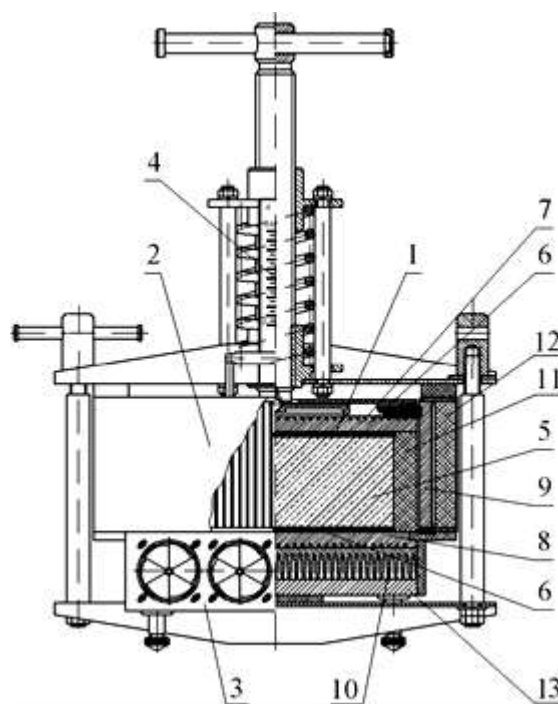
ТБ – тепловой блок: ТМБ1, ТМБ2 – теплотметрические блоки; ПТП1, ПТП2 – преобразователи теплового потока; БТИ – боковая теплоизоляция; ЭП – эластичная прокладка; ТОС – термостат опорных спаев; ТС – термометр сопротивления; $R_{н\text{нагр}}$, $R_{н\text{хол}}$, $R_{н\text{БТИ}}$, $R_{н\text{ТОС}}$ – нагревательные элементы;

ЭБ – электронный блок: Ком – коммутатор сигналов первичных преобразователей; ЦР1, ЦР2, ЦР3 – цифровые регуляторы температуры; РТОС – регулятор термостата опорных спаев; БП – блок питания; ВУ – входное устройство; МКУ – микроконтроллерное устройство; ПК – персональный компьютер; ПО – программное обеспечение.

Рисунок 5.19 – Внешний вид (а) и функциональная схема (б) установки ИТ-7С

термопар и платформы для поднятия и опускания теплового блока при размещении его в климатической камере.

Тепловой блок, внешний вид и конструктивная схема которого приведены на рисунке 5.20, содержит измерительную ячейку 1, блок боковой активной теплоизоляции 2, блок охлаждения 3 и прижимное устройство 4.



1 – измерительная ячейка; 2 – блок боковой активной теплоизоляции; 3 – блок охлаждения; 4 – прижимное устройство; 5 – исследуемый образец; 6 – термомеры; 7, 8, 9 – электрические нагреватели; 10 – радиатор; 11, 12 – тепловая изоляция; 13 – станина

Рисунок 5.20 – Тепловой блок установки ИТ-7С

Исследуемый образец помещают в измерительную ячейку и задают требуемый температурный режим. Посадочное место в измерительной ячейке для образца удовлетворяет требованиям [285] и позволяет использовать образцы, размеры которых могут быть до 300×300×120 мм. Тепловой поток через образец задается верхним нагревателем 7, металлический корпус которого обеспечивает изотермические условия по его теплоотдающей поверхности. Теплоотвод

осуществлен кондуктивно-конвективным способом посредством теплоприемника, который с целью исключения жидкого хладагента выполнен из нагревателя 8 (нижнего) и радиатора 10, представляющего собой набор плит с профильным оребрением, смонтированных на общем основании. Съем теплоты производится за счет обдува воздухом с помощью блока охлаждения, выполненного из четырех вентиляторов.

Плотность теплового потока определяют по показаниям двух ПТП [6, 7], верхнего и нижнего, вмонтированных, соответственно, в верхний и нижний теплотеметрические блоки ТМБ1 и ТМБ2. Температуру поверхностей образца и обоих нагревателей (7 и 8) определяют по показаниям термоэлектрических ПТ (типа ТХА). В приборе предусмотрена возможность непосредственного измерения толщины образца, находящегося в ячейке, с помощью штангенциркуля с измерителем глубины.

Для исключения влияния внешних факторов на тепловое поле образца по боковой поверхности измерительной ячейки смонтирована боковая активная теплоизоляция 2, состоящая из четырех охранных нагревателей 9, снабженных изоляцией 12 и закрытых общим кожухом. Работой охранных нагревателей обеспечивают температуру боковой теплоизоляции, равную полусумме значений температуры нагревателей 7 и 8. Нагреватели 7, 8 и 9 одинаковы по конструкции, выполнены в виде металлических плит с фрезерованными пазами, в которых размещен нагревательный элемент (нихромовый провод во фторопластовой изоляции), залитый высокотемпературным эластичным силиконовым герметиком. Плиты нагревателей 7 и 8 имеют форму прямоугольника размером $360 \times 360 \times 20$ мм и изготовлены из высокотеплопроводного металла.

Измерительная ячейка 1, блок боковой активной изоляции 2 и радиатор 10 с блоком вентиляторов 3 смонтированы на общей станине 13 и помещены в прижимное устройство 4. Усилие задают с помощью винтового механизма с силовой пружиной и контролируют визуально по шкале, которой оснащен прижимной механизм. Максимальное усилие – до 1000 Н с целью минимизации

теплового сопротивления между контактирующими поверхностями ПТП и образца.

Задание условий эксперимента, регулирование и контроль параметров температурных режимов, а также получение первичной измерительной информации обеспечено электронным блоком с встроенным блоком питания.

Для проведения эксперимента при низких значениях температуры тепловой блок помещают в климатическую камеру.

Исходя из формулы (5.9) задачами градуирования установки ИТ-7С являются определение индивидуальных статических функций преобразования обоих ПТП в температурном диапазоне $K_i(T)$ и контактного теплового сопротивления R_K [303-305]. Для определения функции преобразования каждого ПТП использован метод двух измерений [306] при постоянной разности температуры теплоотдающей поверхности верхнего ПТП и тепловоспринимающей поверхности нижнего ПТП. Градуирование осуществляют в диапазоне значений температуры от минус 25°C до 135°C, проходя его ступенчато с любым шагом.

Для определения контактного теплового сопротивления проводят серию измерений сигналов ПТП, сведенных друг с другом. Для исследования твердых материалов предусмотрено использование эластичных прокладок с вмонтированными на их поверхности ПТ ленточного типа, что при наличии дополнительной высокотеплопроводной смазки минимизирует значение R_K контактного сопротивления до порядка 10^{-5} , которым можно пренебречь.

Определение метрологических характеристик (далее – МХ) установок ИТ-7С №1 и №2 выполнено по стандартной методике [294] методом сличения измеренного коэффициента теплопроводности рабочего эталона с его нормированным значением [307]. По результатам метрологической аттестации по рабочим эталонам установки ИТ-7С № 01 и № 02 допущены к применению для измерения коэффициента теплопроводности материалов в диапазоне (0,03 - 3,0) Вт/(м·К) в интервале температуры от минус 40 °С до 140 °С с пределами допускаемой основной относительной погрешности измерения не

менее 5 %, включая погрешность рабочих эталонов теплопроводности, равную 3 %.

Так как в настоящее время такой уровень погрешности не удовлетворяет современным требованиям, разработана методика аттестации установок ИТ-7С косвенным методом с применением калибровочного нагревателя ПМА-081/24.408-2009 [308], которая позволяет достичь требуемой стандартами [288-290] точности без использования рабочих эталонов теплопроводности.

Согласно предложенной методике, определение МХ осуществляется методом косвенных измерений величин, присутствующих в формуле (5.9), – среднего теплового потока, разности температуры и толщины образца путем оценки погрешности их измерения.

Оценку погрешности определения плотности среднего теплового потока и выполняют экспериментально путем задания с помощью калибровочного нагревателя нормированных значений плотности теплового потока из диапазона возможных при измерениях. При этом задаются последовательно десять тепловых режимов. Первые пять режимов проводят при температуре нагревателя, холодильника и боковой теплоизоляции на уровне средней температуры рабочего температурного диапазона (70 °С), путем задания пяти значений суммарного теплового потока из диапазона измерений. Последующие пять – при плотности теплового потока, соответствующей середине диапазона её изменения при этом температура нагревателя, холодильника и теплоизоляции должна соответствовать последовательно пяти точкам рабочего диапазона температуры.

Для каждого i -того режима частные значения относительной погрешности измерения плотности теплового потока определены по формуле:

$$\delta_{q,i} = \frac{(q_{1,i} - q_{2,i}) - q_{0,i}}{q_{0,i}} \times 100, \% \quad (5.10)$$

где $q_{0,i}$ – заданная в i -том режиме плотность теплового потока с помощью электрического калибровочного нагревателя, равная $U \cdot I / A_{эл}$ ($A_{эл}$ – площадь

пластины калибровочного нагревателя).

Погрешность измерения разности температуры также оценена экспериментально сличением показаний термоэлектрических ПТ, размещенных в эластичных прокладках установки ИТ-7С, с показаниями ТХА индивидуальной градуировки с абсолютной погрешностью 0,1 К. Относительная погрешность измерения разности температуры по результатам экспериментов на семи участках из диапазона рабочих значений температуры от минус 40 °С до 180 °С не превысила 1%.

По результатам переаттестации установки ИТ-7С №2 с применением калибровочного нагревателя погрешность измерения плотности теплового потока $\delta_{q,i}$ при температуре от минус 25 °С до 135 °С не превысила ± 1 %, что показано на рисунке 5.21.

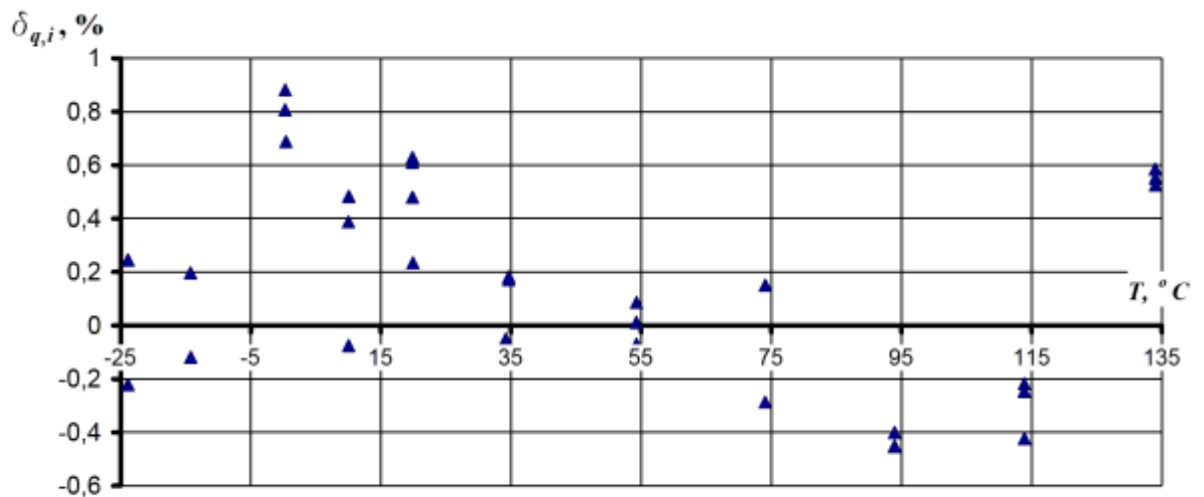


Рисунок 5.21 – Разброс составляющей погрешности измерения плотности теплового потока $\delta_{q,i}$ установки ИТ-7С в диапазоне температуры от минус 25 °С до 135 °С

По новой методике аттестации установок ИТ-7С [308] проведена аттестация установки №3. Основные технические характеристики трех изготовленных установок ИТ-7С с указанием года выпуска и места внедрения представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Основные технические характеристики трех установок ИТ-7С, год выпуска и место внедрения

Характеристика	Обозначение , размерность	ИТ-7С №01 2004, НИИСК	ИТ-7С №02 2008, ИТТФ	ИТ-7С №03 2009, Укрметртест- стандарт
Диапазон измеряемых значений коэффициента теплопроводности	λ , Вт/(м·К)	0,03 – 3,0	0,03 – 3,0	0,02 – 1,5
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения коэффициента теплопроводности	δ_q , %	± 6	± 5	± 3
Диапазон значений рабочей температуры	T , °С	- 40 ... 135	- 40 ... 140	- 40 ... 180
Температура термостатирования опорных спаев термопар	$T_{ТС}$, °С	(50 \pm 2)	(50 \pm 2)	(50 \pm 2)
Габариты (диаметр) образца	$L(D)$, мм	300×300	300×300	300×300
Толщина образца	h , мм	10 ÷ 120	10 ÷ 120	10 ÷ 120

На установках ИТ-7С в порядке выполнения заказов заинтересованных организаций исследованы различные материалы. Полученные данные опубликованы в [309, 310].

Применение установки ИТ-7С для калориметрического анализа процесса гидратации бетонных смесей.

Установка ИТ-7С успешно применена для определения тепловыделения бетона или его связующего при гидратации [311-314]. Для проведения эксперимента готовится специальная кювета, в которую помещают свежеприготовленный образец бетона или связующего. Кювету устанавливают в измерительную ячейку установки ИТ-7С и проводят длительную (3 суток) запись теплового потока от образца.

Полученные графики изменения поверхностной плотности теплового потока q_1 и q_2 активной части экспериментального бетона при средней температуре 20 °С представлены на рисунке 5.22, а график изменения коэффициента теплопроводности активной части бетона в процессе гидратации при той же температуре – на рисунке 5.23.

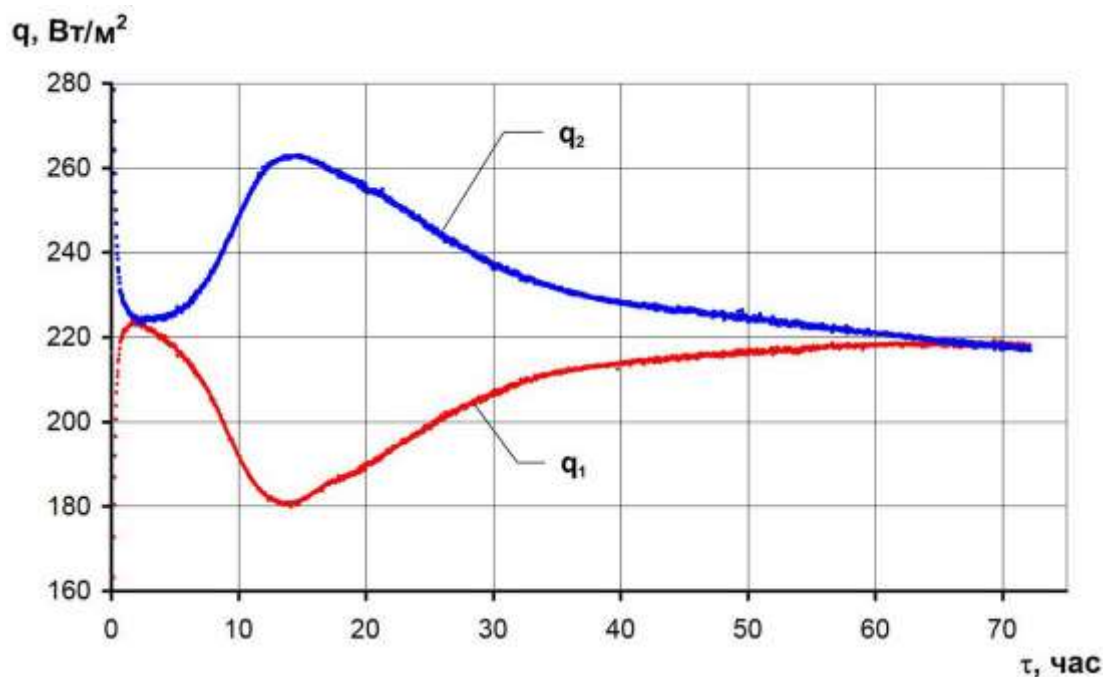


Рисунок 5.22 – Изменение поверхностной плотности теплового потока активной части бетона при температуре 20 °С.

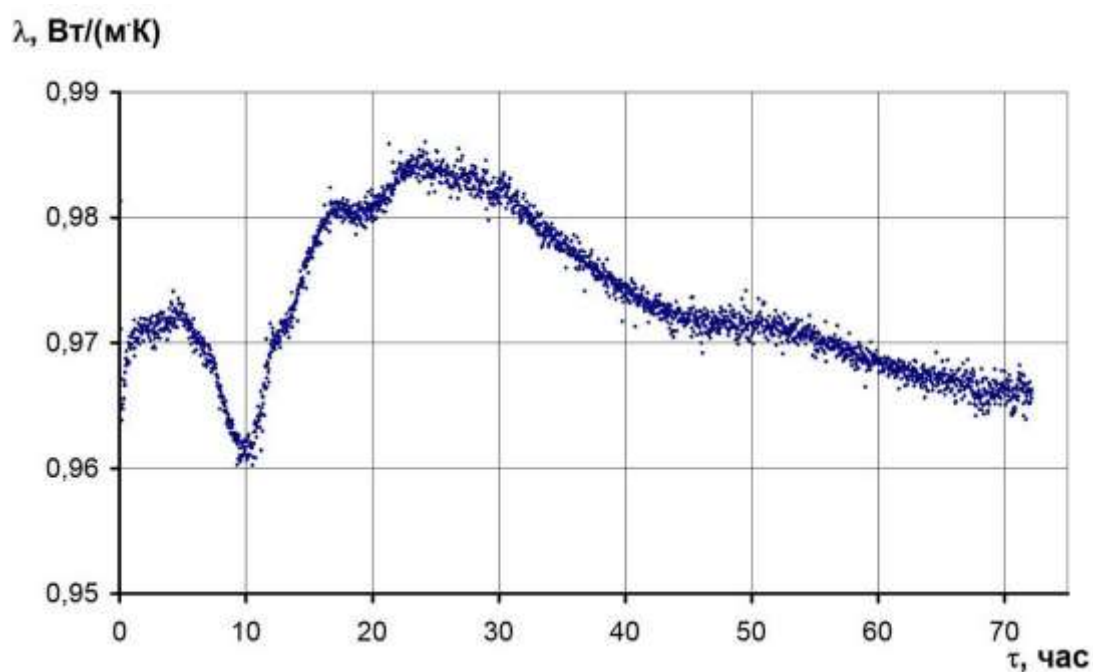


Рисунок 5.23 – Изменение коэффициента теплопроводности активной части бетона в процессе гидратации при температуре 20 °С.

По этим результатам найдены значения объемного тепловыделения q_v при гидратации вяжущих материалов по формуле:

$$q_v = (q_2 - q_1)/h. \quad (5.11)$$

Кроме того на установке ИТ-7С получены данные по изменению при разных значениях температуры объемного тепловыделения активной части бетона приведенные на рисунке 5.24. Данные об интегральном тепловыделении активной части экспериментального бетона представлены на рисунке 5.25, при этом общее значение тепловыделения Q за какой-либо промежуток времени получается экстраполяцией данных, полученных за 72 часа измерений по методике согласно ГОСТ 310.5 [315].

Предложенный метод определения теплоты гидратации на установке ИТ-7С не только не уступает по точности стандартизованным методам определения теплоты гидратации [315, 316], но и в большинстве случаев превышает их по точности. Результатом проведения калориметрического анализа на установке ИТ-7С является получение термокинетической информации, позволяющей давать рекомендации относительно состава бетона, делать заключения о необходимости корректировки состава в определенную сторону, о благоприятных режимах твердения бетона с учетом влияния технологических факторов, а также прогнозировать прочность и долговечность строительных конструкций, которые предполагается изготавливать из исследованных на установке ИТ-7С бетонов.

Применение установки ИТ-7С для определения коэффициента эмиссии

В современных светопрозрачных конструкциях широко используются энергоэффективные низкоэмиссионные стекла, основной характеристикой энергосбережения которых является излучательная способность (эмиссия) стекла.

Известные методы регламентируют определение коэффициента эмиссии косвенным методом с применением ИК-спектрофотометра Фурье импортного производства с последующим расчетом по эмпирическим коэффициентам.

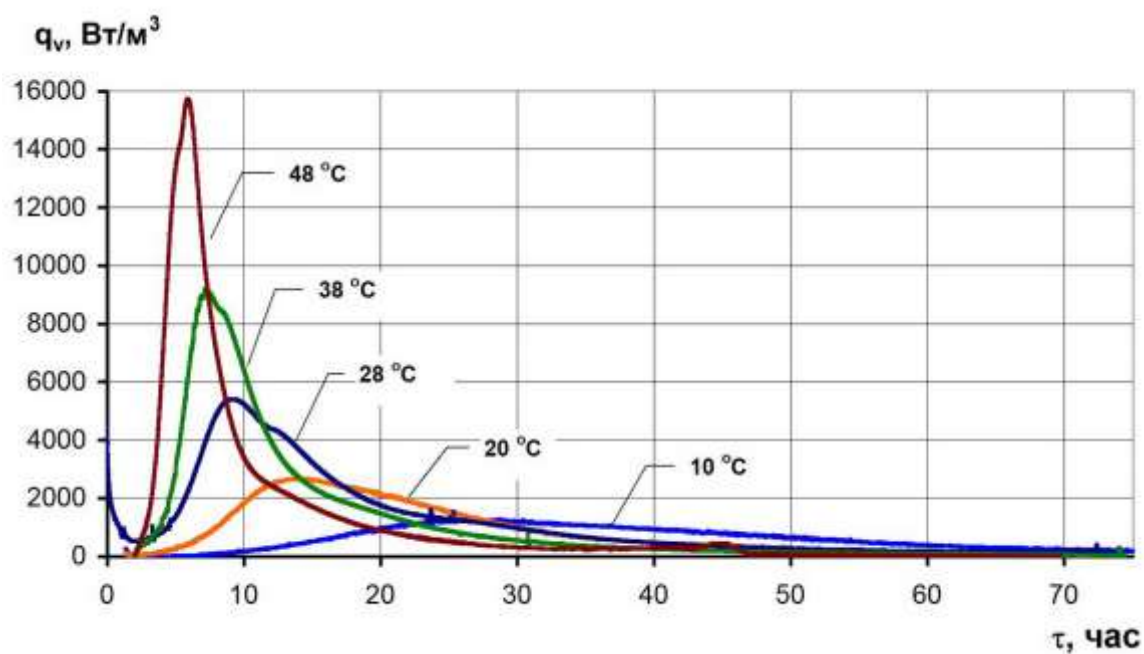


Рисунок 5.24 – Изменение объемного тепловыделения активной части бетона в процессе гидратации при разных значениях температуры

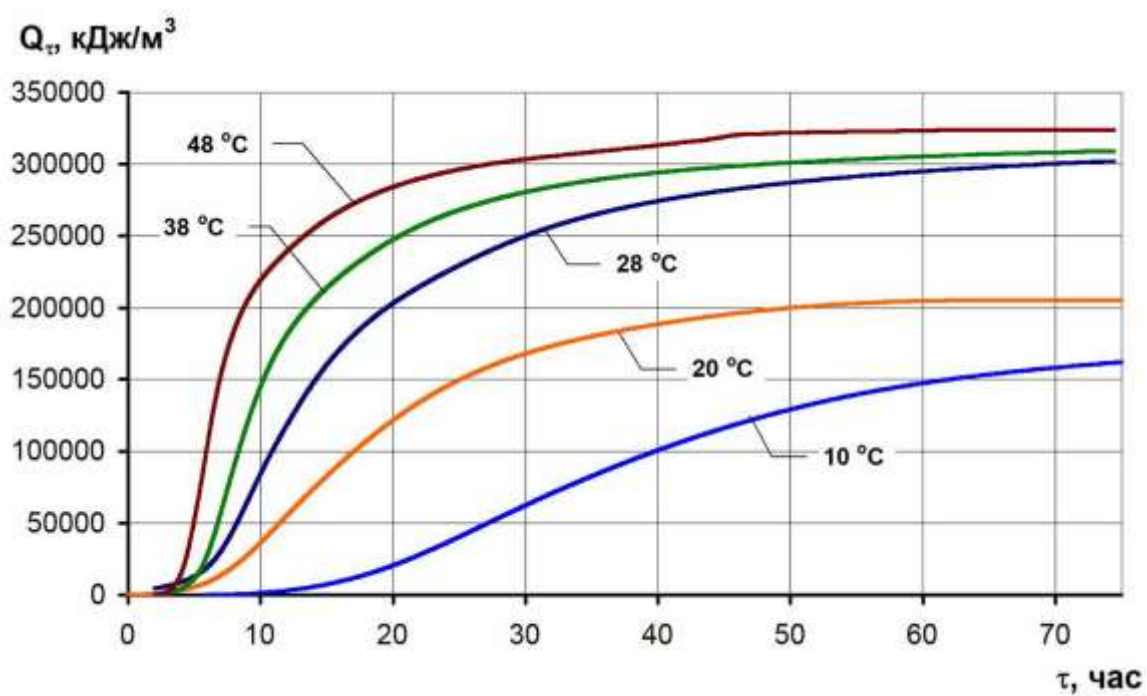


Рисунок 5.25 – Изменение интегрального тепловыделения активной части бетона в процессе гидратации при разных значениях температуры

При выполнении диссертации проведен поиск аналитических решений по вопросам исследования терморadiационных характеристик (далее – ТРХ) и разработаны методики измерения коэффициента эмиссии стекол и покрытий, экспериментальное подтверждение которой выполнено на установке ИТ-7С. Эта методика позволяет рассчитать коэффициент эмиссии по результатам прямых измерений плотности теплового потока, температуры и размеров опытного пакета стекол [317-320], помещенного в измерительную ячейку установки ИТ-7С, как показано на рисунке 5.26.

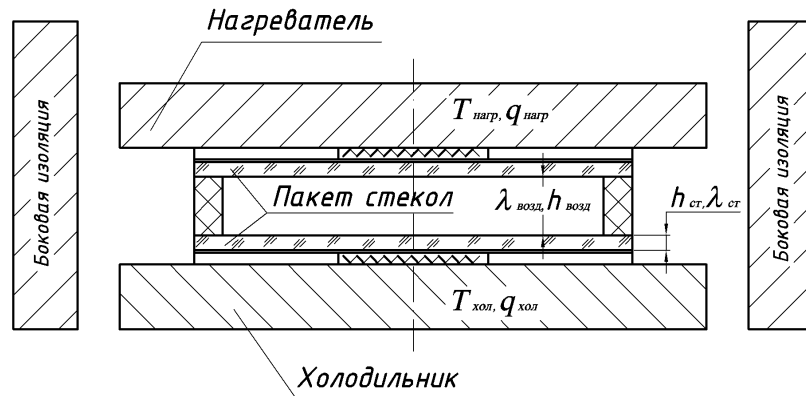


Рисунок 5.26 – Схема размещения опытного стеклопакета в измерительной ячейке теплового блока установки ИТ-7С

Стекла располагают параллельно одно другому, при этом их поверхности с энергоэффективным покрытием обращены друг к другу. Режим измерений осуществлен при перепаде температуры на поверхностях образца порядка 10 К. По результатам измерений в стационарном режиме разности температуры на наружных поверхностях пакета стекол и плотности теплового потока, рассчитывают тепловое сопротивление стеклопакета по формуле:

$$R_{\text{ПАК}} = \Delta T / q_{\text{СР}} = 2(T_{\text{нагр}} - T_{\text{хол}}) / (q_{\text{нагр}} + q_{\text{хол}}). \quad (5.12)$$

С другой стороны, учитывая тепловое сопротивление самих стекол и теплообмен в воздушном зазоре, $R_{\text{ПАК}}$ равно:

$$R_{\text{ПАК}} = 2R_{\text{СТ}} + \left(\frac{1}{R_{\text{ВОЗД}}} + \frac{1}{R_{\text{РАД}}} \right)^{-1} = \frac{2h_{\text{СТ}}}{\lambda_{\text{СТ}}} + \left(\frac{\lambda_{\text{ВОЗД}}}{h_{\text{ВОЗД}}} + 4 \cdot \varepsilon_{\text{ПР}} \cdot \sigma \cdot T_{\text{СР}}^3 \right)^{-1}, \quad (5.13)$$

где $R_{СТ}$, $R_{ВОЗД}$, $R_{РАД}$ – тепловое сопротивление стекла, кондуктивная и радиационная составляющие сопротивления воздушной прослойки;

$\varepsilon_{пр}$ – приведенный коэффициент эмиссии;

$T_{СР} = 0,5(T_{нагр} + T_{хол})$ – среднее значение температуры стеклопакета, К.

Из выражений (5.12) и (5.13) получается формула для расчета приведенного коэффициента эмиссии:

$$\varepsilon_{пр} = \left((\Delta T / q_{СР} - 2h_{СТ} / \lambda_{СТ})^{-1} - \lambda_{ВОЗД} / h_{ВОЗД} \right) / (4 \cdot \sigma \cdot T_{СР}^3). \quad (5.14)$$

Учитывая, что для двух бесконечных параллельных пластин $\varepsilon_{пр} = 1 / (2 \cdot \varepsilon_{ПОК}^{-1} - 1)$ [262], коэффициент эмиссии покрытия энергоэффективного стекла равен:

$$\varepsilon_{ПОК} = 2 / (\varepsilon_{пр}^{-1} + 1). \quad (5.15)$$

Апробация методики проведена экспериментально на образцах стеклопакета из чистых прозрачных и затененных стекол, а также стекол с низкоэмиссионным мягким (*i*-стекло) и жестким (*k*-стекло) покрытием с варьированием толщины стекла и воздушной прослойки. Результаты испытаний методики, представленные на рисунке 5.27, показывают, что полученные данные соответствуют справочным и сертификационным данным для низкоэмиссионных стекол в пределах погрешности измерений [182, 320, 321].

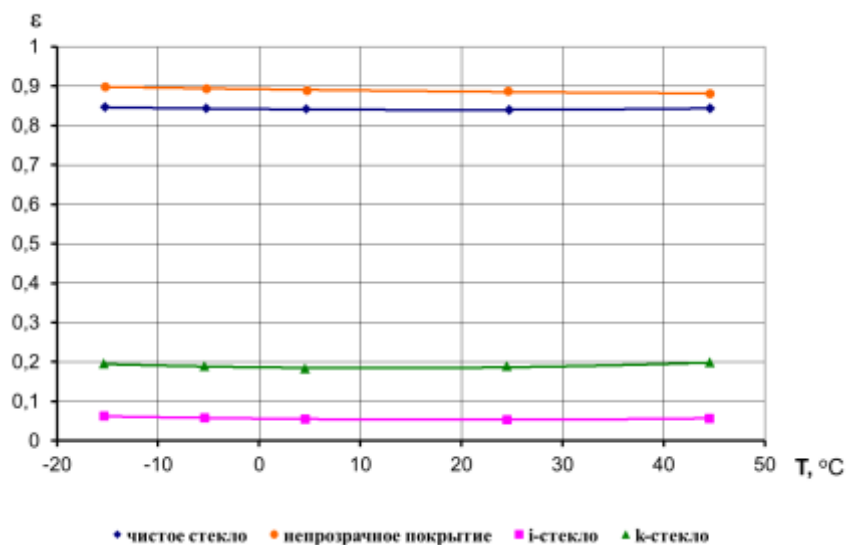


Рисунок 5.27 – Коэффициент эмиссии поверхностей различных стекол

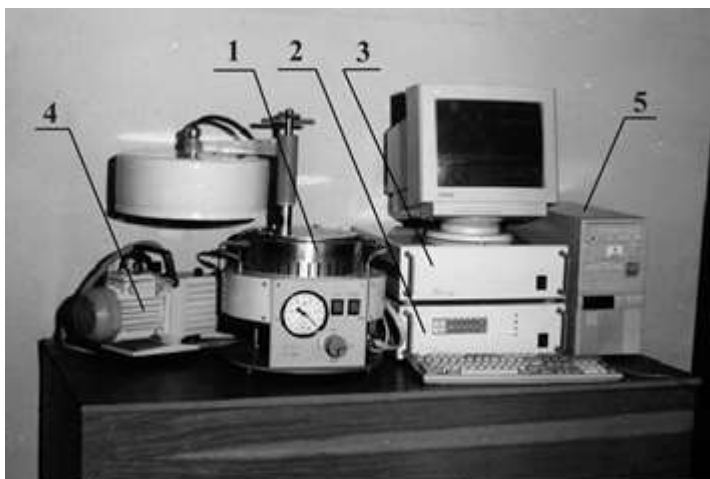
Данная методика применима как в научных исследованиях, так и для массовых технических измерений с целью контроля качества вновь созданных и уже выпускаемых образцов стекол, чистых и с энергоэффективным покрытием, а также при испытаниях и сертификации стеклопакетов. Внедрение методики позволит оценивать реальные ТРХ стекол и покрытий с использованием установок ИТ-7С, которыми оснащены ведущие лаборатории и сертификационные центры Украины.

5.3.3 Теплометрический метод и установка для измерения терморadiaционных характеристик светопрозрачных материалов и покрытий (ИТРС-1)

В ИТТФ под непосредственным руководством диссертанта разработаны три методики и установка ИТРС-1 для определения ТРХ образцов различных стекол, чистых и с энергоэффективным покрытием [10, 182, 263, 317, 320, 323-331]. Особенностью установки является то, что в ней реализован калориметрический метод измерения ТРХ, предусматривающий получение первичной информации с применением термоэлектрических ПТП и ПТ [318-320, 323, 326, 328].

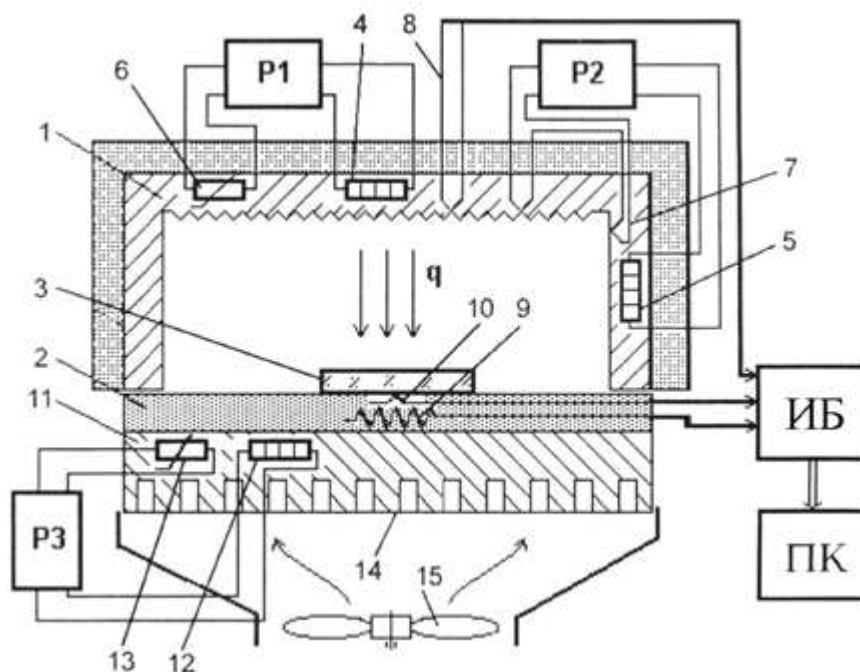
Установка ИТРС-1 [327], внешний вид которой показан на рисунке 5.28, а упрощенная функциональная схема – на рисунке 5.29, содержит четыре блока: тепловой 1, измерительный 2, электронных регуляторов 3 и вакуумирования 4, а также ПК с соответствующим ПО. Тепловой блок установки состоит из полостного источника теплового излучения (ИТИ) 1 цилиндрической формы и теплостока 11 с установленной на его поверхности теплометрической пластиной 2, на которую помещают исследуемый образец 3. Пластина 2 выполнена в виде диска из эпоксидного компаунда, внутри которого имеется семь идентичных ПТП 9 и пять ТХА 10, что позволяет одновременно проводить исследование нескольких образцов.

На верхнем торце и боковой цилиндрической поверхности полости ИТИ поддерживается постоянная температура $T_{ИТИ} = T_1 = const$, а на нижнем торце



- 1 – тепловой блок,
- 2 – измерительный блок,
- 3 – блок электронных регуляторов,
- 4 – вакуумный насос,
- 5 – персональный компьютер с программным обеспечением

Рисунок 5.28 – Внешний вид установки ИТРС-1



- 1 – ИТИ, 2 – теплотрическая пластина, 3 – исследуемый образец,
- 4 – основной нагреватель ИТИ, 5 – охранный нагреватель ИТИ,
- 6 и 13 – медные термометры сопротивления, 7 – гипертермопара,
- 8 – термопары, 9 – ПТП, 10 – измерительная термопара, 11 – теплосток,
- 12 – нагреватель, 14 – радиатор, 15 – вентилятор; P1, P2, P3 – электронные регуляторы температуры; ИБ – измерительный блок, ПК – персональный компьютер, ПО – программное обеспечение

Рисунок 5.29 – Упрощенная функциональная схема установки ИТРС-1

– температура теплостока $T_{TC} = T_2 = 0$. Заданный посредством ИТИ поток теплового излучения в общем случае частично отражается в сторону ИТИ, а частично, пронизывая исследуемый образец, измеряется ПТП, вработанным в теплометрическую пластину. Степень отражаемого в сторону ИТИ теплового потока характеризует качество энергоэффективного покрытия. Для исключения конвективной составляющей теплообмена производится разрежение воздушной среды в рабочей камере до остаточного давления 133 Па с помощью блока вакуумирования, выполненного на базе форвакуумного насоса.

Для оценки степени одномерности измеряемой плотности теплового потока, проведен теоретический анализ искажений одномерности и однородности теплового потока в зависимости от размеров и ТРХ элементов устройства, образующих измерительную полость [328]. Полученные результаты позволили спроектировать установку ИТРС-1 [329, 330] так, что в зоне чувствительного элемента ПТП обеспечена одномерность измеряемой плотности потока теплового излучения.

Плотность потока теплового излучения на поверхность образца стекла, обусловленная радиационным теплообменом, определяется выражением:

$$q_\varepsilon = \delta \cdot \varepsilon_{\text{ПР}} \cdot (T_{\text{ИТИ}}^4 - T_{\text{ОБР}}^4), \quad (5.16)$$

где $\varepsilon_{\text{ПР}}$ – приведенный коэффициент излучения при теплообмене двух поверхностей замкнутого пространства системы «ИТИ–Образец», вычисляемый по формуле:

$$\varepsilon_{\text{ПР}} = (1/\varepsilon_{\text{ОБР}} + (1/\varepsilon_{\text{ИТИ}} - 1) \cdot A_{\text{ПТ}}/A_{\text{ИТИ}})^{-1}, \quad (5.17)$$

где $A_{\text{ПТ}}$, $A_{\text{ИТИ}}$ – площади поверхностей теплометрической пластины и ИТИ;

$T_{\text{ИТИ}}$, $T_{\text{ОБР}}$ – значения температуры ИТИ и верхней поверхности образца;

$\varepsilon_{\text{ОБР}}$, $\varepsilon_{\text{ИТИ}}$ – эффективные коэффициенты излучения образца и ИТИ.

Первая методика соответствует абсолютным измерениям, при которых ТРХ рассчитывают по результатам прямых измерений плотности теплового потока через образец $q_{\text{ИЗМ}} = K_{\text{ПТП}} \cdot E_{\text{ПТП}}$ и температуры под ним. Расчетное соотношение для определения излучательной способности образца имеет вид:

$$\varepsilon_{ОБР} = \left[\frac{\delta \cdot (T_{ИТИ}^4 - T_{ОБР}^4)}{q_{ИЗМ} - \lambda_{ВОЗД} \cdot (T_{ИТИ} - T_{ОБР}) / (h_{ИТИ} - h_{ОБР})} - \frac{A_{ТП}}{A_{ИТИ}} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{ИТИ}} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (5.18)$$

где $T_{ИТИ}$ – температура ИТИ, измеряемая термопарой 8 (см. рис. 5.25);

$T_{ОБР}$ – температура отнесения, вычисляемая по формуле:

$$T_{ОБР} = T_{ИЗМ} + q_{ИЗМ} \cdot (h_{ОБР} / \lambda_{ОБР} + \Delta R) \quad (5.19)$$

где $T_{ИЗМ}$ – температура, измеряемая термопарой 10; ΔR – поправка, учитывающая тепловое сопротивление слоя эпоксидного компаунда теплотметрической пластины, в котором расположен спай измерительной термопары 10, и контактное тепловое сопротивление между образцом и поверхностью теплотметрической пластины (это значение определяется экспериментально при настройке установки).

Вторая методика реализует относительные измерения с применением одного эталонного образца, который устанавливается рядом с исследуемым.

Расчетная формула для определения коэффициента излучения имеет вид:

$$\varepsilon_{ОБР} = \left[\frac{\sigma \cdot (T_{ИТИ}^4 - T_{ОБР}^4)}{q_{ИЗМ} - \frac{T_{ИТИ} - T_{ОБР}}{T_{ИТИ} - T_{ЭТ}} (q_{ИЗМ.ЭТ} - \sigma \cdot \varepsilon_{ПР.ЭТ} \cdot (T_{ИТИ}^4 - T_{ЭТ}^4))} - \frac{A_{ТП}}{A_{ИТИ}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{ИТИ}} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (5.20)$$

где $\varepsilon_{ПР.ЭТ}$ – приведенный коэффициент излучения для поверхностей системы «ИТИ – Эталон», определяемый по формуле, аналогичной (5.17);

$T_{ОБР}$ и $T_{ЭТ}$ – значения температуры, вычисляемые по формулам вида (5.19).

Третья методика – относительная с применением двух эталонных образцов с известными контрастными значениями их коэффициентов излучения ($\varepsilon_{ЭТ.1} \neq \varepsilon_{ЭТ.2}$), например, «белого» образца – с покрытием из полированного металла, и «черного» – из диэлектрика с матовой поверхностью.

Из совместного решения уравнений теплового баланса для «черного» эталона и исследуемого образца получено следующее соотношение для вычисления приведенного коэффициента излучения:

$$\varepsilon_{IP} = \varepsilon_{IP.ЭТ.2} \cdot \frac{(q_{OBR} - (\lambda_{ЭKB}/h) \cdot (T_{ИТИ} - T_{OBR})) \cdot (T_{ИТИ}^4 - T_{ЭТ.2}^4)}{(q_{ЭТ.2} - (\lambda_{ЭKB}/h) \cdot (T_{ИТИ} - T_{ЭТ.2})) \cdot (T_{ИТИ}^4 - T_{OBR}^4)}, \quad (5.21)$$

где значение отношения $\lambda_{ЭKB}/h$ рассчитано по формуле

$$\lambda_{ЭKB}/h = (q_{ЭТ.1} - \varepsilon_{IP.ЭТ.1} \cdot \delta(T_{ИТИ}^4 - T_{ЭТ.1}^4)) \cdot (T_{ИТИ} - T_{ЭТ.1})^{-1}, \quad (5.22)$$

при этом $\varepsilon_{IP.ЭТ.1}$ и $\varepsilon_{IP.ЭТ.2}$ – по формуле (5.13);

T_{OBR} , $T_{ЭТ.1}$ и $T_{ЭТ.2}$ – по формуле (5.19) с учетом индекса.

Искомый коэффициент излучения исследуемого образца равен:

$$\varepsilon_{OBR} = (1/\varepsilon_{IP} + (1/\varepsilon_{ИТИ} - 1) \cdot A_{ТП}/A_{ИТИ})^{-1}, \quad (5.23)$$

При измерениях по второй или третьей методике эталонные образцы устанавливаются на соответствующие ПТП рядом с исследуемым образцом и измеряют q_{OBR} , $q_{ЭТ.1}$, $q_{ЭТ.2}$. Совокупность этих измерений позволяет учесть кондуктивную и конвективную составляющие теплообмена через воздушный зазор, в связи с чем отпадает необходимость вакуумирования пространства рабочей камеры установки.

Первая методика (абсолютная) является основной и применяется для аттестации установки при ее выпуске, для текущего контроля коэффициентов излучения эталонных образцов, а также при периодических поверках установки. Вторая и третья методики измерений являются рабочими, они более производительны и применяются в условиях отработки технологии производства для сравнения качества образцов.

Градуирование установки и ее метрологическая аттестация проведены с использованием стандартного образца – кварцевого стекла марки КВ, для которого полусферический интегральный коэффициент излучения (поглощения) известен и нормирован в соответствии с ГСССД 61-83 [331]. Исследования погрешности вблизи крайних точек диапазона измерения выполнены с помощью образцов из оконного стекла без покрытия и с напыленным непрозрачным слоем никеля, для которых имеются рекомендованные справочные данные [332].

По результатам государственной метрологической аттестации согласно Программе и методике МА ИТРС-1, утвержденной в 1999г. ГП «Укрметртестстандарт» [333], установка модели ИТРС-1 №1 допущена к эксплуатации с предельно допускаемой абсолютной погрешностью измерения интегрального полусферического коэффициента излучения (поглощения) $\pm 0,02$.

Установка ИТРС-1 внедрена на предприятии ООО «Технолуч», г. Киев.

Разработанная методика калориметрических измерений ТРХ и краткое описание устройства реализующей ее установки введены в качестве приложения к национальному гармонизированному с ГОСТ стандарту ДСТУ БВ 2.7-228 [182].

5.3.4 Установка для измерения теплового сопротивления стеклопакетов (ИТС-3)

Одной из важнейших характеристик стеклопакета является его сопротивление теплопередаче. Этот параметр экспериментально определяют, как правило, с использованием универсальной климатической камеры, позволяющей испытывать и другие виды строительных конструкций. Такие камеры энергоемки, крупногабаритны и оснащены дорогим и сложным холодильным и другими видами оборудования. Поэтому они рентабельны лишь при эксплуатации в крупных центрах, специализирующихся на испытаниях и сертификации разнообразных строительных конструкций. Испытание же стеклопакетов довольно длительно и дорого. Вследствие этого предприятия-изготовители стеклопакетов обычно производят контроль сопротивления теплопередаче только лишь при первичной сертификации продукции, а затем – при периодических испытаниях через два года.

Сопротивление теплопередаче стеклопакета зависит не только от конструкции, но и от качества выполнения основных технологических операций (нанесение энергоэффективного покрытия на стекла, герметизация и заполнение сухим газом с низкой теплопроводностью). Таким образом, контроль сопротивления теплопередаче может рассматриваться как

интегральный способ контроля качества всего технологического процесса производства стеклопакетов. И его желательно осуществлять регулярно в процессе производства на отобранных образцах продукции. Такой подход к контролю качества вызвал необходимость создания установки, обеспечивающей условия испытаний, нормированные межгосударственным стандартом [181], но занимающей относительно небольшую площадь и обслуживаемый одним оператором, с механизированными и автоматизированными процессами подготовки проведения измерений. Для решения данных задач в ИТТФ была создана специализированная измерительно-испытательная установка ИТС-3, переданная в эксплуатацию киевскому предприятию ООО «Технолуч» [334, 335].

Метод определения сопротивления теплопередаче стеклопакетов, реализованный в установке ИТС-3, соответствует требованиям [181] и заключается в создании перепада температуры по обеим сторонам испытываемого образца, измерении температуры воздуха и поверхностей определенных участков образца, а также плотности теплового потока, проходящего через образец в стационарном режиме испытания. Для измерения плотности теплового потока и температуры применяют термоэлектрические преобразователи, ПТП [6, 7] и ПТ [336], устанавливаемые в каждой зоне образца однородной по тепловому сопротивлению: центральной и краевых (верхней, нижней и боковых).

Расчет теплового сопротивления для каждой однородной зоны проводится по формуле, регламентированной в [181]: $R = 1/\alpha_1 + R_{CT} + 1/\alpha_2$, где α_1 , α_2 – коэффициенты теплообмена со стороны теплого и холодного отсеков, которым приписаны следующие номинальные значения: $\alpha_1 = 8,0$ Вт/(м²·К) и $\alpha_2 = 23,0$ Вт/(м²·К); R_{CT} – тепловое сопротивление однородной зоны испытываемого стеклопакета, вычисляемое по формуле: $R_{CT} = (T_{CT.1} - T_{CT.2})/q$, где $T_{CT.1}$, $T_{CT.2}$ – значения температуры поверхностей стеклопакета, обращенных к теплomu и холодному отсекам; $q = K_{ПТП} \cdot E_{ПТП}$.

В стандарте [181] даны формулы для расчета приведенных теплового сопротивления и сопротивления теплопередаче всей конструкции на основании измеренных значений теплового сопротивления всех однородных зон и относительных площадей этих зон.

Установка, внешний вид и состав которой приведены на рисунке 5.30, а функционально-структурная схема – на рисунке 5.31, состоит из малогабаритной передвижной климатической камеры, блока электронных регуляторов, информационно-измерительного устройства, обеспечивающего прием и обработку измерительной информации и передачу ее в ПК для дальнейшей обработки, а также сервисного стола для подготовки стеклопакета к испытаниям.

Малогабаритная передвижная климатическая камера служащая для создания требуемых климатических условий по обе стороны от испытываемого стеклопакета, содержит три последовательно расположенных модуля:

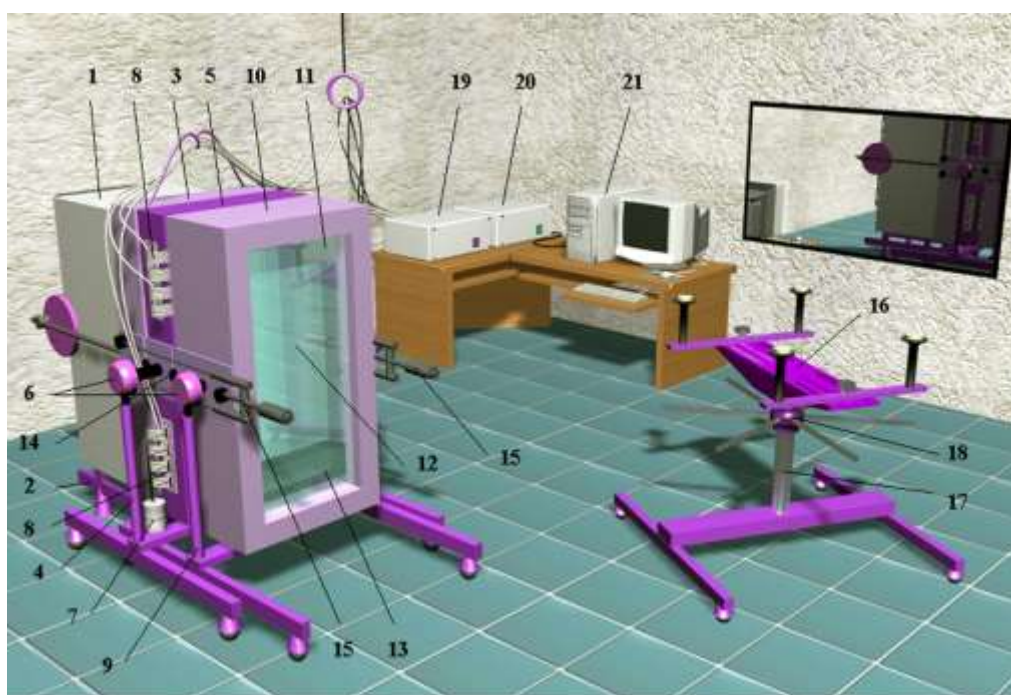
- модуль холодного отсека МХО, выполненный на базе морозильной камеры фирмы Whirlpool для задания температуры и коэффициента теплообмена, соответствующих зимним погодным условиям;
- модуль держателя стеклопакета МДС, (подвижная стойка с деревянной рамой), в котором закрепляют испытываемое изделие;
- модуль теплого отсека МТО для задания температурно-влажностных условий, соответствующих отапливаемому помещению.

В качестве измерителей температуры холодной поверхности испытываемого стеклопакета, а также воздуха по двум его сторонам и различных элементов установки применены 14 термопар ТХК.

В качестве измерителей теплового потока применены 13 идентичных термоэлектрических ПТП модели ПТП-1Б.11.2.1.11.П.00.1.13.12 [6, 7] со встроенными термопарами ТХК и размерами 40×80×2 мм.



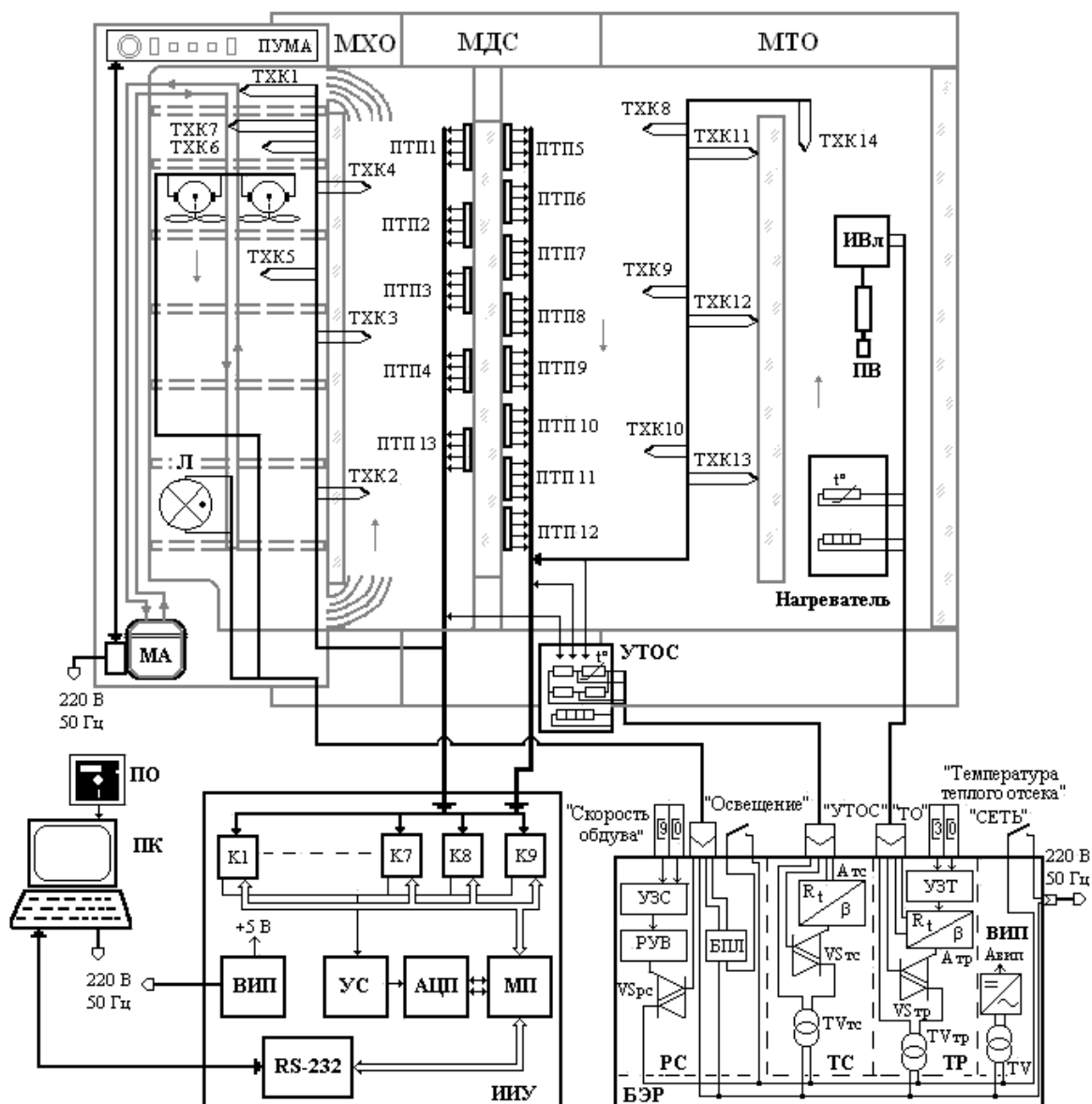
а)



б)

1 – морозильная камера; 2 – подставка холодного отсека; 3 – рама; 4 – стойка модуля держателя образца; 5 – рама; 6 – замок-защелка; 7 – тепловой блок УТСС; 8 – разъемы; 9 – стойка модуля теплого отсека; 10 – рама теплого отсека; 11 – стеклопакет задней стенки теплого отсека; 12 – экран из стеклопакета, установленный в теплом отсеке; 13 – нагреватель; 14 – стыковочный замок; 15 – тяги; 16 – сервисный стол; 17 – механизм подъема сервисного стола; 18 – поворотное устройство; 19 – блок электронных регуляторов; 20 – информационно-измерительное устройство; 21 – персональный компьютер.

Рисунок 5.30 – Внешний вид (а) и структура (б) установки для тепловых испытаний стеклопакетов модели ИТС-3



МХО – модуль холодного отсека; МТО – модуль теплого отсека; МДС – модуль держателя стеклопакета; МА – морозильный агрегат; ПУМА – пульт управления МА; БВ – блок вентиляторов; Л – лампа осветительная; ТХК – термопары; ПТП – преобразователи теплового потока; ИВл – измеритель влажности; УТСС – устройство термостатирования свободных спаев термопар; ПК – персональный компьютер с программным обеспечением ПО; ИИУ – информационно-измерительное устройство; КОМ – коммутатор; УС – усилитель; АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; МП – микропроцессор; ВИП – вторичный источник питания; RS-232 – интерфейс; БЭР – блок электронных регуляторов: Р1 – регулятор скорости обдува; УЗС – устройство задания скорости; РУВ – регулятор угла включения; БПЛ – блок питания лампы Л; Р2 – регулятор температуры УТОС; Р3 – регулятор температуры МТО; УЗТ – устройство задания температуры; ВИП – вторичный источник питания; TV – трансформаторы; А – выпрямители-стабилизаторы; VS – симисторы

Рисунок 5.31 – Функционально-структурная схема установки ИТС-3

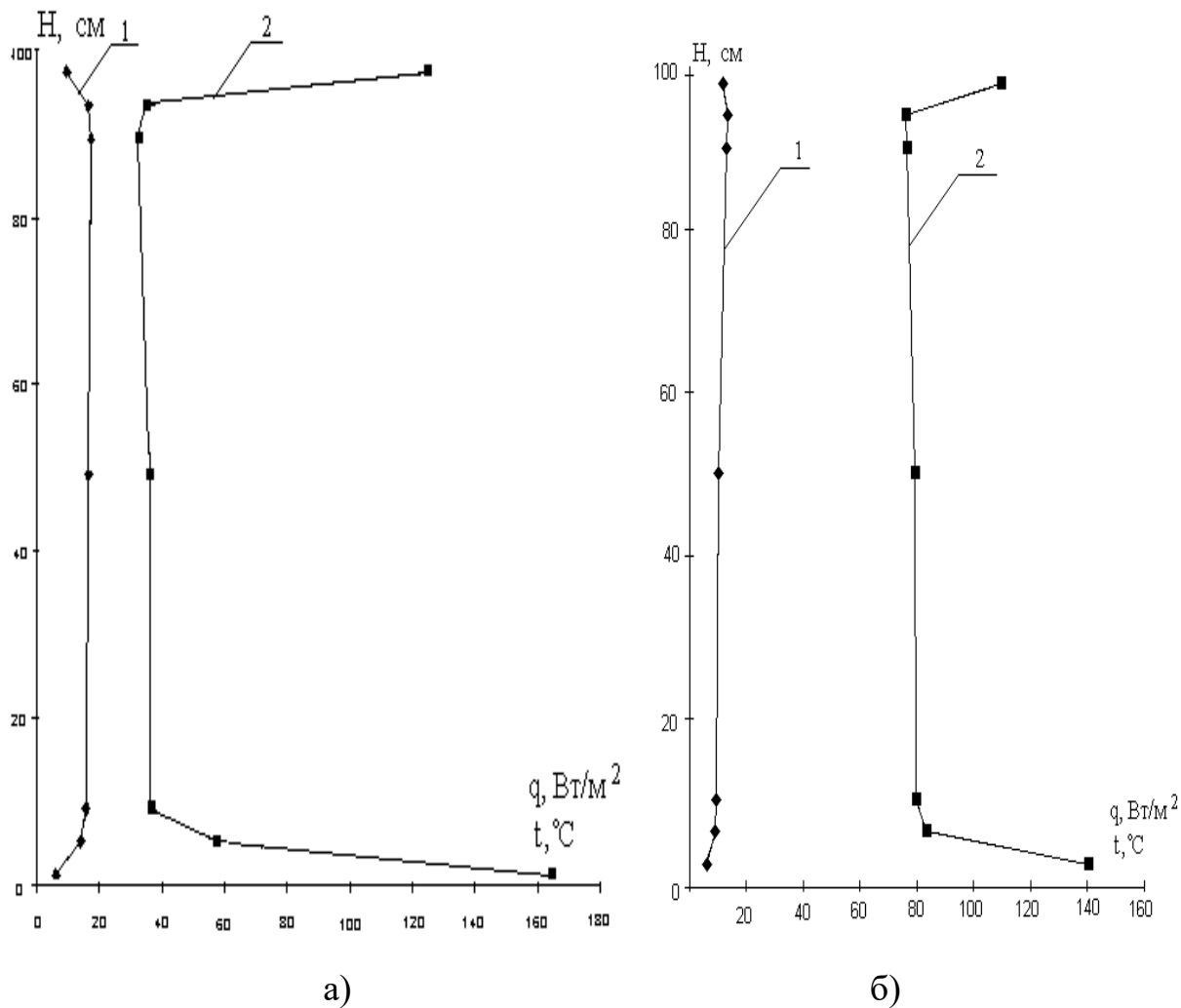
Определение МХ установки ИТС-3 проведено путем измерения теплового сопротивления рабочего эталона из полиметилметакрилата в виде плоскопараллельной пластины, устанавливаемой в проем держателя стеклопакета. Оценка погрешности измерения выполнена путем сличения измеренного теплового сопротивления рабочего эталона с нормированными значениями согласно [123, 307].

По результатам метрологической аттестации пределы основной допускаемой погрешности установки ИТС-3 составили $\pm 8,4\%$.

По сравнению с известными универсальными испытательными стендами установка ИТС-3 обладает такими преимуществами, как автоматизация и достаточность для эксплуатации одного оператора; проведение измерения сопротивления теплопередаче стеклопакета за одну смену; в установке задаются близкие к номинальным значения коэффициентов теплоотдачи на поверхностях стеклопакета; требуется лабораторное помещение площадью не более 20 м².

На установке ИТС-3 проведены исследования теплозащитных характеристик различных типов стеклопакетов. На рисунке 5.32 представлены графики распределения плотности теплового потока вдоль высоты двух типов стеклопакетов: однокамерного с простыми стеклами и воздушным заполнением прослойки и двухкамерного с энергоэффективными стеклами и камерами, заполненными аргоном. Разделительные рамки выполнены из алюминия. Результаты получены для стеклопакетов без рам.

Как известно, в краевых зонах стеклопакетов тепловое сопротивление конструкции значительно уменьшается из-за наличия металлических рамок, которые являются тепловыми шунтами (мостиками холода). В этих условиях важнейшее значение приобретает конструкция и качество оконной рамы, закрывающей мостика холода. Представленные графики подтверждают эти положения, причем влияние краевых эффектов больше сказывается на энергоэффективных стеклопакетах.



а – двухкамерный стеклопакет с энергоэффективными стеклами (4E-12Ar-4M-12Ar-4E);

б – однокамерный стеклопакет с простыми стеклами и воздушным заполнением (4M1-12-4M1).

1 – температура на поверхности стеклопакета со стороны модуля теплого отсека; 2 – плотность теплового потока через стеклопакет со стороны модуля теплого отсека.

Рисунок 5.32 – Распределение теплового потока и температуры вдоль высоты стеклопакета.

Как следует из графиков, показанных на рисунке 5.32, в краевых зонах распределение теплового потока существенно неравномерно, а ширина этих зон может изменяться в зависимости от конструкций стеклопакетов и рам. В стандарте [181] указано, что ПТП должны устанавливаться в центрах зон, и отмечено, что перед проведением измерений ширина краевых зон должна уточняться путем моделирования или предварительных измерений, однако обычно на практике используют значения ширины зон, указанные на иллюстративном рисунке в этом стандарте – 200 мм в верхней и нижней и 150 мм в боковых краевых зонах. В проведенных исследованиях ширина краевых зон была значительно меньше, поэтому ПТП, установленные, соответственно, на расстояниях 100 мм и 75 мм от краев стеклопакета, оказывались у границы фактической краевой зоны и измеряли тепловой поток существенно меньший, чем средний по зоне. Опыт исследования краевых зон и других тепловых неоднородностей строительных конструкций показывает, что для таких испытаний удобны специально разработанные для этих целей многосекционные ПТП со встроенными термопарами [10].

Такой ПТП представляет собой линейку последовательно соединенных секций термобатареи с выводами от каждой секции и независимые термопары, спаи которых размещены по центру каждой секции. Изготовлен ПТП, теплочувствительная зона которого содержит 8 секций с размерами $30 \times 50 \times 1$ мм каждая. Многосекционные ПТП позволяют исследовать распределение плотности теплового потока и температуры в зоне неравномерности и определять их средние значения.

Экспериментальный образец установки после государственной метрологической аттестации в Украинском центре стандартизации, метрологии и сертификации [337] передан для эксплуатации в ООО «Технолуч», специализирующийся на выпуске энергосберегающих стеклопакетов. Проведены испытания гаммы однокамерных и двухкамерных стеклопакетов, выпускаемых предприятием, с сопротивлением теплопередаче от $0,3 \text{ К} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$ до $1,1 \text{ К} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$.

5.3.5 Информационно-измерительная система для тепловых испытаний строительных ограждающих конструкций «Ресурс-С»

Современная цивилизация не может отказаться от выработки и потребления энергии для своего существования, поэтому нет альтернативы ее рациональному использованию, основанному на экономии энергоресурсов и внедрении энергоэффективных технологий.

Задачу энергосбережения в строительной отрасли решают улучшением теплозащитных качеств зданий и сооружений различного назначения, главным образом, путем внедрения новых строительных и теплоизоляционных материалов и изделий, удовлетворяющих повышенным нормативным требованиям к их тепловому сопротивлению, и постоянным контролем степени соответствия фактических значений теплотехнических характеристик ОК установленным нормам. Такой контроль осуществляют при энергетическом обследовании, цель которого заключается в получении достоверной информации о реальном состоянии теплозащиты здания и теплопотерях через его оболочку. Эта информация является исходной для определения удельных по зонам и общих трансмиссионных тепловых потерь здания и оформления раздела «Теплотехнические показатели» энергетического паспорта с фактическими значениями теплотехнических характеристик согласно [278].

Существует несколько методов определения теплопотерь зданий и сооружений. Один основан на принципе теплового баланса [338], и позволяет определить общие трансмиссионные потери через теплозащитную оболочку здания, однако не выявляет ни конкретных причин теплопотерь, ни дефектных или плохо изолированных участков ОК. В связи с этим трудно определить наиболее эффективные направления термомодернизации здания.

Другой метод – бесконтактный (термографический) [339 – 345] основан на дистанционном измерении поверхностной температуры ОК с применением тепловизионной техники. Он является наиболее производительным при обследовании, позволяет продиагностировать все здание и выявить локальные дефекты теплоизоляции путем сравнения температуры поверхности различных

участков. Однако, выдавая качественную картину, сам по себе тепловизионный метод не дает возможности определять численные значения теплового сопротивления ОК и тепловых потерь здания.

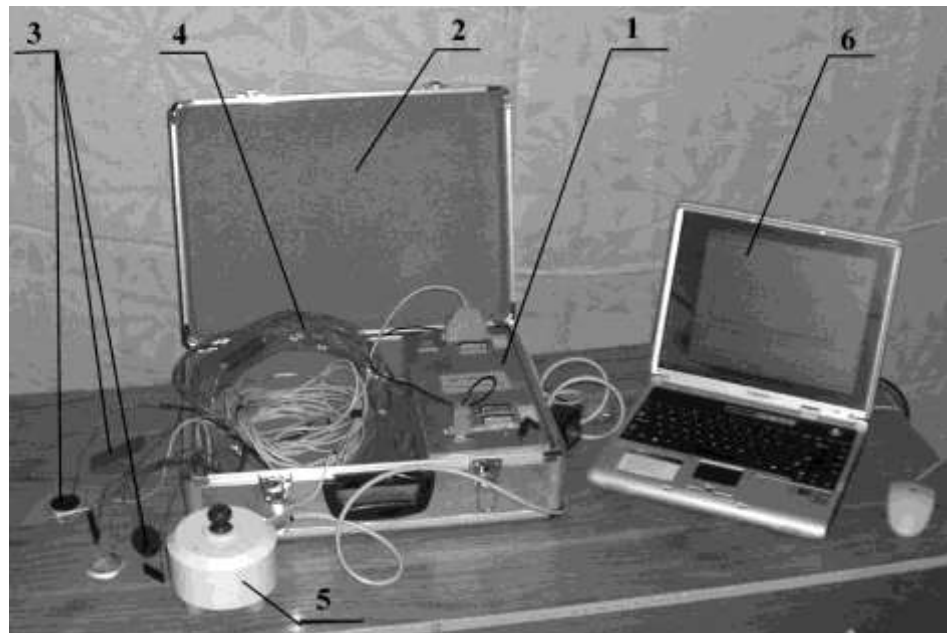
Наиболее точные результаты получают при теплотехническом обследовании зданий, основанном на контактных измерениях [174-177, 179, 346-349] плотности теплового потока через ОК и температуры ее обеих поверхностей и воздуха по обе стороны от ОК с последующим вычислением искомых величин i -ой однородной зоны и приведенного сопротивления теплопередаче конструкции в целом.

Для приборного обеспечения контактного метода теплотехнических обследований объектов в натуральных условиях разработан универсальный многоканальный измерительный комплекс «РЕСУРС» [38, 41, 350, 351], обеспечивающий длительное непрерывное измерение плотности теплового потока и температуры одновременно во многих точках обследуемой поверхности. Основными составляющими комплекса «РЕСУРС», внешний вид которого приведен на рисунке 5.33, являются многоканальное электронное измерительное устройство (измерительный блок), персональный компьютер (ноутбук) и набор различных первичных преобразователей тепловых величин.

Для измерения плотности теплового потока через ОК комплекс оснащен набором ПТП_{СТР} различных типоразмеров, а для измерения температуры – набором пяточковых термопар, предназначенных для установки на поверхности ОК и термопар в корпусе из тонкостенной трубки с отражающей поверхностью, предназначенных для измерения температуры воздуха.

Учитывая особенности ОК зданий (сооружений), разработано несколько модификаций ПТП_{СТР}, предназначенных для установки на различные типы строительных ОК: фрагмент стены; стекло; обвязку окна (раму) и на коробку оконных блоков [347 – 349].

Как было сказано выше, в современных требованиях к теплоизоляции зданий [278] нормативные значения сопротивления теплопередаче ОК в 2 – 3 раза превышают действовавшие ранее. При соблюдении этого требования



1 – измерительный блок; 2 – переносной кейс; 3 – ПТП и ПТ разных типов для обследования энергетических и строительных объектов; 4 – соединительные кабели; 5 – зондовый измеритель коэффициента теплопроводности; 6 – ноутбук

Рисунок 5.33 – Общий вид универсального многоканального измерительного комплекса «Ресурс»

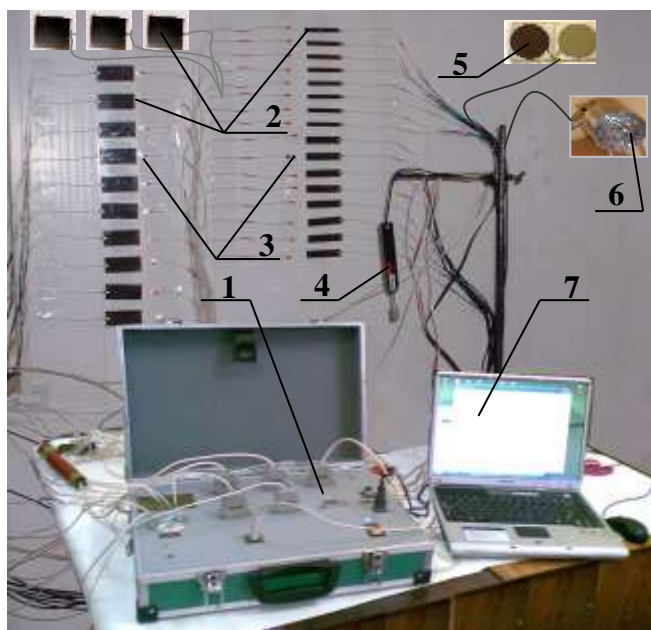
плотность теплового потока через ОК уменьшается до уровня (10 – 20) Вт/м². В связи с этим повышаются требования к чувствительности применяемых на строительных объектах ПТП_{СТР} и другим их характеристикам. При измерении на строительных объектах существенно увеличивается динамическая погрешность измерения. Эта составляющая погрешности вызвана нестационарностью контролируемого теплового процесса и пропорциональна изменению теплосодержания самого ПТП, включенного последовательно в цепь измерения теплового потока, т.е. динамическая погрешность пропорциональна собственной теплоемкости ПТП и скорости изменения температуры $C_{ПТП} \cdot dT_{ПТП} / dt$. Для уменьшения этой составляющей погрешности измерения в диапазоне малых значений теплового потока, характерном для хорошо изолированных строительных элементов, в наборе преобразователей предусмотрены ПТП с корректирующей термобатареей [353],

которые имеют постоянную времени в (5-10) раз меньшую, чем у традиционных ПТП таких же размеров и чувствительности.

Основным достоинством контактного метода теплотехнического обследования является возможность определения численных значений теплового сопротивления ОК. Недостатки метода проявляются при обследовании крупногабаритных объектов, имеющих большие теплоотдающие поверхности и неоднородные в пространстве тепловые поля. К недостаткам нужно также отнести большие трудозатраты по креплению первичных преобразователей на поверхностях различных участков, в том числе труднодоступных (например, стены верхних этажей здания), и их переустановке на новые участки, а также длительные (не менее 4 суток) измерения. При использовании контактного метода трудно обнаружить локальные дефекты.

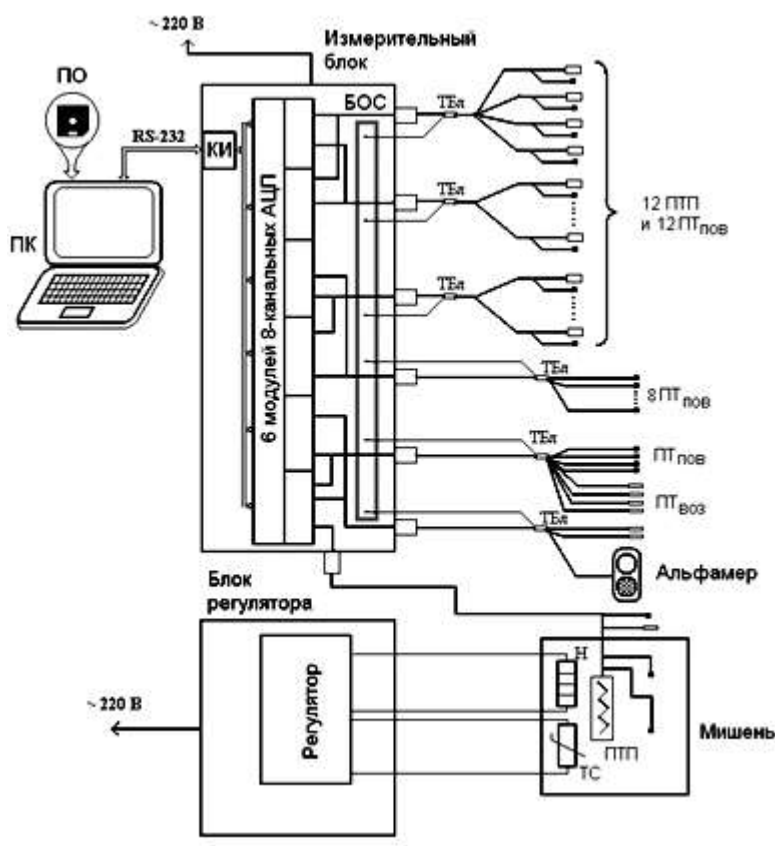
Совместное использование различных методов позволяет реализовать достоинства каждого из них и в значительной мере нивелировать недостатки [352-354]. Технически такой подход воплощен в стандартизированной методике измерений комбинированным тепловизионно-теплометрическим методом МВУ 048/06 [355], а также в информационно-измерительной системе «РЕСУРС-С» [355-359], внешний вид которой показан на рисунке 5.34, а функциональная схема на 48 каналов измерения – на рисунке 5.35.

Система «РЕСУРС-С» состоит из одного или нескольких электронных блоков, переносного ПК (ноутбука) с соответствующим ПО, а также набора первичных преобразователей и теплофизических измерительных устройств. В набор первичных преобразователей системы «РЕСУРС-С» входят ПТП и ПТ, а также другие первичные преобразователи с нормированным электрическим выходом, например, преобразователь влажности воздуха, устройство измерения коэффициента теплообмена («Альфамер»), устройство для настройки тепловизора («Мишень»), устройство для измерения степени черноты покрытий и, при необходимости, накладной экспресс-измеритель коэффициента теплопроводности строительных материалов (ИТ-8) [360].



- 1 – электронный блок;
- 2 – комплект ПТП_{СТР};
- 3 – термопары;
- 4 – измеритель влажности;
- 5 – «Альфамер»;
- 6 – радиометр РАП-15Д;
- 7 – ПК (ноутбук)

Рисунок 5.34 – Внешний вид ИК «РЕСУРС-С»



ПТП – преобразователи теплового потока,
 ПТП_{пов} – преобразователи температуры поверхности,
 ПТП_{воз} – преобразователи температуры воздуха,
 БОС – блок опорных спаев,
 ТБл – температуровыравнивающий блок,
 КИ – конвертер интерфейсов,
 Н – нагреватель,
 ТС – термометр сопротивления.

Рисунок 5.35 – Функциональная схема ИК «РЕСУРС-С-48»

Количество каналов измерения напряжения постоянного тока в измерительном блоке может быть 32, 48, 96 в зависимости от модификации системы «РЕСУРС-С». Модель «РЕСУРС-С-48» оснащена устройствами «Альфамер» и «Мишень» с регулятором температуры. Наличие двух электронных блоков позволяет проводить измерения одновременно в двух зонах, отдаленных друг о друга.

Программное обеспечение системы «РЕСУРС-С» допускает создание индивидуальных конфигурационных файлов для каждого обследуемого объекта, то есть определение порядка, частоты и периодичности опроса каналов, скорости обмена данными и номера порта ПК. При работе осуществляется измерение сигналов по заданной программе, их первичная обработка и представление на экране монитора как таблично, так и в виде графиков изменения во времени. Одновременно данные записываются в ПК в файле формата Microsoft Excel, для дальнейшей обработки этим программным продуктом.

Каждый экземпляр ИК «РЕСУРС-С» поставляется Заказчику со свидетельством об его государственной метрологической аттестации согласно утвержденной Программе и методике метрологической аттестации [361]. Всего внедрено 6 экземпляров ИК «РЕСУРС-С».

5.4 Калориметрические установки для измерения теплоты сгорания топлива (КТС)

Эффективность сжигания топлива в котлоагрегатах зависит от его качества, основной теплотехнической характеристикой которого является теплота сгорания. В последние годы резко возросло значение оперативного контроля теплоты сгорания топлива, применяемого в энергетике и на промышленных предприятиях. Известны специальные приборы – бомбовые калориметры сгорания, в которых сжигание пробы топлива известной массы (или объема – для газа) происходит в специальном реакционном сосуде – калориметрической бомбе Бергло (далее – КБ) в атмосфере сжатого кислорода

при постоянном объеме. Наибольшее распространение в мире получили водяные бомбовые калориметры [362-364]. В них выделившаяся при сгорании пробы энергия определяется по повышению температуры точно дозированного количества воды в калориметрическом сосуде, в котором размещена КБ. Для этих калориметров характерны большие значения энергии тепловыделения ($30\div 50$ кДж) и сравнительно высокая точность. Они применяются не только для регулярного определения теплоты сгорания на тепловых электростанциях и в котельных предприятий, но и при испытании продукции химической и нефтеперерабатывающей промышленности, на объектах добычи и транспортирования природных топлив, в металлургии, а также в научных исследованиях [365, 366].

Однако в Украине необходимые, надежные и удобные в эксплуатации отечественные приборы для измерения теплоты сгорания топлива, несмотря на то, что этот вид измерения был стандартизован [367], не производились. В связи с этим в ИТТФ был разработан отечественный калориметр (далее – КТС), ставший альтернативой традиционному водяному калориметру [35, 368-372].

Главное отличие этого прибора в том, что он является калориметром теплового потока, построенным по принципу изопериболического кондуктивного калориметра [373]. При этом последовательно были разработаны три модели КТС-1, КТС-2 и КТС-3.

Теплота, выделяемая при сгорании пробы топлива в КБ, отводится к изотермической оболочке через ПТП в виде цилиндрической теплометрической оболочки. Сигнал ПТП пропорционален проходящей через него тепловой мощности. После установления в тепловом блоке КТС стационарного состояния, производят поджог пробы топлива и с помощью специального электронного блока интегрируют сигнал ПТП до восстановления в тепловом блоке стационарного режима.

В КТС полную теплоту сгорания пробы топлива определяют двумя способами: интегральным и баллистическим. В первом случае теплота сгорания пропорциональна интегральному значению сигнала ПТП за промежуток от

поджога до восстановления стационарного режима, а во втором – по максимальному значению сигнала ПТП.

Тепловые блоки разработанных калориметров выполнены одинаковыми, при этом размеры и форма калориметрической ячейки согласованы с размерами КБ, что позволяет легко вставлять и извлекать ее из калориметрической ячейки при эксплуатации.

Калориметр модели КТС-1, внешний вид которого представлен на рисунке 5.36, а, предназначен для измерения теплоты сгорания только твердых и жидких топлив. Он выполнен в виде настольного блока и рассчитан на эксплуатацию в комплекте со стандартной самоуплотняющейся КБ типа ЛБС, выпускавшейся в России.

Калориметр модели КТС-2, внешний вид которого показан на рисунке 5.36, б, по сравнению с КТС-1 имеет ряд конструктивных решений, направленных на уменьшение длительности подготовки и измерения, а также на стабилизацию температурных режимов, уменьшение неконтролируемых теплотерь и, следовательно, уменьшение погрешности измерений. Эта модель калориметра комплектуется разработанной в ИТТФ универсальной бомбой БКУ-1, предназначенной для сжигания различных видов топлива, в том числе и газа.

Калориметр модели КТС-3, внешний вид которого показан на рисунке 5.37, а конструктивная схема – на рисунке 5.38, разработан на основании результатов экспериментальных исследований и численного моделирования тепловых процессов в приборе. Он выполнен по той же теплотехнической схеме, что и КТС-2, но имеет ряд конструктивных усовершенствований, в его состав введен персональный компьютер (ПК) и усовершенствованная бомба БКУ-2.

Тепловой блок КТС-3 содержит калориметрическую ячейку, смонтированную в массивный корпус из дуралюмина. Дном корпуса является нижняя крышка с теплоизоляционным вкладышем. Корпус снабжен электронагревателем и медным термометром сопротивления, предназначенными для обеспечения требуемого температурного режима



а



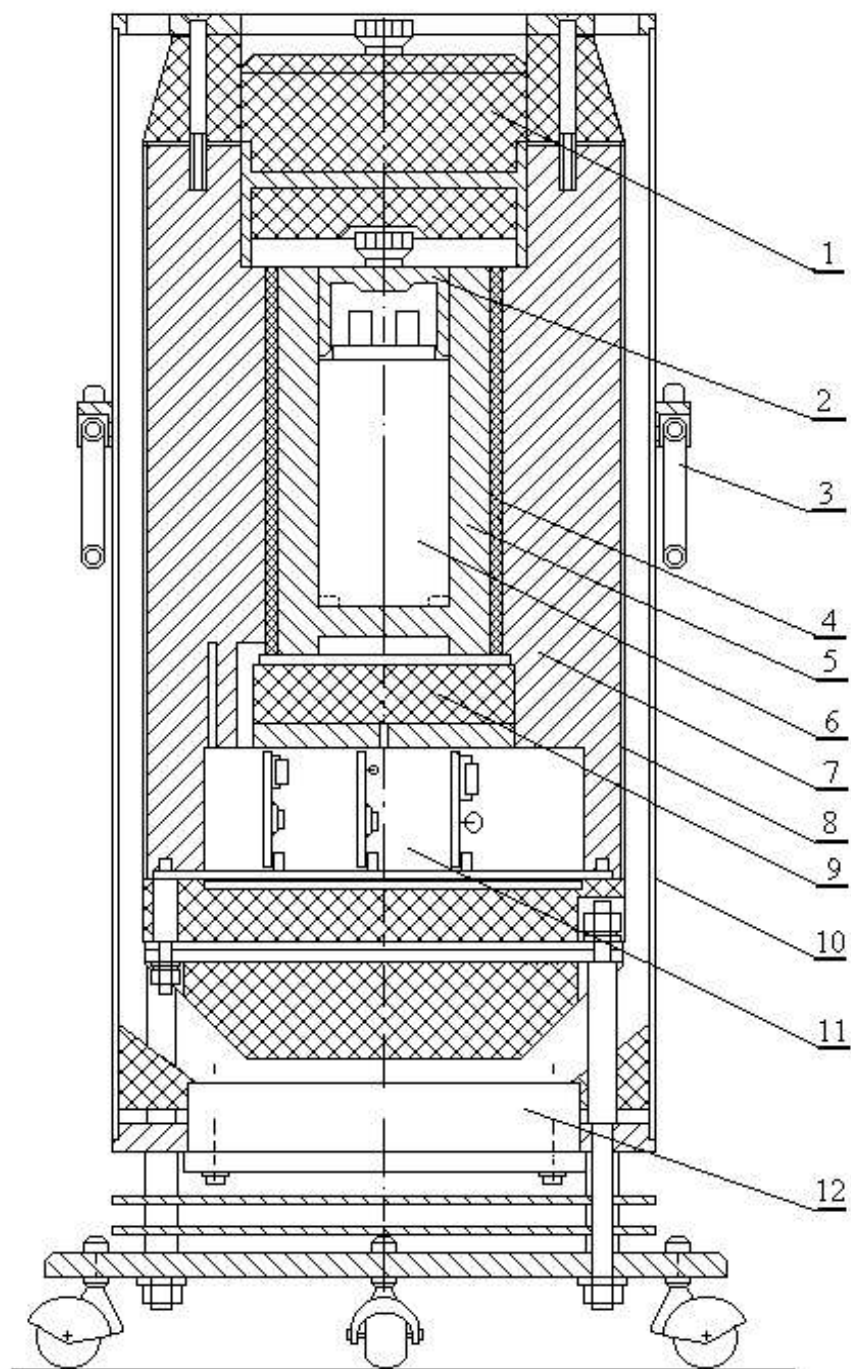
б

Рисунок 5.36 – Внешний вид калориметров КТС-1 (а) и КТС-2 (б).



1 – тепловой блок (ТБ); 2 –бомба БКУ-2; 3 – электронный блок (ЭБ);
4 – персональный компьютер (ПК) с соответствующим ПО.

Рисунок 5.37 – Внешний вид калориметра модели КТС-3



1 – верхняя крышка; 2 – крышка ячейки; 3 - откидывающаяся рукоятка;
 4 – цилиндрическая теплометрическая оболочка (ПТП); 5 – стакан
 калориметрической ячейки; 6 – бомба; 7 – корпус; 8 – нагреватель;
 9 – теплоизоляционный вкладыш; 10 – кожух; 11 – отсек электронных блоков;
 12 – вентилятор.

Рисунок 5.38 – Конструктивная схема теплового блока калориметра модели КТС-3

работы калориметра. Калориметрическая ячейка состоит из стакана, изготовленного из дуралюмина, и размещенной по его боковой поверхности цилиндрической теплотметрической оболочки (ПТП), контактирующей с корпусом калориметра. Теплотметрическая оболочка содержит более 70 тысяч медь-константановых гальванических термоэлементов. Между наружной поверхностью корпуса и металлическим кожухом образован кольцевой канал, в котором с помощью вентилятора и специальных турбулизаторов создается турбулентный воздушный поток для эвакуации излишней теплоты от термостатируемой поверхности корпуса [368]. В его нижней части размещены электронные узлы, благодаря чему обеспечивается стабильная рабочая температура для прецизионных цепей усиления и измерения сигнала ПТП, а также для систем термостатирования.

Для автоматизации процесса измерения и обработки информации на ПК разработана программа «КТС-3», обеспечивающая прием измерительной информации, ее обработку, построение графика изменения теплового потока на экране монитора, определение значения энергии, выделившейся в бомбе интегральным и баллистическим способами, а затем расчет значений удельной высшей и низшей теплоты сгорания исследуемого топлива, создание, редактирование и печать файла протокола испытаний.

Калориметр КТС-3 можно эксплуатировать без связи с ПК. В этом случае оператор считывает результат измерения энергии сгорания пробы с жидкокристаллического дисплея электронного блока и самостоятельно проводит необходимые вычисления.

После включения калориметра и введения необходимых данных в ПК на экране монитора начнется построение графика изменения теплового потока. При выходе ТБ на установившийся тепловой режим, оператор осуществляет поджог пробы либо непосредственно с помощью кнопки на передней панели ЭБ, либо с помощью виртуальной кнопки на экране монитора ПК. При этом автоматически включается программа обработки и информационного обеспечения определения теплоты сгорания топлива.

По истечении (30...120) секунд тепловой поток достигает максимального значения и ПК автоматически вычисляет и индицирует значение полной теплоты сгорания в джоулях, полученное баллистическим способом. Это значение может использоваться для грубой оценки (погрешность примерно 1%) теплоты сгорания. Вычисление результата измерения интегральным методом продолжается в течение 45 минут. При этом график изменения теплового потока отображается на экране монитора ПК как это видно на рисунке 5.39.

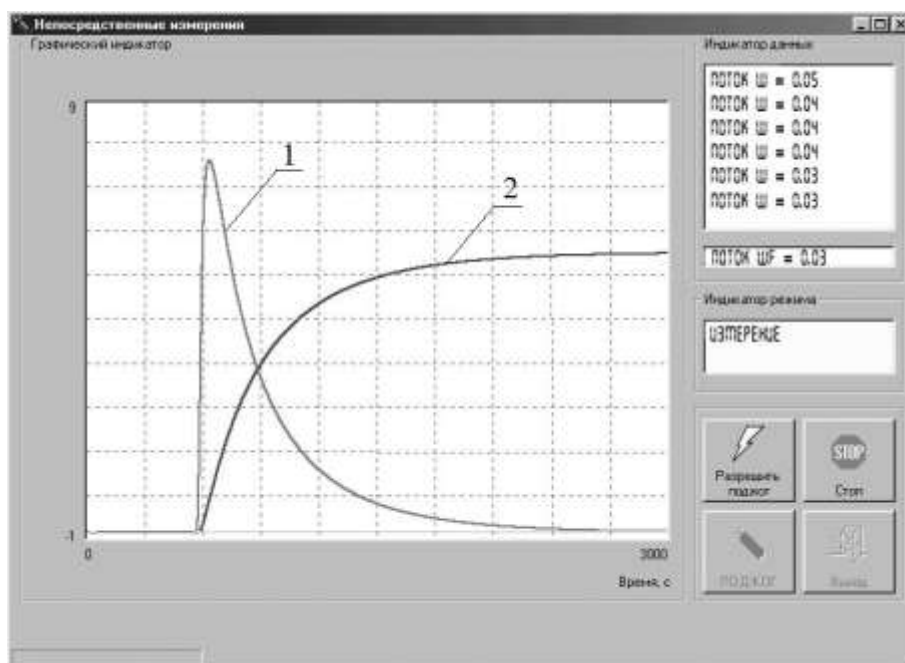


Рисунок 5.39 – Окно рабочего режима программы «КТС-3» с графиками изменения теплового потока (1) и интегрального значения теплоты прошедшей через ПТП (2).

Затем оператор проводит анализ продуктов сгорания в бомбе в соответствии с нормативными документами на измерение теплоты сгорания топлива и в диалоговом режиме вводит с клавиатуры в ПК необходимую информацию. После ввода всех требуемых данных ПК проводит необходимые расчеты, выдает результаты на экран и записывает их в файл протокола испытаний. Калориметр модели КТС-3 имеет диапазон измерения полной

энергии сгорания пробы топлива (10 – 40) кДж, пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения интегральным способом $\pm 0,2\%$.

При выпуске каждый экземпляр калориметрической установки проходит государственную метрологическую аттестацию в установленном порядке по программе и методике метрологической аттестации ПМА, утвержденной в ГП «Укрметртестстандарт».

Изготовлены и переданы в эксплуатацию на предприятия Украины 8 экземпляров калориметров КТС.

5.5 Измерительная установка для синхронного теплового анализа

Для оптимизации технологии процесса сушки важно понимание физических явлений, происходящих при испарении влаги из различных материалов, и сопутствующих факторов. Теоретические методы изучения таких сложных процессов, как конвективная сушка, нуждаются в экспериментальных данных о ТФС материалов и энергии связи влаги с ними. Эксперимент дает не только количественные характеристики, но позволяет устанавливать зависимость удельной теплоты испарения различно связанной с материалом влаги от потенциала переноса влаги в материале [374 - 378].

В качестве технологического фактора, характеризующего интенсивность теплоподвода в процессе сушки, применяют значения известных критериев Коссовича (Ko) и Ребиндера (Rb). Критерий Коссовича характеризует соотношение между теплотой, затраченной на испарение влаги $Q_{ИСП}$, и теплотой, затраченной на нагревание материала $Q_{НАГР}$, за весь процесс сушки:

$$Ko = \frac{Q_{ИСП}}{Q_{НАГР}} = \frac{r \cdot \Delta W}{c \cdot \Delta T}, \quad (5.24)$$

где r – удельная теплота испарения; c – удельная теплоемкость; ΔW – изменение влажности; ΔT – изменение температуры.

Критерий Ребиндера равен отношению теплоты, затраченной на нагрев материала, к теплоте, затраченной на испарение влаги, за бесконечно малый промежуток времени ($Rb = (Ko)^{-1}_{\Delta\tau \rightarrow 0}$):

$$Rb = \frac{c \cdot dT}{r \cdot dW}. \quad (5.25)$$

По физическому смыслу Ko и Rb являются именно критериями оптимизации, а не критериями подобия [374], и использование соответствующих значений этих критериев для конкретных материалов дает возможность детально поставить задачу оптимизации.

При каждом режиме сушки указанные критерии могут быть легко определены, если известны такие физические свойства подвергающегося обработке материала, как удельная теплота испарения и удельная теплоемкость, поэтому важно разработать аппаратуру, которая позволяет измерять оба этих параметра для широкого спектра веществ и режимов. Для их определения может быть успешно применен калориметрический метод, позволяющий получить достаточно полные сведения о каждом материале.

Для прямого калориметрического определения удельной теплоты испарения жидкости еще в 60-х годах XX столетия М.Ф. Казанским с коллегами была сконструирована лабораторная установка [375], основанная на непрерывной автоматической компенсации теплоты, расходуемой на испарение в процессе сушки дисперсного тела и определении убыли массы во времени. Авторами проведен ряд экспериментов по определению удельной теплоты испарения для различных капиллярно-пористых материалов [376 - 378].

Сейчас более тридцати фирм в мире занимаются изготовлением приборов для определения ТФХ материалов и тепловых эффектов. Линейка высокоточных приборов фирмы Setaram [379], несмотря на своё преимущество в виде широкого диапазона температуры, позволяет использовать образцы с массой только до 100 мг, что малоинформативно при изучении растительных продуктов и жидких растворов. Тот же недостаток присущ и приборам фирмы Mettler Toledo [380]. А прибор синхронного термического анализа фирмы Netzsch [381] рассчитан только на работу с твердыми образцами. Кроме того, высокая стоимость продукции этих фирм делает производимые ими приборы

недоступными для большинства отечественных научных и учебных организаций.

Основываясь на опыте использования гальванических ПТП [6-10] в микрокалориметрии [382-386], а также в устройствах для определения составляющих теплового потока при внешнем тепломассообмене [377, 387, 388], в ИТТФ разработан прибор синхронного теплового анализа ДМКИ-1 [389-392] тонкого слоя влажного дисперсного материала или жидкости. Метод синхронного теплового анализа [393, 394] базируется на одновременном использовании методов дифференциальной калориметрии и гравиметрического анализа. Для этого в приборе обеспечено непрерывное и одновременное измерение убыли массы и количества теплоты, затрачиваемой на испарение влаги в процессе сушки тонкого образца влажного дисперсного материала. Температура образца при помощи изотермического источника теплоты поддерживается равной температуре окружающей среды.

В приборе, выполненном по дифференциальной схеме, осуществляется сравнение значений теплового потока в ячейке с пробой исследуемого вещества и в контрольной ячейке с эталоном (термически инертным веществом). Схема, поясняющая принцип работы прибора приведена на рисунке 5.40.

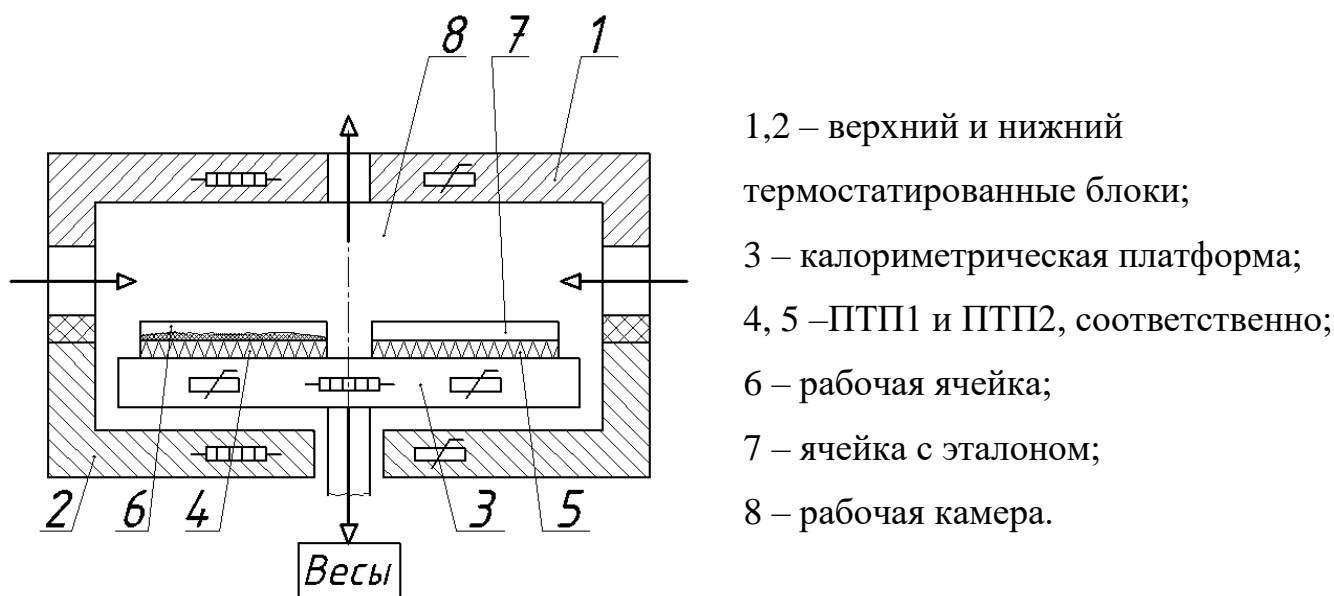


Рисунок 5.40 – Схема, поясняющая принцип работы прибора ДМКИ-1.

Верхний 1 и нижний 2 блоки, термостатируемые при заданной температуре T_{TC} , с помощью встроенных электронагревателей и системы регулирования обеспечивают внутри рабочей камеры 8 изотермический тепловой режим. Поступающий в рабочую камеру воздух предварительно подогревается до температуры T_{TC} .

Температура калориметрической платформы задается либо равной температуре T_{TC} , либо несколько выше, настолько, чтобы скомпенсировать понижение температуры поверхности исследуемого материала, обусловленное фазовым переходом. С помощью ПТП1 и ПТП2 измеряют значения теплового потока, идущего от калориметрической платформы в рабочую ячейку 6 и контрольную 7. Разность этих значений соответствует мощности, подводимой к исследуемому образцу для осуществления фазового перехода. Убыль массы Δm образца за промежуток времени цикла измерения $\Delta \tau$ в процессе исследования определяют с помощью аналитических весов.

Тепловой поток, регистрируемый ПТП1, имеет три составляющие – конвективную в силу теплообмена образца с воздушной средой рабочей камеры, радиационную из-за теплообмена образца с верхним термостатирующим элементом и вызванную тепломассопереносом при испарении влаги образца. Для контрольной ячейки регистрируемый тепловой поток имеет только две составляющие, вызванные конвекцией и тепловым излучением. В работе [392] проведен анализ составляющих теплообмена и дана формула для расчета удельной теплоты испарения:

$$r = \frac{\Delta Q_{1-2} \cdot (1 + R_{ПТП1} / R_{\alpha}) + Q_1 \cdot R_{ОБР} / R_{\alpha} + Q_2 \cdot \Delta R_{ПТП} / R_{\alpha}}{\Delta m / \Delta \tau}, \quad (5.26)$$

где Q_1 и Q_2 – регистрируемые значения теплового потока в двух ячейках, $\Delta Q_{1-2} = Q_1 - Q_2$; $R_{ПТП1}$, $R_{ОБР}$, – значения теплового сопротивления ПТП1 и образца; $\Delta R_{ПТП} = R_{ПТП1} - R_{ПТП2}$; $R_{\alpha} = 1 / (\alpha_{\Sigma} \cdot A_{ПТП})$ – суммарное тепловое сопротивление теплообмену.

Результаты экспериментально-расчетной оценки влияния составляющих числителя формулы (5.26) на результаты исследования испарения дистиллированной воды систематизированы в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Результаты исследования испарения дистиллированной воды

Температура платформы, °С	$1 + \frac{R_{\text{ПТПП}}}{R_{\alpha}}$	$(\frac{R_{\text{ОБР}}}{R_{\alpha}} \cdot Q_1) / \Delta Q$	$(\frac{\Delta R_{\text{ПТПП}}}{R_{\alpha}} \cdot Q_2) / \Delta Q$	$T_{\text{ОТН}}, \text{°С}$	$\frac{r_{\text{ЭКС}}}{r_{\text{СПР}}}$
30	1,006934	0,002177	$-1,52139 \cdot 10^{-7}$	29,42184	1,005475
40	1,006945	0,002187	$1,57287 \cdot 10^{-7}$	39,18654	1,008353
50	1,007131	0,002256	$5,10093 \cdot 10^{-7}$	48,09527	1,005143
60	1,007131	0,002255	$3,87536 \cdot 10^{-7}$	59,1341	1,005097
70	1,007352	0,002333	$6,2127 \cdot 10^{-7}$	65,06691	1,001546
80	1,007606	0,002428	$11,3249 \cdot 10^{-7}$	77,30405	1,005303
90	1,007605	0,002433	$7,60512 \cdot 10^{-7}$	79,59742	1,003208

Вторая важная составляющая критерия Ребиндера – теплоемкость – измеряется на установке ДМКИ-1 методом пошагового сканирования [395], по которому весь сканируемый температурный диапазон измерения разбивают на небольшие интервалы, при изменении температуры от начального до конечного значения в каждом интервале определяют количество теплоты, затраченной на нагрев образца, и рассчитывают его теплоёмкость. Образец, упакованный в герметичный теплопроводный контейнер с известной теплоемкостью, помещают в рабочую ячейку, затем с помощью регуляторов температуры термостатирующих блоков и калориметрической платформы задают режим ступенчатого повышения температуры с заданным шагом.

ПТП1 фиксирует количество теплоты, идущее на нагрев самого преобразователя, рабочей ячейки б, контейнера с исследуемым образцом, а ПТП2 контрольной ячейки – количество теплоты, идущей на нагрев, собственно, преобразователя и контрольной ячейки. Разность ΔQ_{1-2} соответствует тепловому потоку, идущему на нагрев образца и контейнера. Отношение интеграла разности

$\Delta Q_{1-2}(\tau)$ к ширине температурного интервала ΔT и массе образца дает возможность определения удельной теплоемкости в каждом интервале:

$$c = \frac{1}{m} \cdot \left(\frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} \Delta Q_{1-2}(\tau) d\tau}{\Delta T} - C_K - \Delta C_B \right), \quad (5.27)$$

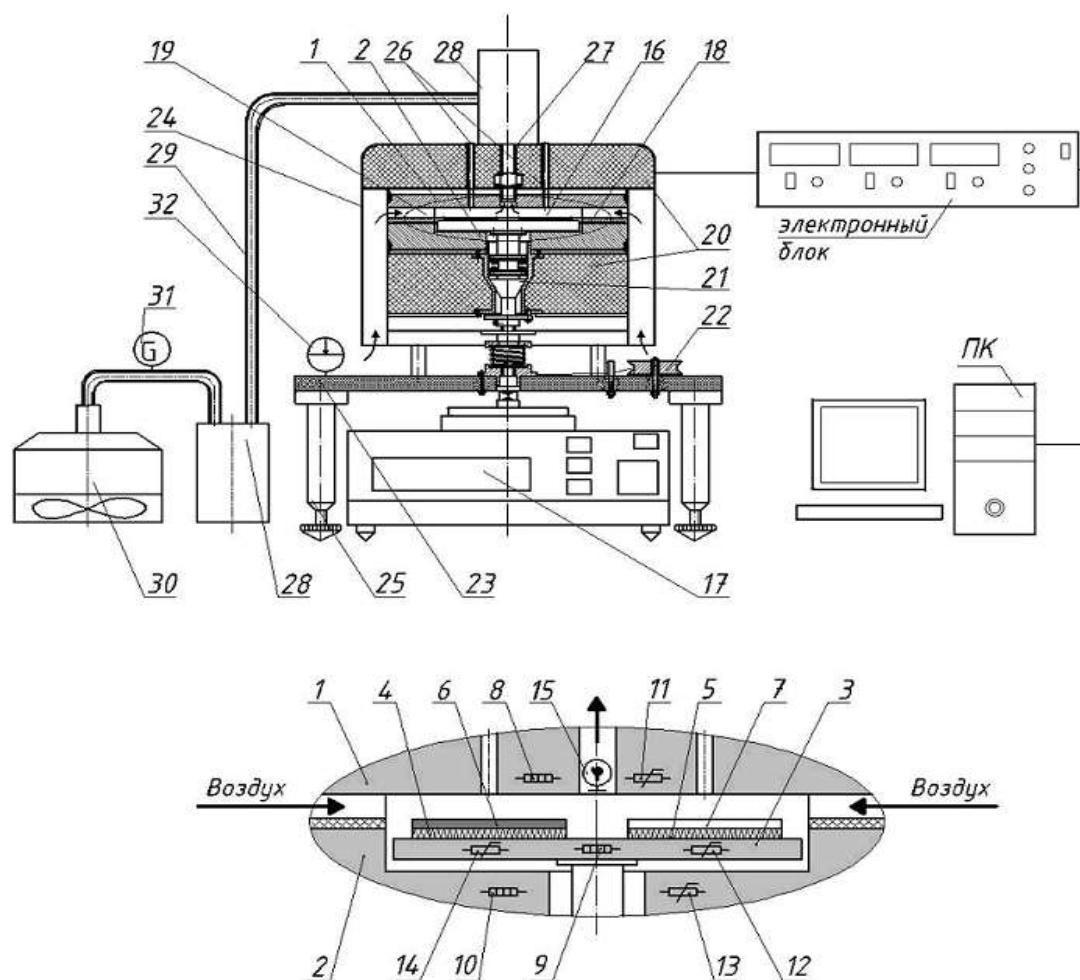
где C_K – теплоёмкость контейнера; $\Delta C_B = (C_{ППП1} + C_{Я1}) - (C_{ППП2} + C_{Я2})$ – значение разности суммарной теплоемкости рабочей и контрольной ячеек вместе с их ПТП.

Теплоемкость контейнера учитывают, если контрольная ячейка пуста. Если на эту ячейку поместить пустой идентичный контейнер, то влияние его теплоёмкости C_K автоматически учитывается при определении разности теплового потока ΔQ_{1-2} , а из формулы (5.27) исключается слагаемое, содержащее C_K .

По описанным методикам выполняют измерения удельной теплоты испарения и теплоемкости в установке ДМКИ-1, конструктивная схема которой приведена на рисунке 5.41. Для передачи сигналов первичных преобразователей и электрического тока в нагреватель платформы служит специальный коммутационный блок, образованный петлеобразно согнутыми мягкими медными проволочками диаметром 0,03 мм.

Такая конструкция коммутационного блока обеспечивает минимизацию влияния токоведущих цепей платформы на весы.

При определении теплоты испарения рабочую камеру 16 нагревают до заданной температуры, помещают вещество-референт в контрольную ячейку и выставляют весы на нуль. Предварительно подготовленный исследуемый образец размещают в рабочей ячейке 6 и закрывают крышку установки. При исследовании жидкости, не снимают крышку, а вводят её через отверстия 26 и поворачивают крышку на 90°. Сразу начинается непрерывное измерение и регистрация массы материала, температуры внутри рабочей камеры и значений теплового потока. Измерения проводят до полного высыхания образца или достижения требуемой влажности.



1,2 – верхний и нижний термостатированные блоки;
 3 – калориметрическая платформа с основным электронагревателем;
 4,5, – ПТП1 и ПТП2; 6 – рабочая ячейка; 7 – контрольная ячейка;
 8,9,10 – электронагреватели; 11,12,13,14 – термометры сопротивления,
 15 – датчик относительной влажности; 16 – рабочая камера; 17 – аналитические
 весы; 18 – изоляционное кольцо; 19 – радиальные канавки; 20 – теплоизоляция;
 21 – коаксиальная стойка; 22 – арретир; 23 – столешница; 24 – кожух;
 25 – регулируемые опоры; 26 – отверстия для введения жидкого вещества в
 ячейку; 27 – центральное отверстие для отведения испаряемой влаги;
 28 – сепаратор; 29 – трубка; 30 – пневмонасос; 31 – датчик расхода воздуха;
 32 – уровень.

Рисунок 5.41 – Схема установки ДМКИ-1

Теплоемкость измеряют по методике, изложенной в [396].

Плоские калориметрические ячейки, показанные на рис. 5.41 удобны для исследования жидкостей и мелкодисперсных материалов, однако не приспособлены для относительно крупнодисперсных материалов, например, растительного сырья.

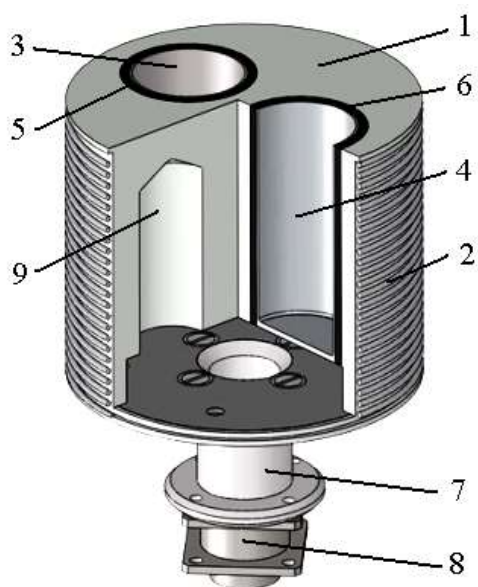
Для расширения номенклатуры исследуемых материалов разработана сменная платформа с цилиндрическими ячейками значительно большего объема. Для размещения этой платформы в ДМКИ-1 разработаны сменные фланцы, позволяющие увеличить размеры рабочей камеры и работать с разными платформами без существенной переделки прибора. Конструкция и внешний вид калориметрической платформы для исследования крупнодисперсных материалов представлены на рисунке 5.42, а внешний вид всей установки ДМКИ-1 – на рисунке 5.43.

Метрологическую аттестацию установки ДМКИ-1 в режиме измерения теплоты испарения выполняют по результатам исследований чистых жидкостей с известными характеристиками (вода, спирты), а в режиме измерения теплоемкости – по результатам сличения с нормированными данными на эталонные образцы (сапфир, кварцевое стекло КВ).

Установка ДМКИ-1 эксплуатируется в отделе теплотрии ИТТФ. Проведены исследования образцов различных материалов с целью оптимизации технологических процессов, в которых они используются. Исследованы новые органические растворители, исходные материалы для биотоплив – торф и растительное сырье, тесто для кондитерской промышленности, суспензии новых наноматериалов.

5.6 ПТП 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 РН от перегрева в плотных слоях атмосферы. Эта проблема решается изготовлением головного обтекателя



а)



б)

1 – температуровыравнивающий корпус; 2 – основной нагреватель; 3 – рабочая ячейка; 4 – контрольная ячейка; 5 – ПТП1; 6 – ПТП2; 7 – фланец; 8 – выводящий разъем; 9 – облегчающая полость.

Рисунок 5.42 – Конструкция (*а*) и внешний вид (*б*) специализированной калориметрической платформы для крупнодисперсных материалов



Рисунок 5.43 – Внешний вид установки ДМКИ-1

из термостойких материалов и нанесением на его наружную поверхность низкотеплопроводного теплозащитного покрытия.

Для расчета параметров теплозащитных покрытий необходима информация об аэродинамической тепловой нагрузке на головную часть, значение которой традиционно определяют методами математического моделирования на основании показаний ПТ, установленных под теплозащитой несущей конструкции [397, 398].

В рамках исследования полетной надежности РН типа «Днепр» по тепловой нагрузке на головной аэродинамический обтекатель в реальных условиях предусмотрен контроль теплового потока к наружной поверхности головной части космического аппарата и теплового потока от оболочки несущей конструкции обтекателя в зону размещения полезного груза. Сначала при наземных испытаниях, а с 2004 года – в реальных полетных условиях при запусках РН с полезным грузом (космическими аппаратами, например, искусственными спутниками Земли) наряду с традиционными измерителями температуры стали применять термоэлектрические ПТП [6, 7] разработки ИТТФ.

По техническому заданию ГKB «Южное» под руководством диссертанта в ИТТФ были разработаны, изготовлены и испытаны две модели ПТП [220]. Первая модель с условным обозначением ПТП-1Б.18.2.1.11.Д.00.1.56.00.0-20 (далее «ПТП...-20»), предназначенная для размещения на внешней поверхности обтекателя, имеет предел измерения плотности теплового потока до 20 кВт/м². Вторая модель – ПТП-1Б.11.2.2.11.Д.00.1.56.00.0-5 (далее – «ПТП...5»), предназначенная для установки на внутренней поверхности обтекателя, имеет предел 5 кВт/м². Сигналы разработанных ПТП поступают на вторичный измерительный прибор системы телеметрии РН. В связи с этим в этих моделях ПТП параметры выбраны так, чтобы обеспечить совместную работу с системой телеметрии РН и, в частности, чтобы коэффициент преобразования ПТП на пределе максимально возможной плотности теплового потока генерировал сигнал порядка 50 мВ.

На активном участке полета РН обтекатель подвергается воздействию высокой температуры (до 500 К) в течение 280 секунд, а затем на отдельные участки обтекателя идет тепловой поток от двигателя управления, корректирующего орбиту корабля. В связи с этим ПТП...-20, устанавливаемые на внешней поверхности обтекателя, должны сохранять свои МХ при температуре до 500 К и быть термостойкими до 523 К, а также иметь высокую долговечность (до 15 лет) и временную стабильность характеристик.

Согласно полученным в главе 3 результатам исследования характеристик ПТП для ПТП...-20 выбраны пара константан-никель и заливочный компаунд УП-610 с порошкообразным компаундом в качестве наполнителя. Расчеты оптимизированных параметров ПТП выполнены по методике [101]. Изготовлены ПТП...-20 в виде дисков, диаметром 40 мм толщиной 2 мм, внутри которых размещена термобатарея с охранной зоной по периметру (с учетом результатов приведенных в 2 главе).

В связи с высокими требованиями по точности и надежности измерения в космических условиях функция преобразователя ПТП...-20 определена на эталонной установке УВТ-1 в диапазоне температуры (300 – 500) К. Результаты для четырех ПТП...-20 приведены на рисунке 5.44.

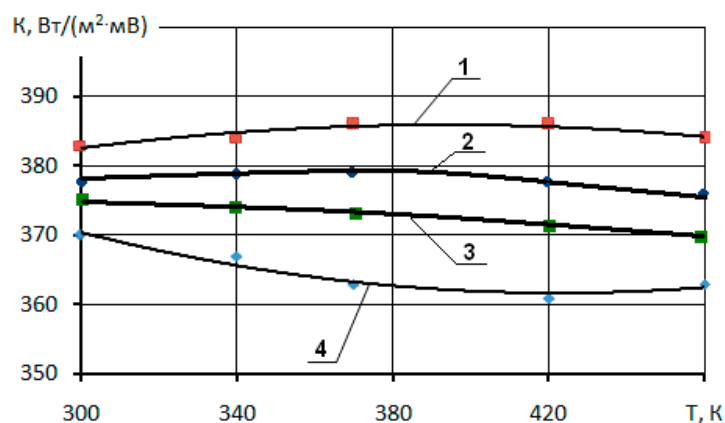


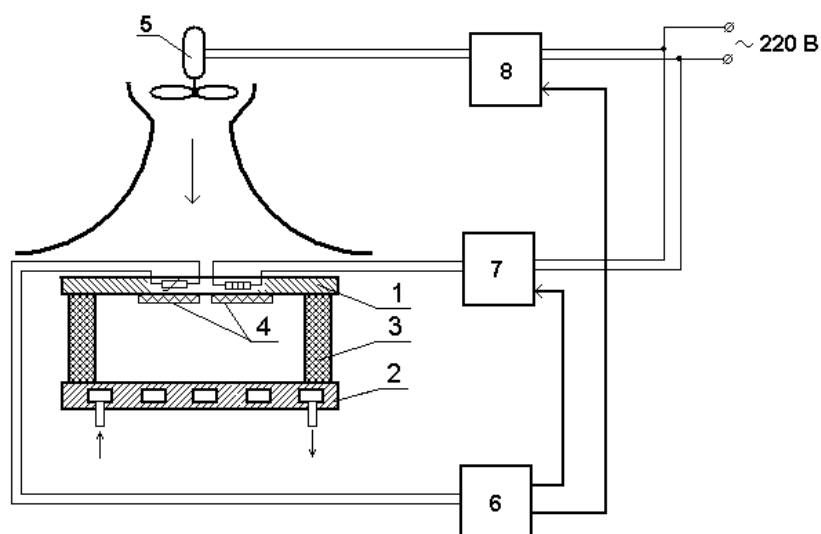
Рисунок 5.44 – Температурная зависимость коэффициентов преобразования четырех ПТП...-20.

Как видно на этих графиках при строгом соблюдении технологии изготовления температурная зависимость коэффициента преобразования ПТП сведена к минимуму, а значения коэффициента преобразования каждого ПТП...-20, прошедшего исследования и аттестацию в диапазоне температуры от 300 К до 500 К отличаются от среднеарифметического по диапазону не более, чем на $\pm 2\%$. Экспериментальные лабораторные исследования подтвердили термостойкость разработанной модели ПТП...-20 при воздействии температуры до 523 К, а механическое разрушение образцов происходит при достижении температуры, близкой 573 К.

Для измерения теплового потока, направленного в зону размещения выводимого на орбиту полезного груза применен ПТП...-5, устанавливаемый на внутренней поверхности металлической несущей конструкции, температура которой на активном участке полета достигает 370 К и изменяется со скоростью порядка (1 – 2) К/с. По показаниям ПТ установлено, что максимальное значение температуры не превышает 350 К, при этом длительность наиболее быстрых изменений составила около 50 с. В таких нестационарных условиях теплообмена традиционный ПТП 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 поверхности, на которой он размещен. Поэтому для измерения теплового потока на внутренней поверхности обтекателя разработаны специальные ПТП, изготовленные с использованием корректирующей термобатареи, дополнительной к основной (см. 3.5 и рис. 3.28). На рисунке 5.45 показана схема укладки спиральных батарей термоэлементов перед заливкой компаундом. В центральной части заготовки ПТП...-5 расположены две полукруглые теплочувствительные зоны, соответственно, с основной и корректирующей термобатареями. Батареи термоэлементов выполнены, как показано на рис. 3.28, с нанесением гальванического покрытия на одну четвертую витка спирали. По периферии теплочувствительные зоны окружены охранной зоной, в которой уложена такая же спираль термоэлементов.



Рисунок 5.45 – Схема укладки термобатарей и подключения подбираемого шунтирующего резистора.



1 – пластина основания с нагревателем и термометром сопротивления; 2 – водоохлаждаемый экран; 3 – боковая теплоизоляция; 4 – исследуемые ПТП; 5 – вентилятор; 6 – программируемый регулятор температуры; 7 – симисторный усилитель мощности; 8 – симисторный выключатель вентилятора.

Рисунок 5.46 – Функциональная схема стенда с программируемым изменением температуры основания, на котором установлены ПТП.

Сигналы основной и корректирующей термобатарей снимают с помощью выводов 4, к которым подключен подстроечный резистор.

ПТП...-5, выполненный на базе константан-медной спирали термоэлементов и компаунда из смолы УП-610 с наполнением порошкообразным корундом, имеет форму диска диаметром 60 мм, толщиной 1,8 мм и эффективным коэффициентом теплопроводности 1,5 Вт/(м·К).

Следует учитывать, что для эффективной работы специальных ПТП с корректирующей термобатареей необходим тщательный подбор соотношения коэффициентов преобразования основной и корректирующей термобатарей, для чего использован подбираемый шунтирующий резистор, включенный параллельно корректирующей батарее. Номинал резистора подбирают при настройке ПТП на специальном стенде, схема которого дана на рисунке 5.46, позволяющем задавать изменения температуры поверхности, на которую установлен ПТП, приблизительно соответствующие изменению температуры внутренней поверхности обтекателя РН за время полета.

Основным элементом стенда является тонкая (толщина 4мм) пластина основания 1, имитирующая обтекатель РН, с встроенными распределенным нагревателем и термометром сопротивления. Напротив нее расположен водоохлаждаемый экран 2, температура которого поддерживается постоянной прокачкой воды из водяного термостата. ПТП 4 располагают на внутренней стороне пластины 1, температура которой может изменяться по заданной программе с помощью регулятора 6 типа «Поликон 814/С», управляющего нагревом и охлаждением помощью нагревателя и вентилятора 5 через симисторный усилитель мощности 7 и выключатель 8. Применение программируемого регулятора позволяет воспроизводить разнообразные кривые изменения температуры основания, проверяя при этом реакцию ПТП.

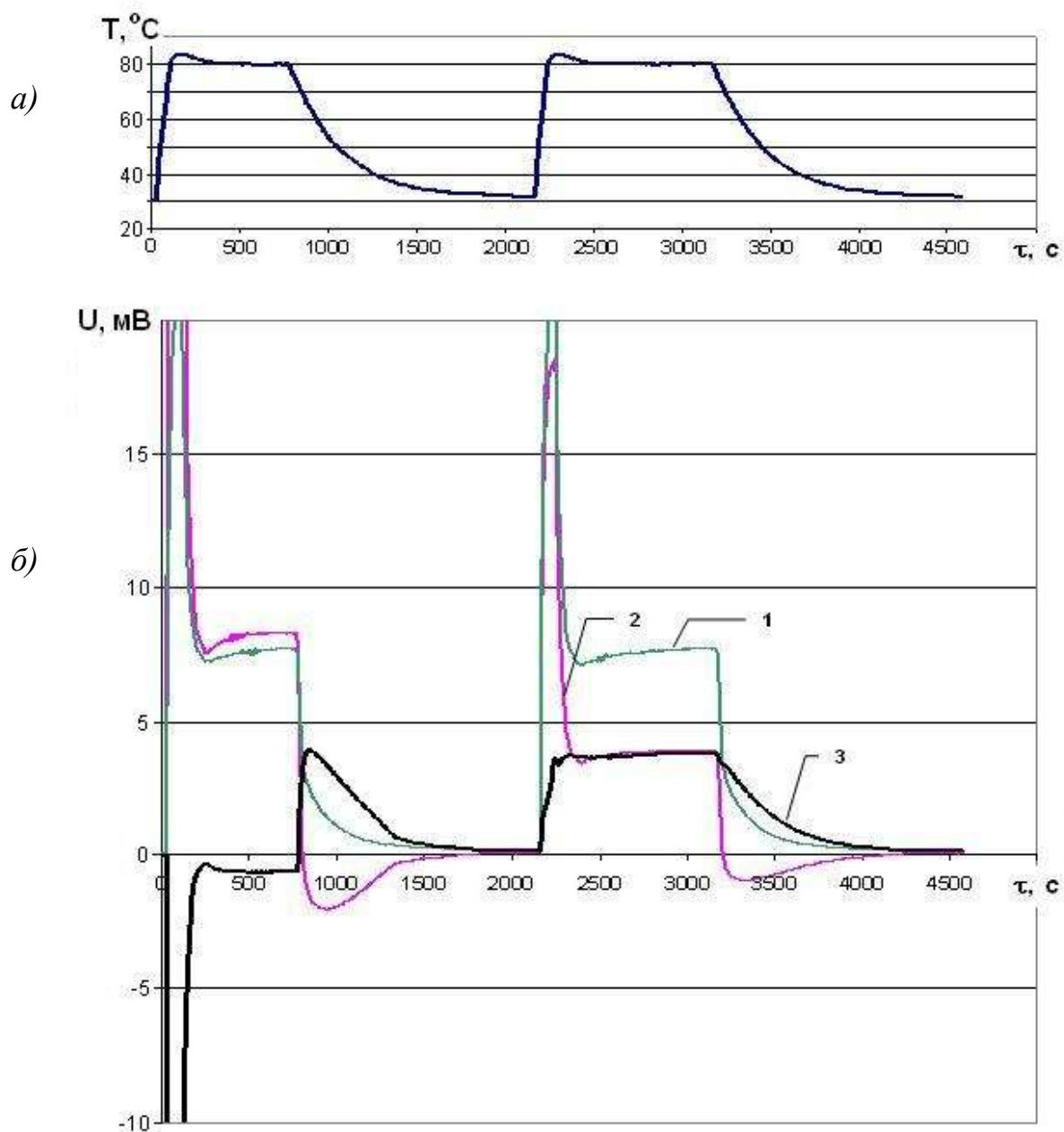
ПТП на теплопроводной смазке устанавливают на пластину 1, включают установку и задают программу изменения температуры так, что на начальном участке температура быстро нарастает от 300 К до 355 К, затем следует участок стабильной температуры, а затем остывание. Во время реализации программы

изменения температуры записывают выходные сигналы ТС и основной и корректирующей термобатарей с помощью измерительной системы, выводя на экран ноутбука графики изменения сигналов, приведенные на рисунке 5.47. 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 значение сопротивления подстроечного резистора, шунтируют им корректирующую термобатарей и в дальнейшем сложение сигналов термобатарей проводится с использованием весовых коэффициентов, обеспечивающих найденное соотношение. На рисунке 5.47 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 до 4500 секунд сложение сигналов проводится с использованием найденных весовых коэффициентов: 1,0 – для основной термобатарей (кривая 1) и 0,456 – для корректирующей термобатарей (кривая 2). В этом случае сигнал каждой из термобатарей также имеет значительные выбросы при быстром изменении температуры, однако, их разностный сигнал (кривая 3) достаточно корректно описывает изменение теплового потока вследствие изменения температуры, а динамическая погрешность не превышает 15% [409].

После подбора соотношения сигналов термобатарей ПТП...-5 проходит обычную градуировку в стационарном режиме на установке РГУ-2 [410].

Все ПТП, предназначенные для использования в составе измерительных систем РН, проходят Государственную метрологическую аттестацию, по результатам которой установленная погрешность измерения в стационарном режиме не превышает ± 4 %.



- 1 – сигнал основной термобатареи;
- 2 – сигнал корректирующей термобатареи;
- 3 – разностный сигнал термобатарей.

Рисунок 5.47 – Графики изменения температуры (*a*) и сигналов термобатарей (*б*) специального ПТП...-5 с корректирующей термобатареей

За годы сотрудничества с предприятиями аэрокосмической отрасли Украины было создано, исследовано и внедрено порядка 95 ПТП повышенной точности. Осуществлено 14 стартов РН типа «Днепр», в составе измерительной системы которых использованы ПТП, разработанные в ИТТФ.

Все ПТП безотказно отработали в условиях космического полета, что позволило впервые получить уникальную измерительную информацию о тепловом потоке в головной части РН [221]. В качестве примера на рисунке 5.48 показано полученное по данным телеметрической измерительной системы РН «Днепр» изменение теплового потока в местах установки ПТП в процессе выведения спутников на орбиту, состоявшегося 17 апреля 2007 года.

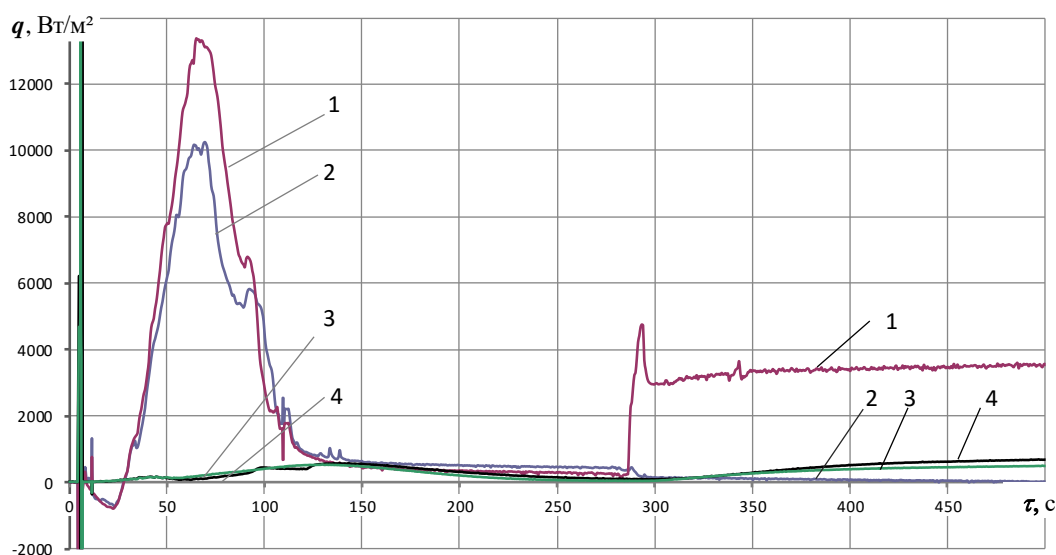


Рисунок 5.48 – Графики изменения теплового потока на наружной поверхности обтекателя (ПТП №1 и №2) и в зоне размещения полезного груза (ПТП №3 и №4) в процессе выведения спутников на орбиту

По показаниям ПТП № 1 и №2, установленных на внешней поверхности обтекателя, наблюдается несколько характерных временных интервалов.

На первом интервале максимальная плотность теплового потока, приходящая на внешнюю поверхность головной части РН, на 69-ой секунде полета достигает 13 кВт/м² и соответствует разгонному участку (выход на орбиту через плотные слои атмосферы). Затем со 120 по 280 секунды поток на

наружной поверхности невелик (движение в разряженных слоях и вне атмосферы), а начиная с 280 с, на один из ПТП 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 №3 и №4, установленных на внутренней стороне обшивки головной части РКН, тепловой поток в зоне расположения полезного груза достаточно мал и изменяется несущественно, что свидетельствует о надежности тепловой защиты головной части ракеты.

5.7 Микрокалориметр для определения тепловыделения топливосодержащих масс разрушенного реактора ЧАЭС

Теплометрическая аппаратура ИТТФ для диагностики нормального состояния ядерных устройств традиционно применялась в НИКИЭТ, ИАЭ им. И.В. Курчатова, ИЯИ НАН Украины и других организациях, начиная с 60-х годов прошлого столетия. В течение 1986 – 1987 г.г. соискатель с коллективом авторов принимали активное участие в работах по ликвидации последствий глобальной катастрофы на 4-ом блоке ЧАЭС, разрабатывая, изготавливая и поставляя на ЧАЭС специальную теплометрическую аппаратуру оперативного контроля температуры и плотности теплового потока, информация по которым приведена в [399-407].

Для преобразования зоны объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему необходима была достоверная информация о происходящих там физических процессах. Главным образом их существенной характеристикой являются тепловые параметры, в связи с чем тепловые измерения сопровождали практически все исследования, выполняемые на объекте «Укрытие» [408]. К ряду решаемых важнейших научно-практических задач на объекте относятся выявление и всесторонние исследования мест скопления ядерного топлива, которое из разрушенной активной зоны распределено по помещениям объекта «Укрытие» в виде фрагментов активной зоны,

мелкодиспергированной высокоактивной топливной пыли и застывших топливосодержащих масс (далее – ТСМ).

Результаты этих исследований нужны для уточнения количества ядерного топлива, оставшегося в объекте «Укрытие», и для разработки рациональных способов преобразования ТСМ для надежного длительного захоронения. Ядерное топливо находится в основном в составе застывших лавообразных скоплений, сосредоточенных в шахте реактора и прилегающих к ней подреакторных помещениях. Встречаются также пемзообразные ТСМ, удельный вес которых менее 1 г/см^3 , и шлакообразные ТСМ, занимающие промежуточное положение между первыми и вторыми по удельному весу. В исследованных образцах топливо находится в виде мелкодисперсных частиц, вкрапленных в силикатную матрицу. Его количество в различных образцах ТСМ неодинаково, в отдельных образцах достигает 60% массы при среднем содержании около 10 %.

Тепловой эффект ядерного топлива определяется в настоящее время распадом долгоживущих радионуклидов и составляет по оценочным расчетам порядка 3 Вт на 1 т ядерного топлива при условии, что все виды радиационного излучения поглощаются в образце. Экспериментальное определение столь малых значений мощности тепловыделения ТСМ представляет собой сложную техническую задачу, требующую применения высокочувствительного инструмента для измерения теплового потока в предполагаемом диапазоне значений (10^{-4} –1) Вт. Задача осложнена еще тем, что исследуемые образцы ТСМ радиоактивны и мощность дозы гамма-излучения, как правило, составляет десятки бэр/ч.

В 1995 г. по заданию Межгосударственного научно-технического центра «Укрытие» был разработан микрокалориметр модели ДМК-Ч для измерения тепловыделения ТСМ [10, 409].

Для обеспечения высокой чувствительности и необходимой точности измерения теплового эффекта в диапазоне значений (10^{-4} –1) Вт при квазистационарном процессе выбран дифференциальный метод измерения,

реализованный в калориметре кондуктивного типа с применением термоэлектрических ПТП в виде цилиндрической оболочки [4, 10, 372].

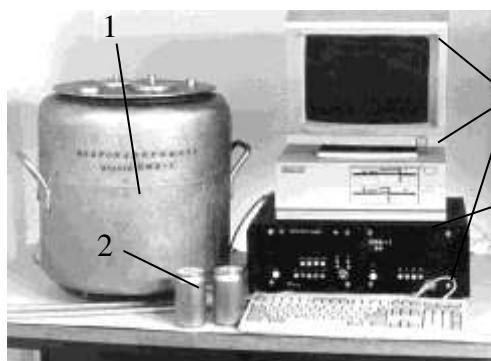
Микрокалориметр представляет собой компьютеризированную измерительную установку, содержащую специализированные тепловой и электронный блоки, стандартный измеритель напряжения постоянного тока и ПК. Внешний вид установки, функциональная схема электронного блока и конструктивная схема теплового блока приведены на рисунке 5.49.

Для проведения исследований микрокалориметр укомплектован специальными контейнерами двух типов, внутрь которых помещают исследуемые образцы. Первый – тонкостенный цилиндрический сосуд емкостью 330 см³ из алюминиевого сплава, горловина которого завальцована во фланец и закрывается крышкой; на внешней стороне крышки имеется направляющая под приспособление для переноски, загрузки и извлечения контейнера из измерительной ячейки. Контейнер второго типа – для исследования тепловыделений высокорadioактивных образцов ТСМ, дополнительно снабжен поглощающей свинцовой оболочкой. При массе контейнера до 3,2 кг его полезная емкость составляет 85 см³.

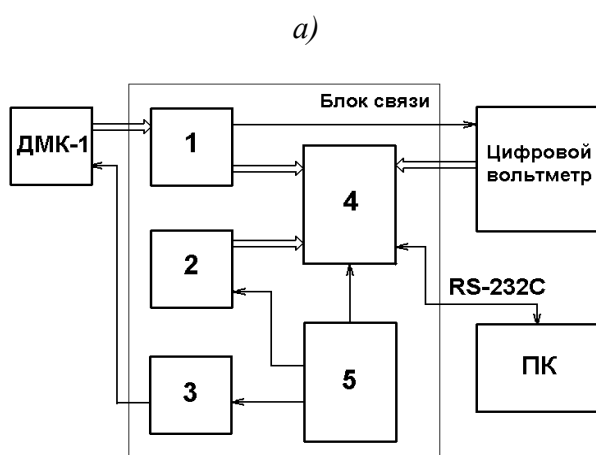
Метрологические характеристики микрокалориметра исследованы методом сличения с мерой. Он состоит в том, что результат измерения мощности тепловыделения микрокалориметром сравнивают со значением этой же мощности тепловыделения, полученным по показаниям образцовых СИТ, в качестве которых взяты универсальные цифровые приборы Щ68002 и Щ68003.

Метрологическую аттестацию и периодические поверки осуществляют по электрической мощности, подводимой к нагревателям, вмонтированным в измерительные ячейки.

Калориметр с применением вольтметра Щ300 обеспечил предельно допустимую относительную погрешность измерения мощности тепловыделения в диапазоне ($10^{-3} - 2$) Вт – 1,5%, а в диапазоне ($10^{-5} - 10^{-3}$) Вт не хуже 5,5% при одноциклической методике измерений и 2% при полициклической методике. Таким образом, был создан новый микрокалориметр, позволяющий исследовать

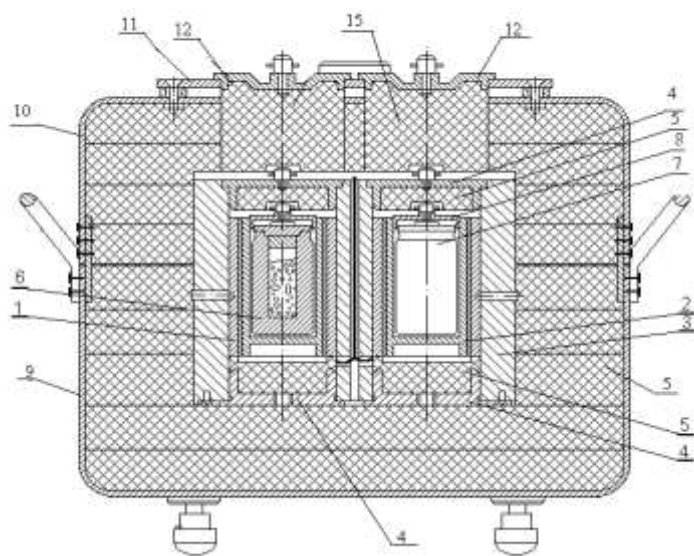


- 1 –тепловой блок;
- 2 – контейнер;
- 3 –электронный блок;
- 4 –компьютер



- 1 – коммутатор измеряемых сигналов;
- 2 – генератор синхронизации;
- 3 – источник тока;
- 4 – преобразователь кода;
- 5 – источник питания

б)



- 1, 2 – ячейки рабочая и сравнения;
- 3 – калориметрический блок;
- 4 – нижние и верхние крышки гнезд;
- 5 – вкладыши теплоизоляционные;
- 6, 7 – контейнеры;
- 8 – крышки измерительных ячеек;
- 9, 10 – корпус, крышка корпуса;
- 11 – панель установочная,
- 12– крышка

в)

Рисунок 5.49 – Микрокалориметр ДМК-Ч

большой объем вещества, который по достигнутой чувствительности к измеряемому параметру является уникальным средством измерения.

В результате выполненного комплекса исследований и работ на 4-м блоке ЧАЭС в короткий срок была разработана и изготовлена теплотермометрическая аппаратура, позволившая составить полную общую теплоточную и температурную картины аварийной зоны. Наиболее существенные результаты, полученные с ее помощью, состоят в следующем:

- анализ по экспериментальным данным изменений во времени распределений температуры и плотности теплового потока в доступных местах развала реактора объекта «Укрытие» показал, что мощность остаточного тепловыделения в реакторе №4 уменьшалась в соответствии с известной закономерностью для накопленных в нем продуктов распада. Этот факт в совокупности с низкими значениями температуры в контролируемых точках дал информацию для вывода о безопасном состоянии объекта «Укрытие»;

- количественная оценка теплового баланса реактора №4 позволила определить нижнюю границу массы оставшегося в реакторной зоне ядерного топлива, которая с вероятностью 0,965 составляет 87 % от топливной загрузки, имевшей место в реакторе на момент аварии;

- детальное теплотермометрическое обследование прилегающих к шахте реактора помещений и ОК самой шахты позволило, с одной стороны, оптимизировать размещение первичных преобразователей оперативного контроля и, с другой, показало наличие участков с увеличенными значениями плотности теплового потока и температуры, тем самым помогло определить актуальные направления дальнейших диагностических исследований.

5.8 Выводы по главе 5

1. На основе разработанных теплотермометрических методов и преобразователей создан комплекс измерительных приборов и установок, обеспечивающих контроль качества и сертификацию различных изделий и материалов по ТФХ и ТРК пожарной безопасности, по теплосберегающим

характеристикам строительных ОК, а также средства контроля тепловых режимов в технологических процессах, в отсеках космических ракет-носителей и объектах ядерной энергетики.

2. Разработана теория метода локального теплового воздействия и на её основе создан и внедрен переносной прибор для экспресс-контроля коэффициента теплопроводности строительных материалов ИТ-8.

3. Проведен теоретический анализ факторов, влияющих на погрешность измерения теплопроводности методом пластины, на основании чего разработана и внедрена установка ИТ-7С для измерения коэффициента теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов, соответствующая требованиям национальных, межгосударственных и международных стандартов и не имеющая аналогов в Украине.

4. Разработана и утверждена в ГП «Укрметртестстандарт» методика метрологической аттестации установки ИТ-7С абсолютным методом измерения величин, метрологически обеспеченных в Украине, что позволило достичь требуемой стандартами точности измерений без использования рабочих эталонов теплопроводности.

Появились реальные предпосылки и материальная база для создания отсутствующего в Украине Первичного эталона единицы измерения коэффициента теплопроводности, соответствующего по точности мировому уровню.

5. Предложены, теоретически обоснованы и экспериментально проверены на установке ИТ-7С методы измерения коэффициента эмиссии стекол и покрытий, а также измерения удельного тепловыделения бетонных смесей в процессе гидратации. Экспериментально на практике показано, что созданная установка ИТ-7С является многофункциональным устройством, позволяющим измерять ТФХ и ТРХ, наблюдать за тепловыми процессами в реальном времени в образцах различных твердых и термолабильных материалов.

6. Разработаны теоретические принципы калориметрического метода измерения коэффициента эмиссии, на основании которых создана и внедрена

установка ИТРС-1 для исследования терморadiационных свойств энергоэффективных стекол и покрытий.

7. Разработана и внедрена установка ИТС-3 для измерения теплового сопротивления стеклопакетов и окон.

8. Создана и зарегистрирована в Государственном реестре мер и измерительных приборов комбинированная тепловизионно-теплометрическая методика МВУ 048/06 – 2012 по определению сопротивления теплопередаче через ОК зданий и сооружений, на базе которой разработан стандарт ДСТУ БВ.2.6-101. Для приборного обеспечения тепловых испытаний строительных ограждающих конструкций разработаны и внедрены несколько модификаций многоканальной информационно-измерительной системы «Ресурс».

9. Разработаны, исследованы метрологические характеристики и внедрены три модификации кондуктивного бомбового калориметра КТС для измерения теплоты сгорания различных видов топлива, не имеющего аналогов в Украине и являющегося импортозамещающей продукцией.

10. Создана измерительная установка для синхронного теплового анализа ДМКИ-1, позволяющая проводить исследования жидких, пастообразных и дисперсных материалов и измерять удельную теплоту испарения и теплоемкость, знание которых позволяет оптимизировать сушку материалов и другие технологические процессы.

11. Разработаны, исследованы метрологические характеристики и внедрены 4 модификации радиометров РАП-12 для измерения радиационного теплового потока и обеспечения огневых испытаний.

12. На основе разработанных методов повышения быстродействия и температуростойкости преобразователей разработаны ПТП для измерительной системы ракеты-носителя «Днепр», позволяющие контролировать тепловую нагрузку на обтекатель головного отсека и на выводимые в космос аппараты от старта до выхода на орбиту.

Все ПТП успешно отработали в экстремальных условиях космического полета и позволили получить уникальную информацию о плотности теплового

потока в головной части летательного аппарата. Надежность и практичность использования специализированных ПТП в составе измерительной системы РН типа «Днепр» подтверждена четырнадцатью запусками.

13. В результате выполненного комплекса исследований и работ на 4-м блоке ЧАЭС в короткий срок была создана оперативная система контроля и диагностики тепловых и радиационных параметров состояния разрушенного реактора и объекта «Укрытие», основным узлом которой является микрокалориметр для определения малых значений мощности тепловыделения топливосодержащих масс. Результаты этих исследований актуальны для уточнения количества ядерного топлива, оставшегося в объекте «Укрытие» и для разработки рациональных способов преобразования топливосодержащих масс для надежного длительного захоронения.

ГЛАВА 6

РАЗРАБОТКА НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ УКРАИНЫ ДЛЯ ОБЛАСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Трудно переоценить роль, какую играет стандартизация во внутренней и внешней экономической политике развитых стран. Именно в стандартах устанавливаются общие требования к техническим, экономическим и другим показателям продукции, оборудования, технологии и услуг, чем обеспечивают возможность их дальнейшего контроля и проверки. Важность стандартизации и нормирования в сфере энергосбережения признана рядом статей Закона Украины «Про енергозбереження» от 01.07.1994 г. [410], на основе которого разработаны Комплексная программа государственной и межотраслевой стандартизации и План государственной стандартизации в сфере энергосбережения.

Согласно этим документам для области измерения тепловых величин в ИТТФ разработано 35 нормативно- документа, включая национальные (ДСТУ, ДСТУ БВ) и межотраслевые (ГОСТ, ДСТУ (ГОСТ)), а также гармонизированные с межотраслевыми (ДСТУ ISO) и европейскими (ДСТУ EN) стандарты Украины. При непосредственном участии диссертанта создано 32 документа, в том числе 4 национальных (ДСТУ), 3 межгосударственных (ГОСТ), 18 стандартов ДСТУ ISO, гармонизированных с международными (ДСТУ ISO), и 7 стандартов – с европейским и (ДСТУ EN), а также разработано 2 методики.

Эти стандарты являются частью создаваемой в Украине базы нормативно-методических документов, гармонизированных с международными стандартами, нормами и требованиями для удовлетворения научных, производственных, торговых и других потребностей общества [411-420].

6.1 Национальные стандарты Украины для области теплоточных измерений

В целях повышения роли измерения теплового потока и соответствующих СИ, применяемых в отраслях народного хозяйства для учета и контроля тепловых величин, требуются нормативные документы, которые устанавливают статус теплоточных измерений в общей системе измерения тепловых величин, регламентируя общие требования к методам и СИ, а также пути обеспечения достоверности и сопоставимости получаемых результатов.

Первыми стандартами в этом направлении явились стандарты ДСТУ 3401 [421], ДСТУ 3756 [6] и ДСТУ 4035 [179], утвержденные также Межгосударственной комиссией по стандартизации в статусе межгосударственных – ГОСТ 30486 [422], ГОСТ 30619 [7] и ГОСТ 25380 [180].

В ДСТУ 3401 и ГОСТ 30486 [421, 422] установлены основные тепловые величины, подлежащие учету или контролю при проведении различных энергосберегающих мероприятий, указаны возможные методы их измерения, сформулированы принципы классификации соответствующих СИТ и общие технические требования, которым должны удовлетворять методы и СИТ для тепловых величин.

Следующим серьезным шагом стандартизации в области измерений теплового потока и его плотности явились стандарты ДСТУ 3756 и ГОСТ 30619 [6, 7], которые распространяется на первичные измерительные преобразователи теплового потока и его поверхностной плотности. ДСТУ 3756 – это первый стандарт, который распространяется на термоэлектрические биметаллические ПТП вида вспомогательной стенки. В нем стандартизованы:

- определения термоэлектрического ПТП вида вспомогательной стенки, и его частного типа – биметаллического;
- классификация ПТП по различным признакам: функциональному назначению, уровню стандартизации и метрологическому статусу;
- типы ПТП в зависимости от термоэлементов, например: константан-медный, копель-серебряный, нихром-никелевый и др., из которых он может

быть изготовлен;

– различные модели для типовых ПТП в зависимости от совокупности следующих признаков исполнения:

а) по количеству термоэлементов: одно- и многоэлементные;

б) по количеству теплочувствительных зон: одно-, двух-, многозонные;

в) по механическому состоянию вспомогательной стенки: монолитные жесткие и гибкие; перфорированные жесткие или гибкие;

г) по геометрическому признаку: диск, пластина квадратная или прямоугольная, кольцо плоское, цилиндрическая оболочка;

д) по конструктивному исполнению: бескорпусный или в корпусе соответствующей формы, с охранной зоной или без нее; с встроенным нагревателем и (или) преобразователем температуры или без них.

Много места в стандарте уделено изложению общих технических требований, которым должен удовлетворять изготавливаемый ПТП, а именно: требованиям назначения, нормируемым метрологическим и точностным характеристикам, конструктивным и технологическим параметрам, стойкости к внешним воздействиям, а также комплектности, маркировке и упаковке.

Кроме того, в этом стандарте установлены правила приемки и методы испытаний, даны указания по эксплуатации, транспортированию и хранению.

Наличие такого стандарта позволяет решить проблемы унификации, совместимости и взаимозаменяемости ПТП, эксплуатируемых в сфере теплоточных и теплофизических измерений.

Третий стандарт этого направления ДСТУ 4035 [179], распространяющийся на ОК жилых, общественных и производственных зданий и сооружений, регламентирует метод измерения плотности теплового потока через ОК с применением ПТП с последующим определением составляющих сложного теплообмена и методики получения истинного значения плотности суммарного теплового потока по измеренному сигналу ПТП. Кроме того даны рекомендации по учету искажения из-за присутствия на ОК ПТП для получения более точного приближения к истинному значению теплового потока.

Наличие указанных стандартов способствовало признанию статуса теплоточных измерений в общей системе измерения тепловых величин и установлению общих требований единства, достоверности и сопоставимости получаемых результатов их измерения в Украине и странах СНГ.

В порядке обеспечения строительной отрасли разработаны стандарты ДСТУ Б В.2.6-101 [360], ДСТУ Б В.2.7-228 [322] и ДСТУ Б EN 13187 [341].

ДСТУ Б В.2.6-101 [360], разработанный совместно с ГП НИИСК взамен ГОСТ 26254, касается ОК зданий и сооружений различного назначения. Он устанавливает метод тепловых испытаний ОК с целью определения ее теплозащитных свойств, который заключается в измерении при определенных температурно-влажностных условиях по обе стороны ОК в стационарном тепловом режиме фактических значений плотности теплового потока через ОК, температуры внутренней и наружной поверхностей ОК и пристенных слоев воздуха и вычислении теплового сопротивления или приведенного сопротивления теплопередаче по измеренным данным. Целью испытаний, согласно этому стандарту, является установление степени соответствия фактических значений сопротивления теплопередаче контролируемой ОК нормативным требованиям [278]. Этот стандарт распространяется на тепловые испытания в лабораторных и натуральных условиях ОК зданий и сооружений, которые отапливаются или охлаждаются.

ДСТУ Б В.2.7-228 (ГОСТ 31364-2007, MOD) [322, 423] разработанный совместно с Техническим комитетом по стандартизации ТК 300 «Світлопрозорі конструкції», распространяется на стекло с низкоэмиссионным мягким покрытием, применяемое при изготовлении стеклопакетов, для остекления светопрозрачных конструкций с целью снижения тепловпотерь зимой и теплопритоков летом. В нем даны термины и определения понятий по теме, установлены требования к основным параметрам и размерам стекол при изготовлении, к характеристикам готового изделия, его маркировке и упаковке; к безопасности и охране ОС, а также изложены правила приемки и методы испытаний, указания по транспортированию, хранению, переработке и методам

контроля. Участие отдела теплотрии заключалось в разработке калориметрического метода определения такой характеристики стекла как коэффициент эмиссии [318, 319].

ДСТУ Б EN 13187 (EN 13187, MOD) [339, 341, 424], разработанный совместно с ГП НИИСК, регламентирует бесконтактный (тепловизионный) метод контроля теплозащитных качеств ограждающих конструкций [345, 347-354]. Этот стандарт является модифицированным европейским стандартом EN 13187 [424], гармонизированным с международным стандартом ISO 6781 [341].

6.2 Национальные стандарты Украины, гармонизированные с международными и европейскими в области теплофизических измерений

Вопросы разработки национальных стандартов, соответствия отечественной продукции международным требованиям и нормам становятся все более актуальными, так как вступление Украины в ВТО и интеграция с ЕС требует не просто подготовки вступительных документов, но и выполнения очень трудоемкого процесса глобального реформирования экономики с обязательной разработкой целого пакета согласований с ВТО по приведению украинских стандартов, требований к безопасности продукции и сертификации в соответствии международным нормам. Одним из условий при этом является обязательная гармонизация национальных стандартов с международными и европейскими, что имеет важнейшее значение для расширения взаимовыгодного обмена товарами (услугами), заключения соглашений по сертификации, о развитии и углублении промышленного сотрудничества и совместного решения научно-технических проблем, повышению и обеспечению качества продукции, оптимизации затрат материальных и энергетических ресурсов и мер по безопасности труда и защите окружающей среды.

Разработанные в отделе теплотрии национальные стандарты, гармонизированные с международными, являются стандартами идентичной степени соответствия и представляют собой тождественный перевод соответствующего международного ISO или европейского EN на украинский

язык с введением пояснений и дополнений, учитывающих национальные условия и особенности их применения. Все они в той или иной степени касаются процессов тепло- и массообмена, в частности, терминологии и методов измерения тепловых величин.

Большая группа этих стандартов распространяется на теплоизоляционные материалы и изделия и теплофизические процессы в них, включая терминологические стандарты: ДСТУ ISO 7345, ДСТУ ISO 9229, ДСТУ ISO 9251, ДСТУ ISO 9288, ДСТУ ISO 9346 [424-429], результатом внедрения которых является приведение в соответствие с международными нормами действующих в Украине терминологии, условных обозначений, единиц измерения и расчетных формул, которые применяют для описания режимов теплообмена и теплофизических свойств теплоизоляционных материалов.

Стандарты ДСТУ ISO 10051, ДСТУ ISO 8497, ДСТУ ISO 8301, ДСТУ ISO 8302, ДСТУ ISO 9869 [183, 290, 291, 430, 431], также распространяющиеся на теплоизоляцию, регламентируют методы определения ТФС, таких как тепловая проницаемость влажных материалов, теплопередающие свойства теплоизоляции круглых труб, тепловое сопротивление и теплопроводность теплоизоляционных материалов, теплопередающие свойства строительных элементов из непрозрачных плоских слоев.

Наиболее значимыми в этой группе являются стандарты ДСТУ ISO 8301 [290], ДСТУ ISO 8302 [291] в которых регламентированы методы и СИ теплового сопротивления теплоизоляционных материалов и связанных с ним характеристик в лабораторных условиях в приборах плоского типа с применения ПТП и по методу защищенной горячей плиты. В них указаны схемы возможного изготовления соответствующего прибора, рекомендации по их правильной эксплуатации, а также требования к исследуемым образцам и алгоритму обработки данных.

Однако следует отметить, что между ISO 8301, ISO 8302 [181, 289] и принятыми в Украине нормативными документами имеются существенные отличия.

Во-первых, в этих ISO указано, что при соблюдении всех требований погрешность измерения коэффициента теплопроводности не превысит $\pm 3\%$, в то время как действующая с советских времен поверочная схема измерения теплопроводности приписывает стандартным образцам теплопроводности (по современной терминологии – рабочим эталонам) такую же погрешность $\pm 3\%$, что естественно, приводит к погрешности рабочих СИ не менее $\pm 6\%$.

Во-вторых, в ISO установлено, что поверку прибора, оснащенного ПТП, следует выполнять по рабочим эталонам перед и после каждого измерения, что значительно усложняет измерения. В ИТТФ выполнены исследования, показавшие, что при наличии оптимальной охранной зоны ПТП, равенстве ТФХ чувствительной и охранной зон ПТП и соблюдении ряда условий [185], прибор, оснащенный ПТП, способен обеспечить высокую точность измерения и стабильность характеристик, благодаря чему поверку можно проводить всего раз в год. Об отличиях сказано в национальных пояснениях к тексту в соответствующих разделах ДСТУ ISO .

Логичным дополнением к ДСТУ ISO 8301 и ДСТУ ISO 8302 является ДСТУ ISO 9869 [183], в котором установлен метод определения теплопередающих характеристик строительных элементов в натуральных условиях с применением ПТП. В нем описаны СИ, даны рекомендации по выбору мест установки ПТП и ПТ, по регламенту выполнения измерений и обработке результатов. Этот метод не является высокоточным по сравнению с измерениями с применением калориметра или «горячей камеры», однако его целесообразно практиковать, когда не стоит задача получения прецизионных данных. Этим стандартом руководствуются при теплотехнических обследованиях зданий и сооружений с целью определения трансмиссионных тепловых потерь.

Следующая группа стандартов: ДСТУ ISO 10211-1, ДСТУ ISO 10211-2, ДСТУ ISO 6949, ДСТУ ISO 14683, ДСТУ ISO 10291, ДСТУ EN 673 [321, 432-4436] – распространяется на строительные конструкции, включая и светопрозрачные, и устанавливает также методы определения

теплопередающих свойств как расчетным путем, так и экспериментальным в лабораторных и натуральных условиях.

Кроме перечисленных разработана еще группа стандартов, посвященных методам исследования ТФС пластмассы, керамики и других материалов (ДСТУ ISO 11357-4, ДСТУ EN 821-2, ДСТУ EN 1159-1, ДСТУ EN 1159-3, ДСТУ EN 1159-4, ДСТУ ISO 9151) [396, 437-441].

6.3 Методики измерения в области энергосбережения

Кроме описанных выше стандартов для области тепловых измерений разработаны два нормативно-методических документа, регламентирующих методики измерения на объектах при проведении мероприятий по энергосбережению [42, 442].

Нормативный документ Государственного комитета Украины по энергосбережению, согласованный Государственным комитетом Украины по строительству и архитектуре, – Методика М 00013184.5.023 [179] – разработана в развитие стандарта ДСТУ 4035 [179], который распространяется на ОК различных объектов, требующих затрат энергии на свое функционирование как в экспериментальных условиях, так и условиях эксплуатации. Методика устанавливает методы измерения поверхностной плотности теплового потока и определения конвективной и радиационных составляющих, а также коэффициентов теплообмена при исследовании сложного теплообмена ОК с ОС. Кроме того, в ней выполнен анализ методических погрешностей измерения из-за присутствия на ОК измерительного ПТП, свойства которого отличны от свойств ОК, и даны рекомендации по подбору ПТП с учетом особенностей объекта контроля и условий эксплуатации.

Методика М 00013184.5.023 является руководящим нормативным документом для применения целого ряда стандартов: ГОСТ 530 [443], ДСТУ Б В.2.7-61 [444], ДСТУ Б В.2.6-17 [181], ДСТУ 4035 и ГОСТ 25380 [179, 180]. Ее внедрение позволяет обеспечить единство и правильность определения тепловых потерь или притоков через ОК за счет правильного выбора ПТП и

выполнения измерений согласно требованиям стандартов ДСТУ 4035 и ГОСТ 25380.

Второй документ – Методика выполнения измерений МВУ 048/06-2012 [442] – касается определения сопротивления теплопередаче через ОК зданий и сооружений различного назначения. В ней установлен комбинированный тепловизионно-теплометрический метод определения сопротивления теплопередаче через ОК зданий и сооружений, основанный на сочетании инфракрасного (бесконтактного) обследования с помощью тепловизионной техники полей поверхностной температуры ОК, инструментального определения теплотехнических параметров воздуха (температуры, влажности, давления и скорости перемещения) вблизи поверхности ОК с количественными контактными измерениями значений поверхностных температуры и плотности теплового потока в намеченных точках поверхности.

Особенности внутренней структуры и состава фрагментов обследуемой ОК (наличие участков с неодинаковыми техническими характеристиками, теплопроводных включений, узлов, стыковых соединений, скрытых производственных дефектов и прочее) приводят к термической неоднородности, вследствие которой оказывается нарушенной одномерность температурного поля и искаженным тепловой поток, пронизывающий такой участок.

Таким образом, методика включает в себя качественный анализ полей температуры поверхностей ОК с количественным определением теплотехнических параметров и характеристик: температуры внутренней и наружной поверхностей ОК и воздуха по обе стороны от нее, поверхностной плотности теплового потока через ОК, коэффициентов теплообмена с прилегающей ОС и теплового сопротивления пограничных слоев по обе стороны ОК, и последующий расчет теплового сопротивления и сопротивления теплопередаче для каждого i -ого участка обследованной ОК и приведенного теплового сопротивления теплопередаче всей конструкции.

Измерения с применением преобразователей температуры и теплового потока [179-182] их фактических значений позволяют найти реальные значения теплотехнических характеристик: теплового сопротивления ОК, приведенного сопротивления теплопередаче через нее и трансмиссионных тепловых потерь.

В методике установлены требования к погрешности измерения, условиям безопасности, квалификации операторов и проведению измерений, рекомендованы СИТ и другие технические средства, которые необходимо применять при измерении, а также описаны алгоритмы подготовки, проведения измерения и обработки полученных результатов. Она предназначена для организаций и специалистов, что выполняют теплотехническое обследование зданий (сооружений) с целью контроля их теплоизоляционных свойств на этапах строительства, приемки, последующей эксплуатации, термомодернизации, реконструкции и капитального ремонта. Результаты теплотехнического обследования используются при составлении энергетического паспорта здания, сооружения.

Разработанные компьютеризированная измерительная система [356, 357] и комбинированная тепловизионно-теплометрическая методика обследования теплозащиты ОК зданий и сооружений успешно прошли апробацию на натуральных жилых зданиях [359]. Результаты, полученные при разработке этой методики и соответствующей аппаратуры нашли отражение в разработанном стандарте ДСТУ Б В.2.6-101 [360].

Методика МВУ 048/06-2012 прошла государственную метрологическую аттестацию (свидетельство №081/24-0778 от 14.12.2011) и занесена в Государственный реестр методик выполнения измерений в соответствии с приказом ДП «Укрметртестстандарт» № 712 от 30.10.2012.

6.4 Выводы к главе 6.

В результате выполненных работ проведена модернизация нормативно-методической базы теплотетрии путем разработки и внедрения более трех десятков стандартов и методик выполнения измерений, в том числе впервые – межгосударственный стандарт на ПТП вида вспомогательной стенки.

ВЫВОДЫ

В результате выполнения данной диссертационной работы решена важная научно-техническая проблема по развитию научных, технических и нормативных принципов создания средств теплотерии на базе термоэлектрических преобразователей теплового потока вида вспомогательной стенки, а также усовершенствованию системы метрологического обеспечения теплотерии.

Наиболее значимыми научными и практическими результатами работы являются:

1. На основании комплексного анализа ряда задач, соответствующих различным условиям применения ПТП на объектах контроля различных типов, установлены причины возникновения методических погрешностей измерения плотности теплового потока и показано, что для наиболее применяемых ранее ПТП вида вспомогательной стенки с отношением поперечного размера к толщине ПТП, равном 10, методические погрешности могут достигать 25%. Разработанные рекомендации по выбору размеров и теплофизических характеристик ПТП с учетом условий их применения позволяют уменьшить методическую составляющую погрешности в 5 раз.

2. В результате теоретического и экспериментального исследования пар термоэлектродных материалов константан-никель и копель-никель, впервые предложено их применение в конструкции термоэлектрических ПТП, что позволило без использования драгоценных металлов расширить температурный диапазон измерения до 500 К и увеличить временную стабильность характеристик ПТП.

3. Впервые предложены и разработаны способы улучшения метрологических характеристик ПТП на основе никелевого покрытия, что позволило расширить температурный диапазон работы в зону выше точки Кюри и создать ПТП, чувствительность которых изменяется не более чем на 5% в диапазоне рабочей температуры.

4. Разработана теория проектирования ПТП для измерения теплового потока при неустановившемся теплообмене. В результате созданы и внедрены специализированные ПТП, время реакции которых снижено в 10 раз, что позволило впервые экспериментально определить тепловую нагрузку на главный аэродинамический обтекатель ракеты-носителя в процессе вывода на орбиту космических аппаратов.

5. На основании изучения условий теплообмена при воспроизведении и передаче единицы измерения плотности теплового потока обоснованы правила выбора размеров эталонных ПТП и материалов, из которых они изготавливаются, а также создан комплекс установок для метрологического обеспечения теплоточных измерений, в том числе, установку эталонного уровня и проект государственной поверочной схемы для средств измерения плотности теплового потока. Эталонная установка обеспечивает воспроизведение единицы измерения плотности теплового потока в диапазоне от 100 до 20000 Вт / м² с неисключенной систематической погрешностью $\pm 0,18\%$ и погрешностью передачи ее размера, не превышающей 0,5%.

6. Создан комплекс для измерения и метрологического обеспечения теплового потока высокой интенсивности в диапазоне значений от 30 до 170 кВт/м² с погрешностью измерения 2%, что позволило внедрить стандарты на огневые испытания, в которых предусмотрено измерения таких параметров, как температура и поверхностная плотность теплового потока в зоне воздействия пламени горелки.

7. Теоретически обоснована и разработана методика измерения коэффициентов эмиссии теплотрическим методом, в основе которого лежат прецизионные измерения теплового сопротивления.

8. Разработана теория проектирования ПТП, которыми оснащены приборы для измерения коэффициента теплопроводности согласно ДСТУ ISO 8301 и ДСТУ Б.В.2.7-105 (ГОСТ 7076, IDT), что позволило снизить погрешность измерения рабочих средств до $\pm 3\%$.

9. Создан дифференциальный микрокалориметр для определения тепловыделения топливосодержащих масс разрушенного реактора ЧАЭС, который обеспечивает измерение мощности тепловыделения в диапазоне от 10^{-3} до 2 Вт с допустимой погрешностью 1,5%, а в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-3} Вт – не хуже 5,5%.

10. Проведена модернизация нормативно-методической базы теплотрии путем разработки и внедрения более трех десятков стандартов и методик выполнения измерений, в том числе межгосударственный стандарт на ПТП вида вспомогательной стенки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Геращенко О. А. Техника теплотехнического эксперимента / О. А. Геращенко, В. Г. Федоров. – К. : Наукова думка, 1964. – 164 с.
2. Геращенко О. А. Тепловые и температурные измерения: справочник / О. А. Геращенко, В. Г. Федоров – К. : Наукова думка, 1965. – 304 с.
3. Геращенко О. А. Теоретические и прикладные вопросы теплотехники : дис. ... д-ра техн. наук : 01.04.14 / Геращенко Олег Аркадьевич. – К. : ИТТФ АН УССР, 1969. – 170 с.
4. Геращенко О. А. Основы теплотехники / Олег Аркадьевич Геращенко. – К. : Наукова думка, 1971. – 192 с.
5. Декуша Л. В. Теплотехнические измерительные преобразователи для исследования сложного теплообмена : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.04 / Декуша Леонид Васильевич; Академия наук УССР, Институт технической теплофизики. – К., 1990. – 278 с.
6. 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).
7. 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).
8. Приборы для теплофизических измерений : Каталог, Институт технической теплофизики АН УССР. – Киев : Реклама, 1986. – 73 с.
9. Приборы для теплофизических измерений : Каталог/К.: Час, 1991. – 56с.
10. Приборы для теплофизических измерений: Каталог. – К. : ИТТФ НАН Украины, 2010 – 59 с.
11. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. – Л-д.: Энергия, 1979. – 352 с.

12. Темкин А. Г. Обратные методы теплопроводности. – М. : Энергия, 1973. – 464 с.
13. Мацевитый Ю. М., Прокофьев В. Е., Широков В. С. Решение обратных задач теплопроводности на электрических машинах. – Киев : Наукова думка, 1980. – 132 с.
14. Френк И. Применение метода наименьших квадратов для решения обратной задачи теплопроводности / Пер. с англ. – Теплопередача, Сер. С. 1963. – Т. 85, № 4. – С. 107–108.
15. 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.
16. Бургграф О. Р. Точное решение обратной задачи в теории теплопроводности и ее приложениях / Пер. с англ. – Теплопередача, Сер. С, 1964. – Т. 86, № 3. – С. 94–106.
17. Шумаков Н. В. Метод последовательных интервалов в теплотехнике нестационарных процессов. – М. : Атомоиздат, 1979. – 212 с.
18. Симбирский Д. Ф. Температурная диагностика двигателей. – Киев : Техника, 1976. – 163 с.
19. Бут Е. Н. Сплайн – идентификация тепловых потоков. – ИФЖ, 1977. – Т. 33, № 6. – С. 1085–1089.
20. Кудрявцев Е. В., Чакалев К. Н., Шумаков Н. В. Нестационарный теплообмен. – М. : Изд-во АН СССР, 1961. – 158 с.
21. Смольский Б. М., Сергеева Л. А. Нестационарный теплообмен. – Минск : Наука и техника. 1974. – 157 с.
22. Теория и техника эксперимента : Учебн. пособие для вузов / Ю. Ф. Гордышев, Ф. Н. Дресвянников, Н. С. Идиатуллин и др. : Под ред. В. К. Щукина. – М. : Энергоавтоматиздат, 1985. – 360 с.
23. Федоров В. Г. Теплотехника в пищевой промышленности / Владимир Гаврилович Федоров. – М.: Пищевая промышленность, 1974. – 176 с.
24. Федоров В. Г. Основы теплотехники. – К. : Вища школа, 1987. – 184 с.

25. Драганов Б. Х. Теплометрия в сельском хозяйстве / Б. Х. Драганов, С. А. Сажина, Ю. М. Сергиенко, В. Г. Федоров. – К. : Изд-во Укр. сельхоз. Академии, 1993. – 280 с.

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

27. Митяков А. В. Градиентные датчики теплового потока в нестационарной теплометрии : дис. канд. техн. наук Митяков Андрей Владимирович; – С.-Пб. : СПб ГПУ, 2000. – 132 с.

28. Сапожников С. З. Основы градиентной теплометрии. – С.-Пб. : Изд-во СПб ГПУ, 2012. – 203 с.

29. Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Митяков А. В. Градиентные датчики теплового потока в теплотехническом эксперименте. – С.-Пб. : Изд-во СПб ГПУ, 2007. – 202 с.

30. Создание новых моделей первичных преобразователей теплового потока и изготовление экспериментальных образцов / Задание Государственной программы неотложных мер по ликвидации последствий аварии на ЧЭАС на 1991-1992 гг.: отчет по НИР (заключ.) / Институт проблем энергосбережения АН Украины ; рук. Т. Г. Грищенко; исполн. Декуша Л. В., Аракелян М. А., Василевская В. В. – Киев, 1992. – 90 с. – Библиогр. : С. 87–90.

31. Разработка в интересах энергосбережения элементной базы теплометрии, включая новые типы первичных преобразователей и теплометрических устройств и средства их метрологического обеспечения [Рукопись]: Отчет о НИР «Контакт» (заключительный) – Киев : Ин-т проблем энергосбережения АН Украины; рук. Грищенко Т. Г.; исполн. : Кашурин П. В., Лапий А. В. – Киев, 1993. – 166 с. – Библ. : с. 154–163. – № ГР UA01013901Р.

32. Исследование и создание первичных преобразователей теплового потока с расширенным диапазоном теплофизических характеристик и разработка на их основе в интересах теплосбережения нового поколения измерителей теплового потока и температуры [Рукопись] : Отчет о НИР «Контакт-2» (заключительный). – Киев : Институт проблем энергосбережения АН Украины; рук. Грищенко Т. Г.; исполн. : Декуша Л. В., Менделеева Т. В. [и др.]. – Киев, 1996. – 68 с. – Библ. : с. 55–57. – № ГР 094U027206.

33. Разработка первичных преобразователей, приборов, устройств и метрологической аппаратуры для обеспечения единства и правильности измерений в области энергосбережения [Рукопись]: Отчет о НИР «Контроль-2» (заключительный). – Киев : Институт общей энергетики НАН Украины; рук. Грищенко Т. Г. ; исполн. Декуша Л. В., Менделеева Т. В., Воробьев Л. И. [и др.]. – Киев, 1997. – 115 с. – Библиогр. : с. 112–115. – № ГР 0195U010304.

34. Разработка в интересах энергосбережения комплекса аппаратуры нового поколения для определения и исследования метрологических характеристик первичных преобразователей теплового потока [Рукопись]: Отчет о НИР «Контакт-3» (заключительный). – Киев : Институт технической теплофизики НАН Украины; рук. Грищенко Т. Г.; исполн. : Декуша Л. В., Воробьев Л. И., Менделеева Т. В. [и др.]. – Киев, 1999. – 134 с. – Библиогр. : с. 132–134. – № ГР 01197U012859.

35. Разработка универсального бомбового калориметра для измерения теплоты сгорания различных видов топлива (твердого, жидкого, газообразного) [Рукопись]: Отчет о НИР «Калория» (заключ.) – К. : Ин-т технической теплофизики НАН Украины; рук. Декуша Л. В.; исполн. Грищенко Т. Г., Воробьев Л. И., Ефемина А. К. Киев, 1999. – 169 с. – Библиогр.: С. 170 – 178. – № ГР 198U005115.

36. Розробка теоретичних основ метрологічного забезпечення теплометрії [Рукопис]: Звіт з НДР «Контакт-4» (заключ.). – Київ : Інститут технічної теплофізики НАН України; рук. Грищенко Т. Г.; исполн.: Декуша Л. В., Воробьев Л. И., Менделеева Т. В. [и др.]. – Киев, 2002. – 145 с. – Библиогр. : с. 142–145. – № ДР 0100U002419.

37. Теоретичні основи розрахунку та проектування установок для визначення теплопровідності «ЛАМБДА» [Рукопис] : звіт з НДР (заключ.) / Інститут технічної теплофізики НАН України ; наук. керівник Грищенко Т. Г. ; відп. вик. Декуша Л. В. – К. : ІТТФ НАН України, 2003. – 176 с. – Бібліогр. : С. 167–176. – № ДР 0101U002314.

38. Подовження ресурсу роботи елементів котельного обладнання децентралізованої енергетики [Рукопис]: звіт з НДР «Ресурс» (заключ.) – Київ, Ін-т техн. теплофізики НАН України; кер. Л. В. Декуша; викон.: Л. Й.

Воробйов, Т. Г. Грищенко, О. Л. Декуша [та ін.] – Київ, 2005. – Роз. 3. – 46 с. – ДР № 0105U006883.

39. Теоретичні та прикладні основи проектування зразкових засобів відтворення одиниці густини теплового потоку [Рукопис] : Звіт з НДР "Компаратор" (заключ.). – Київ : Інститут технічної теплофізики НАН України; кер. Декуша Л. В.; викон. : Грищенко Т. Г., Воробйов Л. Й., Менделеева Т. В. [та ін.]. – Київ, 2005. – 131 с. – Бібліогр. : С. 127–131. – № ДР 0103U005193.

40. Створення вихідного еталону для відтворення, зберігання та передавання розміру одиниці поверхневої густини теплового потоку [Рукопис] : Звіт про НДР (заключ.). – Київ : Інститут технічної теплофізики НАН України; кер. Декуша Л. В.; викон. : Грищенко Т. Г., Воробйов Л. Й., Трикоз П. І. [та ін.]. – Київ, 2008. – 150 с. – Бібліогр. : с. 100–108. – № ДР 0108U008391.

41. Розробка універсальної комп'ютеризованої системи вимірювання теплових потоків на базі малоінерційних перетворювачів [Рукопис] : звіт про НДР (заключ.) / Інститут технічної теплофізики НАН України ; наук. керівник Декуша Л.В.; викон. Грищенко Т. Г., Воробйов Л. Й., Трикоз П. І. [та ін.]. – Київ. – 2008. – 165 с. – Бібліогр. : с. 153–165. – № ДР 0108U002710.

42. 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).

43. Геращенко О. А., Гордов А. Н., Еремина А. К. и др. Температурные измерения / Справочник. – Киев. : Наукова думка, 1989. – 412 с.

44. Линевег Ф. Измерение температуры в технике / Справочник – М. : Металлургия, 1980. – 544 с.

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

46. Germak I. Termoelectricki snimač tepelneho toku. / I. Germak. // Automatisace, 1958. – № 10.

47. 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.

48. Преобразователи теплового потока / Каталог Германия WUNTRONIK (E-mail wuntronic@wuntronic.de)

49. Погурская Ж. Л. Искусственно-анизотропные термоэлектрические преобразователи для измерения плотности тепловых потоков : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.11.04 «Приборы и методы измерения тепловых величин» / Жанна Леонидовна Погурская ; ИТТФ АН УССР. – Киев, 1983. – 22 с.

50. Браун, Чарльсон, Джонсон Прибор для измерения стационарного потока тепла // Приборы для научных исследований / Пер. с англ., 1961. – Т. 32, № 8. – С. 117.

51. Andretta A. Simple heat flux meter / A. Andretta, V. Bartolli, Colluzzi [ets.] // The revive of scientific instruments, 1981. – Vol. 52. – No. 2. – P. 233–234.

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

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

54. Patent 2590982-A1 France, G01K 17/20. Device for measuring a heat flux (Патент 2590982 Франция, МКИ³ G01K 17/20. Тепломер). – Бюл. № 23, 1987 г.

55. А.с. № 1515075 (СССР), МКИ³ G 01 K 17/08. Датчики теплового потока / О. А. Геращенко, А. С. Поник, Л. А. Лукашевич, Л. В. Гурьянов. – № 4368848/24-10 ; заявл. 25.01.88; опубл. 15.10.89, Бюл. № 38. – 3 с.

56. А.с. 288356 (СССР), МПК³ G 01 K 17/08. Устройство для определения тепловых потоков / К. Г. Тараянц. – № 1384304/18-10 ; заявл. 12.12.69 ; опубл. 03.12.70, Бюл № 36.

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

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

59. Кременчугский Л. С. Пироэлектрические приемники излучения / Л. С. Кременчугский, О. В. Ройцина. – Киев : Наукова думка, 1979. – 381 с.

60. Кременчугский Л. С. Система параметров и характеристик тепловых приемников излучения / Л. С. Кременчугский, О. В. Ройцина. – Киев : Институт физики АН Украины, 1983. – 41 с.

61. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники: справочник / Л. З. Криксунов. – М. : Сов. радио, 1978. – 396 с.

62. Кременчугский В. Л. Термопироэлектрические приемники излучения : дис. ... канд. техн. наук / Кременчугский Владимир Львович ; ИТТФ АН УССР. – Киев, 1988. – 166 с.

63. Jong J. Heat Flowmeter and Their Application / J de Jong, Y. Marquenie. // Instr. Pract. – 1962. – Vol. 16. – № 1 – P. 45–51.

64. Isaacs N. Engineering Application of Heat Flux Sensors in Buildings - Technical Note / Building Applications of Heat Flux Transducers, ASTM STP 885 // E. Bales, M. Bomberg, G. E. Courville. – Eds., American Society for Testing and Materials. – Philadelphia, 1985. – P. 122–128.

65. Bomberg M. Application of Heat Flux Transducers : A Select and Annotated Bibliography / M. Bomberg. // ASTM. Building Application of Heat Flux Transducers. – 1985. – NSTP 885. – P. 223–236.

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

67. Schmidt E. Ein neuer Warmeflussmesser und seine praktische Bedeutung in der Wärmeschutztechnik. / E. Schmidt // Mitt. Forschungswissens für Wärmeschutz. – München : 1923.

68. Measuring heat flow detectors for attachment to any material. – Engineering, 1954. – 178, 4615.

69. Геращенко О. А. Создание датчика теплового потока / О. А. Геращенко // Удостоверение о регистрации с приоритетом от 5 февраля 1957. – Комитет по делам изобретений при СМ СССР.

70. А.с. 159048 СССР, МКИ³ G 01 K 17/08. Датчик для измерения локальных тепловых потоков // В. Г. Федоров, О. А. Геращенко. – 1963.– Оpubл. Бюл. № 23. – С. 58.

71. Haldane D. A Direct Measurement System to obtain the Thermal Conductivity of Pipeline Insulation Coating Systems under Simulated Service Conditions / D. Haldane, F. van der Graaf, A. M. Lankhorst. // Offshore Technology Conference held in Houston, Texas, 3-6 May 1999. – OTC 11040. – 15 p.

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

73. 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.

74. Анатычук Л. И. Термоэлектрический полупроводниковый тепломер / Л. И. Анатычук, Н. Г. Лозинский, П. Д. Микитюк [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 1983. – № 5. – С. 236.

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

76. Разработка, изготовление и исследование полупроводниковых тепломеров для оценки теплового состояния организма человека: отчет по НИР / Черновицкий Госуниверситет. – Черновцы, 1987. – 25 с. – №ГР01860004074.

77. Разработка, исследование термоэлектрического преобразователя теплового потока для геотехнологии: отчет по НИР (закл.) / ПО «Львов-прибор». – Львов, 1988. – 63 с. – № ГР 01870093178.

78. Петров Г. С. Применение термоэлектрических полупроводниковых преобразователей теплового потока в разработках приборов [Текст] / 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.

79. gSKIN® Application Note: Building Physics [Electronic resource] / The website of greenTEG. – The access mode to the website : <http://www.greenteg.com/>. – Title screen.

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

81. 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.

82. Ухлинов Г.А. Анизотропия и анизотропный термоэлектрический градиент в наклонно конденсированных пленках / Г. А. Ухлинов, Д. М. Краснов // Материалы и технологические процессы микроэлектроники. – М. : МИЭТ, 1986. – С. 192–195.

83. 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.

84. 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.

85. 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.

86. Geiling L. Das Thermoelement als Strahlungsmesser / L. Geiling // Zschr. F. Angew. Phys. – 1951. – Bd. 3.12. – P. 467–477.

87. Пшенай-Северин Д. А. Искусственно анизотропный термоэлектрический материал с полупроводниковыми и сверхпроводящими слоями / Д. А. Пшенай-Северин, Ю. И. Равич, М. В. Ведерников // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34, Вып. 10. – С. 1265–1269.

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

89. 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.

90. Свидетельство на полезную модель 9959 (с приоритетом 10.08.1998 г.) Датчик теплового потока / Н. П. Дивин (Россия). – Российское агентство по патентам и товарным знакам ; 16.05.99, Бюл. Полезные модели, № 5.

91. Сапожников С. З. Разработка градиентных датчиков теплового потока для теплотри в камерах сгорания / С. З. Сапожников, В. Ю. Митяков, А. В. Митяков [и др.] // Горение твердого топлива : материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием, 13-16 ноября 2012г., г. Новосибирск / Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. – Новосибирск, 2012. – С. 89.1–89.8.

92. Митяков В. Ю. Возможности градиентных датчиков теплового потока на основе висмута в теплотехническом эксперименте : дис. ... д-ра техн. наук : 01.04.14 / Митяков Владимир Юрьевич ; СПбГПУ. – СПб, 2005. – 239 с.

93. Сапожников С. З. Градиентные датчики теплового потока [Текст] / С. З. Сапожников, В. Ю. Митяков, А. В. Митяков. – СПб. : СПбГПУ, 2003. – 169 с.

94. Heat Flux Sensors Преобразователи теплового потока [Electronic resource] / Wuntronic GmbH, Heppstrasse 30, D-80995 Munich, Germany // Каталог: <http://www.wuntronic.de/>.

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

96. 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.

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

98. 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.

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

100. Каталог продукции, часть II, раздел V : каталог / ОАО Научно-производственного предприятия «ЭТАЛОН» ФАТРМ. – Омск, 2007. – С. 26–28.
101. Геращенко О. А. Методика конструирования оптимальных преобразователей теплового потока / О. А. Геращенко, Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша // Проблемы энергосбережения. – Вып. 3. – Киев : Наукова думка, 1990. – С. 36–42.
102. Каганов М. А. О точности измерения тепловых потоков с помощью тепломеров / М. А. Каганов, Ю. Л. Розеншток // Инж.-физ. журнал. – 1960. – Т. 3, № 3. – С. 138–142.
103. 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. : Гидрометеорологич. из-во, 1963. – Т. IX. – С. 108-114.
104. 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.
105. 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.
106. Михайлов А. И. Тепломер конечной толщины / А. И. Михайлов, С. Г. Платонова // Инж.-физ. журнал. – 1979. – Т. 37, № 5. – С. 835–842.
107. 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.
108. Van der Graaf F. Heat-flux Sensor / F. van der Graaf // Thermal Sensors. VCH Verlagsgesellschaft mbh. – Weinheim, FRG. – 1990. – Chapter 8, Vol. 4. – 28p.
109. Van der Graaf F. Building Applications of Heat-flux Transducers // ASTM STP 885, Bales, E, (ets.). – Philadelphia, ASTM, 1985. – P. 79–96.
110. 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.

111. Котюк А. Ф. Единая система государственных эталонов энергетической фотометрии когерентного и некогерентного оптического излучения / А. Ф. Котюк, В. С. Панасюк, Л. Н. Самойлов [и др.] // Измерительная техника. – 1976. – № 3. – С. 17–24.

112. Назаренко Л. А. Метрологическое обеспечение измерений энергетической освещенности некогерентным излучением / Л. А. Назаренко, Л. И. Бондаренко // Проблемы промышленной теплотехники : материалы VII Международной конференции, 23-27 мая 2011, г. Киев. / Институт технической теплофизики НАН Украины. – Киев, 2011. – № 7. – С. 130–131.

113. Общесоюзная поверочная схема для средств измерения мощности и энергии когерентного излучения оптического диапазона : ГОСТ 8.056-73. М. : Изд-во стандартов, 1973. – (В настоящее время отменен).

114. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений потока излучения $1 \cdot 10^{-6}$ – 10^{-2} Вт в диапазоне длин волн 0,4–1,4 мкм : ГОСТ 8.273-78. – [Введ. 1979-01-01]. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – (Государственный стандарт).

115. Общесоюзная поверочная схема для средств измерений энергии лазерного излучения в диапазоне длин волн 0,3–12,0 мкм : ГОСТ 8.275-78. М. : Изд-во стандартов, 1978. – (В настоящее время отменен).

116. Общесоюзная поверочная схема для средств измерения средней мощности лазерного излучения в диапазоне длин волн 0,3–12,0 мкм : ГОСТ 8.276-78. М. : Изд-во стандартов, 1978. – (В настоящее время отменен).

117. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерения энергетической яркости и силы излучения тепловых источников с температурой от 200 до 900 К : ГОСТ 8.106-80. М. : Изд-во стандартов, 1981. – (В настоящее время отменен).

118. Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости, спектральной плотности силы излучения и спектральной плотности энергетической освещенности в диапазоне длин волн 0,25–25,0 мкм ; силы излучения и энергетической освещенности в диапазоне длин волн 0,2–25,0 мкм : ГОСТ 8.195-89. – [Введ.

1990-01-01]. М. : Изд-во стандартов, 1989. – 11 с. – (Государственный стандарт).

119. Государственная поверочная схема для средств измерения энергетической яркости и силы излучения тепловых источников с температурой от 220 до 1360 К : ГОСТ 8.106-2001 ГСИ. – [Введ. 2002-09-01]. Минск : ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 7 с. – (Межгосударственный стандарт).

120. Методические указания. Средства измерений потока излучения типа ОСИ ПИ образцовые. Методы и средства поверки : РД50-528-85. – [Введ. 1986-07-01]. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 7 с. – (Руководящий нормативный документ).

121. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання енергетичної яскравості і сили випромінення теплових джерел з температурою від 220 до 1360 К : ДСТУ 8.106-2003 (Замінює ГОСТ 8.106-2001, IDT). – [Чинний від 2003-07-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2003. – 10 с. – (Національний стандарт України).

122. Государственная поверочная схема для средств измерений поверхностной плотности теплового потока в диапазоне 10-2000 Вт/м² : МИ 1855-88 (Утвержден СНИИМ Государственного комитета СССР по стандартам 31.12.1987). – М. : Издательство стандартов, 1988. – 7 с. – (Методические указания).

123. Сергеев О. А. Метрология и средства измерений тепловых величин / О. А. Сергеев. // Итоги науки и техники ВИНТИ. Метрология и измерительная техника. – М. : 1982. – Т. 2, № 5. – С. 179–223. – ISSN 0202-7585.

124. Физические величины : справочник / Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. [и др.] ; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. – ISBN 5-283-04013-5.

125. Соколов Н. А. Метрологическое обеспечение энергосбережения (Измерение теплопроводности и связанных с ней величин) : [научное издание – учебное пособие] / Н. А. Соколов. – СПб. : НИУПЦ «Межрегиональный институт стекла», 2005. – 128 с. – ISBN 5-902859-02-6.

126. Кудрявцев Е. В. Эталонирование теплового потока / Е. В. Кудрявцев, К. Н. Чакалаев, О. И. Лунева // Тепло- и массоперенос. Т. 1 : сб. науч. тр. [под общ. ред. А. В. Лыкова, Б. М. Смольского] / Изд. Академии наук БССР. – Минск, 1962. – С. 140–145.

127. Геращенко О. А. Методы и средства градуировки датчиков теплового потока (обзор) / О. А. Геращенко, Т. Г. Грищенко, Л. А. Лукашевич // Промышленная теплотехника: Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 1986. – Т. 8, № 1. – С. 78-90. – ISSN 0204-3602.

128. Черепанов В. Я. Методы и средства метрологического обеспечения измерения параметров теплообмена и теплоносителей [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / Черепанов Виктор Яковлевич. – Новосибирск, 2005. – 276 с.

129. Raphael-Mabel, S. Design and calibration of novel high temperature heat flux sensor: thesis... master of science / Sujay A. Raphael-Mabel. – Blacksburg, VA, USA, 2005. – 109 p.

130. Hoffie, A. Convection Calibration of Schmidt-Boelter Heat Flux Gages in Shear and Stagnation Air Flow : thesis ... master of science / Andreas Frank Hoffie. – Blacksburg, VA, USA, 2006. – 173 p.

131. Шатенштейн В. Г. Градуировка высокотемпературных тепломеров в лабораторной установке / В. Г. Шатенштейн // Заводская лаборатория. – 1985. – № 1. – С. 83–86.

132. Геращенко О. А. Аппаратура для метрологической аттестации первичных преобразователей теплового потока / О. А. Геращенко, Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, В. П. Сало // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 1991. – Т. 13, № 4. – С. 64–69. – ISSN 0204-3602.

133. Лукашевич Л. А. Градуировка преобразователей теплового потока в интервале температур от 80 до 300 К : дис. ... канд. техн. наук / Лукашевич Людмила Александровна. – Киев : ИПЭ НАН Украины, 1994. – 147 с.

134. Heat Flux Meters: Calibration // Nordtest method. NT FIRE 050. – NORTEST, Helsinki, 1995.

135. NIST measurement services: Heat-Flux Sensor Calibration / B. K. Tsai, Ch. E. Gibson, A. V. Murthy, E. A. Early, D. P. Dewitt, R. D. Saunders // National

Institute of Standards and Technology. Special Publication 250-65. – May, 2004.– 37 p.

136. Anderson P. Uncertainty in Heat Flux Calibrations performed according to NT FIRE 050 / P. Anderson, I. Wetterlund // Nordtest Project № 1525-01. – SP Swedich National Testing and Research Institute. – SP Report 2001:34.

137. De Ponte F. Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Technology / F. De Ponte // American Society for Testing and Materials. – Philadelphia, 1985. – P. 101-120.

138. Albers M.A. Calibrations of Heat Flow Meters in Wacuum, Cryogenic and High Temperature Conditions / M.A. Albers // Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes. – 1995. – Vol. 18. – P. 399–410.

139. Orlandi R.D. Calibration of Heat Flux Transducers / R.D. Orlandi, G.D. Derderian, L.S. Shu, B. Siadat // Building Aplication of Heat-Flux Transducers, ASTM STP 885. – Philadelphia, 1985. – P. 25–42.

140. Bligh T.P. Heat flux Sensor Calibration Thechnique / T. P. Bligh, D. M. Apthorp // Building Applications of Heat Flux Transducers, ASTM STP 885. – Edited by E. Bales, M. Bomberg, G.E. Courville. – ASTM, 1985. – P. 28–44.

141. Grosshandler W.L. Heat Flux Transducer Calibration: Summary of the 2nd Workshop / W.L. Grosshandler // Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology. – Gaithersburg, 1999. – MD 20899.

142. Standard Practice for Calibrating Thin Heat Flux Transducers : ASTM C1130-90 (2001).

143. Diller, T. E. Heat Flux Calibration – Progress Toward National Standards / T. E. Diller // Proceedings of the 41st International Instrumentation Symposium, Denver, CO May 7-11, 1995.

144. Moffat R. J. Final Report : The NIST/NSF Workshop on Heat Flux Transducer Calibration / R. J. Moffat, C. Danek // NIST in Gaithersburg, January 23-24, 1995.

145. Holmberg D. A progress report on the NIST convective heat flux calibration facility / David G. Holmberg, Carole A. Womeldorf // Proceedings of the 5th ASME/JSME Joint thermal engineering conference. – San Diego, California, 1999. – P. 1–8.

146. Raphael-Mabel S. Design and calibration of a novel high temperature heat flux gage sensor : thesis Master of Science in Mechanical Engineering / S. Raphael-Mabel. – Blacksburg VA, USA, 2005. – 109 p.

147. Blokland H., Van der Graaf F. Sensor for measuring convective and Radiative Heat Flux / H. Blokland, F. van der Graaf // Internet : <http://www.tpd.tno.nl.2010>. – 7 p.

148. Bronwer J.C. Eindverslag calibratce baksensoren / J.C. Bronwer // TNO Report, Delft. – 1999.

149. Эльдаров Ф. Г. Образцовая установка для измерения плотности лучистых тепловых потоков / Ф. Г. Эльдаров, О. А. Краев, Г. Е. Кузьмин // Измерительная техника. – 1974. – № 47. – С. 41.

150. Краев О. А. Калориметр для измерения плотности лучистых потоков / О. А. Краев, В. М. Шульга // Измерительная техника. – 1978. – № 3. – С. 61-62.

151. Государственные эталоны и поверочные схемы. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 288 с.

152. Белоконь А. А. Шаровой радиометр / А. А. Белоконь, Г. Я. Бубель, Н. И. Профатилова, Д. М. Щербина // Приборы и техника эксперимента. – 1976. – № 5. – С. 81–82.

153. Геращенко О. А. Разработка и создание стенда для метрологической аттестации и поверки датчиков лучистых потоков (ДЛП) / О. А. Геращенко, Ю. З. Мавашев, Д. М. Щербина [и др.] // Гелиотехника. – 1979. – № 6. – С. 46–50.

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

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

156. Орлов В. А. Установка для метрологической аттестации приемников теплового излучения / В. А. Орлов, Г. А. Мазаев, Г. Я. Бубуль [и др.] //

Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 1982. – Т. 4, № 1. – С. 37–41. – ISSN 0204-3602.

157. Геращенко О. А. Автоматизированный комплекс для метрологического обеспечения рабочих средств измерений плотности потоков теплового излучения / О. А. Геращенко, Н. Н. Базырь, В. Н. Морозов и др. // Измерительная техника. – 1985. – № 12. – С. 31–32.

158. Государственный первичный специальный эталон единицы плотности радиационного теплового потока в диапазоне 1000 – 5000 Вт/м² [Электронный ресурс]: (описание ГЭТ 197-2011) / Сайт ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений». – Режим доступа к сайту: <http://www.vniiofi.ru/depart/m4/get197-2011.html>. – Название с экрана.

159. Murthy A. V. Calibration of High Heat Flux Sensors at NIST / A. V. Murthy, B. K. Tsai; C. E. Gibson // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. – Vol. 102, No. 4. – Gaithersburg, 1997. – P. 479–488.

160. Murthy A.V. Radiative Calibration of Heat-Flux Sensors at NIST : [Facilities and Techniques / A.V.Murthy, B.K. Tsai, R.D. Saunders // Journ. of research of the National Institute of Standards and Technology. – 2002. – Vol. 105. – № 2. – P. 29–305.

161. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений поверхностной плотности теплового потока в диапазоне от 1 до 10000 Вт/м² : ГОСТ Р 8.797 – 2012 [Введ. в действие 01.07.2013]. – М. : «Стандарт-информ», 2014. – 5 с.

162. Томбасов Е. А. Образцовая установка для градуировки и поверки преобразователей теплового потока / Е. А. Томбасов, О. И. Лозинская, В. Я. Черепанов // Метрология : ежемесячное приложение к науч.-техн. журналу «Измерительная техника». – 1987. – №1. – С. 31–39.

163. Томбасов Е. А. Разработка и исследование средств метрологической аттестации преобразователей теплового потока / Е. А. Томбасов, В. Я. Черепанов, А. Н. Калинин // Измерительная техника. – 1987. – № 5. – С. 30–32.

164. Рабочее место для поверки преобразователей теплового потока РМП ПТП : ТУ 50-691-88. – [Введ. 1989-01-01]. – № ГР 080/390848. – 1988. – 20 с.

165. Геращенко О. А. Аппаратура для метрологической аттестации преобразователей теплового потока / О. А. Геращенко, Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша // Тезисы докладов VII Всеакадемической школы по проблемам метрологического обеспечения и стандартизации. – Фрунзе : АН Киргизской ССР, 1989. – С. 146–197.

166. А.с. 504105 (СССР), МКИ2 G 01 K 17/00. Адиабатический калориметр для измерения теплоемкости / Е.А. Томбасов, В. А. Краснов. – № 1873446/18-10 ; заявл. 22.01.73 ; опубл. 25.02.76, Бюл. № 7. – 3 с.

167. Геращенко О. А. Особенности кондуктивной градуировки преобразователей теплового потока в вакуумном адиабатическом калориметре / О. А. Геращенко, Т. Г. Грищенко, А. Н. Калинин [и др.] // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 1984. – Т. 6, № 5. – С. 60–64. – ISSN 0204-3602.

168. Черепанов В. Я. Методы и средства метрологического обеспечения измерений параметров теплообмена и теплоносителей: дис ... д-ра техн. наук : 05.11.15, 05.11.01 / Черепанов Виктор Яковлевич ; ФГУП «Сибирский гос. научно-исслед. инст. метрологии». – Новосибирск, 2005. – 276 с.

169. Про внесення змін до Закону України "Про метрологію та метрологічну діяльність" : [закон України : від 15.06.2004 р. №1765-IV-ВР] // К. : Відомості Верховної Ради України. – 2004. – № 37. – Ст. 499.

170. Грищенко Т. Г. Исходные образцовые средства для аттестации образцовых преобразователей теплового потока / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, А. В. Лапий // Метрологічне забезпечення температурних та теплофізичних вимірювань : тези доповідей V наук.-техн. конф. 1994 р., Харків. – Харків : Держстандарт України, ДНВО "Метрологія", 1994. – С. 184–186.

171. Разработка и исследование метода и технических средств применительно к созданию государственных эталонов единиц поверхностной плотности теплового потока и тепловой мощности (энергии) [Рукопись] : отчет о НИР / ФГУП СНИИМ. – Новосибирск, 2002.– 33 с. – № ГР 02200303469.

172. Гришин А. А. Развитие метрологического обеспечения теплотехники / А. А. Гришин, В. Я. Черепанов // Промышленная теплотехника :

Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2003. – Т. 25, Приложение к журналу № 4. – С. 461–462. – ISSN 0204-3602.

173. Черепанов В. Я. Государственный первичный эталон единицы поверхностной плотности теплового потока : доклад Федеральному Агенству по техническому регулированию и метрологии / Черепанов Виктор Яковлевич ; ФГУП «СНИИМ». – Новосибирск, 2007. – 32 с.

174. Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus: ASTM C158-10. – [Acting from 01-May-2010]. – ASTM International, 2010. – 15 p. – (International Standard).

175. Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus: ASTM C177-10. – [Acting from 01-Sep-2010]. – ASTM International, 2010. – 23 p. – (International Standard).

176. Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus : ISO 8301:1991. – [Acting from 2008-07-31]. – International Organization for Standardization, 1991. – 38 p. – (International Standard).

177. Rennex B. Summary of Error Analysis for the National Bureau of Standards 1016 mm Guarded Hot Plate and Consideration Regarding Systematic Error for the Heat Flow Meter Apparatus. Guarded Hot Plate and Heat Flow Meter Methodology / B. Rennex // Symp. Quebec, 7-8 Okt. 1982 // Philadelphia : PA, 1985. – P. 68–85.

178. Standard Practice for Calibration of Heat Flow Meter Apparatus : ASTM C1132-95. – (Withdrawn 2002).

179. Енергозбереження. Будівлі та споруди. Методи вимірювання поверхневої густини теплових потоків та визначення коефіцієнтів теплообміну між огорожувальними конструкціями та довкіллям : ДСТУ 4035-2001 [Введ. в дію 01.01.2002]. – К. : Держстандарт України, 2001. – 44 с. – (Національний стандарт).

180. 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).

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

182. Будівельні матеріали. Скло з низькоемісійним м'яким покриттям. Технічні умови : ДСТУ Б В.2.7-228:2009 (ГОСТ 31364-2007, MOD) [Введ. в дію 01.10.2010]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 40 с. – (Міждержавний стандарт).

183. Теплоізоляція. Будівельні елементи. Натурні вимірювання теплового опору та коефіцієнта теплопередавання : ДСТУ ISO 9869:2007 (ISO 9869:1994, IDT) [Введ. в дію 01.01.2009]. – К. : Держстандарт України, 2009. – 46 с. – (Національний згармонізований з ISO Стандарт України).

184. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения : РМГ 29-99 [Введен в действие 01.01.2001] // «В збірнику нормативно-правових актів України та організаційно-методичних документів з питань метрології» – К. : Держстандарт України, 2002. – С. 195–246. (Рекомендации по межгосударственной стандартизации).

185. Грищенко Т. Г. Об оценке корректности показаний преобразователя теплового потока при исследовании теплоизоляционных свойств материалов / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Т. В. Менделеева // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 1996. – Т. 18, № 5. – С. 55–58. – ISSN 0204-3602.

186. Грищенко, Т. Г. Теплометрический экспресс-метод и прибор для определения коэффициента теплопроводности неметаллических материалов: дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14 / Грищенко Татьяна Георгиевна, ИТТФ АН Украины. – К., 1977. – 198 с.

187. Грищенко Т. Г. Особенности использования тепломера в приборах для определения теплопроводности // Инж.-физ. журнал. – 1981. – Т. 40, № 6. – С. 1055–1061.

188. Декуша Л. В. Воспроизведение единицы плотности теплового потока кондуктивным методом / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Т. В. Менделеева // Вестник Тамбовского Гос. технич. университета. Спец. выпуск «Методы и приборы контроля процессов, состава и свойств веществ». – Тамбов : ТГТУ, 2002. – Т. 8, № 1. – С. 148-156. – ISSN 0136-5835.

189. Грищенко Т. Г. Теоретические основы метрологии теплоточных измерений / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Т. В. Менделеева // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2001. – Т. 23, № 4-5. – С. 175–180. – ISSN 0204-3602.

190. Декуша Л. В. Современное состояние метрологического обеспечения теплоточных измерений с помощью первичных преобразователей теплового потока / Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко [и др.] // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2004) : наукові праці IV Міжн. науково-техн. конф., в 2-х томах. – Харків, 2004. – Т.2. С. 26–31.

191. Ковтун С. И. Основы проектирования эталонных преобразователей теплового потока / С. И. Ковтун, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2012. – Т. 34, № 5. – С. 80–90. – ISSN 0204-3602.

192. Грищенко Т. Г. Погрешность измерения стационарного теплового потока плоским преобразователем теплового потока, помещенным внутри массивного объекта / Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша, Т.В. Менделеева ; Ін-т техн. теплофізики НАН України. – Київ : [б. и.], 2000. – 9 с : іл. – Деп. у ДНТБ України 13.11.2000, №201-Ук2000. – Библ. опис. № 92. (Д/п ВИНТИ РАН, 2001, №1 (347)). – Библ. опис. № 29).

193. Грищенко Т. Г. Измерение теплового потока плоским преобразователем теплового потока, помещенным на поверхности полубесконечного массива / Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша, Т.В. Менделеева ; Ін-т техн. теплофізики НАН України. – Київ : [б. и.], 2000. – 10 с : іл. – Деп. у ДНТБ України 13.11.2000, №200-Ук2000 – Библ. опис. № 91. (Д/п ВИНТИ РАН, 2001, №1 (347)). – Библ. опис. № 28).

194. Грищенко Т. Г. Измерение стационарного теплового потока плоским преобразователем теплового потока, помещенным на конвективно

охлаждаемой бесконечной пластине / Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша, Т.В. Менделеева ; Ін-т техн. теплофізики НАН України. – Київ : [б. и.], 2002. – 16 с : іл. – Деп. у ДНТБ України 27.05.02, №62-Ук2002. (Д/п ВИНТИ РАН, 2002, №7 (365). – Библ. опис. № 39).

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

196. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность теплых тел. – М. : Наука, 1964. – 488 с.

197. Декуша Л. В. Об особенностях измерения стационарного теплового потока, проходящего через бесконечную пластину, по обе стороны которой происходит конвективный теплообмен / Л.В. Декуша, Т.В. Менделеева ; Ін-т техн. теплофізики НАН України. – Київ : [б. и.], 2003. – 26 с : іл. – Деп. у ДНТБ України 14.07.03, №93-Ук2003. – Библ. опис. № 65. (Д/п ВИНТИ РАН, 2003, №9 (379). – Библ. опис. № 76).

198. Декуша Л. В. Измерение стационарного теплового потока, приходящего 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.

199. 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.

200. Ватсон, Дж. Н. Теория бесселевых функций / Дж. Н. Ватсон ; пер. с англ. В. С. Бермана. – М.: Иностран. лит-ра. – 1949. – 798 с.

201. Чудновский А. Ф. Теплофизика почв / А. Ф. Чудновский. – М. : Наука, 1976. – 353 с.

202. Дульнев Г. Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов : справочная книга / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. – Л. : Энергия, 1974. – 264 с.

203. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций [Текст] / А. Миснар ; пер. с фр. М. Г. Беда ; авт. предисл. Э. Шпильрайн. – М. : Мир, 1968. – 464 с.

204. Грищенко Т. Ефективний тепловий опір перетворювача теплового потоку виду допоміжної стінки / Т. Грищенко, Л. Декуша, Є. Шмаров, Л. Воробйов // Метрологія та прилади : Науково-виробничий журнал. – Харків, 2012. – № 6. – С. 20–26. – ISSN 2307-2180.

205. 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.

206. Ларикиов Л. Н. Тепловые свойства металлов и сплавов. Серия «Структура и свойства металлов и сплавов» [Текст] : справочник / Л. Н. Ларикиов, Ю. Ф. Юрченко ; ред. В. В. Скороход. – Киев : Наукова Думка, 1985. – 438 с.

207. Wall H. Quantative differential thermal analysis with an isothermal microcalorimeter / H. Wall // Instrument Practice. – 1965. – Vol. 19. – No. 11. – P. 1022–1028.

208. Приборы для измерения температуры контактным способом [Текст] : справочник / [ред. Р. В. Бычковский]. – Львов : Вища школа, Изд-во при Львов. ун-те, 1978. – 206 с.

209. 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.

210. Гук О. П. Метрологічна надійність кабельних перетворювачів температури / О. П. Гук // Вимірювальна техніка та метрологія. – Львів, 2003. – № 62. – С. 120–125.

211. Физический энциклопедический словарь [Текст] : в 5 т. / ред. Б. А. Введенский. – М. : Советская Энциклопедия, 1960. – Т. 2 : Е – Литий. – 1962. – 608 с.

212. Сплавы для термопар : справочное издание / И. Л. Рогельберг, В. М. Бейлин. – М. : Металлургия, 1983. – 360 с.

213. Куритнык И. П. Новые номинальные статические характеристики преобразователя термопар / И. П. Куритнык // Измерительная техника. – 1985. – № 12. – С. 23–25.

214. Кэй Дж. Таблицы физических и химических постоянных / Дж. Кэй, Т. Лэби ; перевод с англ. – М. : Гос. изд-во физ. мат. лит., 1962. – 248 с.

215. Справочник по физико-техническим основам криогеники : справочник / [ред. М. П. Малков]. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.

216. Теплопроводность твердых тел: справочник: пер. с англ. / Р. П. Боровикова, Т.В. Нечаева, А.С. Пушкарский ; ред. А. С. Охотин. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 321 с.

217. Справочник по теплообменникам : справочник: в 2 т. Т. 2 / пер. с англ. ; ред. О. Г. Мартыненко [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.

218. 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.

219. Шмаров Є. В. Термоелектричні перетворювачі теплового потоку на основі константан-нікелевих і копель-нікелевих термоелементів / Є. В. Шмаров, Л. В. Декуша, Д. П. Коломієць, О. Г. Мазуренко // Ukrainian Food Journal. – Київ, 2012. – № 2. – С. 89–92.

220. Ковтун С. И. Первичные преобразователи теплового потока для определения тепловой нагрузки на головной обтекатель РН типа «Днепр» / С. И. Ковтун, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, О. Л. Декуша // Космические технологии: настоящее и будущее : тезисы докладов III Международной конференции, 20-22 апреля 2011 г., г. Днепропетровск, 2011. – С. 54–55.

221. Декуша Л. В. Термоэлектрические преобразователи теплового потока для работы в широком диапазоне температур / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Л. И. Воробьев [и др.] // Проблемы промышленной теплотехники : тезисы IV межд. конф., 26-30 сентября 2005 г. – Киев, 2005. – С. 328–330.

222. 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.

223. 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.

224. Шмаров Є. Біспіральный перетворювач теплового потоку / Є. Шмаров, Л. Воробйов, Т. Грищенко, Л. Декуша // Системи–2013. Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань: тези доповідей Міжнар. наук.-техн. конф., 23-27 вересня 2013р., м. Львів ; за ред. проф. Б. І. Стадника, проф. Б. Венцика, проф. П. Г. Столярчука. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 244 с.

225. 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.

226. 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.

227. Декуша Л. Багатошарові гальванічні перетворювачі теплового потоку / Л. Декуша, Т. Грищенко, Л. Воробйов // Системи–2013. Термографія і термометрія, метрологічне забезпечення вимірювань та випробувань : тези доповідей Міжнар. наук.-техн. конф., 23-27 вересня 2013р., м. Львів / За ред. проф. Б. І. Стадника, проф. Б. Венцика, проф. П. Г. Столярчука. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2013. – С.79.

228. 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.

229. Декуша Л. Інформаційно-обчислювальний комплекс для забезпечення теплових випробувань будівельних матеріалів, виробів та

конструкцій / Л. Декуша, Л. Воробйов, В. Зайцев [та інш.] // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2008. – № 68. – С. 72–78.

230. Березин И.С. Методы вычислений: в 2 т. / И. С. Березин, Н. П. Жидков. – М. : Наука, 1966. – Т. 1 – 630 с.

231. Декуша Л. В. Особенности проектирования преобразователей теплового потока для исследования нестационарного теплообмена / Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко [и др.] // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2008. – Т. 30, № 2. – С. 99–104. – ISSN 0204-3602.

232. Декуша Л. Особенности проектирования малоинерционных ПТП для исследования нестационарного теплообмена. / Л. Декуша, Л. Воробьев, Т. Грищенко, О. Декуша, Г. Пархоменко // Вимірювальна техніка та метрологія : міжвідомчий науково-технічний збірник ; за ред. Б.І. Стадника. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2008. – Вип. 68 – С. 116–125. – ISSN 0368-6418.

233. А.с. 875222 (СССР), МКИЗ G 01 K 17/0. 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 (53). – 7 с.

234. 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.– Харків, 2008. – С. 333– 339.

235. Воробьев Л. Теплометрические средства контроля тепловой нагрузки на головной обтекатель ракеты-носителя / Л. Воробьев, Т. Грищенко, Л. Декуша, О. Декуша, С. Ковтун, Е. Шмаров // Метрологія та прилади : Науково-виробничий журнал. – Харків, 2013. – № 2. – С. 22–29. – ISSN 2307-2180.

236. Декуша Л. В. Термоэлектрический преобразователь с корректирующей термобатареей 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 : матеріали VI міжнародної науково-практичної конф. – Київ, 2008. – С. 80–88.

237. Декуша Л. В. Малоинерционные преобразователи теплового потока с корректирующей термобатарей: тезисы докладов V межд. конф. «Проблемы промышленной теплотехники», (Киев, 22-26 мая 2007 г.) / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, О. Л. Декуша [и др.] / Институт технической теплофизики НАН Украины. – К. : [Изд-во ИТТФ НАН Украины], 2007. – С. 338–339.

238. Декуша Л. В. Особенности воспроизведения единицы плотности теплового потока кондуктивным способом [Текст] / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Т. В. Менделеева // Міжвідомчий наук.-техн. збірник : Вимірювальна техніка та метрологія. – Вип. 63. – Львів : «Львівська політехніка», 2003. – С. 31–39. – ISSN 0368-6418.

239. Декуша Л. В. Особенности радиационного компарирования для передачи единицы плотности теплового потока [Текст] / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Т. В. Менделеева // Міжвідомчий наук.-техн. збірник : Вимірювальна техніка та метрологія. – Вип. 66. – Львів : «Львівська політехніка», 2006. – С. 64–75. – ISSN 0368-6418.

240. Ковтун С. И. Исследование метрологических характеристик установки КГУ-6 для аттестации преобразователей теплового потока: тезисы докладов V межд. конф. [«Проблемы промышленной теплотехники»], (Киев, 22-26 мая 2007 г.) / С. И. Ковтун, Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев / Институт технической теплофизики НАН Украины. – К.: [Изд-во ИТТФ НАН Украины], 2007. – С. 348–349.

241. Декуша Л. В. Проблемы обеспечения единства измерений плотности теплового потока в Украине / Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко, А. А. Мендрул // Забезпечення єдності вимірювань фізико-хімічних та оптико-фізичних величин: Хіммет-3-2008 : матеріали III Міжнародної науково-практичної конф. – К.: [ТОВ "АВЕГА"], 2008. – 292 с. – ISBN 978-966-8953-07-1.

242. Грищенко Т. Г. Метрологическое обеспечение теплоточных измерений в научных исследованиях / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша // XI Всеакадемическая школа по проблемам метрологического обеспечения и стандартизации : тезисы докладов, 1993 г., г. СПб. – СПб., 1993. – С. 71–73.

243. Ковтун С. И. Проблемы воспроизведения и передачи единицы плотности теплового потока [Текст] / С. И. Ковтун // Промышленная

теплотехника: Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2004. – Т. 26, № 6. – С. 220–223. – ISSN 0204-3602.

244. Грищенко Т., Декуша Л., Воробьев Л. Тепловой поток и методы его измерения // Научно-виробничий журнал : Метрологія та прилади. – Харьков, 2009. – № 2. – С. 3–11. – ISSN 2307-2180.

245. Грищенко Т. Г. Измерения теплового потока и их стандартизация в Украине / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев // Оконные технологии, 2009. – № 38. – С. 84–87.

246. Декуша Л. В. Обеспечение эталонного уровня измерений плотности теплового потока в Украине / Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко [и др.] // Промышленная теплотехника: Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2009. – Т. 31, № 4. – С. 109–116. – ISSN 0204-3602.

247. Грищенко Т. Г. Эталонная измерительная установка для воспроизведения, хранения и передачи единицы поверхностной плотности теплового потока [Текст] / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев [и др.] // Проблемы учета теплоты и воды в Украине : сборник трудов V Международной научно-практической конф. – Киев, 2006. – С. 54–66.

248. Грищенко Т. Г. Установка для воспроизведения, хранения и передачи единицы поверхностной плотности теплового потока : наук. праці V наук.-техн. конф-ції [«Метрологія та вимірювальна техніка «Метрологія-2006»], (Харків, 10-12 жовтня 2006 р.). Т.1 / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, С. И. Ковтун [и др.] / Національний науковий центр «Інститут метрології» – Харків: ХФ ДП «УкрНДНЦ», 2006. – С. 329–332.

249. Грищенко Т. Г. Эталонные термоэлектрические преобразователи теплового потока для работы в диапазоне температур от 300 до 500 К : наук. праці V наук.-техн. конф. [«Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2006)»], (Харків, 10-12 жовтня 2006 р.). Т.1 / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, С. И. Ковтун [и др.] / Національний науковий центр «Інститут метрології» – Харків : ХФ ДП «УкрНДНЦ», 2006. – С. 317–320.

250. Декуша Л. В. Термоэлектрические преобразователи теплового потока для работы в широком диапазоне температур: тезисы докладов IV межд. конф. [«Проблемы промышленной теплотехники»], (Киев, 26-30 сентября 2005

г.) / Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко [и др.] / Институт технической теплофизики НАН Украины. – К. : [Изд-во ИТТФ НАН Украины], 2005. – С. 328–330.

251. Первинний еталон одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку: програма і методика атестації ПМА 081/24.407-08 / Л. Воробйов, Т. Грищенко, Л. Декуша [и др.]. – Київ, 2008.– 38 с.

252. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. – М. : Энергопромиздат, 1990. – 367 с.

253. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерения: ДСТУ ГОСТ 8.009:2008 – [Чинний від 2008-10-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2008. – 27 с.

254. Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Способы выражения погрешностей: ДСТУ ГОСТ 8.381:2008. – [Чинний від 2008-10-01].– Київ : Держспоживстандарт України, 2008. – 11 с. – (Національний, міждержавний стандарт України).

255. Ковтун С. И. Исследование составляющих погрешностей воспроизведения и передачи размера единицы плотности теплового потока в эталонной установке: наук. праці VII наук.-техн. конф-ції [«Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2010)»], (Харків, 12-14 жовтня 2010 р.), Т. 1 / С. И. Ковтун, Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Л. И. Воробьев [та ін.] / Національний науковий центр «Інститут метрології» – Харків : [Вид-во ННЦ «Інститут метрології»], 2010. – С. 269–272.

256. Метрологія. Метрологічна атестація засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення: ДСТУ 3215-95. - [Чинний від 1996-07-01]. - К. : Держстандарт України, 1995. – 34 с. – (Національний стандарт України).

257. Метрологія. Повірка засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення: ДСТУ 2708:2006. – [Чинний від 2008-07-01]. – К. : Держстандарт України, 2006. – 18 с. – (Національний стандарт України).

258. Метрологія. Повірочні схеми для засобів вимірювальної техніки. Правила розроблення (OIML D 5:1982, IDT): ДСТУ OIML D 5:2007. - [Чинний

від 2009-07-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 12 с. – (Національний стандарт України).

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

260. Декуша Л. В. Установка для радиационной градуировки преобразователей теплового потока [Текст] / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, В. Б. Зайцев // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2003. – Том 25, Приложение к журналу № 4. – С. 462–464. – ISSN 0204-3602.

261. .Теплотехнический справочник. Т.2 / Под ред. В.И. Юренева, П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976. – 896 с.

262. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров // Справочник. – М. : Агропромиздат, 1979. – 216 с.

263. Грищенко Т. Г. Современные разработки ИТТФ НАН Украины в области теплофизического приборостроения / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев // Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ : сборник трудов Международной научно-технической конференции 30 ноября - 2 декабря 2010 г., г. СПб. – СПб. : СПбГУНиПТ, 2010. – Кн. 1. – С. 23–43. – ISBN 978-5-89565-222-0.

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

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

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

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

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

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

270. Комплекс аппаратуры для измерения и регистрации тепловых параметров. Модель КИТП-1: программа и методика метрологической аттестации // Киев: УкрЦСМ, 2000. – 7 с.

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

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

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

274. Хадсон Р. Инфракрасные системы / Р. Хадсон ; перевод с англ. – М. : Мир, 1972. – 534 с.

275. Русин С. П. Тепловое излучение полостей. / С. П. Русин, В. Э. Пелецкий. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 153 с.

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

277. Приемник теплового излучения с цифровым показывающим устройством РАП-12.М.2. Программа ПМА 081/24.254 – Киев, 2003. – 14 с.

278. Конструкції будівель і споруд. Теплова ізоляція будівель : ДБН В.2.6–31:2006. – [Чинні від 2007–04–01] // Мінбуд України. – К. : Укрархбудінформ, 2006. – 65 с. – (Державні будівельні норми України).

279. Декуша О., Воробьев Л., Декуша Л. Универсальный прибор ИТ-8 для измерения коэффициента теплопроводности строительных материалов // Вимірювальна техніка та метрологія. Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2008. – Вип. 68. – С. 101-107. – ISSN 0368-6418.

280. Кулаков М. В. Измерение температуры поверхности твердых тел / М. В. Кулаков, Б. И. Макаров // Библиотека по автоматике, вып. 598. – М. : Энергия, 1979. – 96 с.

281. Декуша Л. В. Влияние определяющих факторов на результаты измерения коэффициентов теплопроводности методом локального теплового воздействия / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Т. В. Менделеева [и др.] // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев. – 2005. – Т. 27, № 2. – С. 74–80. – ISSN 0204-3602.

282. Декуша Л. В. Метод локального теплового воздействия (зондовый метод) измерения теплопроводности материалов с выносными преобразователями температуры / Л. В. Декуша, Т. В. Менделеева, Л. И. Воробьев, О. Л. Декуша // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – 2005. – Т. 27, № 2. – С. 100–106. – ISSN 0204-3602.

283. Кальве Э., Прат А. Микрокалориметрия. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1963. – 477 с.

284. Декуша Л. В. Особенности экспресс-измерения теплопроводности на образце конечной толщины прибором ИТ-8 / Л. В. Декуша, Т. В. Менделеева, Л. И. Воробьев, О. Л. Декуша // Промышленная теплотехника :

Международный научно-прикладной журнал. – 2005. – Т. 26, № 5. – С. 76–81. – ISSN 0204-3602.

285. Чуриков А. А., Сенкевич А. Ю. Многостадийный метод и информационно-измерительная система неразрушающего контроля теплофизических свойств // Вестник ТГТУ. – 2002. – Т. 8, № 1. – С. 62–69.

286. Прибор для измерения коэффициента теплопроводности строительных материалов. Модель ИТ-8 / Программа и методика метрологической аттестации ПМА 081/24.263-2004. – Киев, 2004 – 13 с.

287. ДСТУ Б В.2.7–40–95 (ГОСТ 30256-94) Будівельні матеріали. Матеріали і вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності циліндричним зондом. – [Чинний від 1996-04-01]. – Київ: Держком України у справах містобудування і архітектури, 1997. – 18 с. (Національний стандарт України, гармонізований з ГОСТ 30256-94).

288. Будівельні матеріали. Матеріали і вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності поверхневим перетворювачем ДСТУ Б В.2.7–41–95 (ГОСТ 30290-94). – [Чинний від 1996-04-01]. – Київ : Держком України у справах містобудування і архітектури, 1997. – (Національний стандарт України, гармонізований з ГОСТ 30290-94).

289. Будівельні матеріали. Матеріали і вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності і термічного опору при стандартному тепловому режимі (на заміну ГОСТ 7076-87) ДСТУ БВ.2.7–105–2000 (ГОСТ 7076-99). [Чинний від 2001-07-01]. – Київ : Держком України у справах містобудування і архітектури, 1997. – (Національний стандарт України, гармонізований з ГОСТ 7076-99).

290. Теплоізоляція. Визначення теплового опору та пов'язаних із ним характеристик в усталеному режимі приладом із перетворювачем теплового потоку (ISO 8301:1991, IDT) : ДСТУ ISO 8301:2007. – [Чинний від 2009-01-01]. – К. : Держспоживстандарт, 2009. – (Національний стандарт України).

291. Теплоізоляція. Визначення теплового опору та пов'язаних з ним характеристик в усталеному режимі приладом із захищеною гарячою пластиною (ISO 8302:1991, IDT) : ДСТУ ISO 8302:2008. – [Чинний від 2010-01-01]. – (не виданий).

292. Стандартные образцы. Основные положения : ГОСТ 315-78 / В сб. Основополагающие стандарты в области метрологии. – М. : Изд-во стандартов, 1986. – 312 с.

293. Стандартні зразки. Основні положення, порядок розроблення, атестації, затвердження, реєстрації і застосування : ДСТУ 3232-95 – К. : Держстандарт України, 1996. – 41 с. (Національний стандарт України).

294. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений теплопроводности твердых тел от 0,1 до 5 Вт/(м·К) в диапазоне температур 90-500 К : ГОСТ 8.140-82 ГСИ – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 5 с.

295. Декуша Л. В. Измерение теплопроводности теплоизоляционных и строительных материалов (в развитие ГОСТ 7076-99 и ISO 8301:1991) / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Т. В. Менделеева // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2003. – Т. 25, № 3. – С. 79–87. – ISSN 0204-3602.

296. Декуша Л. В. Преобразователи теплового потока для приборов по определению теплопроводности материалов / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Т. В. Менделеева // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2003. – Том 25, Приложение к журналу № 4. – С. 469–471. – ISSN 0204-3602.

297. Бурова З. А. Методические погрешности измерения коэффициента теплопроводности материалов на установке ИТ-7С / З. А. Бурова, Л. И. Воробьев, Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко // Промышленная теплотехника: Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2013. – Том 35, № 2. – С. 96–103. – ISSN 0204-3602.

298. Бурова З. А. Проблемы измерения теплопроводности теплоизоляционных и строительных материалов / З. А. Бурова, А. В. Гайдучек, С. И. Ковтун // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2004. – Т. 26, № 6. – С. 205–209. – ISSN 0204-3602.

299. Декуша Л. В. Експериментальна установка для визначення теплопровідності будівельних матеріалів в розрахункових умовах / Л. В. Декуша, Л. Й. Воробійов, З. А. Бурова, Г. Г. Фаренюк // Будівельні конструкції :

Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – К. : ДП НДІБК, 2008. – Вип. 68. – С. 34–39. – ISBN 978-966-41-009-1.

300. Бурова З. Установка для вимірювання коефіцієнта теплопровідності будівельних матеріалів ИТ-7С / З. Бурова, Л. Воробйов, Л. Декуша, О. Декуша // Метрологія та прилади : Науково-виробничий журнал. – Харків, 2009. – № 6 – С. 9–15. – ISSN 2307-2180.

301. Mazurenko, O. G. Universal TPC-Installation with Thermoelectric Converters [Електронний ресурс] / O.G. Mazurenko, T.O. Roman, Z.A. Burova, L.V. Dekusha // Ukrainian Food Journal – Kyiv, 2012. – V. 1, Is. 3. – P. 64–67. – Режим доступу: <http://www.ufj.ho.ua/Archiv/UKRAINIAN%20FOOD%20JOURNAL%202012%20V.1%20Is.3.pdf>.

302. Бурова З. А. Особенности конструирования преобразователей теплового потока для приборов для определения теплопроводности по ДСТУ ISO 8301:2007 / З. А. Бурова, Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко [та ін.] // Будівельні конструкції: Міжвідомчий наук.-техн. збірник наукових праць (будівництво). – Вип. 77. – К. : ДП НДІБК, 2013. – С. 349-354. – ISBN 978-966-97183-8-9.

303. Метрологическая аттестация установки для определения коэффициента теплопроводности строительных материалов методом косвенных измерений / Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, З. А. Бурова, О. Л. Декуша // «Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2010)» : наукові праці VII Міжнародної науч.-техн. конф., 12-14 жовтня 2010 р., м. Харків : у 2-х тт. – Харьков, 2010. – Т. 1. – С. 265–268.

304. Бурова З. А. Методические погрешности измерения коэффициента теплопроводности материалов на установке ИТ-7С / З. А. Бурова, Л. И. Воробьев, Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко // Промышленная теплотехника: Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2013. – Т. 35, № 2. – С. 96–103. – ISSN 0204-3602.

305. Бурова З. А. Повышение точности измерения теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов / З. А. Бурова, Л. И. Воробьев, Л. В. Декуша [и др.] // Промышленная теплотехника: Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2010. – Т. 32, № 1 – С. 113–121. – ISSN 0204-3602.

306. Использование метода двух измерений для исследования метрологических характеристик приборов по ГОСТ 7076-99 / З. А. Булова, А. В. Гайдучек, О. Л. Декуша, Л. И. Воробьев, А. Г. Мазуренко // Проблемы промышленной теплотехники : тезисы докладов V Межд. конференции. – Киев, 2007. – С. 328–330.

307. Государственная система обеспечения единства измерений. Эталонные материалы : Каталог 2008 – 2009 : МИ 2590–2008 [Электронный ресурс] / ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. – СПб.: ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», 2008. – С. 10. – Режим доступа : <http://catalog.vniim.ru/files/raz01-12.pdf>.

308. Установка для вимірювання теплопровідності будівельних матеріалів ИТ-7С / Програма і методика метрологічної атестації ПМА 081/24/408-2009 // Київ, 2009. – 27 с.

309. Измерение теплопроводности современных теплоизоляционных материалов в Украине / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, З. А. Булова // Забезпечення єдності вимірювань фізико-хімічних та оптико-фізичних величин: ХІММЕТ-3-2008 : матеріали ІІІ Міжнар. наук.-практ. конф., 11-13 лист. 2011 р., м. Київ – К. : ТОВ “АВЕГА”, 2008. – С. 161–165.

310. Булова З. А. Дослідження теплопровідності пінополіуретану / З. А. Булова, Л. Й. Воробйов, Л. В. Декуша [и др.] // Промышленная теплотехника: Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2012. – Т. 34, № 1. – С. 108–112. – ISSN 0204-3602.

311. Патент 99061 UA МПК G01K 17/18 (2006.01) G01N 25/20 (2006.01) Прилад для визначення теплофізичних характеристик матеріалів та теплових ефектів / Декуша Л. В., Воробйов Л. Й., Булова З. А., Мендрул Г. О. ; власник Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України. – № а 201107509 ; заявл. 14.06.2011 ; опубл. 10.07.2012. – Бюл. № 13, 2012.

312. Применение прибора по ГОСТ 7076 для исследования процесса гидратации цементов // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2008) : наукові праці VI Міжнародної наук.-техн. конф., 2008 р., м. Харків. – Харків : ННЦ «Інститут метрології», 2008. – Т. 2. – С. 326–328.

313. Мендрул Г. Визначення тепловиділення та коефіцієнту теплопровідності у процесі гідратації в'язучих матеріалів та бетонів на установці ИТ-7С / Г. Мендрул, Л. Воробйов, Л. Декуша, З. Бурова // Метрологія та прилади: Науково-виробничий журнал. – Харків, 2010. – № 1. – С. 15–19. – ISSN 2307-2180.

314. Мендрул Г. А. Проведение калориметрического анализа в процессе гидратации бетонных смесей на установке ИТ-7С / Г. А. Мендрул, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, З. А. Бурова, И. О Кириченко // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2010. – Т. 32, № 2. – С. 105–112. – ISSN 0204-3602.

315. Цементы. Метод определения тепловыделения : ГОСТ 310.5-88. – [Введ. в действие 01.01.1989]. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 6 с.

316. Бетоны. Метод определения тепловыделения при твердении : ГОСТ 24316-80. – [Введ. в действие 01.01.1982]. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 8 с.

317. Розробка приладів та методики для теплотехнічної паспортизації будівель та споруд різного призначення [Рукопис] : звіт з НДР «Методика» (заключ.) – Київ: ІТТФ НАН України ; наук. кер. Л. В. Декуша; викон. Л. Й. Воробйов, Т. Г. Грищенко, О. Л. Декуша [та ін.] – Київ, 2011. – 177 с. – Бібліограф. : С. 166–177. – ДР № 0112U000317.

318. Бурова З. А. Определение коэффициента эмиссии энергоэффективных стекол калориметрическим методом / З. А. Бурова, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев // Тезисы докладов VII Межд. конф. “Проблемы промышленной теплотехники” – Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал.– Киев, 2011. – Т. 33, № 7. – С. 139. – ISSN 0204-3602.

319. Бурова З. А. Определение коэффициента эмиссии энергоэффективных стекол калориметрическим методом / З. А. Бурова, Л. И. Воробьев, Л. В. Декуша, А. Г. Мазуренко // Промышленная теплотехника : Межд. науч.-прикл. журнал. – К., 2011. – Т. 33, № 6. – С. 94–100. – ISSN 0204-3602.

320. Бурова З. А. Калориметричний метод визначення терморадіаційних характеристик енергоефективних стекол / З. А. Бурова, Л. В. Декуша, Л. Й.

Воробйов // Світлотехніка та електроенергетика : Міжнародний науково-технічний журнал. – Харків, 2011. – № 2 (26). – С. 8–12.

321. Скло будівельне. Методика визначення коефіцієнта теплопередавання багатошарових конструкції : ДСТУ EN 673:2009 (EN 673:1997, IDT). – [Чинний від 01.01.2012]. – К. : Держстандарт України, 2012. – (Міжнародний стандарт).

322. Будівельні матеріали. Скло з низькоемісійним твердим покриттям. Технічні умови : ДСТУ Б В.2.7-115-2002 (ГОСТ 30733-2000). – [Чинний від 01.10.2002]. – К. : Держстандарт України, 2002. – (Міждержавний стандарт).

323. Грищенко Т. Г. Калориметрический метод и устройство для определения терморadiaционных характеристик энергосберегающих материалов и покрытий / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, А. В. Гайдучек // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2002. – Т. 24, № 2-3. – С. 159–164. – ISSN 0204-3602.

324. Декуша Л. В. Измерение терморadiaционных характеристик энергоэффективных стекол / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Л. И. Воробьев, А. В. Гайдучек и др. // Региональные проблемы энергосбережения в децентрализованной теплоэнергетике : тезисы докладов Межд. науч.-практич. конф., 1999 г., г. Киев. – Киев, 1999. – С. 75–76.

325. Декуша Л. В. Методика измерения терморadiaционных характеристик энергоэффективных стекол / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, А. В. Гайдучек, Л. И. Воробьев и др. // Региональные проблемы энергосбережения в децентрализованной теплоэнергетике : сб. материалов Межд. науч.-практич. конф., 2000 г., г. Киев. – Киев, 2000. – С. 185–189.

326. Бурова З. А. Определение коэффициента эмиссии энергоэффективных стекол калориметрическим методом / З. А. Бурова, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев // Тезисы докладов VII Межд. конф. «Проблемы промышленной теплотехники». – Промышленная теплотехника: Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2011. – Т. 33, № 7. – С. 139. – ISSN 0204-3602.

327. Установка для прямого измерения интегральных полусферических терморadiационных характеристик энергоэффективных стекол и покрытий ИТРС-1 / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Л. И. Воробьев [и др.]. – Оконные технологии, 2006. – № 23. – С. 36–39.

328. Декуша Л. В. Калориметричний метод визначення терморadiаційних характеристик енергоефективних стекол / Л. В. Декуша, Л. Й. Воробйов, З. А. Бутова // Сучасні проблеми світлотехніки та електроенергетики : матеріали ІV Міжн. наук.-техн. конф., 11-13 квітня 2011р., м. Харків. – Х., 2011. – С. 40-42.

329. Декуша Л. В. Особенности установок для определения терморadiационных характеристик теплотрическим методом / Л. В. Декуша, Т. В. Менделеева, А. В. Гайдучек // Вестник ТГТУ ; спец. выпуск «Методы и приборы контроля состава и свойств веществ, материалов, изделий и окружающей среды». – 2002. – Т. 8, № 1. – С. 105–112. – ISSN 0136-5855.

330. Установка для измерения терморadiационных характеристик энергоэффективных стекол / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Л. И. Воробьев, А. В. Гайдучек, А. И. Самокиш // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-99) : наукові праці ІІ Міжн.наук.-прак. конф. – Харків, 1999. – Т. 2. – С. 108–110.

331. Измерение терморadiационных характеристик энергоэффективных стекол / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Л. И. Воробьев [и др.] // Региональные проблемы энергосбережения в производстве и потреблении энергии : тезисы докладов Межд. науч.-практ. конф. – Киев, 1999. – С.75–76.

332. ГСССД 61-83 Оптические кварцевые стекла. Оптические константы и радиационные характеристики при температурах 295, 473, 673, 873, 1073, 1273, 1473К.4. Стекло КВ. Оптические константы и радиационные характеристики в диапазонах 1,23-1,5 и 1,8-3,6 мкм. Интегральные радиационные характеристики. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 12 с.

333. Установка для измерения терморadiационных характеристик стекол. Модель ИТРС-1 // Программа и методика метрологической аттестации. (Без номера). – Киев. – 1999 г. – 8 с.

334. Измерение сопротивления теплопередаче стеклопакетов с использованием установки ИТС-3 / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Л. И. Воробьев [и др.] // Оконные технологии, 2005. – № 22. – С. 44–49.

335. Декуша Л. В. Компьютеризированный испытательно-измерительный комплекс для определения термического сопротивления стеклопакетов / Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, А. И. Бутенко, А. В. Гайдучек // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2003. – Т. 25, № 2. – С. 67–73. – ISSN 0204-3602.

336. 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).

337. Измерительный комплекс. Модель ИТС-3 / Программа и методика метрологической аттестации: МДУ 014/06-2002. – 6 с.

338. Здания жилые. Метод определения удельного потребления тепловой энергии на отопление : ГОСТ 31168-2003. – [Введен в действие 2003-07-01]. – М. : Стандартинформ, 2003. – 30 с. – (Межгосударственный стандарт).

339. Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций : ГОСТ 26629-85. – [Введен в действие 1986-07-01]. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 16 с. – (Межгосударственный стандарт).

340. Теплові характеристики будівель. Якісне виявлення теплових відмов в огорожувальних конструкціях. Інфрачервоний метод. ДСТУ Б EN 13187:2011 (EN13187:1998, IDT). – К.: Мінрегіон України, 2012. – (Міжнародний стандарт).

341. Thermal performance of building – Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes – Infrared method. – ISO 6781-1983. – [Введен в действие 2008-08-29]. – 16 с. – (Международный стандарт).

342. Вавилов В. П. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике. / В. П. Вавилов, А. Н. Александров. – М. : "Энергопрогресс", 2003. – 76 с. [Библиотека электротехника / Приложение к журналу "Энергетик". – Вып. 9 (57)].

343. Маслова В. А. Термография в диагностике и неразрушающем контроле / В. А. Маслова, В. А. Стороженко. – Харьков: Компания СМІТ, 2004. – 160 с.

344. Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным методом / Аттестация в ФГУ "Российский центр испытаний и сертификации: Свидетельство № 02/442;2002. – М.: ФГУ «РОСТЕСТ», 2002. – 41 с.

345. Оперативное определение тепловых потерь объектов энергетики бесконтактным способом / А. А. Долинский, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев [и др.] // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2007.– Т. 29, № 3.– С. 99–109. – ISSN 0204-3602.

346. Здания и сооружения. Метод определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций : ГОСТ 26254-84. – [Введен в действие 1985-01-01]. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 26 с. – (В Украине отменен с 2012 г.).

347. Методология измерения тепловых потоков преобразователями теплового потока и ее применение при учете теплопотерь через ограждающие конструкции / Л. В. Декуша, Т. В. Менделеева // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики (Севастополь-2002): труды XII конф. СНГ с междун. участием. – Киев : ИПЦ «АЛКОН» НАУ, 2002. – С. 99–102.

348. Комплекс приборов для контроля тепловых характеристик ограждающих конструкций, материалов и изделий / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики (Севастополь-2002) : труды XII конф. СНГ с международным участием. – Киев : ИПЦ «АЛКОН» НАУ, 2002. – С. 75–80.

349. Теплофізичні прилади для теплових випробувань будівельних конструкцій / Воробйов Л. Й., Л. В. Декуша, Менделеева Т. В. // Тези доповідей Київської міської науково-практ. конф. «Промисловості міста – інноваційний шлях розвитку» – Київ : КМДА, 2002. – С. 236–242.

350. Вимірювально-діагностичний комплекс «Ресурс» для дослідження теплового стану енергетичних об'єктів / Л. В. Декуша, Л. Й. Воробйов, В. О. Виноградов-Салтиков, О. Л. Декуша, В. І. Шаповалов // Проблемы учета

теплоты и воды в Украине : сборник трудов V Международной научно-практической конференции. – К., 2006. – С. 75–79.

351. Декуша Л. В. Засоби вимірювальної техніки для діагностики, моніторингу та оптимізації режимів роботи об'єктів у комунальній теплоенергетиці та будівельній індустрії / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Л. Й. Воробйов // В кн.: Комунальна теплоенергетика України: стан, проблеми, шляхи модернізації. – Том I. – К. : ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2007. – С. 346-386.

352. Грищенко Т. Г. Комбинированный тепловизионно-тепловизионный метод контроля трансмиссионных тепловых потерь через ограждающие конструкции зданий и сооружений / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, [и др.] // Проблемы обліку теплоти та води в Україні : збірник доповідей міжнародної науково-практичної конференції. – К., 2008. – С. 88-93.

353. Декуша Л. В. Методика и компьютеризированная измерительная система для натурного обследования состояния теплозащиты здания, сооружения / Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко [и др.] // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2008. – Т. 30, № 5. – С. 82–87. – ISSN 0204-3602.

354. Грищенко Т. Г. Методика измерения сопротивления теплопередаче через ограждающие конструкции зданий и сооружений комбинированным тепловизионно-тепловизионным методом / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л.И. Воробьев, О.Л. Декуша // Проблемы обліку теплоти та води в Україні : збірник доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції. – Киев, 2010. – С. 116–120.

355. Метрологія. Опір теплопередаванню крізь огорожувальні конструкції будівель та споруд різного призначення. Методика виконання вимірювань комбінованим тепловізійно-тепловизионним методом : МВУ 048/06-2012. – К., 2013. – 34 с.

356. Декуша Л. В. Компьютеризированный измерительный комплекс для определения термического сопротивления и трансмиссионных потерь наружных ограждающих конструкций / Л. В. Декуша, Л. И. Воробйов, О. Л. Декуша [и др.] // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2008): наук. праці VI міжн. науково-техніч. конф. – Харків, 2008. – С. 322–325.

357. Декуша Л. В. Компьютеризированный измерительный комплекс для мониторинга теплового состояния фасадных систем / Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко [и др.] // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. – 2009, № 1. – С. 12–16.

358. Определение теплозащитных характеристик ограждающих конструкций зданий тепловизионно-теплометрическим методом / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, О. Л. Декуша // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія -2010) : наукові праці VII Міжн. наук.-техн. конф. – Харків, 2010. – Т. 1. – С. 262–264.

359. Дослідження опору теплопередаванню огорожувальних конструкцій житлових приміщень № 806 та № 807 готельного комплексу в м. Запоріжжя [Рукопис] : звіт з г/д № 530 від 6.12.2011 – Київ: ІТТФ НАН України; кер. Л. В. Декуша; викон.: Н. О. Чорна, Є. В. Шмаров – К., 2011. – 21с.

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

361. Многоканальный измерительный комплекс тепловых потоков и температуры «Ресурс»/ Программа и методика метрологической аттестации ПМА 081/24/408-2009. – Киев, 2009.

362. Олейник Б. Н. Точная калориметрия. / Б. Н. Олейник. – М. : Изд-во стандартов, 1973. – 208 с.

363. Гаджиев С.Н. Бомбовая калориметрия. / С. Н. Гаджиев. – М. : Изд-во «Химия», 1988. – 187 с.

364. Грищенко Т. Г. Бомбовые калориметры для определения теплоты сгорания топлива / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев. // Инж.-физ. журнал. – Минск, 1997.– Т. 70, № 5. – С. 828–839.

365. Измерения в промышленности : справочник: в 3 кн. Кн. 2. : Способы измерения и аппаратура / пер. с немецкого под ред. П. Профоса. – М. : Металлургия, 1990. – 489 с.

366. Топерверх Н. И. Теплотехнические измерительные и регулирующие приборы [Текст] : учебное пособие / Н. И. Топерверх, М. Я. Шерман. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1966. – 455 с.

367. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный первичный эталон и общесоюзная схема для средств измерений количества теплоты : ГОСТ 8.026-79. – [Заменен, введён в действие 01.01.1980]. – М. : Изд-во стандартов, 1979. – 7 с.

368. Воробьев Л. И. Экспериментальное исследование воздушного охлаждения кондуктивного калориметра / Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша. // Инж.-физ. журнал. – Минск, 1999. – Т. 72, № 3. – С. 409–411.

369. Воробьев Л. И. Исследование влияния параметров конструкции кондуктивного бомбового калориметра на погрешности измерения / Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2001. – Том 23, № 6. – С. 143–148. – ISSN 0204-3602.

370. Воробьев Л. И. О пространственной неравномерности тепловых полей в кондуктивном бомбовом калориметре / Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша // Вестник Тамбовского Гос. технич. университета. Спец. выпуск «Методы и приборы контроля процессов, состава и свойств веществ». – Тамбов : ТГТУ, 2002. – Т. 8, № 1. – С. 113–119. – ISSN 0136-5835.

371. Грищенко Т. Г. Теплофизические приборы для контроля качества и эффективности сжигания топлива / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, А. С. Бурдейный // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики (Севастополь-2002) : труды XII конф. СНГ с международным участием. – Киев : ИПЦ «АЛКОН» НАУ, 2002. – С. 71–74.

372. Воробьев Л. И. Кондуктивный бомбовый калориметр для измерения теплоты сгорания топлива [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.04 / Воробьев Леонид Иосифович ; Институт технической теплофизики НАН Украины. – К., 2001. – 185 с. – Библиогр.: С. 158–169.

373. Хеммингер В. Калориметрия. Теория и практика / В. Хеммингер, Г. Хене; пер. с англ. – М. : Химия, 1989. – 176 с.

374. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности : [Учеб. пособие для вузов по спец. группы "Технология пищ. продуктов" и "Машины и аппараты пищ. пр-в"] / А. С. Гинзбург. – М. : Агропромиздат, 1985. – 336 с.

375. Казанский М. Ф. Определение удельной теплоты испарения жидкости из дисперсных тел в широком диапазоне температур / М. Ф. Казанский, Р. В. Луцык, В. М. Казанский // Инж.-физ. журнал. – 1966. – Т. XI, № 5. – С. 586–594.

376. Казанский В. М. Удельная теплота испарения и потенциал переноса влаги капиллярно-пористых тел / В. М. Казанский // Инж.-физ. журнал. – 1963. – Т. VI, № 12. – С. 47–51.

377. Федоров В. Г. О влиянии испарения на теплоотдачу при свободной конвекции / В. Г. Федоров, Л. В. Декуша // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 1980. – Том 2, № 1. – С. 58–61. – ISSN 0204-3602.

378. Казанский В. М. Применение энергограмм сушки для анализа связи влаги с цементным камнем / В. М. Казанский // Инж.-физ. журнал. – 1963. – Т. VI.– № 1. – С. 97–100.

379. Setsys Evolution // Буклет фирмы Setaran, Франция. – Setaran Instrumentation / KEP Technologies. – 2008. – 7 с.

380. Термогравиметрический анализатор Mettler Toledo TGA/DSC 1 // Буклет фирмы Mettler Toledo, Швейцария. – Mettler Toledo, 2007. – 5 с.

381. Термический анализатор STA 449 F3 Jupitet // Буклет фирмы NETZSCH, Германия. – NETZSCH-Geratebau GmbH, 2009. – 12 с.

382. Ooijen van H. Een isotherme microcalorimeter voor kwantitative differential thermische analyse. / H. Ooijen // TNO nieuws. – 1968. – V.23.–№3. – P.136–141.

383. Waal H. Quantative differential thermal analysis with an isothermal microcalorimeter. / H. Waal // Instrum. Pract. – 1969.–V.19, № 11.–P.1022–1028.

384. А. с. 1030671 (СССР), МКИЗ G 01 K 17/08. Дифференциальный микрокалориметр / Н. А. Синцов, Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко [и др.]. – № 3243019/18-19 ; заявл. 02.02.81 ; опубли. 23.07.81. – Бюл. № 27.

385. А. с. 1067375 (СССР), МКИЗ G 01 K 17/04. Дифференциальный микрокалориметр / О. А. Геращенко, А. П. Соловьев, Т. Г. Грищенко [и др.]. – № 3241910/18-10 ; заявл. 02.02.81 ; опубл. 15.01.84. – Бюл. № 2.

386. А. с. 1381348 (СССР), МКИЗ G 01 K 17/08. Дифференциальный микрокалориметр / О. А. Геращенко, Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко [и др.] – № 4011664/31-10 ; заявл. 06.09.89 ; опубл. 07.02.92. – Бюл. № 10.

387. А. с. 1076776 (СССР), МКИЗ G 01 K 17/08. Устройство для измерения составляющих теплового потока при внешнем теплообмене (его варианты) / О. А. Геращенко, Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша – № 3416054/18-10 ; заявл. 29.03.81 ; опубл. 28.02.84. – Бюл. № 8.

388. Скарбовийчук А. М. Определение интенсивности испарения влаги при термической обработке мясных продуктов / А. М. Скарбовийчук, В. Г. Федоров, Л. В. Декуша // Мясная индустрия. – 1982. – № 7. – С. 45–46.

389. Патент 84075 UA, МПК G01N 25/28 / Калориметричний пристрій для визначення питомої теплоти випаровування вологи і органічних рідин з матеріалів / Снежкін Ю. Ф., Декуша Л. В., Дубовикова Н. С. [та ін.]; заявник Інститут технічної теплофізики Академії наук України. – № а200613266; заявл. 15.12.2006; опубл. 10.09. 2008 р. – Бюл. №17.

390. Декуша Л. В. Теплометрический прибор для определения удельной теплоты парообразования / Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, Н. С. Дубовикова, О. Л. Декуша // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2008) : наукові праці VI міжнародної науково-технічної конф. – Харків, 2008. – С. 329–332.

391. Снежкин Ю. Ф. Теплометрический метод исследования кинетики процесса сушки / Ю. Ф. Снежкин, В. И. Рева, Л. А. Боряк // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2005. – Т. 27, № 4 – С. 72–77. – ISSN 0204-3602.

392. Дубовикова Н. С. Теплометрический прибор синхронного термического анализа для определения удельной теплоты испарения / Н. С. Дубовикова, Ю. Ф. Снежкин, Л. В. Декуша [и др.] // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2013. – Т. 35, № 2 – С. 87–95. – ISSN 0204-3602.

393. Кальве Э. Микрокалориметрия: Применение в физической химии и биологии / Э. Кальве, А. Прат ; пер. с франц. – М. : Издательство иностранной литературы, 1963. – 477 с.

394. Уэндландт У. Термические методы анализа / У. Уэндландт ; пер. с англ. под ред. В. А. Степанова и В. А. Берштейна. – М. : Мир, 1978. – 526 с.

395. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре : учебник для вузов по спец. «Конструирование и производство радиоаппаратуры» / Г. Н. Дульнев. – М. : Высш. шк., 1984. – 247 с.

396. Пластмаси. Диференціальна сканувальна калориметрія. Частина 4. Визначення питомої теплоємності : ДСТУ ISO 11357-4:2010 (ISO 11357-4:2005, IDT). – [Введ. в дію 01.01.2012]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2011. – 8 с. – (Національний стандарт України).

397. 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.

398. 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.

399. Геращенко О. А. Приборы для контроля теплового состояния объекта "Укрытие" / О. А. Геращенко, Л. В. Декуша, Л. А. Гурьянов [и др.] // Инж.-физ. журнал. – 1996. – Т. 69, № 2. – С. 255–260.

400. Геращенко О. А. Комплекс теплотермометрической аппаратуры для диагностики разрушенного энергоблока ЧАЭС / О. А. Геращенко, Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко [и др.] // Сб. "Проблеми Чорнобильської 'зони відчуження." – Т. 5. – К., 1998. – С. 187–193.

401. Грищенко Т.Г. Теплофізичні вимірювання для діагностики зруйнованого реактора Чорнобильської АЕС / Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2003. – № 62. – С. 41–48. – ISSN 0368-6418.

402. Комплекс теплотермометричної апаратури для визначення теплового стану зруйнованого реактора ЧАЕС [Електронний ресурс] / А. А. Долінський, Л. В.

Декуша, Т. Г. Грищенко // Національна академія наук України — Чорнобілю: Зб. наук. пр. // НАН України. Національна бібліотечка України ім. В. І. Вернадського; Редкол.: О. С. Онищенко (гол.) та ін. — К., 2006. — Режим доступу: <http://www.nbuv.gov.ua/books/2006/chernobyl/>.

403. Грищенко Т. Г., Декуша Л. В., Аракелян М. А. К вопросу об исследовании свойств преобразователей теплового потока в условиях радиационного излучения // Тези доповідей V науково-техн. конф. "Метрологічне забезпечення температурних і теплофізичних вимірювань" — Харків, 1994. — С. 274.

404. Геращенко О. А. Прибор для измерения тепловых потоков через ограждающие конструкции / О. А. Геращенко, В. Т. Бузынюк, Т. Г. Грищенко, И. Г. Кожевников // Сб. трудов НИИСФ Госстроя СССР "Строительная теплофизика. Микроклимат и теплоизоляция". — М., 1979. — С. 127–131.

405. Геращенко О. А. Автономное малогабаритное устройство для экспресс-диагностики теплового состояния объекта / О. А. Геращенко, М. А. Аракелян // Мера-90: Сб. докладов междунар. конф. с выставкой. — М., 1990. — Ч. 2. — С. 233–238.

406. Геращенко О. А. Нестандартизованная статическая характеристика термопреобразователя сопротивления / О. А. Геращенко, Л. В. Гурьянов, Лукашевич Л. А. // Проблемы энергосбережения. — 1991. — № 6, — С. 12–14. — ISSN 0236-1183.

407. Чорнобиль 1986-1987 р.р. Участь установ НАН України у подоланні наслідків катастрофи. — К.: Академперіодика, 2005. — С. 226–250.

408. Описание объекта "Укрытие" и требования к его преобразованию// Минчернобыль Украины: Исходные данные для выполнения конкурсной работы на проект и технические решения по преобразованию объекта "Укрытие" Чернобыльской АЭС в экологическибезопасную систему. — Киев : Наук. думка, 1992. — 50 с.

409. Грищенко Т. Г. Микрокалориметр для измерения тепловыделения топливосодержащих масс / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша [и др.] / Сб. «Проблеми Чорнобильської «зони відчуження». — Т. 5. — К., 1998. — С. 182–187.

410. Про енергозбереження : [закон України : від 01.07.1994 р. №74/94-ВР] // К. : Відомості Верховної Ради України. – 1994. – № 30. – Ст. 283.

411. Декуша Л. В. Состояние метрологического обеспечения и стандартизации в области измерения теплового потока / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко // Наук. праці II Міжн. наук.-практ. конф-ції «Метрологія та вимірювальна техніка» (Метрологія-99). – Т.2. – Харків, 1999. – С. 12–14.

412. Грищенко Т. Г. Метрологическое обеспечение и стандартизация теплоточных измерений / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша // Тезисы докладов IV Межд. теплофизической школы «Теплофизические измерения в начале XXI века». – Часть 1. – Тамбов, 2001. – С. 149–150.

413. Грищенко Т. Г. Стандартизация теплоточных измерений и их приборное обеспечение / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев // Труды I межд. научно-практ. конф-ции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)» (СЭТТ 2002) // Т. 4. – М.: МГАУ, 2002. – С. 224–227.

414. Грищенко Т. Г. Гармонизация национальных стандартов Украины с международными в области теплообмена и массообмена / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев // Матеріали V Міжн. наук.-практ. конф-ції «Проблеми обліку теплоти та води в Україні», Київ, 2006. – С. 403–406.

415. Грищенко Т. Г. Новые национальные стандарты Украины в области измерений теплового сопротивления и связанных с ним свойств, гармонизированные со стандартами ISO / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев и др. // Тезисы докладов V Межд. конф-ции «Проблемы промышленной теплотехники». – Киев, 2007. – С. 334–335.

416. Грищенко Т. Г. Национальные стандарты Украины, гармонизированные с международными в области измерения теплофизических характеристик / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев [и др.] // Вимірювальна техніка та метрологія, 2008. – № 68. – С.211–215.–ISSN–0368-6418.

417. Грищенко Т. Г. Гармонизация стандартов Украины с международными в области определения трансмиссионных тепловпотерь зданий и сооружений / Т. Г. Грищенко, Л. И. Воробьев, Л. В. Декуша, О. Л. Декуша //

Матеріали VI Міжн. наук.-практ. конф-ції «Проблеми обліку теплоти та води в Україні». – Київ, 2008. – С. 75–79.

418. Грищенко Т. Г. Гармонизация стандартов Украины с международными (ISO, EN, ГОСТ) в области тепло- и массообмена и измерения теплофизических величин / Т. Г. Грищенко, Л. И. Воробьев, Л. В. Декуша, О. Л. Декуша // Промышленная теплотехника: Международный научно-прикладной журнал – К. – 2008. – Т.30, №5. – С. 76–81. – ISSN 0204-3602.

419. Грищенко Т. Г. Гармонизация национальных стандартов – интеграция в мировую экономику / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, А. К. Еремина // Матеріали VII Міжн. наук.-практ. конф-ції «Проблеми обліку теплоти та води в Україні». – Київ, 2010. – С. 121–125.

420. Грищенко Т. Г. Гармонизация стандартов Украины с международными (ISO, EN, ГОСТ) в области тепло- и массообмена и измерения теплофизических величин / Т. Г. Грищенко, Л. И. Воробьев, Л. В. Декуша, О. Л. Декуша // Матеріали VIII Міжн. наук.-практ. конф-ції «Проблеми обліку теплоти та води в Україні». – Київ, 2012. – С. 78-84

421. ДСТУ 3401-97 Енергозбереження. Методи та засоби вимірювання теплових величин. Загальні положення [Чинний від 1999-01-01]. – К. : Держстандарт України, 1998. – 7 с. (Державний стандарт України).

422. ГОСТ 30486-97 Энергосбережение. Методы и средства измерения тепловых величин. Общие положения. [Дата введения 1999-01-01]. – Киев: Межгосуд. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998. – 7 с. (Межгосударственный стандарт).

423. ГОСТ 31364-2007 Стекло с низкоэмиссионным мягким покрытием. Технические условия. [Дата введения 2009-06-30]. – М. : Стандартинформ, 2008. – 19 с. (Межгосударственный стандарт).

424. EN 13187:1998 Thermal Performance Of Buildings – Qualitative Detection Of Thermal Irregularities In Building Envelopes – Infrared Method [Valid from 2008-01-01]. – Comite Europeen de Normalisation. – 16 p.

425. ДСТУ ISO 7345:2005 Теплоізоляція. Фізичні величини та визначення понять (ISO 7345:1987, IDT) [Чинний від 2008-01-01]. – К. : Держстандарт України, 2007. – 12 с. (Державний стандарт України).

426. ДСТУ ISO 9251:2005 Теплоізоляція. Режими теплообміну і властивості матеріалів. Словник термінів (ISO 9251:1987, IDT) [Чинний від 2008-01-01]. – К. : Держстандарт України, 2007. – 7 с. (Державний стандарт України).

427. ДСТУ ISO 9229:2009 Теплоізоляція. Словник термінів (ISO 9229:2007, IDT) [Чинний від 2011-07-01]. – (не виданий).

428. ДСТУ ISO 9288:2005 Теплоізоляція. Радіаційний теплообмін. Фізичні величини та визначення понять (ISO 9288:1989, IDT) [Чинний від 2008-03-01]. – К. : Держстандарт України, 2007. – 26 с. (Державний стандарт України).

429. ДСТУ ISO 9346:2005 Теплоізоляція. Масообмін. Фізичні величини та визначення понять (ISO 9346:1987, IDT) [Чинний від 2008-03-01]. – К. : Держстандарт України, 2007. – 14 с. (Державний стандарт України).

430. ДСТУ ISO 10051:2007 Теплоізоляція. Вплив вологи на теплообмін. Визначення коефіцієнта теплової проникності вологого матеріалу (ISO 10051:1996, IDT) [Чинний від 2009-01-01]. – К. : Держстандарт України, 2013. – 20 с. (Державний стандарт України).

431. ДСТУ ISO 8497:2005 Теплоізоляція. Визначення тепло передавальних властивостей теплоізоляції круглих труб в усталеному режимі (ISO 8497:1994, IDT) [Чинний від 2007-04-01]. – К. : Держстандарт України, 2007. – 19 с. (Державний стандарт України).

432. ДСТУ ISO 10211-1:2005 Теплопровідні включення в будівельних конструкціях. Обчислення теплового потоку та поверхневої температури. Частина 1. Загальні методи (ISO 10211-1:1995, IDT) [Чинний від 2008-03-01]. – К. : Держстандарт України, 2008. – 38 с. (Державний стандарт України).

433. ДСТУ ISO 10211-2:2005 Теплопровідні включення в будівельних конструкціях. Обчислення теплових потоків і поверхневих температур. Частина 2. Лінійні теплопровідні включення (ISO 10211-2:2001, IDT) [Чинний від 2008-03-01]. – К. : Держстандарт України, 2008. – 12 с. (Державний стандарт України).

434. ДСТУ ISO 6946:2007 Будівельні конструкції та елементи. Тепловий опір і коефіцієнт теплопередавання. Методика розраховування (ISO 6946:1996,

IDT) [Чинний від 2009-10-01]. – К. : Держстандарт України, 2012. – 19 с. (Державний стандарт України).

435. ДСТУ ISO 14683:2007 Теплопровідні включення в будівельних конструкціях. Лінійний коефіцієнт теплопередавання. Спрощені методики розраховування та стандартні значення (ISO 14683:1999, IDT) [Чинний від 2009-10-01]. – К. : Держстандарт України, 2012. – 20 с. (Державний стандарт України).

436. ДСТУ ISO 10291:2009 Скло будівельне. Визначення коефіцієнта теплопередавання склопакета в усталеному режимі. Метод захищеної гарячої пластини (ISO 10291:1994, IDT) [Чинний від 2011-01-01]. – К. : Держстандарт України, 2012. – 6 с. (Державний стандарт України).

437. ДСТУ EN 821-2:2010 Кераміка спеціальна технічна. Теплофізичні характеристики монолітної кераміки. Частина 2. Визначення коефіцієнта температуропровідності методом лазерного спалаху (або теплового імпульсу) (EN 821-2:1997, IDT) [Чинний від 2011-07-01] (не виданий).

438. ДСТУ EN 1159-1:2010 Кераміка технічна спеціальна. Теплофізичні характеристики керамічних композиційних матеріалів. Частина 1. Визначення коефіцієнта теплового розширення (EN 1159-1:2003, IDT) [Чинний від 2012-01-01]. – К. : Держстандарт України, 2011. – 8 с. (Державний стандарт України).

439. ДСТУ EN 1159-3:2010 Кераміка технічна спеціальна. Теплофізичні характеристики керамічних композиційних матеріалів. Частина 3. Визначення питомої теплоємності (EN 1159-3:2003, IDT) [Чинний від 2012-07-01]. – К. : Держстандарт України, 2011. – 32 с. (Державний стандарт України).

440. ДСТУ-П CEN/TS 1159-4:2010 Кераміка технічна спеціальна. Теплофізичні характеристики керамічних композиційних матеріалів. Частина 4. Визначення коефіцієнта теплопровідності (CEN/TS 1159-4:2004, IDT) [Чинний від 2012-01-01]. – К. : Держстандарт України, 2012. – 14 с. (Державний стандарт України).

441. ДСТУ ISO 9151:2010 Одяг для захисту від впливу теплоти та полум'я. Метод визначення індексу теплопередавання за дією полум'я (ISO 9151:1995, IDT) [Чинний від 2012-01-01]. – К. : Держстандарт України, 2011. – 11 с. (Державний стандарт України).


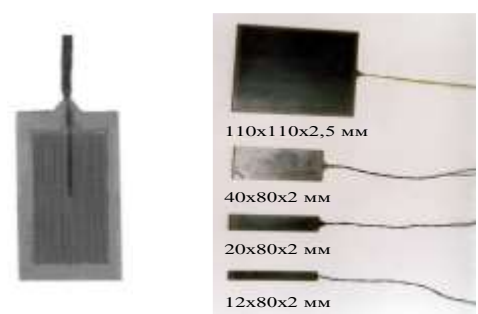
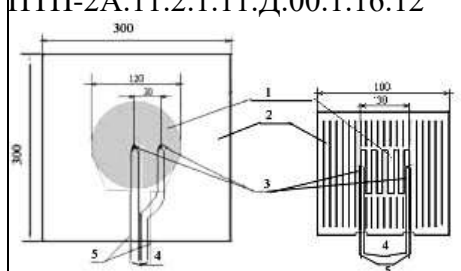
442. Метрологія. Опір теплопередаванню крізь огорожувальні конструкції будівель та споруд різного призначення : Методика виконання вимірювань комбінованим тепловізійно-теплометричним методом МВУ 048/06–2012. – К. : ІТТФ НАН України, 2012. – 25 с.

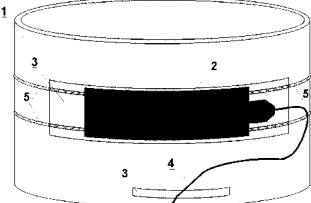
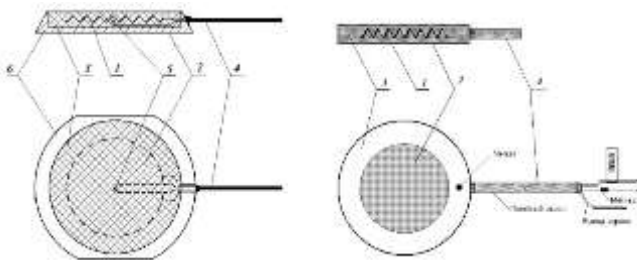
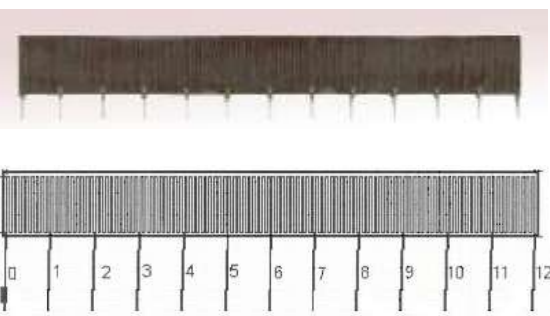
443. ГОСТ 530-2007 Кирпич и камни керамические. Технические условия. [Дата введения 2008-03-01]. – М. : Стандартиформ, 2008. – 39 с. (Межгосударственный стандарт).


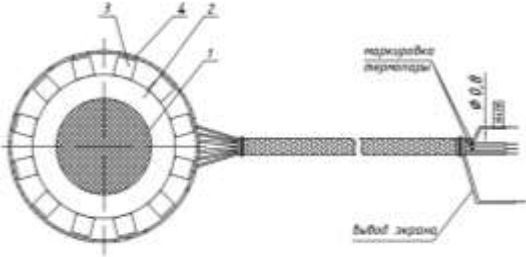
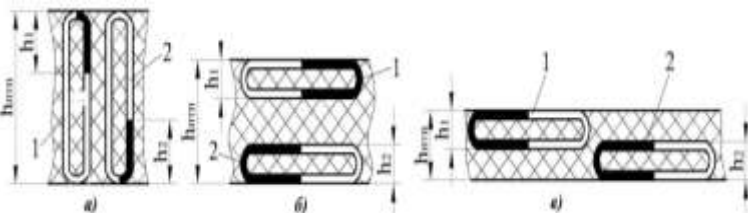
444. ДСТУ Б В.2.7-61-97 Будівельні матеріали. Цегла та камені керамічні. Рядові і лицьові. Технічні умови [Чинний від 1998-01-01]. – К. : Держкоммістобудування України, 1997. – 66 с. (Державний стандарт України).





ПРИЛОЖЕНИЕ А

Первичные преобразователи и переносные измерители теплового потока




Наименование, назначение, модель прибора	Технические характеристики
1	2
<p>Украина, Институт технической теплофизики НАН Украины, (г. Киев) Преобразователи теплового потока (далее – ПТП): термоэлектрические вида вспомогательной стенки общего назначения.</p>	
<p>Модели по ДСТУ 3756-98 (ГОСТ 30619-98)</p> 	<p>Диапазон измерения плотности теплового потока: от 10^{-3} Вт/м² до 10^6 Вт/м². Пределы допускаемой основной относительной погрешности: $\pm 4\%$. Диапазон значений рабочей температуры: от минус 200 °С до 300 °С. Коэффициент теплопроводности: от 0,1 Вт/(м·К) до 1,0 Вт/(м·К). Время реакции (по уровню 0,63): от 3 с до 40 с. Степень черноты: от 0,8 до 0,9. Габаритные размеры: – поперечный размер : от 10 мм до 400 мм, – толщина: от 0,5 мм до 10 мм.</p>
<p>ПТП, предназначенные для измерения на строительных конструкциях, модели ПТП-1Б.11.2.1.11.П.00.1.13.00.0</p> 	<p>В том числе:</p> <p>Диапазон измерения плотности теплового потока: от 10 Вт/м² до 10^3 Вт/м². Пределы допускаемой основной относительной погрешности: $\pm 4\%$. Диапазон значений рабочей температуры: от минус 30 °С до 40° С. Габаритные размеры: 110 мм × 110 мм × 2,5 мм, 40 мм × 80 мм × 2,0 мм, 20 мм × 80 мм × 2,0 мм, 12 мм × 80 мм × 2,0 мм.</p>
<p>ПТП с преобразователями температуры, предназначенные для применения в приборах по измерению коэффициентов теплопроводности по ГОСТ 7076-99, моделей ПТП-2А.11.2.1.11.Д.00.1.56.12.0, ПТП-2А.11.2.1.11.Д.00.1.16.12</p> 	<p>Диапазон измерения плотности теплового потока: от 10 Вт/м² до 10^3 Вт/м². Пределы допускаемой основной относительной погрешности: $\pm 3\%$. Диапазон значений рабочей температуры: от минус 60 °С до 80 °С. Термостойкость: до 250 °С. Габаритные размеры: – поперечный размер от 100 мм до 300 мм, – толщина (2,5\pm0,3) мм, – размер чувствительной зоны от 30 мм до 120 мм.</p>
<p>1 – чувствительный элемент ПТП; 2 – охранный элемент; 3 – термопары; 4 – выводы термопар; 5 – выводы чувствительного элемента ПТП</p>	

1	2
<p>ПТП гибкие, предназначенные для измерения на криволинейных поверхностях, моделей ПТП-1Б.11.2.1.12.П.00.1.30.00.0, ПТП-1Б.11.2.1.12.П.00.1.30.11.0</p>  <p>1 □ – труба; 2 □ – ПТП; 3 □ – липкая лента, крепящая ПТП и его выводы к поверхности трубы; 4 □ – выводы; 5 □ – шнур крепления к трубе</p>	<p>Диапазон измерения плотности теплового потока: от 10 Вт/м² до 2000 Вт/м². Пределы допускаемой основной относительной погрешности: 5%. Диапазон значений рабочей температуры: от минус 40 °С до 150 °С Степень черноты: от 0,91 до 0,92. Коэффициент теплопроводности: от 0,2 Вт/(м·К) до 0,3 Вт/(м·К). Габаритные размеры: – длина от 80 мм до 250 мм, – ширина от 20 мм до 75 мм, – толщина от 2 мм до 3 мм.</p>
<p>ПТП высокотемпературные, предназначенные для измерения на высокотемпературных объектах, моделей ПТП-1Б.18.2.1.11.Д.00.1.56.00.0 ПТП-1Б.18.2.1.11.Д.43.1.56.11.0</p>  <p>1 □ – батарея термоэлементов, 2 – □ теплочувствительная зона, 3 □ – охранная зона, 4 □ – выводы, 5 □ – термопара, 6 □ – корпус.</p>	<p>Диапазон измерения плотности теплового потока: от 0,2·10³ Вт/м² до 20·10³ Вт/м². Пределы основной допускаемой относительной погрешности: ±4%. Диапазоны значений рабочей температуры: от 0 °С до 150 °С, от 0 °С до 200 °С. Термостойкость: до 250 °С. Время реакции (по уровню 0,63): 20 с. Габаритные размеры: – диаметр от 20 мм до 60 мм, – толщина от 2 мм до 2,5 мм.</p>
<p>ПТП многосекционный, предназначенный для измерения плотности теплового потока и распределения ее значений по поверхности объекта, модели ПТП-1Б.11.2.12.11.П.00.0.13.00.0</p>  <p>0,1, ..., 12 – номера выводов от секций</p>	<p>Диапазон измерения плотности теплового потока: от 6,5 Вт/м² до 3·10³ Вт/м². Пределы основной допускаемой относительной погрешности: ±5%. Диапазон значений рабочей температуры: от минус 10 °С до 80 °С. Габаритные размеры: 240 мм × 28 мм × 1 мм. Количество секций □ 12.</p>

1	2
<p>ПТП многосекционный с преобразователями температуры, предназначенный для измерения плотности теплового потока и температуры и распределения их значений по поверхности объекта, модели</p> <p>ПТП-1Б.11.2.8.11.П.21.0.13.11.0 ПТП-1Б.11.2.6.11.П.21.0.16.12.0</p> 	<p>Диапазон измерения плотности теплового потока: от 10 Вт/м^2 до 10^3 Вт/м^2.</p> <p>Пределы основной допускаемой относительной погрешности: $\pm 5\%$.</p> <p>Диапазон значений рабочей температуры: от минус $10 \text{ }^\circ\text{C}$ до $60 \text{ }^\circ\text{C}$.</p> <p>Пределы основной допускаемой абсолютной погрешности измерения температуры: $\pm 0,5\text{K}$.</p> <p>Габаритные размеры:</p> <ul style="list-style-type: none"> –длина от 200 мм до 250 мм, –ширина от 80 мм до 150 мм, –толщина от 1 мм до 3 мм.
<p>ПТП с магнитными держателями, предназначенный для измерения на металлических поверхностях, модели</p> <p>ПТП–1Б.28.2.1.11.Д.13.1.56.12.0</p> 	<p>Диапазон измерения плотности теплового потока: от 100 Вт/м^2 до $5 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$.</p> <p>Предел основной допускаемой относительной погрешности: $\pm 5\%$.</p> <p>Диапазон значений рабочей температуры: от $20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $200 \text{ }^\circ\text{C}$.</p> <p>Термостойкость: до $250 \text{ }^\circ\text{C}$.</p> <p>Время реакции (по уровню 0,63): не более 10 с.</p> <p>Коэффициент эффективной теплопроводности: $(1,0 \pm 0,1) \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$</p> <p>Габаритные размеры:</p> <ul style="list-style-type: none"> – диаметр $(80 \pm 0,2) \text{ мм}$, – толщина $(3 \pm 0,2) \text{ мм}$, – диаметр чувствительной зоны 40 мм.
<p>1 – чувствительная зона ПТП; 2 – охранная зона; 3 – магниты по периметру; 4 – корпус (кольцо); 5 – выводы ПТП и термопары</p>	
<p>ПТП малоинерционный, выполненный с корректирующей термобатареей (ПТПКБ), предназначенный для измерения плотности нестационарного теплового потока, моделей</p>	<p>Диапазон измерения плотности теплового потока:</p> <p>от 10 Вт/м^2 до 1000 Вт/м^2, от 10^3 Вт/м^2 до $20 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$.</p> <p>Термостойкость до $250 \text{ }^\circ\text{C}$.</p> <p>Время реакции (по уровню 0,63) не более 1 с.</p>
	
<p>Варианты конструктивного исполнения ПТПКБ</p> <p>1 – основная термобатарея; 2 – корректирующая термобатарея</p>	

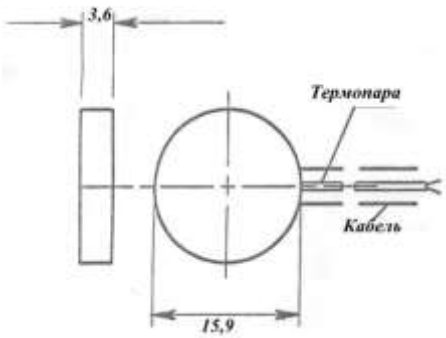
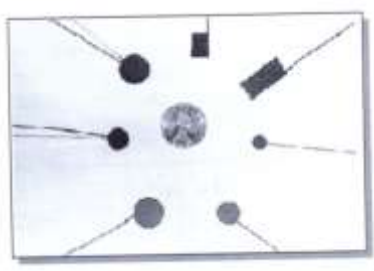

1	2
<p>ПТП низкотемпературный, предназначенный для исследования тепловых параметров в условиях низкой и криогенной температуры, модели ПТП–1Б.11.2.1.11.П.00.0.13.00.0</p> 	<p>Диапазон измерения плотности теплового потока: от 1 Вт/м² до 10 Вт/м². Пределы основной допускаемой относительной погрешности: ±5%. Диапазон значений рабочей температуры: от минус 150 °С до 70 °С. Время реакции (по уровню 0,63): не более 30 с. Габаритные размеры: 105 мм × 20 мм × 2 мм Имеет независимую от температуры чувствительность и коэффициент линейного расширения, соответствующий медной подложке.</p>
<p>ПТП многосекционный, предназначенный для измерения плотности теплового потока и температуры и определения их распределения по поверхности, модели ПТП–2Б.11.2.13.11.П.41.0.53.12.0</p> 	<p>Диапазон измерения плотности теплового потока: от 1·10³ Вт/м² до 600·10³ Вт/м². Пределы основной допускаемой относительной погрешности: ±5%. Диапазон значений рабочей температуры: от минус 10 °С до 150 °С. Габаритные размеры: 400 мм × 400 мм × 3 мм. Размер чувствительной зоны секций: 40 мм × 40 мм × 1,3 мм. Количество секций: 13.</p>
<p>Переносные цифровые приборы для измерения плотности теплового потока и температуры серии ИТП, в том числе:</p>	
	<p>Диапазоны измерения: – плотности теплового потока: от 20 Вт/м² до 1999 Вт/м², – температуры: от минус 50 °С до 150 °С. Погрешности измерения, %: $\delta_q = \pm (4 + 0,8(x_{\text{ИТП}} / x_{\text{ИЗМ}} - 1))$, где $x_{\text{ИТП}} = 2000 \text{ Вт/м}^2$; $\Delta_T = \pm 1 \text{ К}$.</p>
<p>Прибор модели ИТП–20М</p> 	<p>Диапазоны измерения плотности теплового потока: от 10 Вт/м² до 199,9 Вт/м², от 200 Вт/м² до 1999 Вт/м². Погрешности измерения, %: $\delta_q = \pm (4 + 0,8(x_{\text{ИТП}} / x_{\text{ИЗМ}} - 1))$, где $x_{\text{ИТП}} = 200 \text{ Вт/м}^2$, $x_{\text{ИЗМ}} = 2000 \text{ Вт/м}^2$; $\Delta_T = \pm 1 \text{ К}$.</p>


1	2
<p>Прибор модели ИТП–22 комплектуется несколькими ПТП различной чувствительности</p> 	<p>Диапазоны измерения плотности теплового потока: от 2,0 Вт/м² до 19,99 Вт/м², от 20,0 Вт/м² до 199,9 Вт/м², от 200,0 Вт/м² до 1999 Вт/м². Погрешности измерения, %: $\delta_q = \pm (8 + 0,8(x_{PP} / x_{ИЗМ} - 1))$, где $x_{PP} = 20$ Вт/м², $\delta_q = \pm (4 + 0,8(x_{PP} / x_{ИЗМ} - 1))$; где $x_{PP} = 200$ Вт/м², $x_{PP} = 2000$ Вт/м².</p>
<p>Прибор модели ИТП–22 К с возможностью подключения к персональному компьютеру</p> 	<p>Диапазоны измерения плотности теплового потока: от 50,0 Вт/м² до 399,9 Вт/м², от 400,0 Вт/м² до 1999 Вт/м². Погрешность измерения, %: $\delta_q = \pm (4 + 0,8(x_{PP} / x_{ИЗМ} - 1))$, где $x_{PP} = 100$ Вт/м², $x_{PP} = 2000$ Вт/м²</p>
<p>Прибор модели ИТП–23</p> 	<p>Диапазоны измерения: – плотности теплового потока: от 10 Вт/м² до 199,9 Вт/м², от 200 Вт/м² до 1999 Вт/м², – температуры: от минус 50 °С до 150 °С. Погрешности измерения: $\delta_q = \pm (4 + 0,8(x_{PP} / x_{ИЗМ} - 1))$, где $x_{PP} = 200$ Вт/м²; $x_{PP} = 2000$ Вт/м²; $\Delta_T = \pm 0,3$ К в диапазоне от минус 30 °С до 30 °С, $\Delta_T = \pm 1$ К в диапазонах: от минус 50 °С до минус 30 °С, от 30 °С до 150 °С.</p>
<p>Прибор модели ИТП–23М</p> 	<p>Диапазоны измерения: – плотности теплового потока: от 10,0 Вт/м² до 199,9 Вт/м², от 200,0 Вт/м² до 1999 Вт/м², – температуры поверхности: от 0 °С до 150 °С, – температуры воздуха от 0 °С до 60 °С. Погрешности измерения: $\delta_q = \pm (4 + 0,8(x_{PP} / x_{ИЗМ} - 1))$, где $x_{PP} = 200$ Вт/м², $x_{PP} = 2000$ Вт/м²;</p>

1	2
<p>Прибор модели ИТП-24 Предназначен для определения теплового сопротивления и сопротивления теплопередаче через ограждающие конструкции (ОК) по результатам измерения плотности теплового потока через ОК, разности температуры обеих поверхностей ОК и воздуха по обе стороны ОК.</p>	<p>Диапазоны измерения: – плотности теплового потока: от 2,0 Вт/м² до 19,9 Вт/м², от 10,0 Вт/м² до 199,9 Вт/м², – разности значений температуры: ± 50 К. Погрешности измерения: $\delta_q = \pm (8 + 0,8(x_{ПР} / x_{ИЗМ} - 1))$, где $x_{ПР} = 20$ Вт/м², $\delta_q = \pm (4 + 0,8(x_{ПР} / x_{ИЗМ} - 1))$, где $x_{ПР} = 200$ Вт/м²; $\Delta_{ДТ} = \pm 0,3$ К.</p>
<p>Россия, СКБ "Стройприбор", (г. Челябинск) Измеритель плотности теплового потока, предназначенный для выполнения измерения по ГОСТ 25380-82, модели ИТП-МГ4 "Поток"</p> 	<p>Предел измерения плотности теплового потока: 300 Вт/м². Диапазон измерения температуры: от минус 50 °С до 100 °С. Погрешности измерения, %: $\delta_q = \pm (3,5 + q_{ПР} / q_{ИЗМ})$, где $q_{ПР} = 300$ Вт/м², $\Delta_T = \pm 0,2$ К. Габаритные размеры:– электронного блока 177 мм × 90 мм × 30 мм, – ПТП Ø 27 мм × 2 мм</p>
<p>Россия, ООО "Техноцентрприбор", (г. Москва) Установка модели ИПП-3МК для контроля плотности теплового потока с интерфейсом RS-232 для связи с компьютером</p> 	<p>Предел измерения плотности теплового потока: 9999 Вт/м². Разрешение: 1 Вт/м². Предел измерения температуры: 200 °С. Разрешение: 1К. Приведенная погрешность измерения плотности теплового потока: 5 %. (Более подробная информация отсутствует)</p>
<p>Россия, ОАО "Эталон", (г. Омск) Многоканальный измеритель модели ИТ-2 для измерения напряжения (мВ), плотности теплового потока (Вт/м²) и температуры (°С)</p> 	<p>Количество измерительных каналов: 16, 32, 48, 64, 80, 96. Пределы основной допускаемой абсолютной погрешности: $\pm (5 + 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot (U_{ИЗМ}))$, где $U_{ИЗМ}$ – значение измеренного напряжения, мкВ. Габаритные размеры электронного блока: 250 мм × 110 мм × 355 мм. (Более подробная информация отсутствует).</p>

1	2
<p>Преобразователь плотности теплового потока ПТП-03</p> 	<p>Предел измерения плотности теплового потока 500 Вт/м². Погрешность не более 10%. Время реакции (по уровню 0,63): 60с. Габаритные размеры: 110 мм × 30 мм × 4 мм.</p>
<p>Измеритель плотности теплового потока и температуры ИТП-11 с энергонезависимой памятью для хранения измерительной информации после выключения прибора с возможностью ее передачи в компьютер через интерфейс RS-232</p> 	<p>Предел измерения плотности теплового потока: 1000 Вт/м². Диапазоны измерения температуры: от минус 50 °С до 1300 °С (ТХА), от минус 50 °С до 800 °С (ТХК). Основная абсолютная погрешность измерения плотности теплового потока: 0,4 Вт/м² – 4 Вт/м². (в зависимости от коэффициента преобразования). Основная абсолютная погрешность измерения температуры: ± 1,5 К. Габаритные размеры : – электронного блока 129 мм × 75 мм × 30 мм.</p>
<p>Россия, ОАО Челябинский завод "Термоприбор" (г. Челябинск)</p>	
<p>Приборы моделей ИТП-МГ4.01 «ПОТОК» и ИТП-МГ4.03 «ПОТОК» предназначены для измерения плотности теплового потока и температуры на ограждающих конструкциях (ОК), а также для определения сопротивления теплопередаче и теплового сопротивления ОК по ГОСТ 26254-84 и ГОСТ 26602.1-99</p>	<p>Диапазон измерения плотности теплового потока: от 5 Вт/м² до 999 Вт/м². Диапазон измерения температуры: от минус 30 °С до 100 °С. Погрешности измерения: – плотности теплового потока: ±(5–7)%, – температуры: ±0,2 К. Количество сигналов измерения: – плотности теплового потока: 1–3, – температуры: 2. Связь с компьютером через RS-232.</p>
	<p>Габаритные размеры: – электронного блока 175 мм × 90 мм × 30 мм, – ПТП: Ø 27 мм × 2 мм, 80 мм × 40 мм × 2 мм, 80 мм × 20 мм × 2 мм, – термозондов: Ø 22 мм × 450 мм.</p>
<p>ИТП-МГ4.01</p>	<p>ИТП-МГ4.03</p>

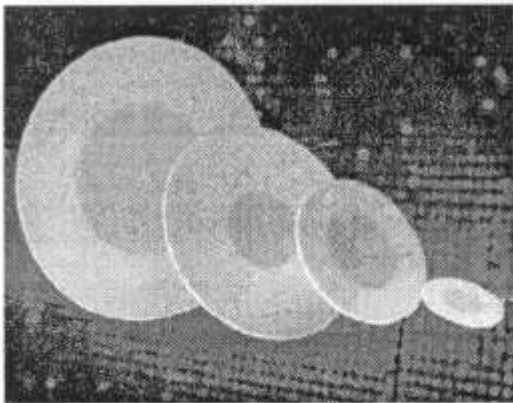
1	2
<p style="text-align: center;">Россия, АООТ "ПРАКТИК-НЦ", (г. Зеленоград, Моск. обл)</p> <p>Измеритель плотности теплового потока моделей ИПП-2, ИПП-2М</p>  <p style="display: flex; justify-content: space-around;">ИПП-2ИПП-2М</p>	<p>Пределы измерения плотности теплового потока: ИПП-2: 200 Вт/м² (500 Вт/м²), ИПП-2М: 2000 Вт/м². Диапазон индикации температуры: от минус 50 °С до 100 °С (ИПП-2), от минус 20 °С до 250 °С (ИПП-2М). Погрешность измерения, %:</p> $\delta_q = \pm(9 + 0,02(x_{\text{ИПП}} / x_{\text{ИЗМ}} - 1)),$ <p>где $x_{\text{ИПП}} = 2000$.</p> <p>Время реакции (на уровне 0,63): $\mu_q = 3,5$ мин, $\mu_T = 1$ мин.</p> <p>Габаритные размеры:</p> <ul style="list-style-type: none"> – блока индикации: 165 мм × 80 мм × 40 мм, – ПТП Ø27 мм × 2 мм (ИПП-2), – ПТП Ø36 мм × 2 мм (ИПП-2М), – температурного зонда: – Ø 4 мм × 55 мм (ИПП-2), – Ø 4 мм × 196 мм (ИПП-2М).
<p style="text-align: center;">Германия, фирма "WUNTRONIC", (München)</p> <p>Преобразователи теплового потока универсальные общего назначения</p> <p style="text-align: center;">В том числе:</p> <p>модели F-080-4, F-040-4, F-020-4, F-010-4, F-070-2, F-035-2, F-018-2, F-025-4, F-025-4, F-050-2, F-002-4</p>  <p>ПТП дисковые с преобразователем температуры, предназначенные для медико-биологических исследований, моделей FR-75 D, FR-0,25-6</p> 	<p>Предел измерения плотности теплового потока: 10⁴ Вт/м².</p> <p>Диапазон значений рабочей температуры: от минус 198 °С до 204 °С. Погрешность: ±2 %. Линейность: ±1 %.</p> <p>Габаритные размеры: (15,8-35,1) мм × (25,4 -35,1) мм × (1,58-2,54) мм.</p> <p>Предел измерения плотности теплового потока: 10⁴ Вт/м².</p> <p>Диапазон значений рабочей температуры: от минус 30 °С до 150 °С. Коэффициент теплопроводности: 0,31 Вт(м·К). Время реакции (по уровню 63): 10 с.</p> <p>Габаритные размеры: Ø 19 мм × 2 мм Ø 25 мм × 2 мм.</p>

1	2
<p>ПТП высокотемпературные с преобразователями температуры для измерений в промышленности и научных лабораториях в высокотемпературных средах моделей FCR-200, FCR-200M, FCR-200C, FCR-200K, FCR-200-M-K, FCA-200-C-K</p> 	<p>Предел измерения плотности теплового потока: 94500 Вт/м². Погрешность измерения: ±5 %. Коэффициент теплопроводности: 0,95 Вт(м·К). Время реакции (по уровню 63): 8 с. Термостойкость: 260 °С, 549 °С. Габаритные размеры: Ø 15,9 мм × 3,6 мм.</p>
<p>ПТП миниатюрные моделей FM и FRM</p> 	<p>Предел измерения плотности теплового потока: 12720 Вт/м². Предел рабочей температуры: 148,5 °С. Воспроизводимость: 0,5 %. Линейность: ±2 %. Время реакции (по уровню 0,63): 3 с. Степень черноты: 0,94. Габаритные размеры: Ø (6-12,7) мм × 1,8 мм, 8,6 мм × 19,1 мм × 2,2 мм, 7,4 мм × 10,7 мм × 1,5 мм.</p>
<p>Германия, фирма "Ahlborn MeB-und Regelungstechnik", (Holzkirchen)</p>	
<p>Микропроцессорный универсальный прибор для теплотехнических измерений модели THERM 7320-1</p> 	<p>Максимальная рабочая температура: 250 °С. Размеры ПТП: от 24 мм × 18 мм до 500 мм × 500 мм, Чувствительность ПТП: от 5 Вт/(м²·мВ). (Более подробная информация отсутствует)</p>

1	2
<p>Электронный измеритель плотности теплового потока, температуры и разности температуры, предназначенный для обнаружения дефектов теплоизоляции ограждающих конструкций, модель THERM 2273</p> 	<p>Предел измерения плотности теплового потока: 1999,9 Вт/м² (тип А) и 19999 Вт/м² (тип В). Диапазон измерения значений температуры: от минус 100 °С до 1370 °С. Разрешение: – по плотности теплового потока 0,1 Вт/м² для типа А и 1 Вт/м² для типа В; – по температуре 0,1 К. Габаритные размеры: – электронного блока 100 мм × 170 мм × 60 мм, – ПТП 30 мм × 25 мм × 1,5 мм.</p>

Нидерланды, фирма «TNO-TPD», (г. Дельфт)

Преобразователи теплового потока серии **PU**, выполненные с охранной зоной



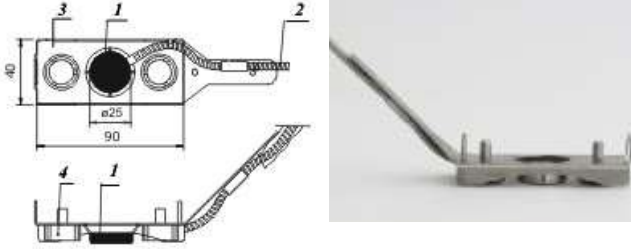
PU11	PU22	PU32	PU43	PU54
Толщина ,3 мм.				
Диаметр, мм:				
25	50	75	100	150
Размер чувствительной зоны, мм:				
10×10	20×20	25×25	30×30	50×50
Коэффициент преобразования, Вт/(м ² ·мВ):				
50	20	20	5,8	3,3
Тепловое сопротивление, 0,02 м ² ·К/Вт				
Погрешность калибровки: ± 5%.				
Предел рабочей температуры: 100 °С				
PU11Г	PU22Г	PU32Г	PU43Г	
Толщина, 1 мм.				
Диаметр, мм:				
25	50	75	100	
Размер чувствительной зоны, мм:				
Ø15	Ø25	Ø40	Ø50	
Коэффициент преобразования, Вт/(м ² ·мВ):				
125	33,1		6,7	
Тепловое сопротивление– 0,004 м ² ·К/Вт				
Погрешность калибровки: ± 5%.				
Предел рабочей температуры: 100 °С.				

Преобразователи теплового потока гибкие **Belt form**





Толщина: 1,2 мм.
 Габаритные размеры: 380 мм × 100 мм.
 Размер чувствительной зоны: 55 мм × 40 мм.
 Радиус изгиба: 30 мм.
 Погрешность: ±2,5%.
 Тепловое сопротивление: 3,5 · 10⁻² м²·К/Вт.
 Предел рабочей температуры: 100 °С.

1	2																														
<p>Преобразователи теплового потока серии НТ</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Модель</th> <th>EPHT 10</th> <th>S41T</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Толщина, мм</td> <td>1,5</td> <td>1,2</td> </tr> <tr> <td>Диаметр, мм</td> <td>25</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>Чувствительная зона, мм</td> <td>1×10</td> <td>40×40</td> </tr> <tr> <td>Коэффициент преобразования, т/(м²·мВ)</td> <td>1000</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>Погрешность, %</td> <td>10</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Тепловое сопротивление, м²·К/Вт</td> <td>0,0015</td> <td>0,0050</td> </tr> <tr> <td>Предел рабочей температуры, °С</td> <td>250</td> <td>250</td> </tr> </tbody> </table>	Модель	EPHT 10	S41T	Толщина, мм	1,5	1,2	Диаметр, мм	25	100	Чувствительная зона, мм	1×10	40×40	Коэффициент преобразования, т/(м ² ·мВ)	1000	20	Погрешность, %	10	5	Тепловое сопротивление, м ² ·К/Вт	0,0015	0,0050	Предел рабочей температуры, °С	250	250						
Модель	EPHT 10	S41T																													
Толщина, мм	1,5	1,2																													
Диаметр, мм	25	100																													
Чувствительная зона, мм	1×10	40×40																													
Коэффициент преобразования, т/(м ² ·мВ)	1000	20																													
Погрешность, %	10	5																													
Тепловое сопротивление, м ² ·К/Вт	0,0015	0,0050																													
Предел рабочей температуры, °С	250	250																													
<p>Преобразователь «черно-белый» для измерения радиационной и конвективной составляющих сложного теплового потока серии RadCon.</p> <p style="text-align: center;">RadCon-M RadCon-R RadCon-C</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th>RadCon-M</th> <th>RadCon-R</th> <th>RadCon-C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">Габаритные размеры, мм</td> </tr> <tr> <td>65мм×65мм×13мм</td> <td>60мм×40мм×40мм</td> <td>80мм×70мм×40мм</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Погрешность калибровки: ±10%.</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Предел рабочей температуры: 250 °С.</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Время реакции: 0,5 с.</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Наличие преобразователя температуры (ПТ):</td> </tr> <tr> <td>внутренний наружный</td> <td>внутренний</td> <td>внутренний</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Наличие принудительного теплоотвода:</td> </tr> <tr> <td>нет</td> <td>да</td> <td>да</td> </tr> </tbody> </table>	RadCon-M	RadCon-R	RadCon-C	Габаритные размеры, мм			65мм×65мм×13мм	60мм×40мм×40мм	80мм×70мм×40мм	Погрешность калибровки: ±10%.			Предел рабочей температуры: 250 °С.			Время реакции: 0,5 с.			Наличие преобразователя температуры (ПТ):			внутренний наружный	внутренний	внутренний	Наличие принудительного теплоотвода:			нет	да	да
RadCon-M	RadCon-R	RadCon-C																													
Габаритные размеры, мм																															
65мм×65мм×13мм	60мм×40мм×40мм	80мм×70мм×40мм																													
Погрешность калибровки: ±10%.																															
Предел рабочей температуры: 250 °С.																															
Время реакции: 0,5 с.																															
Наличие преобразователя температуры (ПТ):																															
внутренний наружный	внутренний	внутренний																													
Наличие принудительного теплоотвода:																															
нет	да	да																													
<p>Нидерланды, «HUKSEFLUX», (г. Дельфт)</p>																															
<p>Преобразователь теплового потока с тонкопленочным нагревателем для самокалибровки модели HFP 01 SC</p> 	<p>Предел измерения плотности теплового потока: 150 Вт/м².</p> <p>Коэффициент преобразования: 20 Вт/(м²·мВ).</p> <p>Диапазон значений рабочей температуры: от минус 30 °С до 70 °С.</p> <p>Погрешность: ±3%.</p> <p>Габаритные размеры:</p> <ul style="list-style-type: none"> – диаметр 80 мм, – толщина 5 мм. 																														
<p>Преобразователь теплового потока с охранной зоной модели HFP 01</p>  <p>1 – чувствительная зона, 2 – охранная зона, 3 – кабель</p>	<p>Предел измерения плотности теплового потока: 2000 Вт/м².</p> <p>Диапазон значений рабочей температуры: от минус 30 °С до 70 °С.</p> <p>Тепловое сопротивление: 6,25·10⁻³ К·м²/Вт.</p> <p>Погрешность: ±5%.</p> <p>Габаритные размеры:</p> <ul style="list-style-type: none"> – диаметр 80 мм, – толщина 5 мм. 																														

1	2
<p>Ультрочувствительный ПТП модели НФР 03</p>  <p>1 – чувствительная зона, 2 – охранный зона, 3 – кабель</p> <p>Преобразователь теплового потока высокотемпературный, предназначенный для исследования процесса плавления алюминия с возможностью крепления на металлической поверхности печи с помощью магнитов, модели НФ 01</p>  <p>1 – ПТП, 2 – кабель выводов, 3 – корпус, 4 – магниты</p> <p>ПТП модели VT для измерения теплового потока (в Вт)</p> 	<p>Предел измерения плотности теплового потока: 2000 Вт/м². Чувствительность: 0,05 мВ/(Вт м²). Тепловое сопротивление : 6,25·10³ К·м²/Вт. Диапазон значений рабочей температуры: от минус 30 °С до 70 °С . Погрешность: ±5%. Габаритные размеры: – диаметр 172 мм, – толщина 5 мм.</p> <p>Диапазон измерения плотности теплового потока: от 50 Вт/м² до 50·10³ Вт/м² Коэффициент преобразования: 2000 Вт/(м²·мВ). Диапазоны значений рабочей температуры: – с кабелем в металлическом экране: от минус °С до 800 °С, – кабелем в тефлоновой изоляции: от минус °С до 240 °С, – системой магнитных держателей: до 550 °С. Погрешность: ±3%. Габаритные размеры: 90 мм × 40 мм × 10 мм.</p> <p>Диапазоны значений рабочей температуры: от минус 50 °С до 160 °С. Чувствительность к тепловому потоку: от 7,4 мВ/Вт до 10 мВ/Вт. Время реакции: 90 с. Габаритные размеры: – площадь 650 мм², – толщина от 0,6 мм до 5 мм.</p>
<p align="center">Швейцария, "Лаборатория физической электроники"</p> <p>ПТП для измерения теплового потока (экспериментальный образец)</p> 	<p>Максимальная рабочая температура: 100 °С. Чувствительность к тепловому потоку: 60 /Вт. Время реакции: 1 с. Габаритные размеры: 350 мм × 35 мм × 1,5 мм.</p>

1	2												
<p>Англия, фирма "RHOPPOINT LTD"</p>													
<p>Преобразователь теплового потока тонкопленочный Microfoil</p> 	<p>Пределы измерения плотности теплового потока: 567 кВт/м², 284 кВт/м², 113 кВт/м². Коэффициенты преобразования: 167 Вт/(м²·мВ), 52,6 Вт/(м²·мВ), 15,9 Вт/(м²·мВ). Диапазон значений рабочей температуры: от минус 200 °С до 260 °С. Время реакции: 0,02 с, 0,06 с, 0,4 с. Габаритные размеры: (7–20) мм × (13–30) мм . Толщина: 0,076 мм; 0,127 мм, 0,305 мм.</p>												
<p>Франция, фирма "Captec Enterprise", (Lille)</p>													
<p>Преобразователи теплового потока</p> 	<p>Предел измерения плотности теплового потока: 5·10⁵ Вт/м². Диапазон значений рабочей температуры: от минус 180 °С до 250 °С. Время реакции: 0,3 с.</p> <table border="1" data-bbox="884 902 1528 1171"> <thead> <tr> <th>Габаритные размеры, мм</th> <th>Чувствительность мВ·м²/Вт</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10 × 10</td> <td>3·10⁻⁴</td> </tr> <tr> <td>50 × 50</td> <td>7,5·10⁻³</td> </tr> <tr> <td>100 × 100</td> <td>0,03</td> </tr> <tr> <td>150 × 150</td> <td>0,078</td> </tr> <tr> <td>300 × 300</td> <td>0,18</td> </tr> </tbody> </table>	Габаритные размеры, мм	Чувствительность мВ·м ² /Вт	10 × 10	3·10 ⁻⁴	50 × 50	7,5·10 ⁻³	100 × 100	0,03	150 × 150	0,078	300 × 300	0,18
Габаритные размеры, мм	Чувствительность мВ·м ² /Вт												
10 × 10	3·10 ⁻⁴												
50 × 50	7,5·10 ⁻³												
100 × 100	0,03												
150 × 150	0,078												
300 × 300	0,18												
<p>США, фирма «Reading thermal systems»</p>													
<p>Устройство с двумя преобразователями теплового потока («черным» и «белым») для измерения плотности суммарного теплового потока, его радиационной и конвективной составляющих и коэффициента теплообмена, с выходом на компьютер модели HFM 6 и HFM 7</p> 	<p>Погрешность: ±5%. Диапазон значений рабочей температуры: от минус от 50 °С до 450 °С. (Более подробная информация отсутствует)</p>												
<p>США, фирма "Vatell"</p>													
<p>Преобразователи теплового потока</p> 	<p>Диапазон значений рабочей температуры: от минус 30 °С до 850 °С. Минимальная измеряемая плотность теплового потока: 0,01 Вт/м², 0,25 Вт/м². Время реакции: 4 мкс, 8 мкс. Чувствительность: S=0,095–0,474 мВ/Вт/м². Толщина: 12,7 мм. Диаметр: 6,35 мм.</p>												

1	2
Япония, фирма "Kyoto electronics manufacturing", (г. Киото)	
<p>Измеритель теплового потока и температуры модели HFM-215</p> 	<p>Предел измерения плотности теплового потока: 10^5 Вт/м². Диапазоны измерения температуры: от минус 200 °С до 1200 °С (Al), от минус 200 °С до 400 °С (Cu). Диапазон значений рабочей температуры от 0 °С до 40 °С. Каналов измерения: 6. Габаритные размеры: 152 мм × 240 мм × 225 мм. Непрерывное сохранение данных по шести каналам в течение 27 часов с периодом сохранения 1 с. Позволяет подключать десятки преобразователей теплового потока или температуры различных типов и работать в сети и в интернете, объединяя их в гибко программируемые комплексы.</p>
<p>Преобразователи теплового потока различного назначения моделей ER2,6; EM1; E500B,S; E500B, S-20;EW; E750; E750S; EG; ET;EF-TS; EV; EC; ER2/HS</p>	<p>Диапазоны плотности теплового потока, Вт/м²: от 10 Вт/м² до 10^5 Вт/м² Диапазоны значений рабочей температуры, от минус 40°С до 900°С; в зависимости от модели.</p>
	

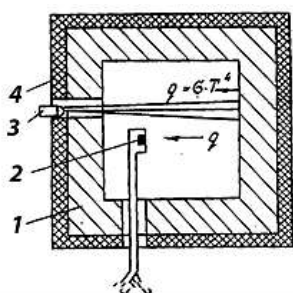
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Описание основных элементов приборного оснащения стендов для аттестации средств измерения (СИ) теплового потока

Б.1 – Аппаратура для радиационного градуирования

Б.1.1 Источники теплового излучения (ИТИ)

Для радиационного градуирования СИ теплового потока в качестве источника некогерентного излучения нашли применение электрические источники оптического излучения (лампы накаливания, газоразрядные лампы в соответствии с ГОСТ 15049*) [Б.1]), и газоразрядные импульсные источники высокоинтенсивного оптического излучения (импульсные лампы в различном конструктивном исполнении согласно ГОСТ 16803*) [Б.2]). К числу некогерентных ИТИ относятся также излучатели типа АЧТ и светодиоды. Например, в качестве ИТИ типа АЧТ описана печь с совершенной изоляцией стенок [Б.3, Б.4], схема измерения которого представлена на рисунке Б.1.



- 1 – печь-излучатель;
- 2 – аттестуемый ПТП (или ПТП);
- 3 – радиационный пирометр;
- 4 – теплоизолированная стенка

Рисунок Б.1 – Схема аттестации ПТП по методу с АЧТ и применением радиационного пирометра [Б.3, Б.4].

В установившемся тепловом состоянии кладка печи по эффекту суммарного излучения близка к АЧТ, имеющему с ним одинаковую температуру. Эта особенность является следствием сравнительно низкой теплопроводности огнеупора, благодаря чему тепловое напряжение на внутренней поверхности огнеупорных стенок близко к нулю, а эффективный тепловой поток, направленный к поверхности и от нее, приблизительно одинаковый [Б.5].

По результатам одновременного измерения выходного сигнала аттестуемого ПТП и температуры стенки печи радиационным пирометром находят искомую функцию преобразования ПТП. Практически такую аттестацию можно осуществить не только на лабораторном стенде, но и в условиях промышленной печи [Б.3], применяя при этом оптический пирометр, чтобы избежать влияния дымовых газов продуктов сгорания.

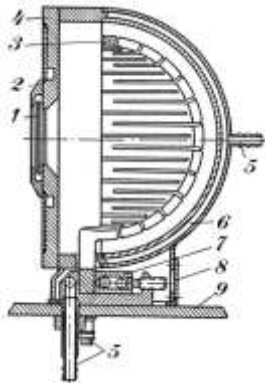
Излучатели, выполненные в виде модели АЧТ, бывают однокамерные и многокамерные (сферической и цилиндрической формы) [Б.6-Б.9]. С их помощью получают поток теплового излучения в широком диапазоне значений плотности (от 1 кВт/м² до 3330 кВт/м²).

Однако, чаще в качестве ИТИ применяют различные инфракрасные нагреватели, обеспечивающие требуемый диапазон потока теплового излучения. Например, излучателем потока с интенсивностью от 0,5 кВт/м² до 2 кВт/м² может служить осветительная лампа накаливания общего назначения, до 10 кВт/м² – промышленные лампы для инфракрасной сушки типа ЭС, до 60 кВт/м² – трубчатые лампы типа КИ-220-1000. С целью создания направленного потока две или более лампы располагают внутри полированного водоохлаждаемого отражателя. При наборе ламп в сплошную панель в режиме кратковременного форсажа удается получить плотность потока до 200 кВт/м² [3]. Дуговая ксеноновая лампа ДКсШ-1000 мощностью 1000 Вт с эллипсоидальным зеркалом для концентрации потока, а также лампы накаливания с галогенным циклом (КГК и КГМ) мощностью (1 – 5) кВт позволяют получать поток теплового излучения плотностью до

*) Примечание. Стандарты СССР (ГОСТ) являются действующими в Украине согласно специальному соглашению между странами-участницами СНГ.

100 кВт/м² и в отдельных случаях до 400 кВт/м² [Б.10]. Хотя собственная инерционность электрических ламп с вольфрамовыми нитями измеряется секундами, описанные устройства в связи с прогревом зеркал и сопряженных деталей фактически выходят на стационарный режим от 5 мин. до 10 мин.

Для получения потоков плотностью более 200 кВт/м² не существует стандартной серийной аппаратуры. ИТИ высокой интенсивности, как правило, индивидуальной разработки. В [Б.6] описан малоинерционный графитовый ИТИ, схема которого приведена на рисунке Б.2.



- 1 – кварцевое окно;
- 2 – кожух газового охлаждения окна;
- 3 – нагреватели;
- 4 – передняя стенка;
- 5 – штуцера охлаждения;
- 6 – сферическое зеркало;
- 7 – зажим-токоподвод;
- 8 – крышка;
- 9 – монтажная плита.

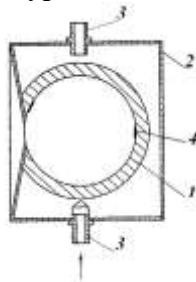
Рисунок Б.2 – Схема малоинерционного графитового ИТИ [Б.6].

В качестве материала излучающего элемента выбран графит, покрытый слоем карбида кремния. ИТИ изготовлен в виде полусферической медной чаши, в стенках которой предусмотрены каналы для протока охлаждающей воды. Изоляция оформлена в виде полусферы, закрываемой передней стенкой с амбразурой, которая закрыта кварцевым стеклом, а внутренний объем печи заполняется аргоном. Такая печь рассчитана на потоки свыше 1000 кВт/м², однако до расчетной мощности не была доведена в связи с подгоранием уплотнения по периметру кварцевого окошка [Б.6], достигнутая плотность превысила 500 кВт/м².

В ИТИ с вольфрамовой спиралью и оптической системой в изображении получают потоки практически до 200 кВт/м². В ксеноновых лампах черная плазма имеет температуру, доходящую до 6000 К, а спектральный состав излучения близок к солнечному. Плотность излучения с поверхности плазмы этих ламп может достигать до $8 \cdot 10^4$ кВт/м², что в оптических системах с большой светосилой позволяет получить в изображении плотность потока до 10^4 кВт/м².

Таким образом, с помощью стандартных и нестандартных излучателей накаливания получают равномерный стабильный поток теплового излучения, плотность которого может достигать 10^4 кВт/м².

Кроме теплового излучения высокой интенсивности в некоторых современных технологиях возникает задача измерения и непрерывного длительного контроля облученности объектов малым тепловым потоком плотностью менее 300 Вт/м². Для метрологического обеспечения таких измерений в ИТТФ в 80-е годы был разработан и эксплуатировался комплекс аппаратуры, в состав которого входил специальный низкотемпературный ИТИ [Б.11], схема которого приведена на рисунке Б.3. Он представляет



- 1 – медная сфера;
- 2 – корпус излучателя;
- 3 – штуцера охлаждения;
- 4 – платиновый термометр сопротивления

Рисунок Б.3 – Схема низкотемпературного ИТИ [Б.11].

собой массивную полу медную сферу, помещенную в охлаждаемый цилиндрический корпус. Значение плотности потока теплового излучения определяют, исходя из закона Стефана-Больцмана по температуре внутренней поверхности сферы, измеряемой с помощью

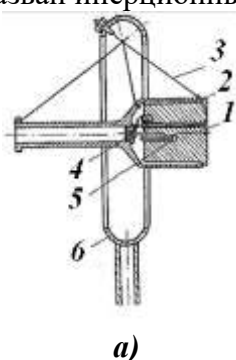
термометров сопротивления. В силу недостаточной изотермичности излучающей полости погрешность задания плотности потока теплового излучения достигала 3 %.

Б. 1.2 Прецизионные приемники теплового излучения

Вторую составляющую радиационной аттестации – получение информации о значениях теплового потока или его плотности, – реализуют при помощи прецизионных радиометров (ПТИ), абсолютных или эталонных. Промышленность выпускает различные приемники излучения, используемые в измерительных схемах в качестве первичных преобразователей энергетических величин непрерывного и импульсного оптического излучения. Эти же ПТИ составляют основу измерительных приборов, спектральный диапазон которых, кроме видимой области, охватывает УФ-область вплоть до вакуумного ультрафиолета (до 0,01 мкм) и ИК-область (до 40 мкм).

В [Б.6; Б.11-Б.17] описаны различные конструкции ПТИ, применяемые в составе установок для радиационной аттестации плоских ПТП.

Радиометр, конструктивная схема и внешний вид которого приведены на рисунке Б.4, назван инерционным, хотя по существу относится к приборам энтальпийного типа [Б.6].



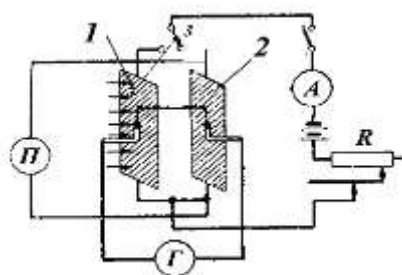
- 1 – блок; 2 – защитная "рюмка";
- 3 – струны-растяжки; 4 – игла;
- 5 – термопары; 6 – несущее кольцо

- а) – конструктивная схема;
- б) – внешний вид

Рисунок Б.4 – Инерционный радиометр [Б.6]

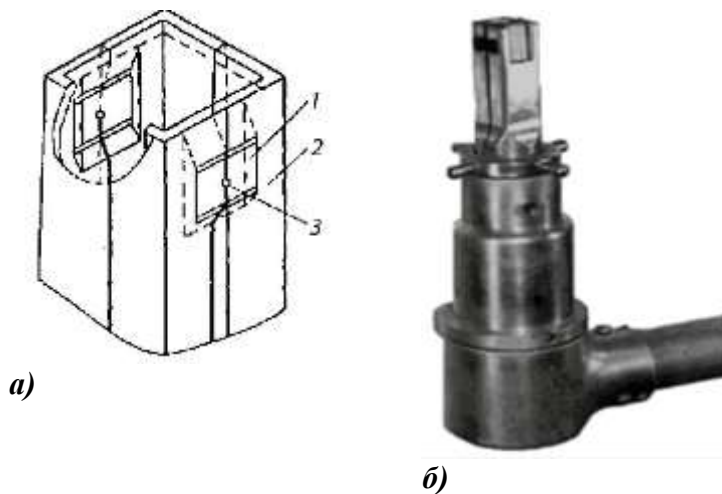
Основным элементом его является массивный медный цилиндр, один торец которого подвергается облучению, а остальные поверхности тщательно теплоизолированы и снаружи отполированы. Для определения хода температуры в блок заделаны шесть хромель-алюмелевых термопар. Один из спаев находится на глубине, равной $1/\sqrt{3}$ высоты цилиндра. В этой точке при постоянной плотности воспринимаемого теплового потока ход температуры совпадает с ходом средней интегральной по блоку температуры [Б.13]. Таким ПТИ измеряли поток плотностью до 300 кВт/м^2 . Подобный прибор, выполненный с относительно малой массой приемного тела [Б.16], позволяет измерять поток плотностью до 2 кВт/м^2 .

Для измерения потока плотностью до 20 кВт/м^2 и 300 кВт/м^2 в [Б.6, Б.17] описаны абсолютные радиометры компенсационного типа. Измерительная схема прибора на поток до 20 кВт/м^2 приведена на рисунке Б.5, а конструктивная схема тепловой головки и внешний вид радиометра на 300 кВт/м^2 – на рисунке Б.6.



- А – амперметр, Г – гальванометр, П – потенциометр,
- Р – электрическое сопротивление;
- 1 – манганиновая пластина, обогреваемая радиационным потоком;
- 2 – манганиновая пластина, обогреваемая электрическим током;
- 3 – дифференциальная термопара

Рисунок Б.5 – Измерительная система компенсационного радиометра на 20 кВт/м^2 [Б.6]



1 – рабочая пластина,
2 – шина,
3 – спай дифференциальной
термопары

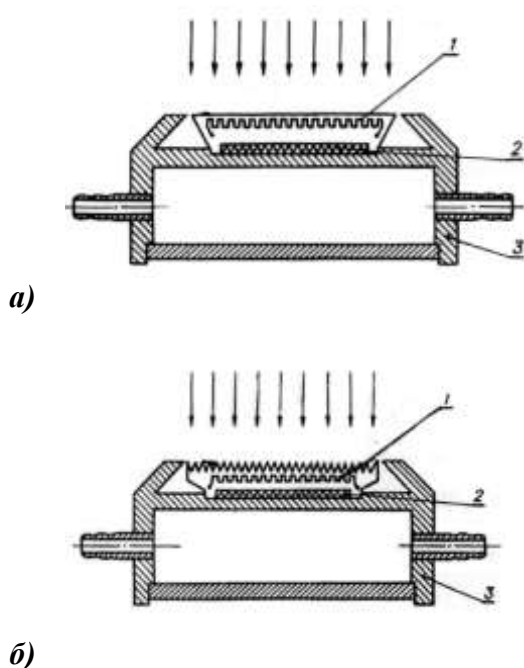
а) – конструктивная схема тепловой
головки;
б) – внешний вид радиометра

Рисунок Б.6 – Компенсационный
радиометр до 300 кВт/м^2 [Б.6].

Второй радиометр имеет две нихромовые идентичные пластины, обогреваемые одновременно: одна – измеряемым потоком теплового излучения, другая – электрическим током. Теплота от внутренних поверхностей отводится конвекцией за счет принудительного потока воздуха со скоростью 100 м/с .

Одним из недостатков компенсационных радиометров является низкая чувствительность дифференциальной термопары. Автор [Б.17] увеличил число спаев до четырех, что незначительно повысило чувствительность термопары.

Кардинальное улучшение было достигнуто применением в качестве чувствительного элемента батареи термоэлементов [Б.6;Б.18], в которой число спаев на три порядка превышает названные цифры. Прибор, схемы и внешний вид которого представлены на рисунке Б.7, состоит из теплоприемника с плоской или зубчатой тепловоспринимающей поверхностью, батареи термоэлементов, экранирующей бленды, корпуса проточного холодильника и электрического нагревателя.



в)

а) – схема радиометра с плоской
тепловоспринимающей поверхностью;
б) – схема радиометра с тепловоспринимающей
поверхностью в виде АЧТ;
в) – внешний вид абсолютного радиометра;

1 – нагреватель; 2 – ПТП; 3 – охлаждаемый
корпус

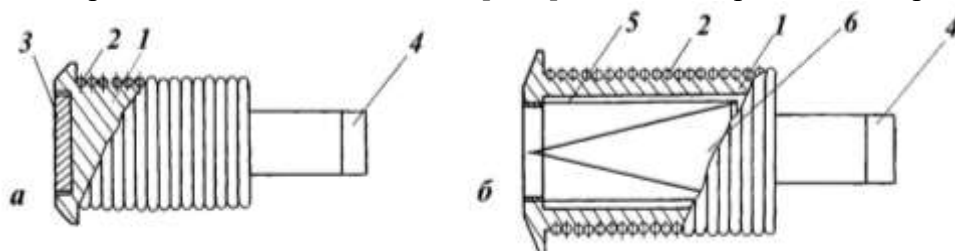
Рисунок Б.7 – Абсолютный радиометр с энергетическим замещением [Б.18; Б.19]

Тепловое сопротивление термобатареи на два порядка выше, чем у приемного тела, изготовленного из материала с высокой теплопроводностью (меди). Поэтому практически безразлично, в какое место приемного тела подведена измеряемая энергия – обстоятельство, позволяющее взаимно замещать поглощенную тепловую радиацию энергией электрического

нагревателя. Приборы такого типа получили название радиометров с энергетическим замещением [Б.11; Б.18; Б.19]. Поскольку корпус охлаждается водой, температура которой равна температуре окружающего воздуха, погрешности, вносимые конвекцией и фоновым излучением, сведены к минимуму.

Приемная поверхность зубчатого радиометра является удовлетворительной моделью АЧТ [Б.20;Б.21] и ее степень черноты может быть принята равной единице с погрешностью не более 1 %. В связи с этим, плотность падающего теплового потока, измеряемого зубчатым радиометром, равна $q_{\text{ПАД}} = K_{3.Б} \cdot E_{3.Б}$, а измеряемого радиометром с плоской приемной поверхностью равна $q_{\text{ПАД}} = \alpha_{\text{П.Р}} \cdot K_{\text{П.Р}} \cdot E_{\text{П.Р}}$.

Для решения метрологических задач в условиях глубокого разрежения и жестких требований по стабильности характеристик, автономности и ресурсу разработаны две модели ПТИ с использованием в качестве чувствительного элемента батареи гальванических термоэлементов проволочных или пленочных [Б.11]. Их схемы приведены на рисунке Б.8.



а – ПТИ с проволочной термобатареей;

б – ПТИ с пленочной термобатареей

1 – металлический корпус, 2 – термозависимый нагреватель, 3 – проволочная дифференциальная гальваническая термобатарея, 4 – коммутационный разъем, 5 – пленочная дифференциальная гальваническая термобатарея, 6 – фольговый конический отражатель

Рисунок Б.8 – Схемы ПТИ для радиационной градуировки в условиях вакуума [Б.11]

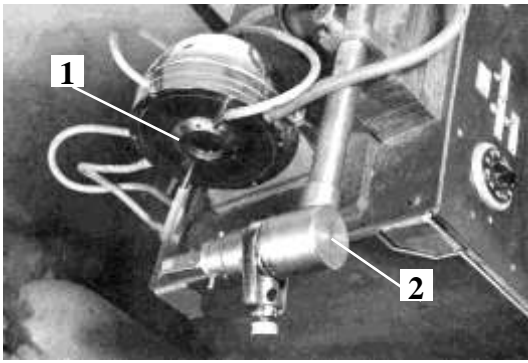
Обе модели предусматривают стабилизацию затененных спаев батареи термоэлементов (3 или 5) путем электротермостабилизации корпуса ПТИ с применением так называемого термозависимого нагревателя. Он представляет собой нагревательный элемент из металлической проволоки (никелевой), материал которой обладает высоким и стабильным во времени температурным коэффициентом сопротивления.

Разработкой ПТИ занимаются также и за рубежом, в таких странах как Франция, Нидерланды, Великобритания, США [Б.14; Б.15; Б.19-Б.26]. Некоторые из них приведены в приложении. А.

Б.1.3 Стенды для радиационной аттестации

Радиационную аттестацию, как правило, осуществляют на стендах и установках, основными узлами которых являются: ИТИ с системами обеспечения электропитания и охлаждения (термостатирования), измеритель температуры ИТИ либо измеритель плотности потока теплового излучения, а также измерительно-регистрирующая аппаратура [Б.6; Б.9; Б.14; Б.15; Б.19; Б.26-Б.37].

Для аттестации плоских одиночных ПТП [3] размерами $10 \times 10 \times 1$ мм при плотности потока теплового излучения от 50 кВт/м^2 до 500 кВт/м^2 предназначен радиационный стенд, описанный в [Б.6] и показанный на рисунке Б.9. Аттестуемый ПТП помещают в специальную кассету, закрепляемую на головке радиометра, и экспонируют тем же радиационным потоком, что и пластину радиометра. Градуирование партии одиночных ПТП выполняют в несколько этапов по сложной программе, что приводит к большим затратам времени. К другим недостаткам могут быть отнесены громоздкость стенда, сложный регламент работ, узкий диапазон задаваемой плотности теплового потока, ограниченность одним типоразмером градуируемых ПТП, термостойкость которых не ниже 100°C .



- 1 – печь-ИТИ с графитовым нагревателем (см. рис. Б.2);
2 – компенсационный радиометр (см. рис. Б.6)

Рисунок Б.9 – Радиационный стенд для градуирования одиночных ПТП [Б.6].

Для радиационной аттестации менее термостойких ПТП предназначен стенд, на котором отведение теплоты от ПТП осуществляется теплопроводностью пластины, на которой он установлен. Для измерения плотности теплового потока применяется выше описанный инерционный радиометр (см. рис. Б.4), более чувствительный, чем компенсационный, что позволяет снизить нижнюю границу диапазона измеряемых значений плотности теплового потока до 1 кВт/м^2 . Аттестуемый ПТП устанавливается на поверхность металлического холодильника, охлаждаемого проточной водой, закрепленного на координатнике таким образом, чтобы его поверхность с ПТП заняла нужное положение относительно излучателя.

В этих двух стендах облучение аттестуемого ПТП и радиометра производят попеременно. При этом возможные колебания плотности падающего потока излучения, приводящие к значительным погрешностям измерения, не фиксируются. Кроме того, стенды с электрической печью в качестве ИТИ не экономичны в связи с большими энергоемкостью и расходом воды на ее охлаждение.

Более экономичными являются стенды с ИТИ, набранным из трубчатых ламп, обеспечивающим диапазон плотности теплового потока от 100 Вт/м^2 до 10^4 Вт/м^2 , для измерения которой использован абсолютный радиометр с энергетическим замещением с плоской приемной поверхностью (см. рис. Б.7). Окрашенный чернью ПТП притирается на вакуумной смазке к поверхности медного холодильника, по конструкции подобного корпусу радиометра и охлаждаемого водой с температурой, равной температуре окружающего воздуха. ПТП и радиометр располагают под ИТИ таким образом, что их тепловоспринимающие поверхности находились в одной плоскости расположены симметрично середине ИТИ, чтобы оказаться в зоне одномерного теплового потока одинаковой плотности. Экспериментально установлено, что поле теплового потока по длине излучателя неравномерное, но симметрично относительно середины, а зона одномерности не более 20 %, что накладывает ограничение на поперечный размер аттестуемого ПТП (не более 30 мм).

Усовершенствованной моделью является показанная на рисунке Б.10 автоматизированная установка УГД [Б.19], представляющая собой радиационный компаратор, содержащий блок тепловых режимов, систему охлаждения и термостабилизации, пульт управления и измерительно-регистрирующую аппаратуру. Блок тепловых режимов, обеспечивающий создание дискретных рабочих режимов с фиксированной плотностью теплового потока в 1, 2, 4, 8 и 10 кВт/м^2 , состоит из лампового излучателя и двух идентичных термостатируемых холодильников, размещенных на установочной платформе. На одном холодильнике устанавливают градуируемый, а на другом – эталонный ПТП. Хороший тепловой контакт обеспечивают использованием вакуумной смазки. Идентичность степеней черноты поверхностей обоих ПТП, обращенных к излучателю, обеспечивают краской марки "черное тело" одного состава.

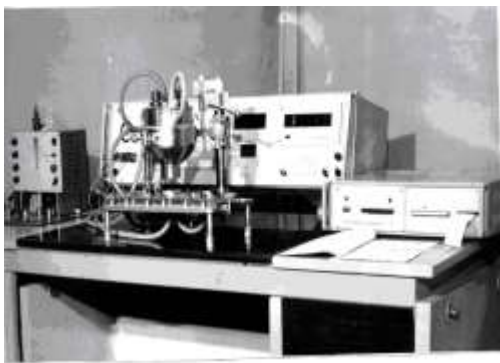


Рисунок Б.10 – Внешний вид радиационной установки УГД ИТТФ [Б.19]

Система охлаждения и термостабилизации, включающая термостат и водоохладитель, обеспечивает независимость от температуры водопроводной сети. Измерительно-регистрирующая аппаратура выдает значения градуировочных коэффициентов ПТП на цифровое табло или ленту цифropечатающего устройства. Градуирование производится при комнатной температуре ПТП диаметром от 6 мм до 35 мм с погрешностью $\pm 5\%$.

При термостатировании поверхностей радиометра и ПТП в температурном равновесии с окружающей средой тепловые потери на свободную конвекцию и обратное переизлучение не учитываются. Искомый градуировочный коэффициент ПТП вычисляют по формуле:

$$K = K_{\text{э}} \cdot E_{\text{э}} / E, \quad (\text{Б.1})$$

которая из-за погрешностей термостатирования авторами [Б.35] приведена к виду:

$$K = K_{\text{э}} \cdot E_{\text{э}} \cdot \varphi / E \quad (\text{Б.2})$$

где $K_{\text{э}}$ и $E_{\text{э}}$ – коэффициент преобразования и сигнал абсолютного радиометра;

φ – поправочный коэффициент равный:

$$\varphi = \frac{1 + R_{\text{РАД}} \cdot (\alpha + 4 \cdot \varepsilon_{\text{РАД}} \cdot \sigma \cdot \gamma_{\text{РАД}}(r) \cdot T_{\text{ОС}}^3)}{1 + R_{\text{ПТП}} \cdot (\alpha + 4 \cdot \varepsilon_{\text{ПТП}} \cdot \sigma \cdot \gamma_{\text{РАД,ПТП}}(r) \cdot T_{\text{ОС}}^3)},$$

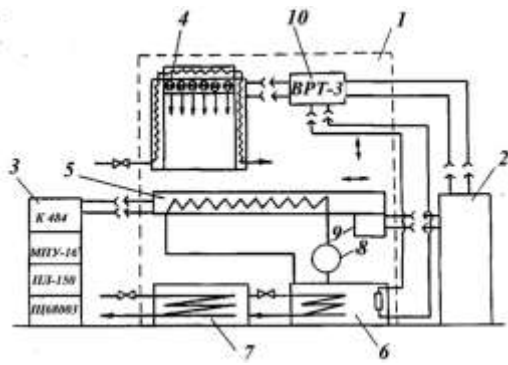
где $R_{\text{РАД}}$ и $R_{\text{ПТП}}$ – тепловое сопротивление теплообмену на поверхности радиометра и градуируемого ПТП соответственно.

Теоретически $\varphi = 0,95$, но так как φ зависит от теплового сопротивления, приходится при градуировании ПТП уточнять значение поправочного коэффициента для каждого типа ПТП.

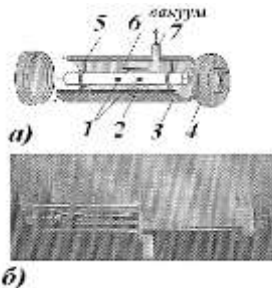
К достоинствам этой градуировки относятся одновременность облучения градуируемого ПТП и радиометра, расширение диапазона аттестации в область средних и малых значений плотности теплового потока. Однако на точность измерений влияют такие факторы, как трудности по обеспечению одинаковой степени черноты тепловоспринимающих поверхностей ПТП и радиометра, равенства температуры теплостоков, охлаждаемых с помощью одного термостата и включенных с ним последовательно, а также невозможность аттестации ПТП с размерами более 35 мм.

Для аттестации ПТП больших размеров или партии однотипных ПТП предназначен стенд РГУ [Б.19], блок-схема которого приведена на рисунке Б.11. Рабочая поверхность стола имеет габариты, позволяющие устанавливать на ней один ПТП с поперечными размерами до 200×400 мм, либо партию ПТП, количество которых зависит от поперечного размера и может достигать 30 штук. В основу установки положен метод компарирования с эталонным ПТП, пределы основной относительной погрешности градуировки равны $\pm 4\%$.

Для высокотемпературной градуировки градиентных анизотропных ПТП авторы [Б.27] предложили стенд, представленный на рисунке Б.12. На оси цилиндрического корпуса из стали (3) в специальных держателях (5) закреплена трубка (2) с нагревателем из вольфрамовой проволоки внутри. На поверхности трубки устанавливают градуируемые ПТП 1 и термопару 6. В одной из крышек (4) корпуса (3) размещен герметичный разъем для



1 – тепловой блок,
 2 – пульт управления насосом и подъемным устройством,
 3 – измерительно-регистрирующий комплекс, 4 – блок излучателей,
 5 – стол для размещения ПТП,
 6 – термостат, 7 – теплообменник, 8 – насос,
 9 – механизм перемещения стола,
 10 – высокоточный регулятор температуры ВРТ-3
 Рисунок Б.11 – Блок-схема радиационной установки РГУ ИТТФ [Б.19].



1 – градуируемые ГДТП; 2 – трубка;
 3 – корпус; 4 – крышка; 5 – держатель;
 6 – термопара;
 7 – патрубок для вакуумирования

Рисунок Б.12 – Схема (а) и общий вид (б) стенда для высокотемпературной градуировки градиентных анизотропных ПТП [Б.27].

подачи питания на нагреватель и снятия сигналов ПТП 1 и термопары 6. Вакуумирование полости стенда производится через патрубок (7), это позволяет устранить конвективный теплообмен. Термопара 6 служит для определения температуры отнесения.

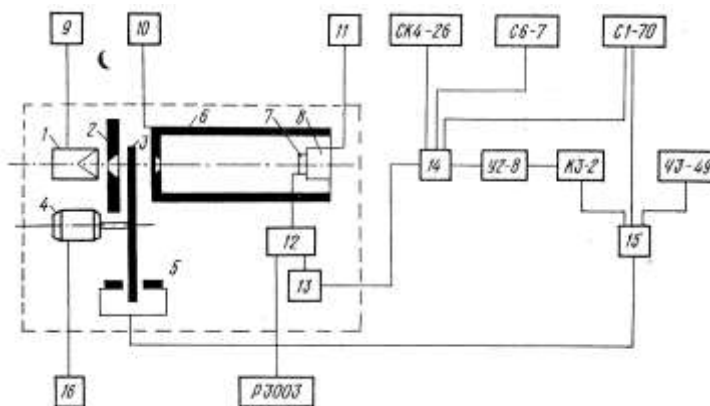
Для метрологического обеспечения измерений очень малых плотностей теплового излучения при низких значениях температуры и различных регулируемых уровнях фонового потока излучения предназначена установка [Б.38, Б.39], которая позволяет исследовать и измерять пороговую чувствительность, постоянную времени, абсолютный коэффициент поглощения ПТИ различных конструкций при низких значениях температуры.

Установка создана на базе низкотемпературной камеры [Б.39], ее схема вместе с измерительной блок-схемой приведены на рисунке Б.13.

Радиационные установки с ИТИ типа АЧТ применяют, главным образом, для градуирования ПТИ, например, датчиков Гардона, Шмидта-Боэлтера и других. Так в Шведском Национальном институте испытаний и исследований (г. Хельсинки) имеется установка для градуирования ИТИ, применяемых для огневых испытаний, с ИТИ типа АЧТ сферической формы [Б.9], схема которой показана на рисунке Б.14. На этой установке получают потоки теплового излучения плотностью от 2 кВт/м^2 до 100 кВт/м^2 .

Аналогичный трубчатый ИТИ модели АЧТ использован в подобной установке Национального института стандартов и технологий США (далее - NIST), схема которой приведена на рисунке Б.15 [Б.9; Б.14; Б.15]. Максимальная плотность теплового потока, достигаемая в этой установке, составляет 200 кВт/м^2 , но на этой установке можно получать тепловое излучение малой плотности от $0,04 \text{ кВт/м}^2$ до 50 кВт/м^2 в зависимости от расстояния между диафрагмой АЧТ и градуируемым ПТИ, например, на расстоянии $12,5 \text{ мм}$ – 50 кВт/м^2 , на расстоянии $62,5 \text{ мм}$ – 10 кВт/м^2 , а на расстоянии 174 мм – $0,04 \text{ кВт/м}^2$.

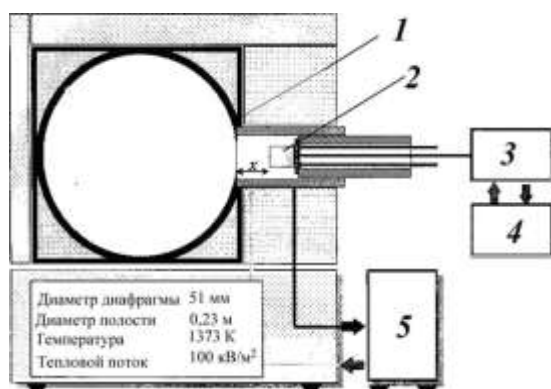
В NIST имеется еще установка для градуирования ПТИ по тепловому излучению с применением лазера в качестве источника теплового излучения. Схема установки приведена на рисунке Б.16 [Б.15]. В ней излучение генерируют два лазера: аргонный и криптонный с соответствующими длинами волн. Применение кремниевого датчика позволяет регулировать мощность отраженного излучения. Максимум теплового потока, достигаемый в данной установке, – 8 Вт .



1 – источник излучения (АЧТ); 2 – сменные диафрагмы; 3 – дисковый модулятор; 4 – электродвигатель; 5 – магнито-электрический датчик числа оборотов двигателя; 6 – экран; 7 – градуируемый ПТИ; 8 – основание; 9, 10, 11 – блоки измерения и регулирования температуры АЧТ, экрана и основания; 12 – электронный коммутатор; 13 – предусилитель; 14 – широкополосный усилитель; 15 – предусилитель датчика числа оборотов двигателя; 16 – источник питания электродвигателя;

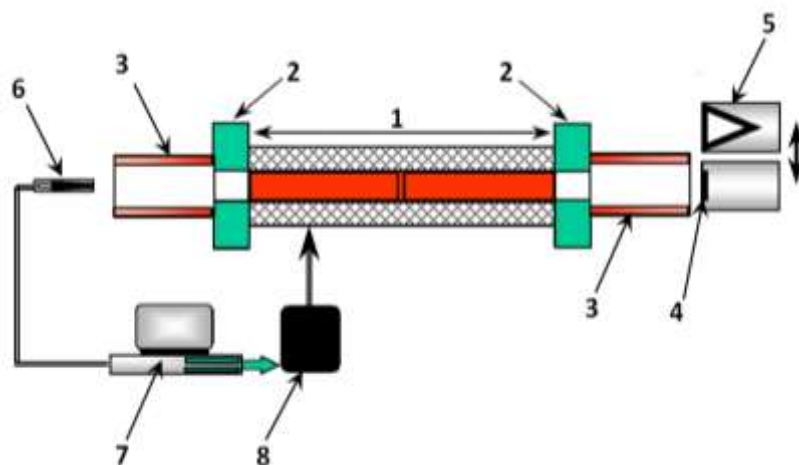
СК4-26 – анализатор спектра; С6-7 измеритель нелинейных искажений; С1-70 – осциллограф; У2-8 – селективный измерительный усилитель; К3-2 – синхродетектор; ЧЗ-49 – электронно-счетный частотомер; Р3003 – компаратор напряжения

Рисунок Б.13 – Измерительная блок-схема установки для исследования и аттестации параметров глубокоохлаждаемых ПТИ [Б.38; Б.39]



- 1 – излучатель АЧТ сферической формы;
- 2 – градуируемый ПТИ;
- 3 – цифровой вольтметр;
- 4 – компьютер;
- 5 – термостат с хладагентом

Рисунок Б.14 – Схема радиационной установки NIST (США) с излучателем АЧТ сферической формы [Б.9]



- 1 – трубка из графита (ИТИ);
- 2 – торцевые крышки (диафрагмы);
- 3 – бленда;
- 4 – аттестуемый ПТП;
- 5 – радиометр;
- 6 – оптический пирометр;
- 7 – компьютер;
- 8 – блок питания

Рисунок Б.15 – Схема установки с цилиндрическим ИТИ на базе трубчатой модели АЧТ, применяемая в NIST, США [Б.9; Б.15].

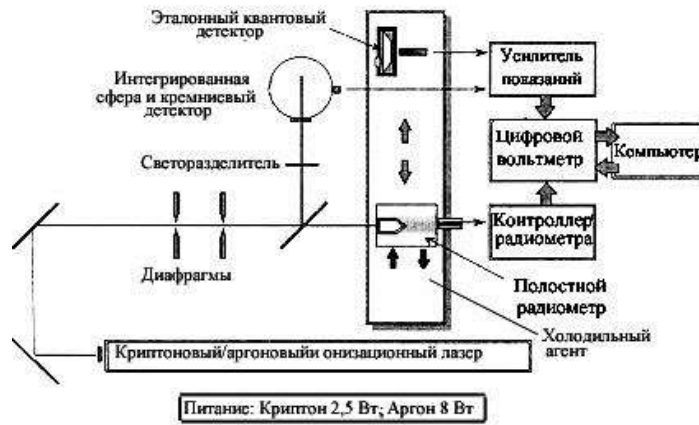


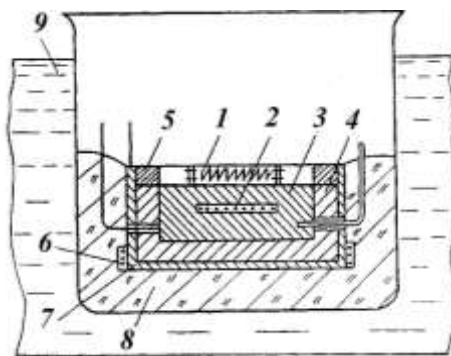
Рисунок Б.16 – Измерительная схема градуировочной установки NIST (США) с применением лазерных излучателей [Б.15].

В Украине эксплуатируется градуировочная установка, создающая плотность потока теплового излучения до 2000 кВт/м^2 . Это обеспечено разработанным в Харьковском институте метрологии прецизионным ИТИ ВПИЛП-1, содержащим высокотемпературный графитовый излучатель в виде модели АЧТ цилиндрической формы, нагреваемой в высокочастотном электромагнитном поле индуктора [Б.34, Б.40].

Большинство радиационных установок позволяют проводить градуирование только при одном значении температуры, с погрешностью не ниже 5 %. Поэтому на практике наряду с радиационными получили развитие и методы кондуктивного градуирования.

Б.2 – Аппаратура для кондуктивного градуирования

Одним из первых известных устройств с кондуктивным способом подведения теплоты к аттестуемому ПТП с использованием конвективного теплостока является прибор для градуирования почвенных ПТП, схема которого приведена на рисунке Б.17 [Б.41].



- 1 – ПТП; 2 – основной нагреватель;
- 3 – медный блок; 4 – слой висмута;
- 5 – изоляционное кольцо;
- 6 – компенсационный нагреватель;
- 7 – медный кожух; 8 – теплоизоляция;
- 9 – водяная баня

Рисунок Б.17 – Схема устройства для градуировки почвенных ПТП [Б.41]

Особенностью устройства является использование в качестве идеальной изоляции 4, окружающей основной нагреватель 2, слоя висмута, служащего одновременно промежуточным термоэлектродом дифференциальной термопары, применяемой в качестве нуль-индикатора для обеспечения одномерного теплового потока через градуируемый ПТП. Температуру отнесения определяют термистором, вмонтированным в медный блок основного нагревателя. Градуируемый ПТП устанавливают на медный блок, обеспечивая надежный тепловой контакт. Отведение теплоты происходит конвекцией со свободной поверхности ПТП.

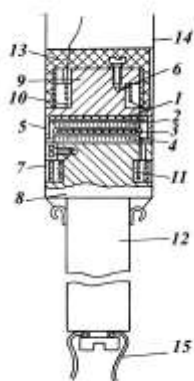
Аналогично организованы подведение и сток теплоты в градуировочном устройстве, разработанном НПО "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева" (г. Санкт-Петербург) [Б.42]. Установка позволяет создавать тепловые потоки плотностью до 1000 Вт/м^2 . Погрешность

воспроизведения плотности теплового потока в середине диапазона измерения не более 1% при комнатной температуре. Температурный диапазон градуирования от (20-25)°С до 100°С.

Кондуктивный способ подведения энергии при конвективном теплоотводе использован в градуировочных установках ВНИПИТеплопроект (г. Москва) [Б.43] при температуре от минус 73°С до 200°С, нормированных для испытания теплоизоляционных строительных материалов.

Дальнейшее развитие градуировочных установок кондуктивного типа шло по пути организации теплостока также кондуктивным способом. Например, в устройстве для одновременной градуировки двух плоских ПТП [Б.44], в котором реализована методика двух измерений, между градуируемым и вспомогательным ПТП помещают градуировочный нагреватель. Получившийся термостолбик устанавливают в устройство между двумя термостатируемыми проточными холодильниками. Градуирование производят в два этапа, соответствующих перезакладке ПТП с изменением их места расположения. При этом подводимую мощность к градуировочному нагревателю сохраняют неизменной.

В [Б.45] описано устройство для кондуктивной градуировки ПТП методом двух измерений неполной компенсации в диапазоне от значений температуры жидкого гелия до температуры жидкого азота. Схема устройства приведена на рисунке Б.18.

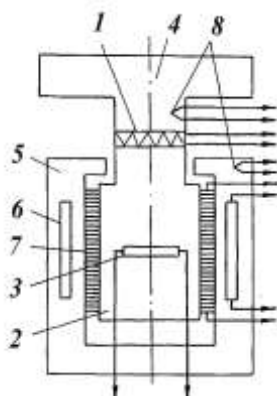


- 1 – нагреватель компенсационный; 2 – ПТП вспомогательный;
- 3 – нагреватель основной; 4 – ПТП градуируемый;
- 5 – охранный экран; 6, 7 – термопары; 8, 9 – медные блоки;
- 10, 11 – тепловые шунты; 12 – хвостовик; 13 – пробковая изоляция; 14 – капроновая нить; 15 – жгут медный проволока

Рисунок Б.18 – Схема градуировочного устройства ЭНИН [Б.45]

Устройство помещают в гелиевый криостат. Один ПТП – градуируемый, а второй используют в качестве вспомогательного, по показаниям которого учитывают тепловой поток, не прошедший через градуируемый ПТП. Градуирование при каждой фиксированной температуре из рабочего диапазона выполняют при двух режимах: с включенным градуировочным нагревателем, когда к нему подводится нормируемая мощность, и с отключенным. По оценкам авторов, погрешность определения чувствительности ПТП в азотно-гелиевом диапазоне температуры не превышала 20 %.

Известно устройство, реализующее кондуктивный метод градуирования с полной компенсацией теплопритоков [Б.46] в адиабатическом калориметре, схема которого приведена на рисунке Б.19.

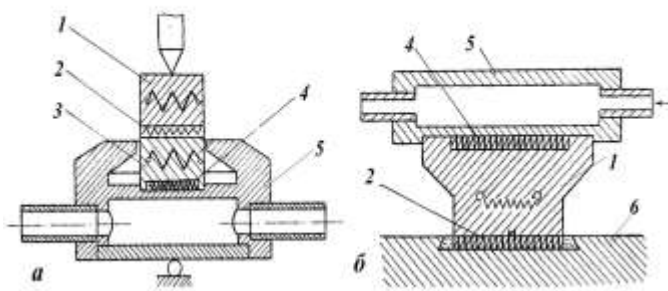


- 1 – градуируемый ПТП;
- 2 – металлический сердечник;
- 3 – градуировочный нагреватель;
- 4 – холодильник;
- 5 и 6 – охранный блок с компенсационным нагревателем;
- 7 – индикатор-термобатарея;
- 8 – термопары

Рисунок Б.19 – Схема устройства для кондуктивного градуирования при полной компенсации теплопотерь [Б.46]

Градулируемый ПТП 1 размещают между сердечником 2 с градуировочным нагревателем 3 и холодильником 4. В установившемся тепловом режиме от сердечника 2 тепловая энергия полностью проходит через градулируемый ПТП к холодильнику 4. Отсутствие теплотерь достигается наличием компенсационного нагревателя 6, смонтированного в медном охранном блоке 5, контактирующем с сердечником 2 через термобатарей 7, на которой поддерживают нулевой перепад температуры с помощью регулятора. Благодаря высокой чувствительности термобатареи, по мнению авторов, тепловые потери не превышают (0,1-0,2) % мощности, подводимой к градуировочному нагревателю. На этом устройстве легко варьировать температурный режим. Для этого устройство размещают на металлическом стержне и опускают в сосуд Дьюара с жидким азотом. По мере выкипания азота температура повышается от минус 180°С до 100°С. После испарения азота градуирование продолжается в режиме разогрева, достигая температуры 400°С. Температура отнесения принимается равной среднему арифметическому показаний термопар 8. Основным недостатком устройств такого типа являются жесткие требования к обеспечению совмещения контактирующих поверхностей ПТП, сердечника и холодильника и к качеству обработки этих поверхностей.

В [Б.29] описана серия градуировочных устройств контактного типа, в которых удалось получить эффективное замещение измеряемой тепловой энергии электрической, подающейся наиболее точному контролю. На рисунке Б.20 приведена схема одного из устройств такого типа.



а – градуирование автономного ПТП; *б* – градуирование ПТП, закрепленного на изделии

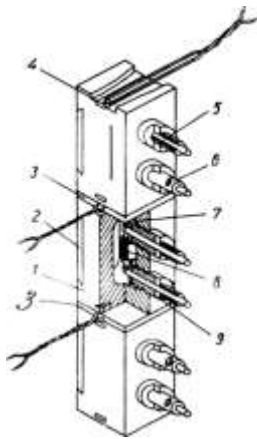
1 – источник теплоты (нагреватель);
2 – градулируемый ПТП; 3 – приемное тело;
4 – термобатарея; 5 – холодильник;
6 – изделие

Рисунок Б.20 – Схема градуирования по методике с энергетическим замещением [3; Б.29]

В первом устройстве градулируемый ПТП 2 размещают между источником теплоты 1 и приемным телом с нагревателем замещения 3 и термобатареей 4, приведенным в тепловой контакт с проточным охлаждаемым холодильником 5. При этом тепловое сопротивление стоку теплоты через термобатарею 4 на два-три порядка меньше теплового сопротивления теплоотдаче свободной конвекцией. Поэтому при малом отличии температуры ОС от охлаждающей воды конвективными теплотерями можно пренебречь. В режиме градуирования ПТП 2 нагреватель 3 не включен, а весь поток от нагревателя 1, регистрируемый термобатареей 4, протекает через градулируемый ПТП и определяется по построенному предварительно градуировочному графику устройства. Устройство (см. рис. Б.20, б) применяют для градуировки ПТП, установленных неразъемно в изделии.

Подняться при градуировке в область более высоких значений температуры (вплоть до 1000 К) удалось, применяя высокотемпературные нагреватели, набираемые в контактный столбик, внешний вид которого показан на рисунке Б.21 [3; 20; Б.47; Б.48]. Минимально градуировочный столбик состоит из трех нагревателей и двух ПТП.

Режим градуирования организован так, что значение потока, проходящего через один ПТП, названный "холостым", близко к нулю в отличие от градулируемого, через который идет основной поток. Температура отнесения градулируемого ПТП в каждом режиме принимается равной средней арифметической из показаний ближайших к нему термопар в верхнем и нижнем нагревателях.



- 1 – корпус;
- 2 – крышка;
- 3 – ПТП;
- 4 – термопара;
- 5 – никелевый токовод нагревателя;
- 6 – ступенчатая втулка;
- 7 – отражательный пирофиллитовый щиток;
- 8 – вольфрамовая спираль;
- 9 – пирофиллитовый изолятор

Рисунок Б.21 – Внешний вид контактного столбика [3; Б.47]

Градуировочный коэффициент при заданной температуре вычисляют по формуле (Б.3), в которой W – мощность, пронизывающая градуируемый ПТП, определяется соотношением:

$$W = W_H + W_X - W_{РАД}, \quad (Б.3)$$

где $W_H = I \cdot U$ – мощность нагревателя; $W_X = K_X \cdot E_X$ – мощность теплопритока через "холостой" преобразователь; $W_{РАД}$ – мощность радиационного рассеивания боковой поверхностью, определяемая по экспериментально полученной графической зависимости боковых потерь от температуры при изотермическом режиме с учетом поправки на неизотермичность [Б.48]. Градуирование выполняют в вакуумной камере при разрежении 10^{-3} мм. Нагреватели выдерживают высокие тепловые нагрузки – более 500 Вт/м^2 при максимальной температуре 1000 К . Размеры ПТП не превышают $10 \times 10 \times 1 \text{ мм}$.

Градуирование ПТП при низких значениях температуры выполняется с применением системы термостатирования при низкой температуре [Б.49-Б.51]. В [Б.51] описана установка УНГ, предназначенная для градуирования абсолютным методом плоских ПТП диаметром 27 мм при температуре от минус 196°С до 37°С , внешний вид которой показан на рисунке Б.22.

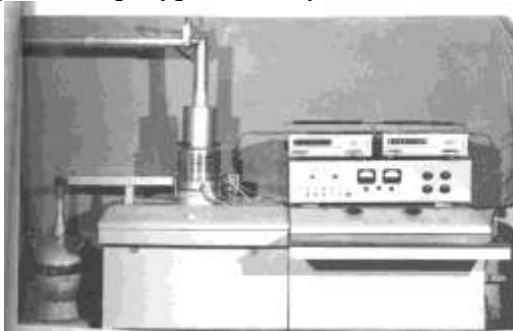
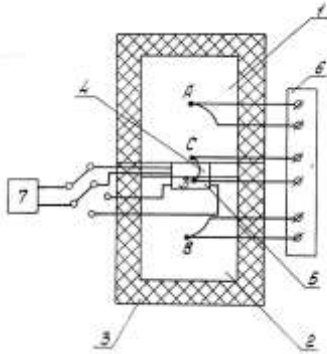


Рисунок Б.22 – Внешний вид установки УНГ-1 для градуирования плоских ПТП в диапазоне температуры от 80 К до 300 К [Б.51]

ПТП градуируют в контактом столбике, также состоящем из градуировочного нагревателя между градуируемым и вспомогательным ПТП, омываемом парами азота и защищенном от внешних теплопритоков системой экранов. Температурный режим создается испарителем жидкого азота и подогревателем паров азота, помещенными в сосуд Дьюара. После достижения требуемой температуры к градуировочному нагревателю подводится мощность, включается система компенсации теплопотерь и после достижения на вспомогательном ПТП нулевого сигнала измеряется ТЭДС градуируемого. Установка снабжена системой автоматической регистрации и определения плотности теплового потока, градуировочного коэффициента и температуры отнесения. Сбалансированная система подачи мощности на испаритель азота и подогреватель паров азота позволяет поддерживать температуру градуирования с погрешностью не более $0,1 \text{ К}$. Погрешность определения чувствительности ПТП по результатам метрологической аттестации оценена в 5% . Недостатком установки является ручная система регулирования мощности испарителя и нагревателя, большой расход жидкого азота и значительная продолжительность опыта при каждой фиксированной температуре из-за длительности перехода с одного температурного уровня на другой.

Поэтому для градуирования ПТП в широком температурном диапазоне предпочтительнее использование установок, реализующих квазистационарный и монотонный температурные режимы [3, Б.52-Б.54]. Схема теплового блока одной из них приведена на рисунке Б.23.



- 1, 2 – медные блоки; 3 – тепловая изоляция;
4 – градулируемый ПТП; 5 – рабочий ПТП;
6 – блок холодных спаев; 7 – переключатель.

Рисунок Б.23 – Схема устройства для кондуктивной градуировки ПТП в квазистационарном режиме [Б.52, Б.53]

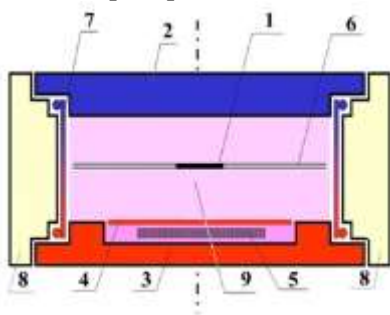
Градулируемый ПТП 4 размещают между двумя массивными медными блоками 1 и 2, окруженными тепловой изоляцией 3. В контактной поверхности блока 2 размещен рабочий ПТП 5, имеющий одинаковые с градулируемым ПТП размеры. Перед началом опыта задают перепад температуры между блоками 1 и 2, соответствующий требуемому значению пронизывающего теплового потока. Перепад измеряется термопарами А и В, выведенными на блок холодных спаев 6. В процессе измерений определяют ТЭДС в цепях ПТП 5 и 4 (E_5 и E_4) и вычисляют коэффициент преобразования градулируемого ПТП по формуле:

$$K_4 = \frac{K_5 E_5}{E_4} (1 - \delta_c), \quad (\text{Б.4})$$

где K_5 – коэффициент преобразования рабочего ПТП 5, определяемый в независимом градуировочном опыте; δ_c – поправка, учитывающая теплоемкость элементов устройства.

По мнению авторов погрешность градуирования не превышает 8 % при доверительной вероятности 0,95. Основными источниками погрешности являются неточность определения теплоемкости системы и площади ПТП, теплообмен боковой поверхности градулируемого и рабочего ПТП и нестабильность контактного сопротивления.

Известен прибор, в котором реализовано градуирование ПТП с использованием теплоизоляционного материала с известной теплопроводностью, а методика измерения может считаться методикой с полной компенсацией теплового потока от источника теплоты в неактуальном направлении. Схема прибора, реализующего такую методику, показана на рисунке Б.24 [106].



- 1–ПТП аттестуемый; 2–холодная пластина;
3–горячая пластина;
4–градуировочный нагреватель;
5–вспомогательная термобатарея (нуль-индикатор);
6–охранная зона ПТП;
7–боковой экран; 8–кожух;
9–эталонный теплоизоляционный материал

Рисунок Б.24 – Схема прибора для абсолютной градуировки ПТП с использованием эталонного теплоизоляционного материала [106]

Особенностью схемы является применение теплозащиты по боковой поверхности рабочей ячейки от теплопотерь. Основные части прибора: ПТП 1, холодная пластина 2, горячая пластина 3, градуировочный электрический нагреватель 4, вспомогательная термобатарея 5. Поверхность градуировочного нагревателя 4 лежит на одном уровне с поверхностью горячей пластины 3, окружающей его. Между нагревателем 4 и горячей пластиной 3 встроена вспомогательная термобатарея 5, выполняющая роль индикатора "нулевого потока".

Аттестуемый ПТП 1 с охранной зоной 6 по его периметру размещают в среднем сечении слоя теплоизоляционного материала 9. Боковой металлический экран 7 обеспечивает линейный температурный градиент, соответствующий тому, который имеется в слое изоляционного материала 9, что способствует исключению боковых теплопотерь при любой температуре окружающей среды. Если температура горячей и холодных пластин (и, соответственно, боковой градиент) стабильны, то подведение электрической энергии контролируют так, что тепловой поток от нагревателя к горячей пластине равняется нулю, при этом коэффициент ПТП определяют по мощности, подведенной к градуировочному нагревателю.

Однако, в связи с тем, что трудно подобрать материал 6 для охранной зоны ПТП, коэффициент теплопроводности которого был бы одинаков с ПТП, имеют место искажения теплового потока на боковой границе ПТП. Это приводит к неидентичности созданного нагревателем теплового потока тепловому потоку, прошедшему через аттестуемый ПТП, что является одним из источников погрешности градуирования ПТП, не учитываемый авторами. Другой абсолютный метод, аналогичный описанному выше, описан в [Б.49].

Б.3 Установки для конвективного градуирования

Одна из первых известных конвективных установок, схематически приведенная на рисунке Б.25, представляет собой малую аэродинамическую трубу [Б.55]. После прохождения через элементы кондиционирования восходящего потока, воздух попадает в двухмерное сопло, уменьшающее сечение потока в отношении 30:1 для минимизации турбулентности на входе в измерительный участок и обеспечения цилиндрического профиля скоростей с очень тонким пограничным слоем на входе в зону измерений. Измерительная зона состоит из нагреваемой изотермической медной пластины, обдуваемой сверху ламинарным потоком воздуха комнатной температуры.

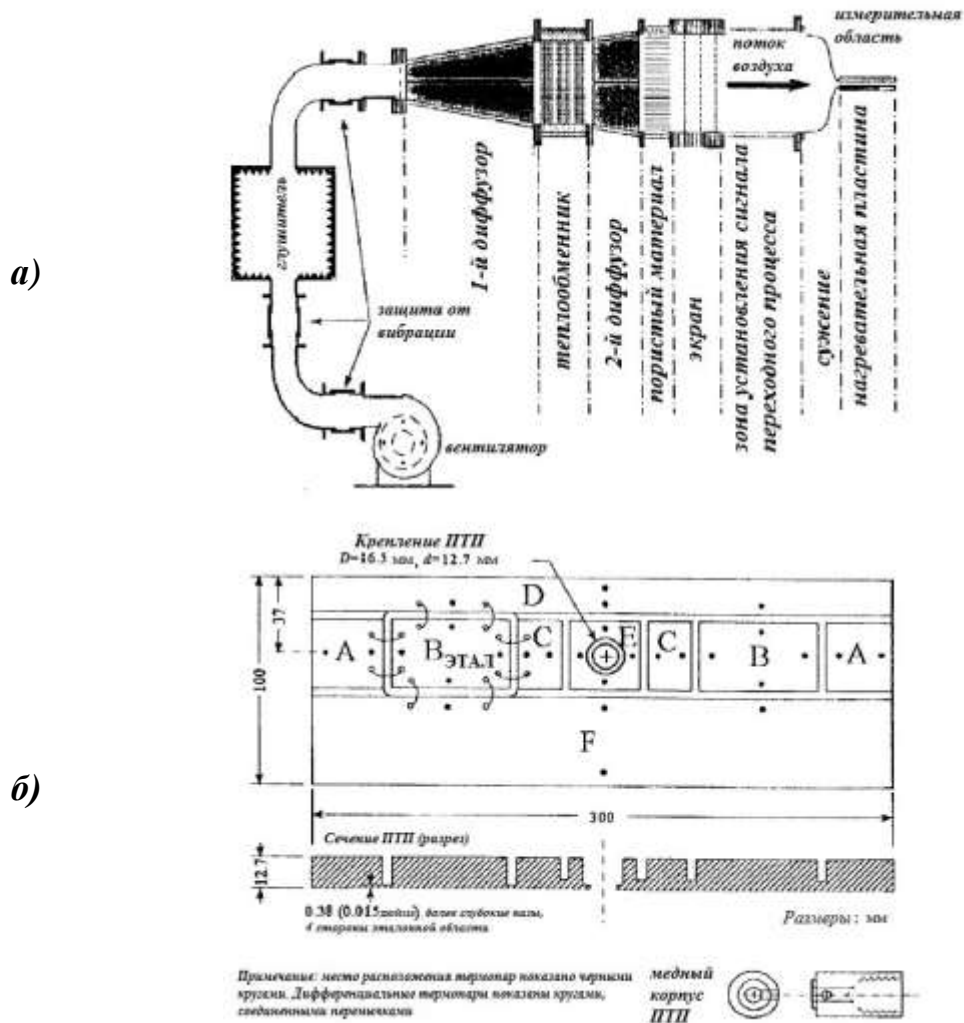
ПТП устанавливают в центральном отверстии пластины вплотную с ее поверхностью на известном расстоянии от входа измерительной зоны. Эталонная зона пластины защищена от возможных кондуктивных теплопотерь таким образом, чтобы тепловой поток был только от верхней поверхности. Сигналы контрольных термопар и ПТП и данные о мощности фиксируются с помощью системы сбора данных и передаются в ПК. Установка обеспечивает тепловой поток с плотностью до 10 кВт/м^2 . По оценке авторов относительная погрешность установки не превышает 5 %.

На рисунке Б.26 приведена схема установки и внешний вид ее измерительного узла [Б.56]. В состав установки входят камера высокого давления 1, шланг-трубка для подачи воздуха 2, медный трубчатый теплообменник 3 для обеспечения температуры газовой среды (воздуха) и измерительный узел 4. Измерительный узел 4 представляет собой стальную конструкцию 5, поддерживающую две алюминиевые пластины, на которых устанавливают эталонный 7 и аттестуемый ПТП 8.

Из камеры высокого давления 1 по шлангу 2 подают воздух в теплообменник 3, откуда он поступает в распределитель 9, имеющий два выходных отверстия (сопла 10), направляющих поток воздуха перпендикулярно размещенным друг против друга алюминиевым пластинам 6. При этом эталонный преобразователь Шмидта-Боэлтера 7 располагают в сквозном отверстии одной пластины, а аттестуемый ПТП 8 – крепят на другой пластине заподлицо с поверхностью, обращенной к распределителю.

Скорость потока воздуха регулируют вентилем, установленным на выходе из камеры 5, а нагрев или охлаждение воздуха до определенной температуры путем погружения теплообменника в кипящую воду или тающий лед. Коэффициент преобразования ПТП определяют по результатам одновременного измерения сигналов ПТП 7 и 8.

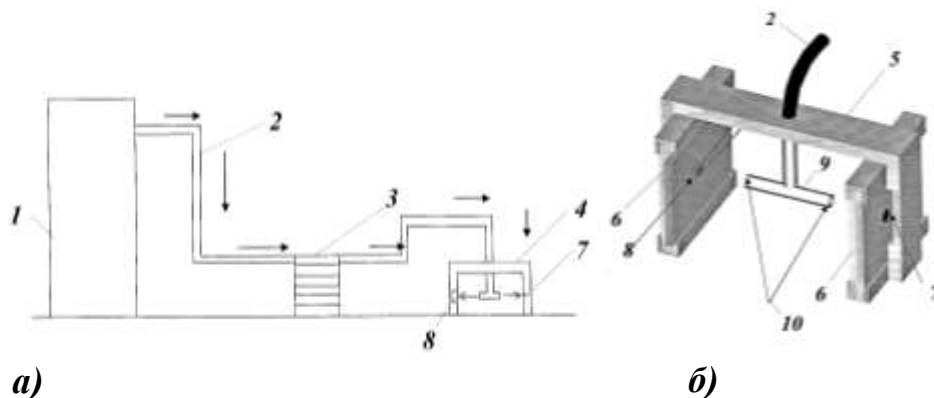
Еще попытки использования конвективного теплообмена для аттестации ПТП описаны в работах американских ученых [Б.57; Б.58].



а) Малая аэродинамическая труба конвективной градуировочной установки;

б) Конструктивная схема измерительной ячейки

Рисунок Б.25 – Конвективная аэродинамическая установка [Б.55]



а) – схема установки;

б) – внешний вид измерительного узла;

1 – камера высокого давления; 2 – шланг подачи воздуха; 3 – теплообменник;

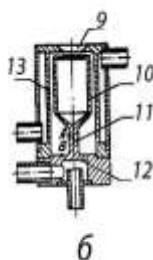
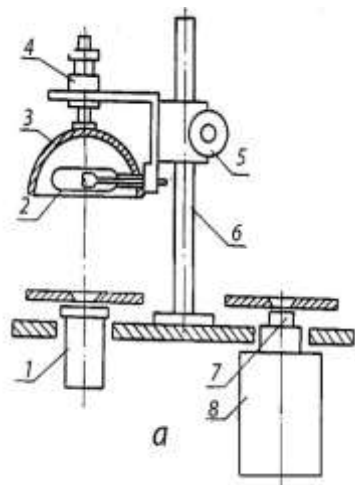
4 – измерительный узел; 5 – поддерживающая конструкция; 6 – алюминиевые плиты; 7 –

эталонный ПТП; 8 – аттестуемый ПТП; 9 – распределитель воздуха; 10 – сопла распределителя

Рис. Б.26 – Конвективная градуировочная установка [Б.56]

Б.4. Эталонные средства измерения для аттестации теплоточных СИТ

Одной из первых эталонных (ранее – образцовых) установок для метрологической аттестации СИ теплового потока, точнее ПТИ, являлась разработанная еще в 70-е годы радиационная установка, описанная в [Б.59], схематически представленная на рисунке Б.27.



а – блок-схема установки [Б.59],
б – конструктивная схема эталонного ПТИ [Б.60]
1 – эталонный ПТИ; 2 – ИТИ; 3 – отражатель;
4 – юстировочное устройство; 5 – устройство для вертикального перемещения и поворота вокруг вертикальной оси источника теплового излучения;
6 – вертикальная ось; 7 – градуируемый ПТИ;
8 – термостат; 9 – входное отверстие диафрагмы эталонного ПТИ; 10 – поглотитель теплоты;
11 – перемычка; 12 – холодильник; 13 – кожух
Рисунок Б.27 – Эталонная установка для воспроизведения поверхностной плотности (энергетической освещенности) теплового излучения [Б.59; Б.60]

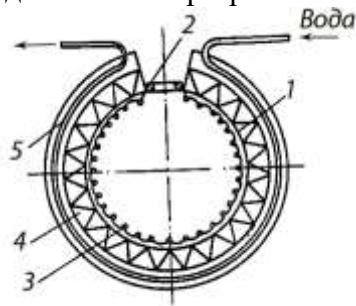
Установка имеет ИТИ (галогенную лампу накаливания типа КГМ40-750 с полусферическим алюминиевым отражателем), эталонный ПТИ, устройство для вертикального перемещения ИТИ и поворота его вокруг вертикальной оси, термостат с посадочным местом для крепления градуируемых ПТИ. Юстировочное устройство позволяет перемещать отражатель относительно лампы в трех взаимно – перпендикулярных направлениях и получать достаточно однородный по сечению радиационный поток. Отклонения от однородности в различных точках сечения потока в пределах приемной площадки диаметром 10 мм не превышает 2 %. Поворотом вокруг вертикальной оси ИТИ можно установить на одинаковой высоте попеременно над эталонным и градуируемым ПТИ. При необходимости на рабочем месте устанавливается термостат с укрепленным градуируемым ПТИ для определения градуировочной характеристики в температурном диапазоне от минус 50 °С до 100 °С.

Конструктивная схема эталонного приемника показана на рисунке Б.27, **б** [Б.60]. Измеряемый поток теплового излучения, ограниченный входной диафрагмой, поглощается зачерненными стенками поглотителя – модели АЧТ, проходит по перемычке к термостатированному холодильнику и отводится охлаждающей жидкостью. При этом проходящий поток создает на перемычке разность температуры, пропорциональную поглощенному тепловому потоку, которая измеряется дифференциальной термопарой. Для уменьшения потерь теплоты в окружающую среду служит охлаждаемый отполированный медный кожух. Внутренняя поверхность кожуха и внешняя поверхность охладителя отполированы, поэтому паразитные потоки теплоты между ними, обусловленные излучением и теплопроводностью через слой воздуха, не превышают 4% и учитываются при градуировании.

Градуирование производят замещением потока теплового излучения теплотой, выделяемой калибровочным нагревателем, который для этого помещают внутрь полости поглотителя, а все свободное пространство полости для уменьшения потерь теплоты от нагревателя через входное отверстие диафрагмы ПТИ заполняют порошкообразной засыпкой. Диаметр входного отверстия 8 мм, эффективная степень черноты $0,99 \pm 0,01$ в диапазоне длин волн (0,3 – 12) мкм. С учетом нестабильности потока теплового излучения и влияния воздуха случайная погрешность аттестации составила 3,5% с доверительной вероятностью 0,95%, а систематическая – не превысила 1,6%.

Для аттестации ПТИ в диапазоне плотности потока теплового излучения (0,1...30) кВт/м² в спектральном диапазоне (0,3 - 30) мкм совместными усилиями НПО «Метрология»

(г. Харьков) и ИТТФ АН УССР (г. Киев) был создан комплекс эталонных средств и разработана локальная поверочная схема (см. таблицу 1.1). Для приборной реализации этой схемы разработаны эталонный ПТИ шарового типа (г. Харьков) и подчиненное эталонное средство – ПТИ разработки ИТТФ [Б.11, схемы которых даны на рисунках Б.28 и Б.29.]

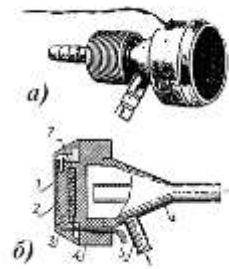
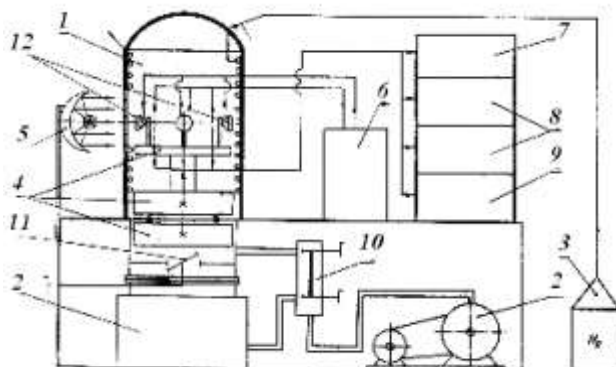


- 1 – тонкостенная шаровая полость;
- 2 – входное отверстие; 3 – нагреватель;
- 4 – термобатарея;
- 5 – термостатируемый радиатор

Рисунок Б.28 – Схема эталонного шарового радиометра ШРК – 80, НПО «Метрология», г. Харьков [Б.61]

Основными элементами шарового радиометра являются сферическая полость с диаметром входного отверстия 40 мм, встроенный электронагреватель и термоэлектрический чувствительный элемент. Принцип действия прибора основан на сравнении теплового воздействия на чувствительный элемент радиометра измеряемого потока излучения с тепловым воздействием электрической мощности методом интегрирования плотности теплового потока через оболочку полости термобатареей, рабочие спаи которой расположены в плоскости большого круга, а холодные – закреплены на полой трубке, через которую прокачивается термостатированная жидкость. Специальное размещение спаев термоэлементов уменьшает наиболее неопределенную составляющую погрешности радиометра, обусловленную неидентичностью температурных полей оболочки полости при облучении измеряемым потоком и замещении мощностью электрообогрева. Неисключенная систематическая погрешность прибора оценена экспериментально в 2%.

В основе работы ПТИ ИТТФ лежит принцип преобразования энергии излучения, поглощенного плоской приемной поверхностью, в электрический сигнал [Б.11]. Для определения градуировочной функции ПТИ разработана метрологическая установка УМАП [Б.19], блок-схема которой видна на рисунке Б.30.



- а – внешний вид прибора;
- б – конструктивная схема;

- 1 – теплоприемный диск;
- 2 – градуировочный нагреватель;
- 3 – термобатарея; 4 – корпус;
- 5 – штуцер; 6 – основание корпуса;
- 7 – тепловой шунт

Рисунок Б.29 – Подчиненное эталонное средство измерения плотности потока теплового излучения [Б.11]

- 1 – тепловакуумная камера;
- 2 – система откачки;
- 3 – система захлаживания;
- 4 – поворотный стол; 5 – излучатель;
- 6 – устройство термостатирования;
- 7 – пульт управления;
- 8 – информационно-измерительная система;
- 9 – система питания; 10 – натекатели;
- 11 – вакуумный затвор; 12 – аттестуемые ПТИ

Рисунок Б.30 – Блок-схема установки УМАП для градуирования и метрологической аттестации ПТИ ИТТФ (Киев) [Б.11; Б.19]

Установка имеет тепловакуумную камеру 1, где поддерживают вакуум не ниже $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па, температура внутренней поверхности стенки стабилизируется с помощью

жидкого азота на уровне 83 К, а ее коэффициент поглощения около 0,9. В качестве ИТИ применены электрический нагреватель из силицированного графита, создающий поток инфракрасного излучения в диапазоне спектра от 1 мкм до 30 мкм, и ксеноновая лампа типа ДКСШ-5000, излучающая в диапазоне от 0,3 мкм до 1,5 мкм. Первый ИТИ расположен внутри камеры. Ввод излучения от второго излучателя, расположенного снаружи, осуществляется через кварцевое окно. ИТИ укомплектованы соответствующими устройствами для формирования пучка излучения заданной геометрии и плотности. По оптической оси каждого ИТИ расположены быстродействующие заслонки с электромагнитным приводом. Все операции, связанные с измерением параметров излучения и режимов в камере, осуществляются дистанционно без разгерметизации камеры.

По результатам метрологической аттестации установка «УМАП» получила статус поверочной метрологической установки. В качестве исходного эталонного ПТИ применен эталонный радиометр типа ШРКТ-40У [Б.62], являющийся усовершенствованной моделью радиометра ШРК-80, показанного на рисунке Б.28. Его всесторонние исследования позволили создать такую конструкцию, при которой сведена к минимуму наибольшая по значению составляющая основной погрешности ПТИ компенсационного типа, связанная с неодинаковыми условиями теплообмена в режимах облучения и замещения. Это достигнуто тем, что чувствительный элемент установлен на поверхности приемной плоскости в той зоне, где температурные поля в обоих режимах совпадают с точностью, позволяющей реализовать погрешность 1,5%.

Исследования метрологических характеристик эталонного радиометра ШРКТ-40У проведены на прецизионной установке модели ПУГ [Б.62], основными элементами которой являются термостатируемая вакуумная камера объемом 0,3 м с вакуумным оборудованием, наружный ИТИ – компаратор с оптической системой формирования пучка потока излучения, контрольно-измерительная аппаратура и электросиловое оборудование. Внешний вид установки ПУГ показан на рисунке Б.31. Камера представляет собой стальной стакан



а)



б)

а – общий вид установки,
б – поворотный стол

Рисунок Б.31 –
Радиационная установка
ПУГ – исходное эталонное
средство для аттестации
ПТИ [Б.62]

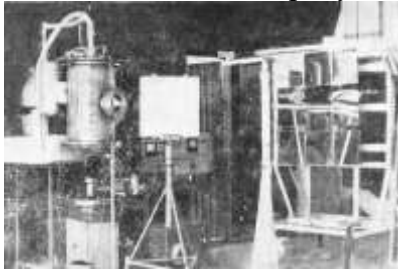
диаметром 600 мм с горизонтальной осью, установленный на стенде, внутри которого смонтированы вакуумные насосы. Стакан с одной стороны закрыт глухой заглушкой, а с другой снабжен съемным фланцем, на стороне которого, обращенной к вакуумной камере, смонтирован поворотный стол, где предусмотрено четыре места для установки ПТИ, включая эталонный. В качестве ИТИ взята кварцевая галогенная лампа типа КГМ-110-1800 мощностью 1,8 кВт, устанавливаемая в фокусе сферического водоохлаждаемого зеркала.

В оптическую схему входят объектив из трех кварцевых линз, наружная обойма для установки наружной заслонки и сменных диафрагм, внутренняя быстродействующая охлаждаемая заслонка с дистанционным электро-магнитным приводом и калибрующие диафрагмы. Одна из трех линз одновременно является окном вакуумной камеры, через которое в неё вводится тепловое излучение. Через калибрующую диафрагму поток излучения строго одинаковой мощности вводится либо в эталонный ПТИ, либо в градуируемый.

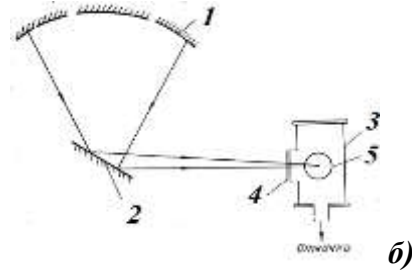
Спектральный интервал воспроизводимого потока излучения (0,4 - 4,0) мкм ограничен пропускной способностью баллона лампы и применяемых оптических материалов. Однако неселективность эталонного ПТИ, определяемая геометрией приемной полости, позволяет

аттестовать рабочие ПТИ в более широкой полосе спектра, если их собственная спектральная чувствительность достаточно равномерна. Для регулирования мощности потока излучения без изменения его спектрального состава предусмотрен набор сменных апертурных диафрагм разного диаметра.

Стенд для аттестации ПТИ по солнечному излучению, созданный в Физико-техническом институте Узбекской ССР (г. Ташкент) [Б.62; Б.63], является радиационным компаратором с применением эталонного радиометра ШРК -80. Общий вид и оптическая схема стенда показаны на рисунке Б.32



а)



б)

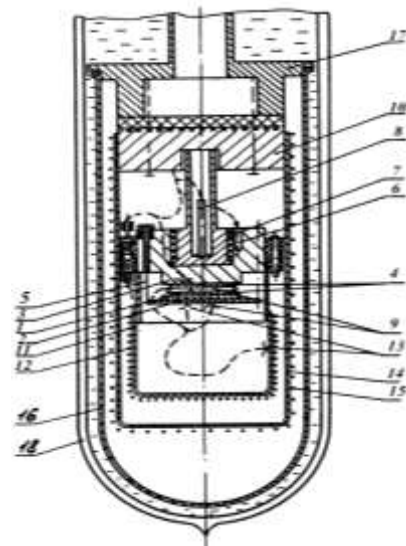
а – общий вид стенда, б – оптическая схема стенда
 1 – фацетный концентратор; 2 – поворотное зеркало; 3 – вакуумная камера;
 4 – иллюминатор камеры; 5 – эталонный радиометр
 Рисунок Б.32 – Стенд для аттестации ПТИ по солнечному излучению [Б.63]

Стенд состоит из фацетного зеркального концентратора, гелиостата, вакуумной камеры, термостатирующих устройств и измерительной системы. Фацетный концентратор имеет восемь сферических зеркальных фацет. Средняя плотность потока концентрированной солнечной энергии в диапазоне длины волны от 0,4 мкм до 2,5 мкм в фокальном пятне при вариации количества фацет составляет от 5 кВт/м² до 350 кВт/м². Установка позволяет проводить аттестацию как на воздухе, так и в вакууме с относительной погрешностью 4%.

Для метрологического обеспечения плоских ПТП в СССР в 80-ые годы появилась установка высшей точности УВТ-53-А-88 (в современной терминологии – эталонная установка), внешний вид и конструктивная схема которой показаны на рисунке Б.33 [Б.64].



а)



б)

а – внешний вид, б – схема теплового блока
 1 – градуируемый ПТП; 2 – основной нагреватель; 3 – холодильник; 4 – контактные пластины;
 5 – растяжки; 6 – термометр сопротивления регулирующей; 7 – нагреватель; 8 – термометр сопротивления измерительный; 9 – спаи дифференциальной термопары; 10 – нагреватель фоновый;
 11 – экран адиабатический; 12 – нагреватель экрана; 13 – термопара экрана; 14 – защитный экран; 15 – нагреватель защитного экрана; 16 – вакуумная камера; 17 – крышка; 18 – сосуд Дьюара
 Рисунок Б.33 – Внешний вид и конструктивная схема теплового блока эталонной установки УВТ-53-А-88 (СНИИМ, г. Новосибирск) [Б.64].

Аттестуемый ПТП помещают между контактными пластинами, которыми снабжены основной нагреватель и холодильник. С их помощью весь тепловой поток от нагревателя к холодильнику проходит через чувствительный элемент ПТП. Внутри холодильника вмонтированы регулирующий термометр сопротивления и нагреватель, которые посредством регулятора температуры выводят холодильник на требуемый уровень температуры. В нем также установлен измерительный платиновый термометр сопротивления для измерения температуры отнесения в каждой экспериментальной точке.

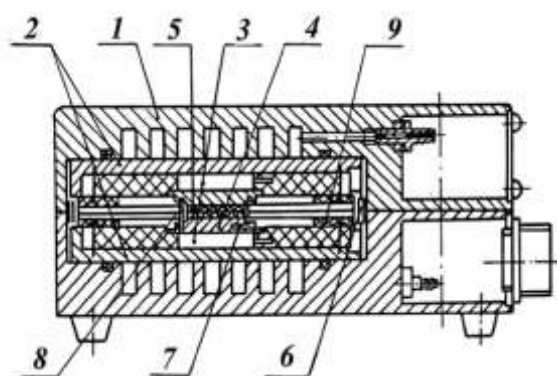
Холодильник снабжен адиабатическим экраном для поддержания температуры экрана равной температуре основного нагревателя. Вдоль экрана при этом формируется температурное поле, близкое температурному распределению в термостолбике «нагреватель–ПТП–холодильник». Фоновый нагреватель с защитным экраном образуют изотермическую камеру с необходимым уровнем температуры, позволяющую обеспечить высокую эффективность адиабатизации рабочего объема измерительной ячейки. Тепловой блок помещают в вакуумную камеру и погружают в сосуд Дьюара с жидким азотом. Отличительной особенностью этой установки является то, что нормированный тепловой поток от основного нагревателя к холодильнику через ПТП пронизывает только его чувствительный элемент. Это обеспечено идентичностью площади контактных пластин и теплочувствительной зоны.

Измерения мощности и сигнала ПТП проводят при фиксированном значении температуры из указанного диапазона после установления стационарного состояния и вычисляют коэффициент преобразования ПТП K по формуле:

$$K = \frac{U_H \cdot U_o / R_o}{E \cdot A}, \quad (\text{Б.5})$$

где U_H – напряжение на основном нагревателе, последовательно соединенном с образцовой катушкой сопротивления; U_o и R_o – напряжение и электрическое сопротивление образцовой катушки.

Тепловой блок рабочего эталона – кондуктивного компаратора [Б.65], в котором реализован относительный метод измерения, представляет собой устройство, схема которого показана на рисунке Б.34. Эталонный и поверяемый рабочий ПТП, сложенные в «столбик»,



- 1 – термостатируемый корпус;
- 2 – ячейка;
- 3 – идентичные термобатареи «Селен»;
- 4 – медные диски; 5 – ПТП;
- 6 – центрирующее кольцо;
- 7 – термометр сопротивления;
- 8 – штифты-стойки;
- 9 – текстолитовая шайба

Рисунок Б.34 – Схема теплового блока эталонного кондуктивного компаратора СНИИМ [Б.65]

помещают в устройство и зажимают между двумя массивными медными дисками, с помощью которых задается определенная разность температуры и соответствующий ей тепловой поток. В установившемся режиме плотность теплового потока, проходящего через оба ПТП, будет одинаковой при условии отсутствия бокового теплообмена. Передача единицы измерения плотности теплового потока производится путем сличения показаний эталонного и поверяемого ПТП. Коэффициент преобразования поверяемого ПТП определяют по формуле (Б.1).

Для проведения градуировки столбик из ПТП помещают на контактную поверхность нижнего медного диска и центрируют, после чего верхний узел опускают на нижний и фиксируют с помощью центрирующего кольца. В нижний диск вмонтирован термометр

сопротивления для измерения температуры отнесения. Конструкция теплового блока предусматривает возможность термостатирования корпуса путем циркуляции жидкости с заданной температурой из стандартного термостата.

Тепловой блок идет в комплекте с измерительным блоком, предназначенным для измерения ТЭДС, сопротивления и температуры ПТП, а также тока, питающего термобатареи «Селен». Все измеряемые величины преобразуются и выдаются в виде напряжения в диапазоне (0 – 200) мВ. Поэтому в качестве показывающего прибора используется стандартный милливольтметр со шкалой (0 – 200) мВ класса точности не хуже 0,1 %, например, Ф283 или В7-21.

Перечень ссылок

Б.1 Лампы электрические Термины и определения : ГОСТ 15049-81. – [Введен в действие 01.01.1983] – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 14 с. – (Межгосударственный стандарт)

Б.2 Источники высокоинтенсивного оптического излучения газоразрядные импульсные. Термины и определения : ГОСТ 16803-78. – [Введен в действие 01.07.1979] – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 12 с. – (Межгосударственный стандарт)

Б.3 Черноголов А. И. Теплометрические исследования мартевских печей / А. И. Черноголов. – М. : Metallurgia, 1967. – 152 с.

Б.4 Создать тепломер и освоить методику измерения интенсивности тепловых потоков в пламенном пространстве печей: отчет о НИР / УралНИИСтромпроект. – Инв. 02860022545. – Челябинск, 1985. – 46 с.

Б.5 Гордов А. Н. Основы пирометрии. / А. Н. Гордов. – М. : Metallurgia, 1971. – 447 с.

Б.6 Геращенко О.А. Основы теплометрии / Олег Аркадьевич Геращенко. – К.: Наукова думка, 1971. – 192 с.

Б.7 А. с. 164077 СССР, Модель черного тела / Козырев Б. П., Бузников А. А. (СССР). – Оpubл. 1964, Бюл. № 14. – 3 с.

Б.8 Козырев Б. П. Многокамерное черное тело / Б. П. Козырев, А. А. Бузников. // Известия ЛЭТИ. – Л. : ЛЭТИ, 1966. – Вып. 15. – С. 17-22.

Б.9 Murthy, A. V. Comparative calibration of heat flux sensor in two blackbody facilities / A. V. Murthy, B. K. Tsai, R. D. Saunders // Journal of research of the National Institute of Standards and Technology. – Vol. 104, № 5. – Gaithersburg, 1999. – P. 487–494.

Б.10 Каталог продукции, часть II, раздел V: каталог / ОАО Научно-производственного предприятия «ЭТАЛОН» ФАРМ. – Омск, 2007 – с.26 – 28.

Б.11 Геращенко О. А. Приборный комплекс для измерения потоков теплового излучения плотностью 20...300 Вт/м² и его метрологическое обеспечение / О. А. Геращенко, В. В. Августов, Г. Н. Дешевых, В. Н. Черинько // Мера-91 : Тезисы докладов Межд. конф. с выст., – М., 1991. – С. 101.

Б.12 Кудрявцев Е. В. Нестационарный теплообмен / Е. В. Кудрявцев, К. Н. Чекалев, Н. В. Шумаков. – М. : Изд-во АН СССР, 1961. – 158 с.

Б.13 Геращенко О. А. Инерционный радиометр для измерения лучистых тепловых потоков / О. А. Геращенко, В. Г. Карпенко, Ю. В. Чимисов // Вопросы технической теплофизики. – Киев : Наукова думка, 1968. – С. 72-76.

Б.14 Murthy A. V., Tsai B. K., Saunders R. D. Radiativ calibration of heat flux sensors at NIST - an overview (Радиационная градуировка преобразователей теплового потока в NIST - обзор) // HTD, 1997. – Vol. 353. – Proceedings of the ASME Heat Transfer Division 3. – p. 159-164.

Б.15 Murthy A. V. Radiative Calibration of Heat-Flux Sensors at NIST: Facilities and Techniques / A. V. Murthy, B. K. Tsai, R. D. Saunders // Journal of research of the National Institute of Standards and Technology. – Vol. 105, № 2. – Gaithersburg, 2000. – P. 293–305.

Б.16 Геращенко О. А. Прибор для измерения локальных тепловых потоков / О. А. Геращенко, В. Г. Федоров // Теплоэнергетика, 1958. – № 6. – С. 89-90.

- Б.17 Перрен де Бришамбо Ш. Солнечное излучение и радиационный теплообмен в атмосфере. – М. : Мир, 1966. – 319 с.
- Б.18 А. с. 301561 СССР МКИ³ G 01 T 5/02 Абсолютный радиометр // В. Г. Карпенко, О.А. Геращенко, С. А. Сажина (СССР). – Оpubл. 1973, Бюл. № 19. – 3 с.
- Б.19 Приборы для теплофизических измерений: Каталог / К.:Час,1991. – 56с.
- Б.20 Разработка нового типа термоэлектрических приемников теплового излучения, которые допускают нормирование метрологических характеристик, для контроля и автоматизации процессов энерго- и теплоиспользования: отчет по Б/т 1-7.6-32 ("ЛУЧ") (закл. / Институт проблем энергосбережения (ИПЭ) НАН Украины ; ГР VA 01013900P – Киев, 1994. – 109 с.
- Б.21 Хэйджер Н. Абсолютный дифференциальный радиометр / Н. Хэйджер// Приборы для научных исследований. – 1963. – № 9. – С. 68-74.
- Б.22 Хэйджер Н. Тонкопленочный измеритель теплового потока // Приборы для научных исследований. – 1965. – № 11. – С. 39-46.
- Б.23 Tunmore V. G. Wavelength – independent direct reading radiometer / V. G. Tunmore, H. W. Trolander. – Journ. Sci. Instr. – 1965. – Vol. 42, No. 9.
- Б.24 Heat flux sensors: Каталог / Delft:TPD, 1975/ – 6 с.
- Б.25 Heat Flow Thermal Sensor [Electronic resource] / The website of Wuntronic GmbH, Germany. – The access made to the website: <http://WWW.wuntronic.de/>. – Title screen
- Б.26 Gentile T. R. The NIST high accuracy cryogenic radiometer (Высокочастотный криогенный радиометр NIST) / T. R. Gentile, J. M. Hauston, J. E. Hardis, C. L. Cromer, A. C. Parr // Appl. Opt. – 1996. – V. 35. – P. 1056-1068.
- Б.27 Сапожников С.З. Основы градиентной теплотрии [Текст]: монография / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 202 с.
- Б.28 Разработка первичных преобразователей, приборов, устройств и метрологической аппаратуры для обеспечения единства и правильности измерений в области энергосбережения [Рукопись]: Отчет о НИР «Контроль-2» (закл.): Институт общей энергетики НАН; рук. Грищенко Т.Г.; исполн.: Декуша Л.В., Воробьев Л.И. [и др.] – Киев, 1997. – 115 с. - № ГР 0195U010304
- Б.29 Разработка в интересах энергосбережения комплекса аппаратуры нового поколения для определения и исследования метрологических характеристик первичных преобразователей теплового потока [Рукопись]: Отчет о НИР «Контакт -3» (закл.): ИТТФ НАН Украины; рук. Грищенко Т.Г.; исполн.: Декуша Л.В., Воробьев Л.И., Менделеева Т.В. [и др.] – К., 1999. – 134 с. – Библ.: с. 129-132. – №ГР0197U012859.
- Б.30 Розробка теоретичних основ метрологічного забезпечення теплотрії [Рукопис] : Звіт із НДР «Контакт-4» (закл.) : Ин-т технической теплофизики НАН Украины; рук.Грищенко Т.Г.; исполн.: Декуша Л.В., Воробьев Л.И., Менделеева Т.В. [и др.] – Киев, 2002. – 145с. – Библиогр. : с. 142-145. – №ДР0100U002419.
- Б.31 Сергеев О.А. Метрология и средства измерений тепловых величин / О.Сергеев. // Итоги науки и техники ВИНТИ. Метрология и измерительная техника. – М. : ВНИТИ, 1982. – 2, № 5. – С. 179 – 223.
- Б.32 Геращенко О.А. Методы и средства градуировки датчиков теплового потока (обзор) / О.А. Геращенко, Т.Г. Грищенко, Л.А. Лукашевич // Промышленная теплотехника. – Киев, 1986. – Т. 8, № 1. – С. 78-90. – ISSN 0204-3602.
- Б.33 Черепанов В.Я. Методы и средства метрологического обеспечения измерения параметров теплообмена и теплоносителей [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / Черепанов Виктор Яковлевич. – Новосибирск, 2005. – 276 с.
- Б.34 Гурвич А. Л. Сравнительное градуирование датчиков теплового потока (теплоприемников) в диапазоне до 2000 кВт/м² / А. Л. Гурвич, В. В. Белых, И. Е. Спектор, Е. Н. Фомичёв // Промышленная теплотехника: Международный научно-прикладной журнал.– Киев,1980.– Т.2,№1.– С. 98-102.– ISSN 0204-3602.

Б.35 Геращенко О. А. Радиационная градуировка батарейных датчиков теплового потока / О. А. Геращенко, Т. Г. Грищенко, С. А. Сажина // Теплофизика и теплотехника. – Киев: Наукова думка, 1977.– Вып.32. – С. 15-17.

Б.36 Olsson S. Calibration of thermal radiometers – The development of a new method (Градуировка приемников теплового получения. – Разработка нового метода) / S. Olsson. // SP Report 1989:04: National Testing and Research Institute, Sweden (1989). – SP Report 1989:04.

Б.37 Olsson S. Calibration of radiant heat flux meters. The development of a water – cooled aperture for use with blackbody cavities. (Градуировка радиационных преобразователей теплового потока. Разработка водоохлаждаемой диафрагмы для полостных абсолютно черных тел) / S. Olsson. // Swedich National Testing and Research Institute, Sweden (1991). – SP Report 1991:58.

Б.38 Киселёв С. Б. Установка для метрологического исследования глубокоохлаждаемых приемников теплового излучения / С. Б. Киселёв, О. Б. Попов, Н. А. Ткаченко, Ф. Г. Эльдаров // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 1984. – Т. 6, № 6. – С. 50-54. – ISSN 0204-3602.

Б.39 Киселёв С. Б. Низкотемпературная камера для градуировки приемников тепловых потоков излучения / С. Б. Киселёв, О. Б. Попов, Ф. Г. Эльдаров // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 1983. – Т. 5, № 1. – С. 95-98. – ISSN 0204-3602.

Б.40 Фомичев Е. В. Высокотемпературный источник теплового излучения / Е.В. Фомичев, В. В. Белых, А. Н. Гращенков, А. Л. Гурвич // Измерительная техника. – 1978. – № 12. – С. 44-47.

Б.41 Deacon E. L. The measurement and recording of the heat flux into the soil (Измерение и регистрация теплового потока в грунте) / E.L.Deacon // Quart. J.Roy. Meteor. Soc. – 1950. – V. 76.

Б.42 Олейник Б. Н. Установка для поверки и градуировки плоских тепломеров / Б. Н. Олейник, З. К. Патовская // Труды метрологических институтов СССР : Исследования в области тепловых измерений. – 1969. – Вып. 171. – С. 70-72.

Б.43 Метод определения плотности теплового потока через теплоизоляционные конструкции в температурном интервале 200 ... 473 К : отчет о НИР / ВНИПИТеплопроект. – Инв. 02850082784. – М., 1985. – 86 с.

Б.44 Колесников А. Г. Прибор для определения тепловых потоков / А. Г. Колесников, А. А. Сперанская // Изв. АН СССР, Серия геофизика. – 1958. – № 11. – С. 1174-1178.

Б.45 Геращенко О. А. Исследование чувствительности медь-константановых батарейных датчиков теплового потока в интервале температур от 5 до 300 К. / О. А. Геращенко, Т. Г. Грищенко, Л. А. Лукашевич и др. // Промышленная теплотехника. – Киев, 1983. – Т. 5, № 4. – С. 76-80. – ISSN 0204-3602.

Б.46 Геращенко О. А. Адиабатический калориметр для контактной градуировки датчиков теплового потока / О. А. Геращенко, В. Г. Карпенко, Э. А. Татаринов // Теплофизика и теплотехника. – Вып. 16. – Киев : Наукова думка, 1970. – С. 83-86.

Б.47 Геращенко О. А. Высокотемпературная градуировка датчиков теплового потока / О. А. Геращенко, Н. Н. Горшунова // В сб. : Теплофизика и теплотехника. – Киев : Наукова думка, 1971. – Вып. 19. – С. 107-110.

Б.48 Геращенко О. А. Теория теплопроводности контактного столбика / О. А. Геращенко, Т. Г. Грищенко // В сб. : Теплофизика и теплотехника. – Киев : Наук думка, 1971.–Вып. 19. – С. 78-80.

Б.49 Albers M. A. Calibrations of Heat Flow Meters in Wacuum, Cryogenic and High Temperature Conditions (Градуировка преобразователей теплового потока в условиях вакуума, криогенной и высокой температуры) / M. A. Albers // Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes. – 1995. – Vol. 18. – P. 399-410.

Б.50 Грищенко Т. Г. Установка для контактной градуировки датчиков теплового потока в интервале температур от 80 до 300 К / Т. Г. Грищенко, Л. А. Лукашевич, А. В. Остапенко,

В. П. Фокин // Промышленная теплотехника: Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 1982. – Т.4, № 1. – С. 7-10. – ISSN 0204-3602.

Б.51 Лукашевич Л. А. Градуировка преобразователей теплового потока в интервале температур от 80 до 300 К : дис. ... канд. техн. наук / Лукашевич Людмила Александровна. – Киев : ИПЭ НАН Украины, 1994. – 147 с.

Б.52 А. с. 609982 СССР МКИ³ G 01 K 19/00 Способ градуировки преобразователей теплового потока / Г. М. Миндлин, Б. Г. Начкебия, С. Е. Буравой (СССР). – № 2347016/18-10 ; заяв. 17.04.76 ; опубли. 05.06.78, Бюл. № 21. – 3 с.

Б.53 Буравой С. Е. Нестационарный метод определения коэффициента преобразования и проводимости тепломеров / С. Е. Буравой, Б. Г. Начкебия, М. В. Наумов // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 1989. – Т. 11, № 3. – С. 86-89. – ISSN 0204-3602.

Б.54 Начкебия Б. Г. Установка для градуировки преобразователей теплового потока / Б. Г. Начкебия, В. Г. Морозов, Т. В. Белкина и др. // Промышленная теплотехника. – Киев, 1982. – Т. 4, № 1. – С. 42-47. – ISSN 0204-3602.

Б.55 Holmberg D. A progress report on the NIST convective heat flux calibration facility / David G. Holmberg, Carole A. Womeldorf // Proceedings of the 5th ASME/JSME Joint thermal engineering conference. – San Diego, California, 1999. – P. 1-8.

Б.56 Raphael-Mabel S. Design and calibration of a novel high temperature heat flux gage sensor : thesis Master of Science in Mechanical Engineering / S. Raphael-Mabel. – Blacksburg VA, USA, 2005. – 109 p.

Б.57 Blokland H., Van der Graaf F. Sensor for measuring convective and Radiative Heat Flux (Преобразователь для измерения конвективного и радиационного теплового потока) / H. Blokland, F. van der Graaf // Internet : <http://www.tpd.tno.nl.2010>. – 7 p.

Б.58 Bronwer J.C. Eindverslag calibratce baksensoren / J.C. Bronwer // TNO Report, Delft. – 99.

Б.59 Эльдаров Ф. Г. Образцовая установка для измерения плотности лучистых тепловых потоков / Ф. Г. Эльдаров, О. А. Краев, Г. Е. Кузьмин // Измерительная техника. – 1974. – № 47. – С. 41.

Б.60 Краев О. А. Калориметр для измерения плотности лучистых потоков / О. А. Краев, В. М. Шульга // Измерительная техника. – 1978. – № 3. – С. 61-62.

Б.61 Белоконь А. А. Шаровой радиометр / А. А. Белоконь, Г. Я. Бубель, Н. И. Профатилова, Д. М. Щербина // Приборы и техника эксперимента. – 1976. – № 5. – С. 81-82.

Б.62 Орлов В. А. Установка для метрологической аттестации приемников теплового излучения / В. А. Орлов, Г. А. Мазаев, Г. Я. Бубуль и др. // Промышленная теплотехника. – Киев, 1982. – Т. 4, № 1. – С. 37-41. – ISSN 0204-3602.

Б.63 Геращенко О. А. Разработка и создание стенда для метрологической аттестации и поверки датчиков лучистых потоков (ДЛП) / О. А. Геращенко, Ю. З. Мавашев, Д. М. Щербина и др. // Гелиотехника. – 1979. – № 6. – С. 46-50.

Б.64 Томбасов Е. А. Образцовая установка для градуировки и поверки преобразователей теплового потока / Е. А. Томбасов, О. И. Лозинская, В. Я. Черепанов // Метрология : ежемесячное приложение к науч.-техн. журналу «Измерительная техника». – 1987. – № 1. – С. 31-39.

Б.65 Томбасов Е. А. Разработка и исследование средств метрологической аттестации преобразователей теплового потока / Е. А. Томбасов, В. Я. Черепанов, А. Н. Калинин // Измерительная техника. – 1987. – № 5. – С. 30-32.

Б.66 Геращенко О. А. Аппаратура для метрологической аттестации преобразователей теплового потока / О. А. Геращенко, Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша // Тезисы докладов VII Всеакадемической школы по проблемам метрологического обеспечения и стандартизации. – Фрунзе : АН Киргизской ССР, 1989

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Решение уравнения теплопроводности при исследовании искажений температурных и тепловых полей в ПТП и контролируемом объекте

Введение. Особенности измерения теплового потока через ОК плоским ПТП конечных размеров являются искажения температурного и теплового полей, возникающие как в самом ПТП, так и в массиве объекта контроля. Исследование методических погрешностей измерений выполнено в диссертационной работе путем решения уравнения теплопроводности при граничных условиях, соответствующих различным типам ОК и случаям взаимного расположения ПТП и ОК.

В.1 – Случай размещения ПТП на поверхности ОК – изотермической металлической пластины (решение задачи параграфа 2.1)

Для этого случая схема физической модели теплообмена в системе «Изотермическая металлическая пластина – ПТП – окружающая среда» показана на рисунке В.1.

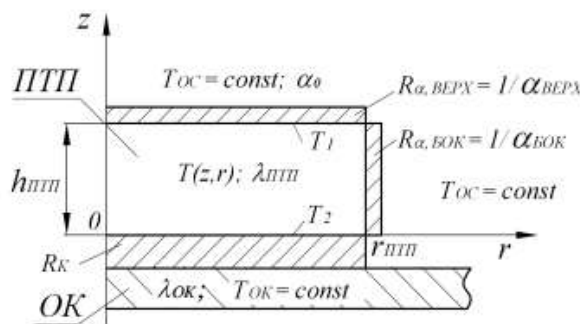


Рисунок В.1 – Схема физической модели системы «Изотермическая пластина из высокотеплопроводного материала – ПТП – ОС»

Теплообмен с коэффициентом $\alpha_{\text{БОК}}$ между боковой поверхностью ПТП и окружающей средой (далее – ОС) приводит к искажениям температурного и теплового полей в самом ПТП [В.1].

Решение уравнения (2.16) при граничных условиях (2.17) имеет вид [В.2 – В.4]:

$$\mathcal{Q}(\zeta, \rho) = K_t \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot J_0(v_n \rho) \cdot S_n(\zeta), \quad (\text{В.1.1})$$

где $J_0(v_n \rho)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка [В.5],

v_n – собственные числа характеристического уравнения: $v \cdot J_0'(v) + Bi_{\text{БОК}} \cdot J_0(v) = 0$;

$$K_t = Bi_{\text{БОК}} / (\alpha_{\text{БОК}} \cdot R_{\alpha, \text{ПТП}}^{\text{ВЕРХ}}), \quad (\text{В.1.2})$$

$$A_n = \frac{2Bi_{\text{БОК}}}{v_n \cdot J_0(v_n)(Bi_{\text{БОК}}^2 + v_n^2)}, \quad (\text{В.1.3})$$

$$S_n(\zeta) = (B_n(\zeta) + C_n(\zeta)) / Z_n(M), \quad (\text{В.1.4})$$

где $B_n(\zeta) = \mathcal{G}_1(\text{sh}(v_n M \zeta) + D_{n,2} \text{ch}(v_n M \zeta)), \quad (\text{В.1.5})$

$$C_n(\zeta) = \mathcal{G}_2(\text{sh}(v_n M (1 - \zeta)) + D_{n,1} \text{ch}(v_n M (1 - \zeta))), \quad (\text{В.1.6})$$

$$Z_n(M) = (D_{n,2} + D_{n,1}^{-1}) \text{sh}(v_n M) + (1 + D_{n,2} / D_{n,1}) \text{ch}(v_n M), \quad (\text{В.1.7})$$

$$D_{n,1} = \nu_n \cdot \alpha_{\text{БОК}} R_{\alpha, \text{ПТП}}^{\text{БЕРХ}} / \text{Bi}_{\text{БОК}}, \quad D_{n,2} = \nu_n \cdot \alpha_{\text{БОК}} R_k / \text{Bi}_{\text{БОК}}, \quad (\text{B.1.8})$$

$$M = 2/k = h_{\text{ПТП}} / r_{\text{ПТП}}. \quad (\text{B.1.9})$$

Исходя из (B.1.1) производная от локальной температуры $\mathcal{G}(\rho, \zeta)$ имеет вид:

$$\frac{\partial \mathcal{G}(\rho, \zeta)}{\partial \zeta} = K_q \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \nu_n \cdot J_0(\nu_n \rho) \cdot P_n(\zeta), \quad (\text{B.1.10})$$

где $K_q = K_t \cdot M$, при этом K_t по формуле (B.1.2) и M – по (B.1.9);

A_n – по формуле (B.1.3)

$$P_n(\zeta) = (G_n(\zeta) + H_n(\zeta)) / Z_n(M), \quad (\text{B.1.11})$$

$$\text{где } G_n(\zeta) = \mathcal{G}_1(ch(\nu_n M \zeta) + D_{n,2} sh(\nu_n M \zeta)), \quad (\text{B.1.12})$$

$$H_n(\zeta) = \mathcal{G}_2(ch(\nu_n M (1 - \zeta)) + D_{n,1} sh(\nu_n M (1 - \zeta))), \quad (\text{B.1.13})$$

$Z_n(M)$ – по формуле (B.1.7), $D_{n,1}$ и $D_{n,2}$ – по формуле (B.1.8).

B.2 – Случай размещения ПТП на конвективно охлаждаемой поверхности ОК – неограниченной пластины (решение задачи параграфа 2.6)

Для этого случая схема физической модели приведена на рисунке B.2. В задаче принято допущение об одинаковом коэффициенте теплообмена ПТП с ОС на торцевой и боковой поверхностях ПТП. Это позволило трансформировать исходную задачу, объединив тепловое сопротивление ПТП ($R_{\text{ПТП}} = h_{\text{ПТП}} / \lambda_{\text{ПТП}}$) с тепловым сопротивлением конвективному теплообмену на его торцевой поверхности ($1/\alpha_0$) и введя понятие эффективного коэффициента теплообмена: $\alpha_{\text{ЭФ}} = (1/\alpha_0 + h_{\text{ПТП}} / \lambda_{\text{ПТП}})^{-1}$. Таким образом схема модели исходной задачи трансформирована в схему, приведенную на рисунке B.3 [B.2, B.6-B.8].

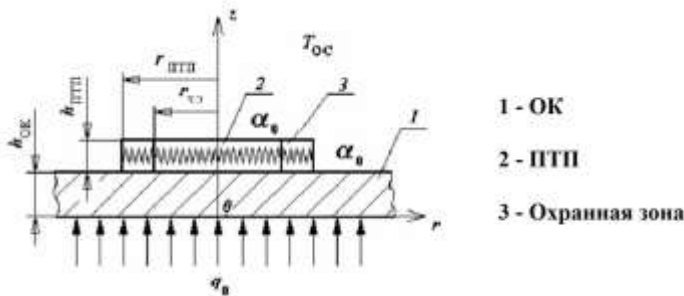


Рисунок B.2 – Схема физической модели теплообмена в системе «неограниченная пластина – ПТП – ОС»

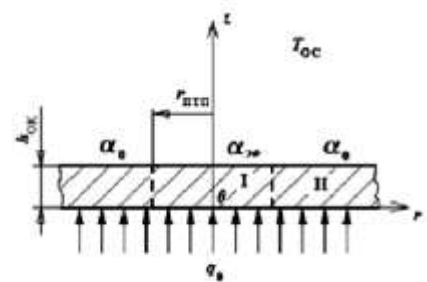


Рисунок B.3 – Схема модели трансформированной задачи

При этом на схеме рис. B.3 область **I** соответствует ограниченному сплошному цилиндру высотой $h_{\text{ОК}}$ и радиусом $r_{\text{ПТП}}$; область **II** – полуму цилиндру высотой $h_{\text{ОК}}$ с внутренним радиусом $r_{\text{ПТП}}$ и бесконечным наружным радиусом. На поверхность области **II** при $z = 0$ поступает постоянный тепловой поток q_0 . На поверхности при $z = h_{\text{ОК}}$ происходит конвективный теплообмен с ОС с постоянным коэффициентом теплообмена α_0 .

Обе области имеют общую поверхность цилиндрической формы высотой h_{OK} и радиусом r_{III} . При таком определении граничных условий для решения каждой из областей применен классический метод разделения переменных, а распределения температуры и плотности теплового потока представлены в виде бесконечных рядов. Определение коэффициентов этих рядов выполнено, исходя из равенства значений температуры T_I и T_{II} и радиального теплового потока $-\lambda_{OK} \partial T_I / \partial r$ и $-\lambda_{OK} \partial T_{II} / \partial r$ на общей границе областей, т. е. при $r = r_{III}$ и $0 \leq z \leq h_{OK}$.

При переходе к безразмерным координатам $\rho = r/r_{III}$ и $\zeta = z/h_{III}$ введена безразмерная форма для температуры \tilde{T}_i следующими соотношениями: $\tilde{T}_i = (T_i - T_{OC}) / (T_{OK} - T_{OC})$, ($i = I, II$), где T_{OK} – неискаженная действительная температура поверхности ОК.

Для применения метода разделения переменных обе функции температуры представлены в виде таких линейных комбинаций, которые позволяют в дальнейшем перейти к однородным граничным условиям:

$$\tilde{T}_I = \mathfrak{G}_1(\rho, \zeta) + Bi_{0,h} \cdot (1 - \zeta) + \frac{Bi_{0,h}}{Bi_{\mathfrak{E}\phi,h}} = \mathfrak{G}_1(\rho, \zeta) + Bi_{0,h} \cdot (1 - \zeta) + \frac{\alpha_0}{\alpha_{\mathfrak{E}\phi}}, \quad (B.2.1)$$

$$\tilde{T}_{II} = \mathfrak{G}_2(\rho, \zeta) + Bi_{0,h} \cdot (1 - \zeta) + 1, \quad (B.2.2)$$

$$\text{где } Bi_{0,h} = \alpha_0 h_{OK} / \lambda_{OK}, \quad Bi_{\mathfrak{E}\phi,h} = \alpha_{\mathfrak{E}\phi} h_{OK} / \lambda_{OK} \text{ – числа Био,} \quad (B.2.3)$$

$$\text{причем } Bi_{0,h} / Bi_{\mathfrak{E}\phi,h} = \alpha_0 / \alpha_{\mathfrak{E}\phi}. \quad (B.2.4)$$

$\mathfrak{G}_1(\rho, \zeta)$ и $\mathfrak{G}_2(\rho, \zeta)$ – функции температуры в безразмерной форме, удовлетворяющие дифференциальному уравнению

$$\frac{\partial^2 \mathfrak{G}}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \mathfrak{G}}{\partial \rho} + \frac{r_{III}}{h_{III}} \cdot \frac{\partial^2 \mathfrak{G}}{\partial \zeta^2} = 0 \quad (B.2.5)$$

при следующих граничных условиях

$$\text{– для области } I: \quad \mathfrak{G}_1(0, \zeta) \text{ – ограничена,} \quad (B.2.6)$$

$$\frac{\partial \mathfrak{G}_1}{\partial \zeta}(\rho, 0) = 0, \quad (B.2.7)$$

$$\frac{\partial \mathfrak{G}_1}{\partial \zeta}(\rho, 1) = -Bi_{\mathfrak{E}\phi,h} \cdot \mathfrak{G}_1(\rho, 1), \quad (B.2.8)$$

$$\text{– для области } II: \quad \frac{\partial \mathfrak{G}_2}{\partial \rho}(\infty, \zeta) \text{ – ограничена,} \quad (B.2.9)$$

$$\frac{\partial \mathfrak{G}_2}{\partial \zeta}(\rho, 0) = 0, \quad (B.2.10)$$

$$\frac{\partial \mathfrak{G}_2}{\partial \zeta}(\rho, 1) = -Bi_{0,h} \cdot \mathfrak{G}_2(\rho, 1). \quad (B.2.11)$$

Температурные поля обеих областей связаны тем условием, что на их совместной границе ($\rho = 1$) температура и тепловой поток непрерывны и, следовательно, справедливы следующие равенства:

$$\mathfrak{D}_1(1, \zeta) + \frac{Bi_{0,h}}{Bi_{\mathfrak{D}\Phi,h}} = \mathfrak{D}_2(1, \zeta) + 1, \quad (\text{B.2.12})$$

$$\frac{\partial \mathfrak{D}_1(1, \zeta)}{\partial \rho} = \frac{\partial \mathfrak{D}_2(1, \zeta)}{\partial \rho}. \quad (\text{B.2.13})$$

В результате решения уравнения (B.2.5) с граничными условиями для областей **I** и **II** получены следующие выражения функции температуры:

$$\text{— для области I: } \mathfrak{D}_1(\rho, \zeta) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot I_0(\bar{v}_n \cdot \rho) \cdot \cos\left(\frac{h_{OK} \cdot \bar{v}_n}{r_{III}} \cdot \zeta\right), \quad (\text{B.2.14})$$

$$\text{— для области II: } \mathfrak{D}_2(\rho, \zeta) = \sum_{m=1}^{\infty} B_m \cdot K_0(\bar{\mu}_m \cdot \rho) \cdot \cos\left(\frac{h_{OK} \cdot \bar{\mu}_m}{r_{III}} \cdot \zeta\right), \quad (\text{B.2.15})$$

где I_0 и K_0 – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода, соответственно, нулевого порядка, \bar{v}_n и $\bar{\mu}_m$ – собственные числа, которые определяются из следующих характеристических уравнений

$$\frac{h_{OK} \cdot \bar{v}_n}{r_{III}} \cdot \text{tg}\left(\frac{h_{OK} \cdot \bar{v}_n}{r_{III}}\right) = Bi_{\mathfrak{D}\Phi,h}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{B.2.16})$$

$$\frac{h_{OK} \cdot \bar{\mu}_m}{r_{III}} \cdot \text{tg}\left(\frac{h_{OK} \cdot \bar{\mu}_m}{r_{III}}\right) = Bi_{0,h}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{B.2.17})$$

Коэффициенты A_n и B_m рядов (B.2.14) и (B.2.15) найдены из условий (B.2.12) и (B.2.13) с учетом ортогональности собственных функций:

$$A_n = D_n + \sum_{m=1}^{\infty} B_m E_{nm}, \quad (\text{B.2.18})$$

$$\text{где } D_n = \frac{1}{Z_n} \cdot \left(1 - \frac{Bi_{0,h}}{Bi_{\mathfrak{D}\Phi,h}}\right) \cdot \frac{\sin v_n}{v_n}, \quad (\text{B.2.19})$$

$$E_{nm} = \frac{1}{Z_n} \cdot 0,5 \cdot K_0(\delta_m) \cdot \left(\frac{\sin(v_n - \mu_m)}{v_n - \mu_m} + \frac{\sin(v_n + \mu_m)}{v_n + \mu_m}\right), \quad (\text{B.2.20})$$

$$\text{где } v_n = \frac{h_{OK} \cdot \bar{v}_n}{r_{III}}, \quad Z_n = 0,5 \cdot I_0(\bar{v}_n) \cdot \left(1 + \frac{\sin 2v_n}{2v_n}\right), \text{ а также}$$

$$B_m = \sum_{k=1}^{\infty} A_k F_{km}, \quad (\text{B.2.21})$$

$$\text{где } F_{km} = -\frac{1}{ZZ_m} \cdot 0,5 \cdot \bar{v}_k \cdot I_1(\bar{v}_k) \cdot \left(\frac{\sin(v_k - \mu_m)}{v_k - \mu_m} + \frac{\sin(v_k + \mu_m)}{v_k + \mu_m}\right), \quad (\text{B.2.22})$$

$$\text{здесь } ZZ_m = 0,5 \cdot \bar{\mu}_m \cdot K(\bar{\mu}_m) \cdot \left(1 + \frac{\sin 2\mu_m}{2\mu_m}\right).$$

Подстановкой (B.2.21) в (B.2.18), получена система алгебраических уравнений для определения коэффициентов A_n :

$$A_n = D_n + \sum_{k=1}^{\infty} A_k G_{kn}, \quad (\text{B.2.23})$$

где
$$G_{kn} = \sum_{m=1}^{\infty} F_{km} \cdot E_{mn} \tag{B.2.24}$$

Порядок системы уравнений (B.2.23) определяется количеством найденных собственных чисел, которое диктуется точностью сходимости рядов (B.2.14) и (B.2.15) и, как показывают расчеты, зависит от соотношения толщины пластины и радиуса ПТП, а также от коэффициента теплообмена.

Как отмечено ранее, результат измерения ПТП определяется значением среднеинтегрального теплового потока, выражение для плотности которого в области I имеет вид:

$$q_{\bar{N}D,I}(\zeta, \rho) = -\frac{\lambda_{OK}}{\rho^2} \cdot \frac{T_{OK} - T_{OC}}{h_{OK}} \int_0^{\rho} \frac{\partial \tilde{T}_I}{\partial \zeta} \cdot 2\rho d\rho \tag{B.2.25}$$

С учетом (B.2.14) выражение (B.2.25) принимает вид:

$$q_{\bar{N}D,I}(\zeta, \rho) = \frac{\lambda_{OK}}{\rho^2} \cdot \frac{T_{OK} - T_{OC}}{h_{OK}} \cdot \left(\rho^2 Bi_{0,h} + 2 \int \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot v_n \cdot I_0(\bar{v}_n \cdot \rho) \sin(v_n \cdot \zeta) \rho d\rho \right) \tag{B.2.26}$$

Пути несложных преобразований с учетом корня $v_n = (h_{OK} \cdot \bar{v}_n / r_{ПТП})$ и того, что

$$\int_0^{\rho} I_0(\bar{v}_n \cdot \rho) \rho d\rho = \frac{\rho}{\bar{v}_n} I_1(\bar{v}_n \cdot \rho) \tag{B.2.27}$$

выражение (B.2.26) преобразовано к виду:

$$\begin{aligned} q_{\bar{N}D,I}(\zeta, \rho) &= \frac{\lambda_{OK}}{\rho^2} \cdot \frac{T_{OK} - T_{OC}}{h_{OK}} \cdot \left(\rho^2 \cdot Bi_{0,h} + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \dot{A}_n \cdot v_n \cdot \frac{\rho}{\bar{v}_n} \cdot I_1(\bar{v}_n \cdot \rho) \cdot \sin(v_n \zeta) \right) = \\ &= \frac{\lambda_{OK}}{\rho^2} \cdot \frac{T_{OK} - T_{OC}}{h_{OK}} \cdot \left(\rho^2 \cdot Bi_{0,h} + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \frac{h_{OK}}{r_{ПТП}} \cdot \rho \cdot I_1(\bar{v}_n \cdot \rho) \cdot \sin(v_n \zeta) \right) \end{aligned} \tag{B.2.28}$$

В.3 – Случай размещения ПТП на поверхность ОК – неограниченной пластины, конвективно охлаждаемой с двух сторон (решение трансформированной задачи параграфа 2.7)

Для этого случая схема физической модели теплообмена в системе «ОС₁ – ПТП – неограниченная пластина – ОС₂» приведена на рисунке В.4, а схема модели трансформированной задачи – на рисунке В.5. [В.2; В.5; В.9; В.10].

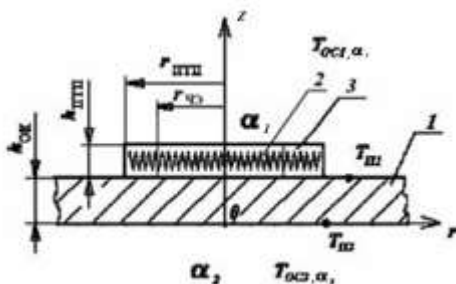


Рисунок В.4 – Схема физической модели теплообмена в системе «ОС₁ – ПТП – пластина – ОС₂»

- 1 - ОК
- 2 - ПТП
- 3 - Охранная зона

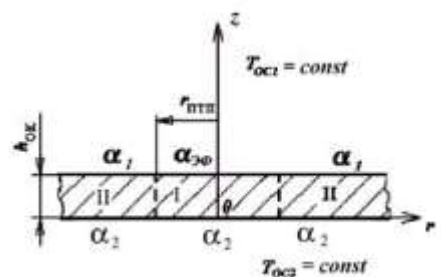


Рисунок В.5 – Схема модели трансформированной задачи

Граничные условия, записанные для трансформированной задачи (см. (2.81)-(2.83)), неоднородны, но, пользуясь линейностью данной задачи, безразмерные выражения температуры (2.76) и (2.77) можно представить в виде такой линейной комбинации, которая позволяет перейти к однородным граничным условиям и использовать метод разделения переменных. Для этого:

– для области I ($0 \leq \rho \leq 1$), воспользовавшись подстановкой

$$\tilde{T}_I(\rho, \zeta) = \mathfrak{G}_I(\rho, \zeta) + \frac{Bi_{\mathfrak{E}\Phi, h} \cdot Bi_{2, h} \cdot (1 - \zeta) + Bi_{2, h}}{Bi_{\mathfrak{E}\Phi, h} + Bi_{2, h} + Bi_{\mathfrak{E}\Phi, h} \cdot Bi_{2, h}}, \quad (\text{B.3.1})$$

выражения температуры на торцах ограниченного цилиндра преобразованы к виду:

$$\tilde{T}_{I, 1} = \tilde{T}_I(\rho, 1) = \mathfrak{G}_I(\rho, 1) + a_{2\mathfrak{E}\Phi}, \quad (\text{B.3.2})$$

$$\tilde{T}_{I, 2} = \tilde{T}_I(\rho, 0) = \mathfrak{G}_I(\rho, 0) + Bi_{\mathfrak{E}\Phi, h} \cdot a_{2\mathfrak{E}\Phi} + a_{2\mathfrak{E}\Phi}, \quad (\text{B.3.3})$$

где $a_{2\mathfrak{E}\Phi} = \frac{Bi_{2, h}}{Bi_{\mathfrak{E}\Phi, h} + Bi_{2, h} + Bi_{\mathfrak{E}\Phi, h} \cdot Bi_{2, h}} = \frac{1}{1 + \alpha_{\mathfrak{E}\Phi}/\alpha_2 + Bi_{\mathfrak{E}\Phi, h}}$;

– для области II ($1 \leq \rho < \infty$) с использованием подстановки:

$$\tilde{T}_{II}(\rho, \zeta) = \mathfrak{G}_{II}(\rho, \zeta) + \frac{Bi_{1, h} \cdot Bi_{2, h} \cdot (1 - \zeta) + Bi_{2, h}}{Bi_{1, h} + Bi_{2, h} + Bi_{1, h} \cdot Bi_{2, h}} \quad (\text{B.3.4})$$

температура на торцах полого цилиндра записывается следующими выражениями:

$$\tilde{T}_{I, 1} = \tilde{T}_{II}(\rho, 1) = \mathfrak{G}_{II}(\rho, 1) + a_2, \quad (\text{B.3.5})$$

$$\tilde{T}_{I, 2} = \tilde{T}_{II}(\rho, 0) = \mathfrak{G}_{II}(\rho, 0) + Bi_{1, h} \cdot a_2 + a_2, \quad (\text{B.3.6})$$

где $a_2 = \frac{Bi_{2, h}}{Bi_{1, h} + Bi_{2, h} + Bi_{1, h} \cdot Bi_{2, h}} = \frac{1}{1 + \alpha_1/\alpha_2 + Bi_{1, h}}$.

В (B.3.1) ÷ (B.3.6) функции температуры $\mathfrak{G}_I(\rho, \zeta)$ и $\mathfrak{G}_{II}(\rho, \zeta)$, представленные в безразмерной форме, удовлетворяют дифференциальному уравнению (2.62) со следующими граничными условиями:

– для области I ($0 \leq \rho \leq 1$): $\frac{\partial \mathfrak{G}_I}{\partial \zeta}(\rho, 0) = Bi_{2, h} \cdot \mathfrak{G}_I(\rho, 0),$ (B.3.7)

$$\frac{\partial \mathfrak{G}_I}{\partial \zeta}(\rho, 1) = -Bi_{\mathfrak{E}\Phi, h} \cdot \mathfrak{G}_I(\rho, 1), \quad (\text{B.3.8})$$

$$\mathfrak{G}_I(0, \zeta) \text{ – ограничена;} \quad (\text{B.3.9})$$

– для области II ($1 \leq \rho < \infty$): $\frac{\partial \mathfrak{G}_{II}}{\partial \zeta}(\rho, 0) = Bi_{2, h} \cdot \mathfrak{G}_{II}(\rho, 0),$ (B.3.10)

$$\frac{\partial \mathfrak{G}_{II}}{\partial \zeta}(\rho, 1) = -Bi_{1, h} \cdot \mathfrak{G}_{II}(\rho, 1), \quad (\text{B.3.11})$$

$$\frac{\partial \mathfrak{G}_{II}}{\partial \rho}(\rho \rightarrow \infty, \zeta) \rightarrow 0. \quad (\text{B.3.12})$$

Исходя из условий равенства значений температуры и плотности теплового потока на общей вертикальной границе ($\rho = 1, 0 \leq \zeta \leq 1$), обеспечивающих непрерывность перехода из области I в область II , получены такие равенства сопряжения:

$$\mathfrak{G}_I(1, \zeta) + Bi_{\mathfrak{E}\Phi, h} \cdot a_{2\mathfrak{E}\Phi} \cdot (1 - \zeta) + a_{2\mathfrak{E}\Phi} = \mathfrak{G}_{II}(1, \zeta) + Bi_{1, h} \cdot a_2 \cdot (1 - \zeta) + a_2, \quad (\text{B.3.13})$$

$$\frac{\partial \mathfrak{G}_I}{\partial \rho}(1, \zeta) = \frac{\partial \mathfrak{G}_{II}}{\partial \rho}(1, \zeta). \quad (\text{B.3.14})$$

Дифференциальное уравнение (В.2.5) решено методом разделения переменных. Для этого искомая безразмерная функция температуры в каждой области представлена в виде произведения двух функций, зависящих только от одной переменной:

$$- \text{ для области } I: \mathcal{G}_I(\rho, \zeta) = R_1(\rho) \cdot Z_1(\zeta), \quad (\text{В.3.15})$$

$$- \text{ для области } II: \mathcal{G}_{II}(\rho, \zeta) = R_2(\rho) \cdot Z_2(\zeta). \quad (\text{В.3.16})$$

После подстановки (В.3.15) в уравнение (В.2.5) получено уравнение:

$$R_1''(\rho) \cdot Z_1(\zeta) + \frac{1}{\rho} \cdot R_1'(\rho) \cdot Z_1(\zeta) + (r_{III}/h_{OK})^2 \cdot R_1(\rho) \cdot Z_1''(\zeta) = 0, \quad (\text{В.3.17})$$

$$\text{откуда: } (R_1''(\rho) + \frac{1}{\rho} R_1'(\rho))/R_1(\rho) + (r_{III}/h_{OK})^2 \cdot \frac{Z_1''(\zeta)}{Z_1(\zeta)} = 0. \quad (\text{В.3.18})$$

Учитывая тот факт, что каждое из слагаемых уравнения (В.3.18) для области *I* зависит только от одной переменной и при этом каждое из них не равно нулю, можно записать два следующих уравнения, каждое из которых является уравнением только с одной переменной:

$$\frac{R_1''(\rho) + \frac{1}{\rho} R_1'(\rho)}{R_1(\rho)} = \lambda^2, \quad (\text{В.3.19})$$

$$\frac{Z_1''(\zeta)}{Z_1(\zeta)} = -\lambda^2 \left(\frac{h_{OK}}{r_{III}} \right)^2 \quad (\text{В.3.20})$$

с граничными условиями, полученными, соответственно, из следующих:

$$- \text{ из условия (В.3.7): } Z_1'(0) = Bi_{2,h} \cdot Z_1(0), \quad (\text{В.3.21})$$

$$- \text{ из условия (В.3.8): } Z_1'(1) = -Bi_{\text{ЭФ},h} \cdot Z_1(1), \quad (\text{В.3.22})$$

$$- \text{ из условия (В.3.9): } R_1(0) \text{ – ограничена.} \quad (\text{В.3.23})$$

Уравнение (В.3.19) представляет собой модифицированное уравнение Бесселя, решением которого, вообще говоря, является линейная комбинация модифицированных функций Бесселя первого и второго рода. Однако, учитывая условие (В.3.23), коэффициент при функции Бесселя второго рода должен быть равен нулю. Следовательно, решением уравнения (В.3.19) при этих условиях является модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка $R_1(\rho) = I_0(\lambda \cdot \rho)$, а решением уравнения (В.3.20) следующая функция:

$$Z_1(\zeta) = c_1 \cdot \cos(\varepsilon \cdot \zeta) + c_2 \cdot \sin(\varepsilon \cdot \zeta), \quad (\text{В.3.24})$$

где $\varepsilon = \lambda \cdot h_{OK} / r_{III}$, а подстановка в (В.3.24) значений коэффициентов c_1 и c_2 , найденных из условий (В.3.21) и (В.3.22), приводит к трансцендентному уравнению для определения собственных чисел ε_n для области *I*:

$$\varepsilon_n \cdot \text{ctg}(\varepsilon_n) = \frac{\varepsilon_n^2 - Bi_{\text{ЭФ},h} \cdot Bi_{2,h}}{Bi_{\text{ЭФ},h} + Bi_{2,h}}. \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{В.3.25})$$

Подстановкой в формулу (В.3.15) полученных выражений для $R_1(\rho)$ и $Z_1(\zeta)$ найдено общее решение для температуры в области *I*, которое представляет собой линейную комбинацию множества фундаментальных решений в виде бесконечного ряда:

$$\mathcal{G}_I(\rho, \zeta) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot I_0(\lambda_n \cdot \rho) \cdot \left(\cos(\varepsilon_n \zeta) + \frac{Bi_{2,h}}{\varepsilon_n} \cdot \sin(\varepsilon_n \zeta) \right) \text{ при } 0 \leq \rho \leq 1, 0 \leq \zeta \leq 1. \quad (\text{В.3.26})$$

Аналогичные рассуждения применены для построения решения для температуры в области **II** ($1 \leq \rho < \infty$ и $0 \leq \zeta \leq 1$) с учетом граничных условий для этой области, а именно: вместо уравнения (2.7.22) получено два следующих:

$$\frac{R_2''(\rho) + \frac{1}{\rho} R_2'(\rho)}{R_2(\rho)} = +\delta^2, \quad (\text{B.3.27})$$

$$\frac{Z_2''(\zeta)}{Z_2(\zeta)} = -\delta^2 \cdot \left(\frac{h_{OK}}{r_{III}} \right)^2. \quad (\text{B.3.28})$$

с граничными условиями, полученными из условий (B.3.10) ÷ (B.3.12) для области **II**, соответственно:

$$\text{– из условия (B.3.10): } Z_2'(0) = Bi_{2,h} \cdot Z_2(0), \quad (\text{B.3.29})$$

$$\text{– из условия (B.3.11): } Z_2'(1) = -Bi_{1,h} \cdot Z_2(1), \quad (\text{B.3.30})$$

$$\text{– из условия (B.3.12): } R_2(\infty) \rightarrow 0 \quad (\text{B.3.31})$$

Уравнение (B.3.28) представляет собой модифицированное уравнение Бесселя, решением которого, учитывая условие (B.3.31), является модифицированная функция Бесселя второго рода нулевого порядка, следовательно, $R_2(\rho) = K_0(\delta \cdot \rho)$. Решение уравнения (B.3.28) по аналогии с решением (B.3.24) уравнения (B.3.20) имеет вид:

$$Z_2(\zeta) = b_1 \cdot \cos(\psi \cdot \zeta) + b_2 \cdot \sin(\psi \cdot \zeta), \quad (\text{B.3.32})$$

где $\psi = \delta \cdot h_{OK} / r_{III}$ – собственные числа трансцендентного уравнения для

$$\text{области II: } \psi_m \cdot \text{ctg}(\psi_m) = \frac{\psi_m^2 - Bi_{1,h} \cdot Bi_{2,h}}{Bi_{1,h} + Bi_{2,h}}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{B.3.33})$$

Подстановкой полученных выражений для $R_2(\rho)$ и $Z_2(\zeta)$ в формулу (2.7.32), найдено общее решение для температуры в области **II**, которое представляет собой линейную комбинацию множества фундаментальных решений в виде бесконечного ряда:

$$\mathcal{G}_{II}(\rho, \zeta) = \sum_{m=1}^{\infty} (B_m \cdot K_0(\delta_m \cdot \rho) \cdot (\cos(\psi_m \zeta) + \frac{Bi_{2,h}}{\psi_m} \cdot \sin(\psi_m \zeta))) \quad (\text{B.3.34})$$

для области значений $1 \leq \rho \leq \infty$ и $0 \leq \zeta \leq 1$.

Коэффициенты разложения A_n и B_m в формулах (B.3.26) и (B.3.34) найдены, исходя из условий сопряжения (2.7.8) и (2.7.9) решений на границе областей **I** и **II**, то есть при $\rho = 1$ и $0 \leq \zeta \leq 1$.

Подстановкой выражений (B.3.26) и (B.3.34) для $\mathcal{G}_I(\rho, \zeta)$ и $\mathcal{G}_{II}(\rho, \zeta)$ в (B.3.14), с учетом ортогональности собственных функций, получены выражения коэффициентов A_n через коэффициенты B_m :

$$A_n = D_n + \sum_{m=1}^{\infty} B_m E_{mn}, \quad (\text{B.3.35})$$

$$\text{где } D_n = \frac{1}{Z_n} (a_2 - a_{2\text{ЭФ}}) \cdot \left(\frac{\sin \varepsilon_n}{\varepsilon_n} - \frac{Bi_{2,h}}{\varepsilon_n} \cdot \frac{\cos \varepsilon_n - 1}{\varepsilon_n} \right),$$

$$E_{mn} = \frac{1}{ZN_n} \cdot 0,5 \cdot K_0(\delta_m) (E1_{mn} + E2_{mn}),$$

$$E1_{mn} = \left(1 + \frac{Bi_{2,h}^2}{\psi_m \varepsilon_n}\right) \cdot \frac{\sin(\psi_m - \varepsilon_n)}{\psi_m - \varepsilon_n} + \left(1 - \frac{Bi_{2,h}^2}{\psi_m \varepsilon_n}\right) \cdot \frac{\sin(\psi_m + \varepsilon_n)}{\psi_m + \varepsilon_n},$$

$$E2_{mn} = \left(\frac{Bi_{2,h}}{\psi_m} - \frac{Bi_{2,h}}{\varepsilon_n}\right) \cdot \frac{1 - \cos(\psi_m - \varepsilon_n)}{\psi_m - \varepsilon_n} + \left(\frac{Bi_{2,h}}{\psi_m} + \frac{Bi_{2,h}}{\varepsilon_n}\right) \cdot \frac{1 - \cos(\psi_m + \varepsilon_n)}{\psi_m + \varepsilon_n},$$

$$ZN_n = 0,5 \cdot I_0(\lambda_n) \cdot \left(\left(1 + \frac{Bi_{2,h}^2}{\varepsilon_n^2}\right) + \left(1 - \frac{Bi_{2,h}^2}{\varepsilon_n^2}\right) \cdot \frac{\sin 2\varepsilon_n}{2\varepsilon_n} + \frac{Bi_{2,h}}{\varepsilon_n} \cdot \frac{1 - \cos 2\varepsilon_n}{\varepsilon_n} \right).$$

Для удовлетворения второго условия сопряжения (B.3.14) найдены частные производные от $\theta_I(\rho, \zeta)$ и $\theta_{II}(\rho, \zeta)$, которые с учетом того, что $I_0'(x) = -I_1(x)$ и $K_0'(x) = -K_1(x)$, имеют следующие выражения:

$$\frac{\partial \theta_I(\rho, \zeta)}{\partial \rho} = -\sum_{n=0}^{\infty} A_n \cdot \lambda_n \cdot I_1(\lambda_n \cdot \rho) \cdot (\cos(\varepsilon_n \zeta) + \frac{Bi_{2,h}}{\varepsilon_n} \cdot \sin(\varepsilon_n \zeta)). \quad (B.3.36)$$

$$\frac{\partial \theta_{II}(\rho, \zeta)}{\partial \rho} = -\sum_{m=0}^{\infty} B_m \cdot \delta_m \cdot K_1(\delta_m \cdot \rho) \cdot (\cos(\psi_m \zeta) + \frac{Bi_{2,h}}{\psi_m} \cdot \sin(\psi_m \zeta)), \quad (B.3.37)$$

где $I_1(\lambda_n \cdot \rho)$ и $K_1(\delta_m \cdot \rho)$ – модифицированные функции Бесселя, соответственно, первого и второго рода первого порядка.

Подстановкой выражений (B.3.36) и (B.3.37) в (B.3.14), с учетом ортогональности собственных функций, получены выражения коэффициентов B_m через коэффициенты A_n :

$$B_m = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot F_{km}, \quad (B.3.38)$$

где $F_{km} = -\frac{1}{ZM_m} \cdot 0,5 \cdot \lambda_k \cdot I_1(\lambda_k) (F1_{km} + F2_{km}),$

$$F1_{km} = \left(1 + \frac{Bi_{2,h}^2}{\psi_m \varepsilon_k}\right) \cdot \frac{\sin(\psi_m - \varepsilon_k)}{\psi_m - \varepsilon_k} + \left(1 - \frac{Bi_{2,h}^2}{\psi_m \varepsilon_k}\right) \cdot \frac{\sin(\psi_m + \varepsilon_k)}{\psi_m + \varepsilon_k},$$

$$F2_{km} = \left(\frac{Bi_{2,h}}{\psi_m} - \frac{Bi_{2,h}}{\varepsilon_k}\right) \cdot \frac{1 - \cos(\psi_m - \varepsilon_k)}{\psi_m - \varepsilon_k} + \left(\frac{Bi_{2,h}}{\psi_m} + \frac{Bi_{2,h}}{\varepsilon_k}\right) \cdot \frac{1 - \cos(\psi_m + \varepsilon_k)}{\psi_m + \varepsilon_k},$$

$$ZM_m = 0,5 \delta_m K_1(\delta_m) \cdot \left(\left(1 + \frac{Bi_{2,h}^2}{\psi_m^2}\right) + \left(1 - \frac{Bi_{2,h}^2}{\psi_m^2}\right) \cdot \frac{\sin 2\psi_m}{2\psi_m} + \frac{Bi_{2,h}}{\psi_m} \cdot \frac{1 - \cos 2\psi_m}{\psi_m} \right).$$

Подстановкой выражения (B.3.38) коэффициентов B_m в (B.3.35), получена алгебраическая система уравнений для определения коэффициентов A_n :

$$A_n = D_n + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot G_{kn}, \quad (B.3.39)$$

где $G_{kn} = \sum_{m=1}^{\infty} F_{km} \cdot E_{mn} \cdot$

Таким образом, найдена система алгебраических уравнений:

$$\sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot G_{kn} - A_n = -D_n, \quad (\text{В.3.40})$$

порядок которой определяется количеством найденных собственных чисел. Это количество диктуется точностью сходимости рядов (В.3.26) и (В.3.34) и, как показывают расчеты, зависит от соотношения толщины пластины и радиуса ПТП, а также от коэффициентов теплообмена.

Перечень ссылок:

В.1 – Грищенко Т. Г. Особенности использования тепломера в приборах для определения теплопроводности // Инж.-физ. журнал. – 1981. – Т. 40, № 6. – С. 1055-1061.

В.2 – Розробка теоретичних основ метрологічного забезпечення теплометрії [Рукопис] : Звіт з НДР "Контакт-4" (заключ.) : Ін-т технічної теплофізики НАН України; рук. Грищенко Т. Г.; исполн.: Декуша Л. В., Воробьев Л. И., Менделеева Т. В. [и др.] – Киев, 2002. – 145с. – Библиогр. : с.142-145. – № ДР 0100U002419.

В.3 – Грищенко Т. Г. Теоретические основы метрологии теплоточных измерений / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Т. В. Менделеева // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – Киев, 2001. – Т.23, № 4-5. – с. 175-180. – ISSN 0204-3602.

В.4 – Декуша Л. В. Современное состояние метрологического обеспечения теплоточных измерений с помощью первичных преобразователей теплового потока / Л. В. Декуша, Л. И. Воробьев, Т. Г. Грищенко, Т. В. Менделеева, С. И. Ковтун // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія -2004) : наукові праці IV Міжн. наково-техн. конф., в 2-х томах. – Харків, 2004. – Т.2. – С. 26-31.

В.5 – Ватсон Г. Н. Теория бесселевых функций : в 2 ч. Ч. 1 [Текст] /Г. Н. Ватсон ; пер. с англ. В. С. Бермана ; [Под ред. и с доп. Г. Шилова]. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1949. – 798 с.

В.6 – 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

В.7 – Декуша Л. В. Измерение стационарного теплового потока плоским преобразователем теплового потока, помещенным на конвективно охлаждаемой бесконечной пластине / Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша, Т. В. Менделеева. – Киев, 2002. – 16 с. – Деп. в ГНТБ Украины, р.№ 39-Ук2003.

В.8 – Декуша Л. В. Об особенностях измерения стационарного теплового потока, проходящего через бесконечную пластину по обе стороны, которой происходит конвективный теплообмен / Л. В. Декуша, Т. В. Менделеева. – Киев, 2003. – 25 с. – Деп. в ГНТБ Украины, р.№ 93-Ук2003.

В.9 – 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Информация о метрологической аттестации теплотрических средств измерительной техники (СИТ)

Таблица Г.1 – Перечень разработанных программ и методик метрологической аттестации (ПМА)

№ п/п	Название теплотрического СИТ, модель	Кто утвердил, дата утверждения, регистрационный номер ПМА
1	2	3
1	Калориметр для измерения теплоты сгорания топлива, КТС	Директор УкрЦСМ, 22.08.1995, ПМА-б/н.1995
2	Преобразователи теплового потока термоэлектрические вида вспомогательной стенки общего назначения, ПТП	Заместитель директора УкрЦСМ, 23.04.1999, ПМА-б/н.1999
3	Установка для измерения терморрадиационных характеристик стекол, ИТРС-1	Заместитель директора УкрЦСМ, 23.04.1999, ПМА-б/н.1999
4	Приемник теплового излучения (радиометр), РАП-12	Заместитель директора УкрЦСМ, 05.08.2000, ПМА-б/н.2000
5	Комплекс аппаратуры для измерения тепловых параметров пламени I горелки, КИТП-1	Заместитель директора УкрЦСМ, 05.08.2000, ПМА-б/н.2000
6	ПТП со встроенным преобразователем температуры	Заместитель директора УкрЦСМ, 08.02.2002, МДУ 013/06-2002
7	Измерительный комплекс, ИТС-3	Заместитель директора УкрЦСМ, 08.02.2002, МДУ 014/06-2002
8	Радиометр с цифровым показывающим устройством, РАП-12.М.2	Заместитель директора ГП «Укрметртестстандарт», 11.12.2003, ПМА 081/39.254-2003
9	Прибор для измерения коэффициентов теплопроводности строительных материалов, ИТ-8	Директор НИИ «МЕТХИМЭНЕРГОТЕСТ» ГП «Укрметртестстандарт», 02.03.2004, ПМА 081/24.263-2004
10	Установка для измерения коэффициента теплопроводности твердых материалов цифровой, ИТ-7С	Директор НИИ «МЕТХИМЭНЕРГОТЕСТ» ГП «Укрметртестстандарт», 25.05.2004, ПМА 081/24.272-2004
11	Многоканальный измерительный комплекс тепловых потоков и температуры «Ресурс»	Директор НИИ «МЕТХИМЭНЕРГОТЕСТ» ГП «Укрметртестстандарт», 18.09.2006, ПМА 081/24.368-2006
12	Установка для измерения коэффициента теплопроводности строительных материалов, ИТС-7С (2-ой вариант ПМА)	Директор НИИ «МЕТХИМЭНЕРГОТЕСТ» ГП «Укрметртестстандарт», 31.07.2009, ПМА 081/24/408-2009
13	Исходный эталон единицы измерения поверхностной плотности теплового потока	Директор НИИ «МЕТХИМЭНЕРГОТЕСТ» ГП «Укрметртестстандарт», 05.12.2008, ПМА 081/24.407-08
14	Первинний еталон одиниці вимірювання поверхневої густини теплового потоку (перутвержден)	Директор ГП «Укрметртестстандарт» Директор ІТТФ НАН України 29.09.2011, ПМА 081/24.407-08

Таблица Г.2 – Перечень свидетельств метрологической аттестации теплотеметрических СИТ

№ п/п	Название теплотеметрического СИТ, модель, номер	Регистрационный номер и дата свидетельства МА. Организация, выдавшая свидетельство
1	2	3
1	Установка для радиационной градуировки ПТП, РГУ, № 01	Св. № 64 от 26.06.1991, Базовый отдел метрологической службы АН УССР
2	Дифференциальный микрокалориметр, ДМК-4, № 01	Св. № 24-2/106 от 14.08.1995, «УкрЦСМ»
3	Установка для измерения теплоты сгорания топлива (калориметр), КТС-1, № 01	Св. № 24-2/106 от 14.08.1995, «УкрЦСМ»
4	Приемник теплового излучения (радиометр), РАП-12, № 01	Протокол МА № 1 от 24.10.1995, СМП «Стандарт-сервис-диагностика»
5	Калориметр, КТС-1М, № 02	Св. № 24-183 от 12.01.1996, «УкрЦСМ»
6	Калориметр, КТС-2, № 01	Св. № 24-123-98 от 12.03.1998, «УкрЦСМ»
7	Бомба калориметрическая, БКУ-1	Аттестат № 24-2/658, от 04.06.1998, «УкрЦСМ»
8	Калориметр, КТС-2, № 02	Св. « 24.329.98 от 15.07.1998, «УкрЦСМ»
9	Установка для измерения термодинамических характеристик стекла, ИТРС-1, № 01	Св. № 39-181-99 от 30.04.1999, «УкрЦСМ»
10	Радиометр, РАП-12, № 02	Св. № 39.358.00 от 21.08.2000, «УкрЦСМ»
11	Комплекс аппаратуры для измерения и регистрации тепловых параметров, КИТП, № 01	Св. № 39.257.00 от 18.10.2000, «УкрЦСМ»
12	Калориметр, КТС-3, № 01	Св. № 24.528.00 от 18.10.2000, «УкрЦСМ»
13	Бомба калориметрическая, БКУ-2	Аттестат № 39-2/1640 от 18.10.2000, «УкрЦСМ»
14	Измерительный комплекс, ИТС-3, № 01	Св. № 39.822.02 от 12.07.2002, «УкрЦСМ»
15	Радиометр с цифровым показывающим устройством, РАП 12М.2, № 01	Св. № 39.384.03 от 15.12.2003, ГП «Укрметртестстандарт»
16	Прибор для измерения теплопроводности строительных материалов, ИТ-8, № 01	Св. № 24.091.04 от 26. 08.2004, ГП «Укрметртестстандарт»
17	Радиометр, РАП-12М, № 03	Св. № 24.255.04 от 19.07.2004, ГП «Укрметртестстандарт»
18	Радиометр, РАП-12Д, № 04	Св. № 24.447.04 от 22.12.2004, ГП «Укрметртестстандарт»
19	Установка для измерения теплопроводности строительных материалов ИТ-7С, № 01	Св. № 24.001.05 от 10.01.2005, ГП «Укрметртестстандарт»
20	Радиометр с цифровым показывающим устройством, РАП-12Д.2, № 06	Св. № 24.106.05 от 11.04.2005, ГП «Укрметртестстандарт»
21	Калориметр, КТС-3, № 02	Св. № 24.2116.06 от 13.04.2006, ГП «Укрметртестстандарт»
22	Радиометр РАП-12М.2, № 007	Св. № 24.373.06 от 06.09.2006, ГП «Укрметртестстандарт»

Продолжение таблицы Г.2

23	Измерительный комплекс «Ресурс-96», № 03	Св. № 24.385.06 от 14.09.2006, ГП «Укрметртестстандарт»
24	Прибор для измерения теплопроводности строительных материалов, ИТ-8М, № 02	Св. № 24.160.07 от 08.06.2007, ГП «Укрметртестстандарт»
25	Радиометр с цифровым показывающим устройством, РАП-12Д.2, № 08	Св. № 24.179.07 от 26.06.2007, ГП «Укрметртестстандарт»
26	Калориметр, КТС-3, № 03	Св. № 24.180.07 от 26.06.2007, ГП «Укрметртестстандарт»
27	Измерительный комплекс, «Ресурс-С», № 04	Св. № 24.197.08 от 10.04.2008, ГП «Укрметртестстандарт»
28	Калориметр, КТС-3, № 04	Св. № 24.196.08 от 10.04.2008, ГП «Укрметртестстандарт»
29	Установка для измерения теплопроводности твердых материалов, ИТ-7С, № 02	Св. № 24.444.08 от 24.10.2008, ГП «Укрметртестстандарт»
30	Прибор для измерения теплопроводности строительных материалов, ИТ-8, № 03	Св. № 24.448.08 от 25.10.2008, ГП «Укрметртестстандарт»
31	Эталонная установка, УВТ-1, № 01	Св. № 24.495.08 от 05.12.2008, ГП «Укрметртестстандарт»
32	Установка для измерения теплопроводности строительных материалов, ИТ-7С, № 03	Св. № 24.160.09 от 20.04.2009, ГП «Укрметртестстандарт»
33	Радиометр с цифровым показывающим устройством, РАП-12УМ.2, № 10	Св. № 24.447.09 от 24.12.2009, ГП «Укрметртестстандарт»
34	Радиометр с цифровым показывающим устройством, РАП-12УМ.2, № 11	Св. № 24.476.10 от 30.12.2010, ГП «Укрметртестстандарт»
35	Калориметр, КТС-4, № 01	Св. № 24.6512010 от 28.12.2010, ГП «Укрметртестстандарт»
36	Установка для измерения теплопроводности строительных материалов ИТ-7С, № 02	Св. № 24.652.2010 от 28.12.2010, ГП «Укрметртестстандарт»
37	Прибор для измерения теплопроводности строительных материалов, ИТ-8М, № 04	Св. № 24.653.2010 от 28.12.2010, ГП «Укрметртестстандарт»
38	Установка для измерения теплопроводности строительных материалов ИТ-7С, № 04	Св. № 24.377.2011 от 01.08.2011, ГП «Укрметртестстандарт»
39	Установка для измерения теплопроводности строительных материалов ИТ-7С, № 05	Св. № 24.440.11 от 30.08.2011, ГП «Укрметртестстандарт»
40	Калориметр, КТС-4, № 02	Св. № 24.472.11 от 28.09.2011, ГП «Укрметртестстандарт»
41	Радиометр, РАП-12УМ, № 12	Св. № 24.284.12 от 27.11.2012, ГП «Укрметртестстандарт»
42	Измерительный комплекс «Ресурс-32», № 05	Св. № 24.306.12 от 18.12.2012, ГП «Укрметртестстандарт»
43	Калориметр КТС-4, № 03	Св. № 24.307.12 от 18.12.2012, ГП «Укрметртестстандарт»
44	Радиометр, РАП-12УМ, № 013	Св. № 24.332.12 от 25.12.2012, ГП «Укрметртестстандарт»
45	Калориметр, КТС-4, № 04	Св. № 24.142.13 от 14.05.2013, ГП «Укрметртестстандарт»
46	Радиометр, РАП-12ДМ, № 014	Св. № 24.152.13 от 06.06.2013, ГП «Укрметртестстандарт»
47	Радиометр, РАП-12УМ, № 015	Св. № 24.091.20014 от 25 04 2014, ГП «Укрметртестстандарт»

Приложение Д

Перечень нормативно-методических документов (НМД), разработанных с участием Л.В. Декуши (по состоянию на 2014 г)

№ №	Обозначение и дата введения НМД	Название НМД	Организации – разработчики. Авторы от ИТТФ
1	2	3	4
1. Национальные стандарты Украины (ДСТУ)			
1	1.1 ДСТУ 3756-98, 2000-07-01	Енергозбереження. Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. Загальні технічні умови.	МТК 111 «Енергозбереження», м. Київ, ІТТФ НАН України, м. Київ, Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Воробйов Л.Й.
2	1.2 ДСТУ 4035-2001, 2002-01-01	Енергозбереження. Будівлі та споруди. Методи вимірювання поверхневої густини теплових потоків та визначення коефіцієнтів теплообміну між огорожувальними конструкціями та доквіллям.	МТК 111 «Енергозбереження», м. Київ, ІТТФ НАН України, м. Київ, Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Менделєєва Т.В. та ін.
3	1.3 ДСТУ БВ.2.6-101:2010, 2010-01-20	Конструкції будинків і споруд. Метод визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій.	ДП «НДІ БК», м. Київ; ПНТУ ім. Ю. Кондратюка, м. Полтава; ДНБА, м. Донецьк; ІТТФ НАН України, м. Київ, Воробйов Л., Грищенко Т., Декуша Л.
4	1.4 ДСТУ БВ.2.7-228:2009, 2009-07-01	Будівельні матеріали. Скло з низькоемісійним покриттям. Технічні умови	ТК 300 «Світлопрозорі конструкції», м. Київ; ІТТФ НАН України, м. Київ, Воробйов Л., Гайдучек А., Грищенко Т., Декуша Л.
2. Межгосударственные стандарты (ГОСТ)			
5	2.1 ГОСТ 25380-2001, 2002-07-01	Энергосбережение. Здания и сооружения. Методы измерения поверхностной плотности тепловых потоков и определения коэффициентов теплообмена между ограждающими конструкциями и окружающей средой.	МТК 111 «Энергосбережение», г. Киев; ИТТФ НАН Украины, г. Киев; Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Менделеева Т.В. и др.
6	2.2 ГОСТ 30619 -98, 2000-07-01	Энергосбережение. Преобразователи теплового потока термоэлектрические общего назначения. Общие технические условия.	МТК 111 «Энергосбережение», г. Киев; ИТТФ НАН Украины, г. Киев; Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Воробьев Л.И.
7	2.3 ГОСТ 31364-2007, 2009-07-01	Строительные материалы. Стекло с низкоэмиссионным покрытием. Технические условия	ТК 300 «Светопрзрачные конструкции», г. Киев; ИТТФ НАН Украины, г. Киев; Воробьев Л.И., Гайдучек А.В., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В.

3. Национальные стандарты Украины, гармонизированные с международными (ДСТУ ISO) и европейскими (ДСТУ EN) стандартами

8	3.1 ДСТУ ISO 4006:2009 (ISO 4006:1991 IDT), 2012-01-01	Вимірювання витрати та кількості плинного середовища в закритих трубопроводах. Словник термінів та умовні позначення.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л., Грищенко Т., Декуша Л. та ін.
9	3.2 ДСТУ ISO 6946:2007 (ISO 6946:1996, IDT), 2009-01-01	Будівельні конструкції та елементи. Тепловий опір і коефіцієнт теплопередавання. Методика обчислення.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л., Грищенко Т., Декуша Л. та ін.
10	3.3 ДСТУ ISO 7345:2005 (ISO 7345:1987, IDT), 2008-01-11	Теплоізоляція. Фізичні величини та визначення понять.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л., Грищенко Т., Декуша Л.
11	3.4 ДСТУ ISO 8301:2007 (ISO 8301:1991, IDT), 2009-01-01	Теплоізоляція. Визначення теплового опору і пов'язаних із ним властивостей в усталеному режимі. Прилад із вимірювачем теплового потоку	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л., Грищенко Т., Декуша Л. та ін.
12	3.5 ДСТУ ISO 8302:2008 (ISO 8302:1991, IDT), 2010-01-01	Теплоізоляція. Визначення теплового опору та пов'язаних із ним характеристик в усталеному режимі. Прилад із захищеною гарячою пластиною.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л., Грищенко Т., Декуша Л. та ін.
13	3.6 ДСТУ ISO 8302:2008 (ISO 8302:1991, IDT), 2010-01-01	Теплоізоляція. Визначення теплового опору та пов'язаних із ним характеристик в усталеному режимі. Прилад із захищеною гарячою пластиною.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л., Грищенко Т., Декуша Л. та ін.
14	3.7 ДСТУ ISO 9151:2010 (ISO 9151:1995, IDT), 2012-01-01	Одяг захисний від нагрівання та полум'я. Визначення теплопровідності під час дії полум'я.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л., Грищенко Т., Декуша Л. та ін.
15	3.8 ДСТУ ISO 9229:2009 (ISO 9229:2007, IDT), 2011-07-01	Теплоізоляція. Матеріали, вироби та системи. Словник термінів.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л., Грищенко Т., Декуша Л. та ін.
16	3.9 ДСТУ ISO 9251:2005 (ISO 9251:1987, IDT), 2007-04-01	Теплоізоляція. Радіаційний теплообмін. Фізичні величини та визначення понять.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л., Грищенко Т., Декуша Л. та ін.
17	3.10 ДСТУ ISO 9288:2005 (ISO 9288:1989, IDT), 2008-01-01	Теплоізоляція. Режими теплообміну і властивості матеріалів. Словник термінів.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л., Грищенко Т., Декуша Л. та ін.

1	2	3	4
18	3.11 ДСТУ ISO 9346:2005 (ISO 9346:1987, IDT), 2008-03-01	Теплоізоляція. Масообмін. Фізичні величини та визначення понять.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л., Грищенко Т., Декуша Л. та ін.
19	3.12 ДСТУ ISO 9869:2007 (ISO 9869:1994, IDT), 2009-01-01	Теплоізоляція. Будівельні елементи. Натурні вимірювання теплового опору та коефіцієнта теплопередавання.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л.,Грищенко Т., Декуша Л. та ін.
20	3.13 ДСТУ ISO 10051:2006 (ISO 10051:1996, IDT), 2009-01-01	Теплоізоляція. Вплив вологи на теплообмін. Визначення коефіцієнту теплової проникності вологого матеріалу.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л.,Грищенко Т., Декуша Л. та ін.
21	3.14 ДСТУ ISO 10211-1:2005 (ISO 10211-1:1995, IDT), 2008-03-01	Теплопровідні включення в будівельних конструкціях. Обчислення теплового потоку та поверхневої температури. Частина 1. Загальні методи.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л., Грищенко Т., Декуша Л. та ін.
22	3.15 ДСТУ ISO 10211-2:2005 (ISO 10211-1:1995, IDT), 2008-03-01	Теплопровідні включення в будівельних конструкціях. Обчислення теплового потоку та поверхневої температури. Частина 2. Лінійні теплопровідні включення.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л.,Грищенко Т., Декуша Л. та ін.
23	3.16 ДСТУ ISO 10291:2009 (ISO 10291:1994, IDT) 2011-01-01	Скло будівельне. Визначення в усталеному режимі U-характеристик (теплопровідності) багатошарового скла. Метод із використанням захищеної гарячої пластини.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л.,Грищенко Т., Декуша Л. та ін.
24	3.17 ДСТУ ISO 11357-4:2010 (ISO 11357-4:2005, IDT), 2012-01-01	Пластмаси. Диференціальна сканувальна калориметрія. Частина 4. Визначення питомої теплоємності.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л.,Грищенко Т., Декуша Л. та ін.
25	3.18 ДСТУ ISO 14683:2007 (ISO 14683:1999, IDT), 2009-01-01	Теплопровідні включення в будівельних конструкціях. Лінійний коефіцієнт теплопередавання. Спрощені методики обчислення та стандартні значення.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л.,Грищенко Т., Декуша Л. та ін.
26	3.19 ДСТУ EN 673:2009 (ISO 673:1997, IDT), 2012-01-01	Скло будівельне. Визначення в усталеному режимі U-характеристик (теплопровідності) багатошарового скла. Метод обчислення. Розроблення ДСТУ.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л.,Грищенко Т.,Декуша Л. та ін.

1	2	3	4
27	3.20 ДСТУ EN 821-2:2010 (EN 821-2:1997, IDT), 2011-01-01	Кераміка спеціальна технічна. Монолітна кераміка. Термофізичні властивості. Частина 2. Визначення теплової дифузійної здатності із застосуванням методу лазерного спалаху. Розроблення ДСТУ.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л.,Грищенко Т.,Декуша Л. та ін.
28	3.21 ДСТУ EN 1434-3:2005 (EN 1434-3:1997, IDT), 2007-07-01	Теплолічильники. Частина 3. Обмін даними та інтерфейси.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л.,Грищенко Т.,Декуша Л. та ін.
29	3.22 ДСТУ EN 1159-1:2010 (EN 1159-1:2003, IDT), 2012-01-01	Кераміка технічна спеціальна. Теплофізичні характеристики керамічних композиційних матеріалів. Частина 1. Визначення коефіцієнта теплового розширення.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л.,Грищенко Т.,Декуша Л. та ін.
30	3.23 ДСТУ EN 1159-3:2010 (EN 1159-3:2003, IDT), 2012-01-01	Кераміка спеціальна технічна. Матеріали композиційні керамічні. Теплофізичні властивості. Частина 3. Визначення питомої теплоємності.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л.,Грищенко Т.,Декуша Л. та ін.
31	3.24 ДСТУ CEN/TS 1159-4:2010 (CEN/TS 1159-4, IDT) 2012-01-01	Кераміка спеціальна технічна. Матеріали композиційні керамічні. Теплофізичні властивості. Частина 4. Визначення теплопровідності.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л.,Грищенко Т.,Декуша Л. та ін.
4. Методические документы			
32	4.1 M00013184.5.23-01, 2002-01-01, Затверджена та введена в дію наказом Держкоменерго- збереження від 2005.12.01 №127 і погоджена Держбудом України від 13.06.2002 р.	Визначення теплових потоків крізь огорожувальні конструкції (определение тепловых потоков через ограждающие конструкции).	ІТТФ НАН У, м. Київ Грищенко Т.,Декуша Л.,Менделєєва Т., та ін.
33	4.2 МБУ 048/06-2012 Занесено в Держреєстр методик виконання вимірювань згідно з наказом ДП Укрметртест- стандарт від 30.10.2012 № 712	Метрологія. Опір теплопередаванню крізь огорожувальні конструкції будівель та споруд різного призначення / Методика виконання вимірювань комбінованим тепловізійно-теплометричним методом.	ІТТФ НАН У, м. Київ Воробйов Л.,Грищенко Т.,Декуша Л. Декуша О.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е
Информация о внедрениях теплотеметрических приборов

№ п/п	Название теплотеметрического средства измерения	Место внедрения	Документ, подтверждающий внедрения, дата подписания
1	2	3	4
1.	Калориметрические установки для измерения теплоты сгорания топлива моделей КТС:		
1.1	КТС-1, №01	Краснопереконский содовый завод, г. Краснопереконск	Акт сдачи-приемки от 01.09.1995
1.2	КТС-1, №02	Кировоградская ТЭЦ	Акт сдачи-приемки от 19.10.1998 по дог. № 513
1.3	КТС-2, №01	ОВДКП «Ровнотеплокомун-энерго», г. Ровно	Акт сдачи-приемки от 10.08.1998 по дог. № 502
1.4	КТС-2, №02	ТЭЦ -6, г. Киев	Акт сдачи-приемки от 10.02.1998 по дог. № 501
1.5	КТС-3, №01	Филиал «Киевэнергонадка», АЕК «Киевэнерго», г. Киев	Акт внедрения от 14.11.2000 по договору № 534
1.6	КТС-3, №02	КП «ГАЛС», г. Донецк	Акт внедрения от 30.04.2006 по договору № 534
1.7	КТС-3, №03	ТОВ «Енергимпекс»	Акт внедрения от 11.07.2007 по договору № 523
1.8	КТС-3, №04	ЧП Радов Д.Г. г. Севастополь ГТОО «Юго-Западная железная дорога», г. Киев	Акт сдачи-приемки от 06.12.2007 по договору № 529
2.	Приемники теплового излучения модели РАП		
2.1	РАП-12, №01	ИТТФ НАН Украины	Протокол о МА в СМП «Стандарт-сервис-диагностика»
2.2	РАП-12, №02	Институт теплообмена НАН Белоруси	Свидетельство о МА №39.358.00 от 21.08.2000
2.3	РАП-12М, №01	УДПО ГУ МВД Украины, г. Киев	Акт внедрения от 24.05.2002 по договору № 567
2.4	РАП-12М,2,№01	Вимірювальна пожежна лабораторія УДПОГУ МВС України, м. Київ	Свидетельство ГП «Укрметртестстандарт» о МА №39.384.03 от 15.12.2003
2.5	РАП-12М,2,№02	Випробувальна пожежна лабораторія, УПБ МЧС України в Дніпропетровській обл. м. Дніпропетровськ	Акт внедрения от 20.08.2003 по договору № 583
2.6	РАП-12М,2,№07	Випробувальна пожежна лабораторія НДПБ МНС України, м. Київ	Акт сдачи-приемки от 01.09.2006 по договору № 517
2.7	РАП-12Д, № 04	ТОВ «ПОЖЕСТ», г. Киев	Акт внедрения от 20.12.2004 по договору № 597
2.8	РАП-12Д,2,№ 06	ООО «ПРОМИНВЕСТПЛАСТИК», г. Рубежное, Луганской обл.	Акт внедрения от 05.08.2005 по договору №504
2.9	РАП-12ДМ,2,№08	ООО «ПРОМИНВЕСТПЛАСТИК», г. Рубежное, Луганской обл.	Акт внедрения от 05.06.2007 по договору № 527
2.10	РАП-12ДМ,2	ГП «Укрметртестстандарт», г. Киев	Акт внедрения от 04.09.2007 по договору № 536
2.11	РАП-12ДМ, №14	ООО «ДОНСТРОЙТЕСТ», г. Донецк	Акт внедрения от 18.09.2013 по дог. № 569
2.12	РАП-12УМ,2, №11	ООО «Термаш», г. Днепропетровск	Акт внедрения от 04.12.2013 по дог. №592

1	2	3	4
	2.13 РАП-12УМ, №12 2.14 РАП-12УМ, №13 3.15 РАП-12УМ, № 15 3.16 РАП-12УМ.2, №10	ПрАТ «ВО «Бердянський кабельний завод», г. Бердянськ ЧП «УКРПРОМСЕРТ», г. Дніпропетровськ ООО «ТАРКЕТ ВІНІСІН», г. Калуш ЗАО Завод «ЮЖКАБЕЛЬ», г.Харьков	Акт внедрения от 27.11.2012 по дог. № 552 Акт внедрения от 01.02.2013 по дог. № 563 Акт внедрения от 28.04.2014 по дог. № 589 Акт сдачи-приемки от 18.01.2010 по дог. № 580
3	Автоматизированная установка для измерения параметров пламени при огневых испытаниях КИП-1, №01	АНТК им. Антонова, г. Киев	Акт внедрения от 12.11.2000 по дог. № 535
4	Установка для измерения термо- радиационных характеристик светопрозрачных материалов и покрытий ИТРС-1, №01	ТОВ «Технолуч», г. Киев	Акт внедрения от 23.10.2002 по дог. №510
5	Установка для измерения теплового сопротивления стеклопакетов ИТС -3, №01	ТОВ «Технолуч», г. Киев	Акт внедрения от 17.12.2002 по договору № 510
6	Переносные приборы для экспресс-контроля коэффициента теплопроводности строительных материалов модели ИТ-8:		
	6.1 ИТ-8, № 01	ЗАО «Познякижилстрой», г. Киев	Акт сдачи-приемки от 31.03.2004 по дог. № 580
	6.2 ИТ-8М, №02 6.3 ИТ-8М, №03 6.4 ИТ-8М, №04	ТОВ НВПБО «БУДПЛАСТИК», г. Киев ГП «Укрметртестстандарт», г. Киев ИТТФ НАН України, г. Киев	Акт внедрения от 29.05.2007 по дог. № 524 Акт внедрения от 15.12.2008 по дог. №524 Свидетельство о МА №24.653.10 от 28.12.2010
7	Установки для измерения коэффициента теплопроводности и теплоизоляционных материалов ИТ -7С:		
	7.1 ИТ-7, №01 7.2 ИТ-7С, № 02 7.3 ИТ-7С, № 03 7.4 ИТ-7С, № 04 7.5 ИТ-7С, № 05	НИИСК, г. Киев ИТТФ НАН України ГП «Укрметртестстандарт», г. Киев НИИСК, г. Киев ООО «Строительная лаборатория», г. Николаев	Акт внедрения от 15.02.2005 по дог. №578 Свидетельство о МА № 24.444.08 от 24.10.2008 Акт внедрения от 18.12.2010 по дог.№545 Акт внедрения от 07.10.2011 по дог. №594. Акт внедрения от 15.09.2011 по дог. №505
8	Компьютеризированные информационно-измерительные системы для тепловых испытаний строительных ограждающих конструкций модели «Ресурс»;		
	8.1 «Ресурс-32», № 05 8.2 Ресурс-С (48) № 04 8.3 Ресурс, №03	ГП «Кривбасстандарт- метрологія», г. Кривий Ріг ЧП «Укртеплогідроізоляція», г. Луцьк ООО «Строительная лаборатория», г. Николаев	Акт внедрения от 15.06.2006 по дог.№ 512 Акт внедрения от 18.07.2008 по дог. № 533 Акт внедрения от 10.10.2006 по договору №514