

Курбатова Надежда Анатольевна

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОГО  
МЕТОДА И УСТАНОВКИ ЭТАЛОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ  
ДЛЯ ПОВЕРКИ ДАТЧИКОВ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

05.11.15 – «Метрология и метрологическое обеспечение»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск 2011

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия».

Научный руководитель – доктор технических наук, заслуженный метролог РФ  
Черепанов Виктор Яковлевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Алейников Александр Федорович;  
кандидат технических наук  
Бродников Александр Федорович.

Ведущая организация – ОАО «Научно-производственное предприятие «Эталон» (г. Омск).

Защита состоится 15 декабря 2011 г. в 15-00 час. на заседании диссертационного совета ДМ.212.251.01 при ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия» (СГГА) по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, д. 10, ауд. 403.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «СГГА».

Автореферат разослан 11 ноября 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Симонова Г.В.

Изд. лиц. № ЛР 020461 от 04.03.1997.  
Подписано в печать 08.11.2011. Формат 60×84 1/16.  
Усл. печ. л. 1,27. Тираж 100.  
Печать цифровая. Заказ  
Редакционно-издательский отдел СГГА  
630108, Новосибирск, 108, Плахотного, 10.  
Отпечатано в картопечатной лаборатории СГГА  
630108, Новосибирск, 108, Плахотного, 8.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы исследования.* Тепловой поток является физической величиной, характеризующей процесс теплообмена между телами и объектами, имеющими разную температуру, и одним из глобальных параметров всех протекающих в природе тепловых процессов и явлений. Поэтому измерения и контроль теплового потока представляют интерес для многих отраслей науки, техники и промышленности и, прежде всего, для решения вопросов рационального использования теплоэнергетических ресурсов. Повышение точности измерений этой физической величины позволяет решать вопросы энергосбережения за счет получения достоверных данных об источниках тепловых потерь и их количественных значений.

В качестве примера необходимости использования для этих целей средств измерений теплового потока можно привести стандарты ИСО 8301:1991 «Теплоизоляция. Определение термического сопротивления и связанных с ними теплофизических показателей. Прибор, оснащенный тепломером» и ГОСТ 7076-99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления». Эти документы предусматривают реализацию методов, основанных на использовании контактных датчиков теплового потока (тепломеров) в качестве средств измерений при определении теплозащитных свойств ограждающих конструкций зданий и сооружений.

Для определения интенсивности теплообмена принято использовать отношение значения теплового потока, проходящего по нормали к поверхности теплообмена, к площади этой поверхности. Эту величину называют поверхностной плотностью теплового потока.

Вид измерений, связанных с определением теплового потока и его поверхностной плотности, принято называть теплотерией. Технической основой теплотерии являются преобразователи (датчики) теплового потока, которые преобразуют измеряемую плотность теплового потока в электрический сигнал. Основоположниками теплотерии являются известные ученые теплофизики и метрологи: Геращенко О.А., Федоров В.Г., Грищенко Т.Г. (Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев), Дульнев Г.Н., Ярышев Н.А., Пилипенко Н.В. (ЛИТМО, г. Санкт-Петербург), Платунов Е.С., Буравой С.Е., Курепин В.В. (ЛИХП, г. Санкт-Петербург), Олейник Б.Н., Сергеев О.А. (ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, г. Санкт-Петербург), Ковач Т. (ОМХ, Венгрия).

Работы по созданию средств метрологического обеспечения теплотерии начались в СНИИМ в 1979 г., прежде всего, по запросам предприятий оборонной промышленности. В результате этих работ в 1988 г. была создана установка высшей точности УВТ 53-А-88, возглавляющая государственную поверочную схему для средств измерений поверхностной плотности теплового потока (МИ 1855-88) в диапазоне от 10 до 2 000 Вт/м<sup>2</sup>. В последующие годы был также разработан ряд образцовых (эталонных) средств поверки датчиков теплового потока и теплотерических приборов.

Возрастание в последние годы требований к расширению диапазона и точности измерений теплового потока продиктовано, прежде всего, актуализацией

вопросов энергосбережения как общемировой проблемы и принятием в России законов об энергосбережении. Кроме того, необходимость измерений тепловых потоков в хозяйственном комплексе является фактором, влияющим на качество многих технологических процессов и дающим объективную информацию, в частности, о безопасности теплоэнергетических объектов. Это привело к более широкому распространению и применению средств теплотрии, а также к необходимости повышения их точности и расширения диапазона измерений, а, следовательно, и уровня их метрологического обеспечения.

В связи с этим в 2008 г. был утвержден разработанный в СНИИМ Государственный первичный эталон ГЭТ 172–2008 единицы поверхностной плотности теплового потока для диапазона значений от 10 до 5 000 Вт/м<sup>2</sup> и одобрена соответствующая государственная поверочная схема, которая находится в стадии утверждения. Поверочная схема предусматривает расширение от 1 до 10 000 Вт/м<sup>2</sup> диапазона воспроизведения и передачи единицы, а также наличие соответствующих эталонных установок, обеспечивающих единство измерений в этом диапазоне.

В связи с этим актуальной является разработка метода и реализующей его установки эталонного назначения, которая обеспечивает поверку средств теплотрии в расширенном диапазоне при высоких значениях плотности теплового потока.

*Цель научного исследования* – совершенствование системы обеспечения единства и требуемой точности измерений поверхностной плотности теплового потока.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

– на основе анализа существующих методов и эталонных средств метрологического обеспечения теплотрии выбрать наиболее перспективный метод воспроизведения и передачи единицы поверхностной плотности теплового потока в область ее высоких значений;

– провести теоретические и экспериментальные исследования выбранного метода формирования теплового потока заданной плотности;

– создать измерительную установку эталонного назначения, реализующую предложенный метод, и исследовать ее метрологические характеристики;

– оценить предельные точностные возможности исследованного метода, в частности, для уточнения константы Больцмана.

*Объектом исследования* являются методы и эталонные средства воспроизведения и передачи единицы поверхностной плотности теплового потока.

*Методы исследования*

В работе использовались методы теории теплообмена и теплопроводности, методы калориметрии, теплофизического и теплотехнического эксперимента, теоретической и прикладной метрологии.

*Научная новизна* работы заключается в следующем:

– предложен и разработан новый радиационно-конвективный метод воспроизведения и передачи единицы поверхностной плотности теплового потока на основе адиабатического излучателя;

- впервые предложена, разработана и исследована теплотрическая установка эталонного назначения, реализующая этот метод;
- предложен и реализован способ определения температурной зависимости коэффициента преобразования датчиков теплового потока;
- предложен и реализован метод непосредственного сличения поверяемого и эталонного датчиков теплового потока радиационно-конвективным методом при их последовательном расположении относительно теплового потока;
- впервые предложено использовать радиационно-калориметрический метод на основе адиабатического излучателя для уточнения константы Больцмана.

*Практическая значимость исследования:*

- разработанный метод является основой для создания эталонных теплотрических установок, предусмотренных новой государственной поверочной схемой для средств измерений плотности теплового потока;
- разработанный радиационно-конвективный метод и теплотрическая установка позволяют приблизить условия поверки датчиков теплового потока к условиям их эксплуатации, в частности, в условиях атмосферы, а также дают возможность определять температурную зависимость коэффициента преобразования датчиков в широком диапазоне температур;
- на основе предложенного радиационно-калориметрического метода появляется альтернативная возможность уточнения константы Больцмана и значений реперных точек температурной шкалы.

Основные результаты работы внедрены в производственный процесс: «Научно-производственного предприятия «Эталон» (г. Омск) – при подготовке производства теплотрических установок для поверки датчиков теплового потока; ФГУП «Сибирский государственный НИИ метрологии» (г. Новосибирск) – для выполнения метрологических и научно-исследовательских работ в области теплотрии, а также в учебный процесс ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия» (г. Новосибирск) и ГОУ ДПО «Академия метрологии, стандартизации и сертификации (учебная)» (Новосибирский филиал) – по дисциплинам «Метрологическое обеспечение теплотехнических измерений» и «Приборное и метрологическое обеспечение учета тепла».

*Основные положения и результаты, выносимые на защиту:*

- радиационно-конвективный метод и теплотрическая установка эталонного назначения на основе адиабатического излучателя позволяют воспроизводить и передавать единицу поверхностной плотности теплового потока в область высоких значений и определять температурную зависимость коэффициента преобразования датчиков;
- новый вариант радиационно-конвективного метода позволяет осуществить непосредственное сличение датчиков теплового потока;
- радиационно-калориметрический метод на основе адиабатического излучателя позволяет уточнить константу Больцмана.

*Апробация работы*

Основные положения диссертационной работы и отдельные ее результаты докладывались и обсуждались на следующих Международных и Всероссийских конгрессах, конференциях и семинарах: VI Всероссийской межвузовской

конференции молодых ученых (г. Санкт-Петербург, ЛИТМО, 2009 г.); V, VI, VII Международных конгрессах «ГЕО-СИБИРЬ» (г. Новосибирск, СГГА, 2009, 2010, 2011 гг.); VIII учебно-методическом семинаре-совещании «Эталонные и рабочие средства измерения в области теплофизики. Энергоаудит» (г. Омск, НПП «Эталон», 2010 г.); заседании технического комитета по метрологии «Температурные, теплофизические и дилатометрические измерения» при Управлении метрологии Росстандарта и комиссии при научном Совете РАН по комплексной проблеме «Теплофизика и теплоэнергетика» (г. Обнинск, 2010 г.); X международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (г. Новосибирск, НГТУ, 2010 г.); Международных молодежных инновационных форумах «ИНТЕРРА-2010», «ИНТЕРРА-2011» (г. Новосибирск, СГГА); I Межотраслевой конференции по проблемам новых технологий (г. Миасс, 2010 г.); II Всероссийской научно-практической конференции «Системы обеспечения тепловых режимов преобразователей энергии и системы транспортировки теплоты» (г. Махачкала, ДГТУ, 2010 г.); IV Всероссийской конференции по проблемам термометрии «ТЕМПЕРАТУРА-2011» (г. Санкт-Петербург, ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»); XIII Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ РКТС–13 (г. Новосибирск, ИТФ СО РАН, 2011 г.); VII Международной конференции «Проблемы промышленной теплотехники» (г. Киев, ИТТФ РАН Украины, 2011 г.).

#### *Публикации*

По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, из них две статьи опубликованы в изданиях, определенных в Перечне ВАК Минобрнауки РФ, и одна статья – в зарубежном издании «Measurement Techniques» журнала «Измерительная техника».

#### *Структура и объем работы*

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и библиографического списка. Содержание работы изложено на 121 страницах. Работа содержит 35 рисунков и 17 таблиц. Библиографический список включает 51 наименование.

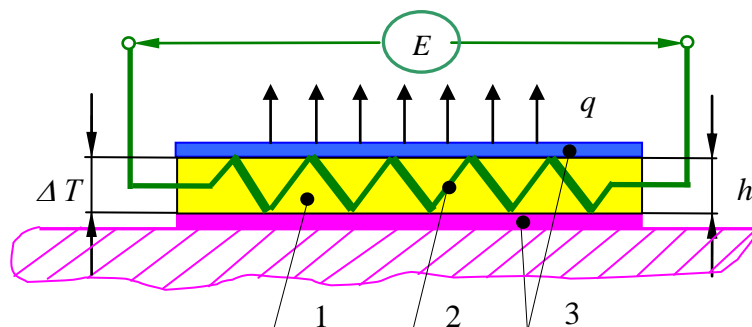
## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* раскрыта актуальность работы, сформулированы цель и задачи, методы исследований, новизна, практическая ценность и основные положения, выносимые на защиту.

В *первом разделе* приведен обзор и анализ современных методов и средств измерений поверхностной плотности теплового потока и их метрологического обеспечения.

Подробно рассмотрены средства измерений теплового потока и их использование в различных сферах человеческой деятельности. Основой этих измерений являются контактные накладные первичные измерительные преобразователи (датчики) теплового потока. Принцип действия этих датчиков, имеющих обычно форму пластин, заключается в формировании электрического сигнала  $E$ , пропорционального разности температур  $\Delta T$ , создаваемой измеряемым тепло-

вым потоком плотностью  $q$  на некотором постоянном термическом сопротивлении. Датчики содержат чувствительный элемент, представляющий собой слой материала  $1$  (рисунок 1) толщиной  $h$  с теплопроводностью  $\lambda$ , на поверхностях которого размещены датчики температуры  $2$ , чаще всего, спаи дифференциальных термоэлектрических преобразователей. Контактные пластины  $3$  обеспечивают необходимый тепловой контакт с поверхностью объекта и защищают чувствительный элемент от внешних воздействий.



$1$  – чувствительный элемент,  $2$  – дифференциальный датчик температуры,  $3$  – контактные пластины

Рисунок 1 – Устройство датчика теплового потока

В СССР и России наибольшее распространение получили гальванические термоэлектрические датчики, разработанные Институтом технической теплофизики НАН Украины, представляющие собой многоспайную (до 1 000 спаев) биметаллическую термобатарею, свернутую в плоскую спираль и расположенную в материале из диэлектрика. В настоящее время технологию промышленного производства контактных тепломеров осваивает НПП «Эталон» (г.Омск).

Эти датчики широко используются при изучении тепловых процессов, прежде всего, в теплоэнергетике, а также в авиационной и ракетно-космической технике, в геофизике и медицине. Коэффициенты преобразования датчиков обычно имеют значения от 1 до 100 Вт/(м<sup>2</sup>·мВ). Размеры и формы датчиков различны. Они бывают круглой, квадратной или прямоугольной формы с характерными размерами от 10 до 330 мм и толщиной от 0,5 до 15 мм. Диапазон измеряемой плотности теплового потока – от 1 до 10 000 Вт/ м<sup>2</sup> при температуре от –200 до 650 °С.

Основной характеристикой датчиков является коэффициент преобразования  $K$ , устанавливающий связь между плотностью  $q$  теплового потока, проходящего через датчик, и его электрическим сигналом (термоЭДС)  $E$ :

$$K = q/E, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ}). \quad (1)$$

Для установления этой связи используют поверочные теплотрические установки.

В работе рассмотрены достоинства и недостатки существующих датчиков, направления их совершенствования в зависимости от диапазонов измеряемых

значений плотности теплового потока и температуры, а также от условий их применения на объектах измерений.

Показано, что для снижения методической погрешности измерений условия теплообмена датчиков при их эксплуатации и поверке должны быть близкими. Для оценки погрешности в условиях эксплуатации, помимо коэффициента преобразования, необходимо знание таких его свойств, как тепловое сопротивление, коэффициент черноты, теплоемкость, температурный коэффициент линейного расширения и площадь контактной поверхности.

Технической основой метрологического обеспечения средств теплотриии в настоящее время является Государственный первичный эталон единицы поверхностной плотности теплового потока ГЭТ 172–2008, обеспечивающий ее воспроизведение и передачу в диапазоне от 10 до 5 000 Вт/м<sup>2</sup> при значениях температуры от 200 до 420 К. Этот эталон заменил действующую с 1988 г. установку высшей точности УВТ 53-А-88 и соответствующую государственную поверочную схему МИ 1855-88, которые обеспечивали единство измерений в диапазоне от 10 до 2 000 Вт/м<sup>2</sup> при температуре от 200 до 400 К.

Согласно поверочной схеме МИ 1855-88 передача единицы плотности теплового потока осуществляется методом непосредственного сличения, который реализуется с помощью кондуктивного, конвективного и радиационного компараторов. Наибольшее распространение получили кондуктивные и радиационные компараторы, основанные на сравнении показаний поверяемого и эталонного датчиков при воздействии на них теплового потока одинаковой плотности.

Достоинством кондуктивных компараторов является простота конструкции теплового блока, главными элементами которого являются нагреватель и холодильник. Недостатком таких компараторов является погрешность, возникающая при поверке датчиков, отличающихся по форме и размерам от эталонного. Для оценки этой погрешности при выполнении работы были проведены исследования трех различных вариантов кондуктивного метода для датчиков, имеющих разные диаметры.

Первый вариант метода заключался в использовании кондуктивного компаратора КТМ -01, в котором тепловой поток создается за счет разности температур нагревателя и холодильника, между которыми помещены в виде «сэндвича» оба датчика последовательно по отношению к теплому потоку, проходящему через них.

Второй метод определения коэффициента преобразования основан на использовании адиабатического нагревателя, расположенного между датчиками.

Третий вариант метода основан на параллельном относительно теплового потока расположении датчиков.

Результаты сравнительных исследований показывают, что при передаче единицы плотности теплового потока от эталонного датчика к поверяемому, имеющему бóльший размер, результаты методов с использованием адиабатического нагревателя и параллельного теплового потока совпадают в пределах 2 % и расходятся с первым более, чем на 20 %. Это показывает, что два данных метода поверки датчиков различных форм и размеров являются наиболее точными.

К достоинствам радиационного компаратора следует отнести то, что он позволяет осуществлять поверку датчиков в условиях, наиболее близких к реальным условиям их эксплуатации. К их недостаткам относятся погрешности, обусловленные неидентичностью геометрии и свойств поверяемых и эталонного датчиков, приводящие к неодинаковости взаимодействия радиационного теплового потока с их поверхностью. Кроме того, для осуществления такого способа необходим эталонный датчик высокой точности. При использовании абсолютного радиационного метода, основанного на законе Стефана-Больцмана, не требуется эталонный датчик, но необходимо знание коэффициента черноты излучателя и наличие вакуума.

Поэтому актуальной является задача создания тепловых излучателей с измеряемым значением создаваемого ими теплового потока, позволяющих проводить поверку датчиков методом прямых измерений не только в вакууме, но и в условиях атмосферы при наличии конвективного теплообмена. При выполнении данной работы было предложено создать такие излучатели на основе адиабатических измерительных технологий, используемых в калориметрии.

Находящаяся на утверждении новая поверочная схема предусматривает расширенный по сравнению с первичным эталоном диапазон воспроизводимых и передаваемых значений плотности теплового потока (рисунок 2).



Рисунок 2 – Диапазоны значений плотности теплового потока и температуры, воспроизводимые и передаваемые УВТ 53-А-88 (МИ 1855-88), ГЭТ 172-2008 и новой поверочной схемой

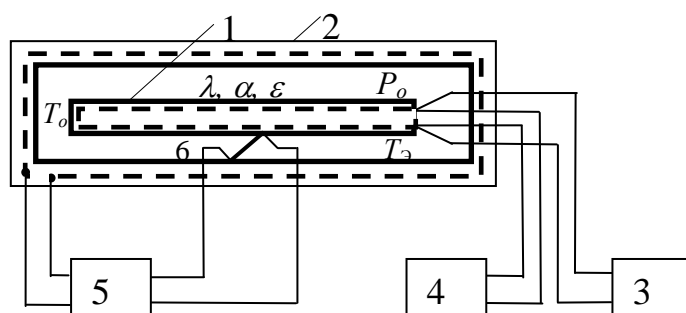
Такое расширение в область малых значений вызвано потребностью определения качества современных теплозащитных конструкций зданий и сооружений. Измерения высоких значений плотности теплового потока востребованы на предприятиях атомной энергетики, химической технологии, в ракетостроении и в других сферах, использующих высокоэнергетические объекты и установки. Кроме того, это позволит проводить сличения эталона ГЭТ 172-2008

с эталонами других стран, в частности, с эталоном NIST, у которого нижний предел воспроизводимых значений составляет  $10 \text{ кВт/м}^2$ .

Для «привязки» передаваемых первичным эталоном значений плотности теплового потока в расширенный диапазон необходимо решить задачи по разработке и исследованию новых методов воспроизведения и передачи ее единицы, а также по созданию соответствующих эталонных теплотрических установок. Данная диссертационная работа посвящена решению этих задач.

*Второй раздел* посвящен разработке радиационно-конвективного метода воспроизведения и передачи единицы плотности теплового потока. Основой метода является тепловой адиабатический излучатель, формирующий одномерный тепловой поток заданной плотности.

Адиабатический метод, используемый в калориметрии, основан на тепловом взаимодействии двух тел – ядра и окружающей его оболочки (рисунок 3).



1 – ядро с нагревателем, 2 – адиабатическая оболочка с нагревателем, 3 – источник электрической мощности, 4 – измеритель напряжения, 5 – регулятор температуры оболочки, 6 – дифференциальный термопреобразователь

Рисунок 3 – Схема адиабатического источника теплового потока

Связь между ними обычно характеризуется тепловым потоком  $Q_{\Sigma}$ , интенсивность которого зависит от свойств поверхности тел и разделяющей их среды (теплопроводности  $\lambda$ , коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  и черноты  $\epsilon$ ).

Уравнение баланса тепловых потоков в системе ядро – оболочка имеет вид

$$P_o(\tau) - Q_{\Sigma}(T_o, T_3, \lambda, \alpha, \epsilon) = C(T_o) \frac{dT_o}{d\tau}, \quad (2)$$

где  $P_o(\tau)$  – поток, сформированный источником тепла, например, электрическим нагревателем, расположенным в ядре;  $Q_{\Sigma}(T_o, T_3, \lambda, \alpha, \epsilon)$  – тепловой поток, образованный теплообменом между ядром и оболочкой;  $C(T_o)$  – полная теплоемкость ядра;  $dT_o/d\tau$  – скорость изменения его температуры.

В адиабатическом методе поток  $Q_{\Sigma}$  сводится к минимуму за счет того, что температура  $T_3$  адиабатической оболочки поддерживается равной температуре образца  $T_o$  путем регулирования мощности нагревателя оболочки.

Остаточный тепловой поток  $Q_{\Sigma}$  между ядром и оболочкой в случае, когда  $\Delta T = T_0 - T_3 \rightarrow 0$ , является суммой потока  $Q_{\lambda}$ , обусловленного теплопроводностью среды между ядром и оболочкой, теплового потока  $Q_{\alpha}$ , обусловленного конвективной составляющей (в случае газовой среды) и радиационным тепловым потоком  $Q_{\varepsilon}$  (в случае прозрачной среды):

$$Q_{\Sigma} = Q_{\lambda} + Q_{\alpha} + Q_{\varepsilon}. \quad (3)$$

Здесь

$$Q_{\lambda} = \frac{\lambda}{d} \Delta T F, \quad Q_{\alpha} = \alpha \Delta T F, \quad Q_{\varepsilon} = \sigma \varepsilon (T_0^4 - T_3^4) F, \quad (4)$$

где  $d$  – толщина слоя среды;  $F$  – площадь взаимного облучения ядра и оболочки.

Для близких значений  $T_0$  и  $T_3$  тепловое сопротивление среды между ядром и оболочкой  $R_{\Sigma}$ , равное отношению  $\Delta T$  к плотности теплового потока  $q_{\Sigma} = Q_{\Sigma} / F$ , имеет вид

$$R_{\Sigma} \cong \left[ \frac{\lambda}{d} + \alpha + 4 \sigma \varepsilon T_0^3 \right]^{-1}. \quad (5)$$

В таблице 1 приведены расчетные значения  $R_{\Sigma}$  для различных вариантов заполнения пространства между ядром и оболочкой.

Таблица 1 – Значения суммарного теплового сопротивления  $R_{\Sigma}$  для различных сред ( $\varepsilon = 0$  – непрозрачная среда,  $\alpha = 0$  – вакуум или твердотельная изоляция)

Среда	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$d$ , мм	$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\varepsilon$	$T_0$ , К	$R_{\Sigma}$ , (м <sup>2</sup> ·К)/Вт
Вакуум ( $5 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст.)	0	3	0	0,05	300	3,27
	0	3	0	0,05	400	1,38
	0	3	0	0,05	500	0,71
	0	3	0	0,05	600	0,41
	0	3	0	0,05	700	0,26
Воздух (760 мм.рт.ст.)	0,03	3	8	0,05	300	0,05
	0,03	3	20	0,05	700	0,03
Стеклотекстолит	0,3	3	0	0	500	0,01
Экранно-вакуумная изоляция	$3 \cdot 10^{-5}$	3	0	0	500	100
Пенопласт	0,06	3	0	0	500	0,05

Анализ таблицы показывает существенный вклад радиационной составляющей теплообмена, сильно возрастающий с ростом температуры. В этой ситуации целесообразно вместо вакуумирования среды использовать непрозрачные для излучения теплоизоляционные материалы и, прежде всего, экранно-вакуумную изоляцию.

Если задать в рамках решаемой измерительной задачи значения мощности  $P_o$  и разности  $\Delta T$  температуры ядра и оболочки, то относительная погрешность определения мощности, расходуемой на нагрев ядра равна

$$\delta p = \frac{Q_{\Sigma}}{P_o} = \frac{\Delta T F}{P_o R_{\Sigma}}. \quad (6)$$

Для наиболее эффективной экранно-вакуумной изоляции при  $P_o = 5,4$  Вт,  $\Delta T = 40$  мК,  $F = 1 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup>,  $R_{\Sigma} = 100$  (м<sup>2</sup>·К)/Вт эта погрешность равна  $0,7 \cdot 10^{-4}$  %, а для воздуха ( $R_{\Sigma} = 0,03$ ) – 0,2 %.

Рассмотренный пример демонстрирует возможность достижения высокой точности измерений тепловой мощности, выделяемой в ядре, в том числе и при наличии воздушного зазора между ядром и оболочкой. Таким образом, в зависимости от требований к погрешности измерений в качестве среды можно использовать вакуум или воздух. Данный метод традиционно используется при калориметрических измерениях теплоемкости ядра в нестационарном режиме.

В данной работе в качестве ядра предложено использовать тепловой излучатель в виде модели абсолютно черного тела с адиабатической оболочкой (экраном), имеющей отверстие для выхода теплового потока  $Q_o$ . В этом случае уравнение (2) принимает вид

$$P_o(\tau) - Q_{\Sigma}(T_o, T_{\Sigma}, \lambda, \alpha, \varepsilon) - Q_o = C(T_o) \frac{dT_o}{d\tau}. \quad (7)$$

Формирование теплового потока таким излучателем возможно и при наличии воздушной среды между излучателем и оболочкой, а также между излучателем и поверяемым датчиком теплового потока, расположенным вблизи выходного отверстия излучателя и перекрывающим его.

При выполнении условий адиабатичности ( $Q_{\Sigma} = 0$ ) и стационарности ( $dT_o/d\tau = 0$ ) выходящий из отверстия тепловой поток  $Q_o$  равен мощности  $P_o$ , подводимой к нагревателю излучателя, и имеет плотность, равную

$$q = \frac{P_o}{F_D}, \quad (8)$$

где  $F_D$  – площадь датчика.

Условие стационарности определяется соотношением теплового потока  $Q_v$ , идущего на изменение температуры ядра, и мощностью  $P_o$ , выделяемой

нагревателем. С учетом удельной теплоемкости  $c$  ядра и его массы  $m$  значение этого теплового потока оценивается по формуле:

$$Q_v = mc \frac{dT_o}{dt}. \quad (9)$$

Погрешность, обусловленная нестационарностью температуры ядра, в этом случае будет равна

$$\delta_v = \frac{Q_v}{P_o}. \quad (10)$$

Например, при скорости изменения температуры ядра 0,005 К/мин, удельной теплоемкости 420 Дж/(кг·К), массе 0,2 кг,  $P_o = 5,4$  Вт значение погрешности из-за нестационарности составит 0,08 %.

В этом случае на датчик воздействует одномерный радиационный и конвективный тепловые потоки заданного значения, определяемого электрической мощностью излучателя. Такой метод формирования теплового потока в работе предложено называть радиационно-конвективным. При его реализации упрощается конструкция установки, а условия поверки датчика приближаются к условиям его эксплуатации.

В случае использования электрического нагревателя равенство (8) принимает вид

$$q = \frac{4 U_n U_o}{\pi d^2 R_o}, \quad (11)$$

где  $U_n$  – падение напряжения на потенциальных выводах нагревателя;  $U_o$  – падение напряжения на потенциальных зажимах меры электрического сопротивления;  $R_o$  – значение сопротивления меры;  $d$  – диаметр датчика.

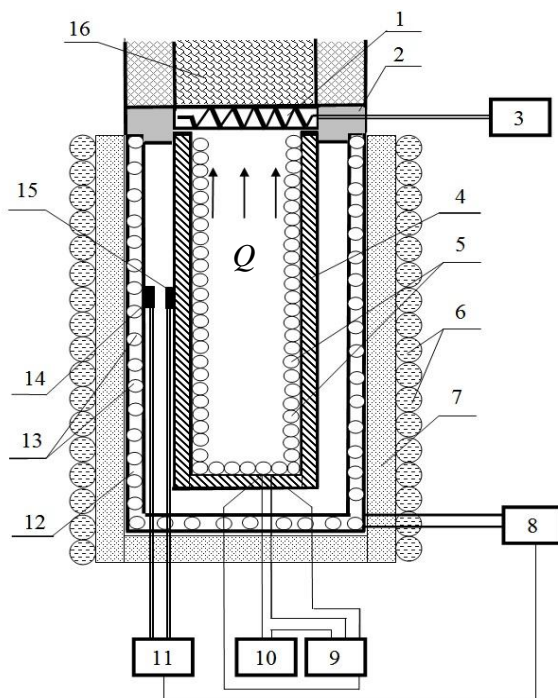
Из этого уравнения следует, что основными источниками погрешности рассматриваемого метода являются погрешность измерений мощности нагревателя и погрешность определения площади датчика. Погрешность измерений мощности зависит не только от погрешности измерений электрических величин, входящих в (11), но и от ее соответствия формируемому тепловому потоку. Это соответствие определяется, в свою очередь, выполнением условий адиабатичности и стационарности, которые могут быть оценены по соотношениям (6) и (10).

Особенностью предлагаемого метода формирования теплового потока на основе адиабатического излучателя является то, что его значение зависит не только от температуры излучателя, но и от температуры поверяемого датчика. Поэтому стабилизация температуры датчика также имеет важное значение для стационарности создаваемого теплового потока в системе излучатель-датчик.

В *третьем разделе* приведены результаты экспериментальных исследований предложенного радиационно-конвективного метода. Исследования прово-

дились на специально разработанной и изготовленной теплотрической установке с двумя тепловыми блоками, отличающимися диапазоном воспроизводимых значений плотности теплового потока.

Схема установки приведена на рисунке 4. Ее тепловой блок содержит поверяемый датчик 1, помещенный в теплоизолирующее кольцо 2, расположенное на выходном отверстии излучателя 4. Для стабилизации температуры датчика на его внешнюю поверхность устанавливают сосуд с тающим льдом 16. К нагревателю теплового излучателя 5 подводят электрическую мощность  $P_0$  от источника питания 10, определяемую измерителем 9. С помощью регулятора 11 устанавливают мощность нагревателя 13 экрана 12, при которой его температура становится равной температуре излучателя. Равенство температур определяют по показаниям датчиков 14 и 15. В этом случае подводимая к теплому излучателю 4 электрическая мощность, преобразуясь в тепло, создает равный ей тепловой поток  $Q_0$ .



1 – поверяемый ДТП; 2 – теплоизолирующее кольцо; 3 – милливольтметр;  
4 – излучатель; 5 – нагреватель излучателя; 6 – холодильник; 7 – теплоизолирующий кожух; 8 – источник питания нагревателя экрана; 9 – измеритель электрического тока и напряжения; 10 – источник питания нагревателя излучателя; 11 – регулятор;  
12 – экран; 13 – нагреватель экрана; 14 – датчик температуры экрана; 15 – датчик температуры излучателя; 16 – сосуд со льдом

Рисунок 4 – Радиационно-конвективная теплотрическая установка

Для выполнения этого равенства необходимо соблюдение условий адиабатичности и стационарности излучателя и датчика. При этом плотность теплового потока  $q_0$ , проходящего через датчик, определяется соотношением (9).

Таким образом, по результатам измерений электрической мощности, подводимой к тепловому излучателю, площади датчика, а также его сигнала  $E$ , измеряемого милливольтметром  $\mathcal{Z}$ , рассчитывается коэффициент преобразования  $K$ :

$$K = \frac{4U_n U_o}{\pi d^2 R_o E}. \quad (12)$$

Исследования применимости предложенного метода для поверки датчиков первоначально проводились при значениях плотности теплового потока от 200 до 2500 Вт/м<sup>2</sup> с использованием датчиков, коэффициент преобразования которых был ранее определен на государственном первичном эталоне ГЭТ 172-2008. Эти исследования проводились с использованием теплового блока, предназначенного для работы при температуре до 150 °С. Полученные значения коэффициента преобразования эталонных датчиков сравнивались с его значением, полученным на первичном эталоне. Приведенная на рисунке 5 зависимость показывает, что при значениях выше 700 Вт/м<sup>2</sup> относительная погрешность определения коэффициента преобразования не превышает 3 %.

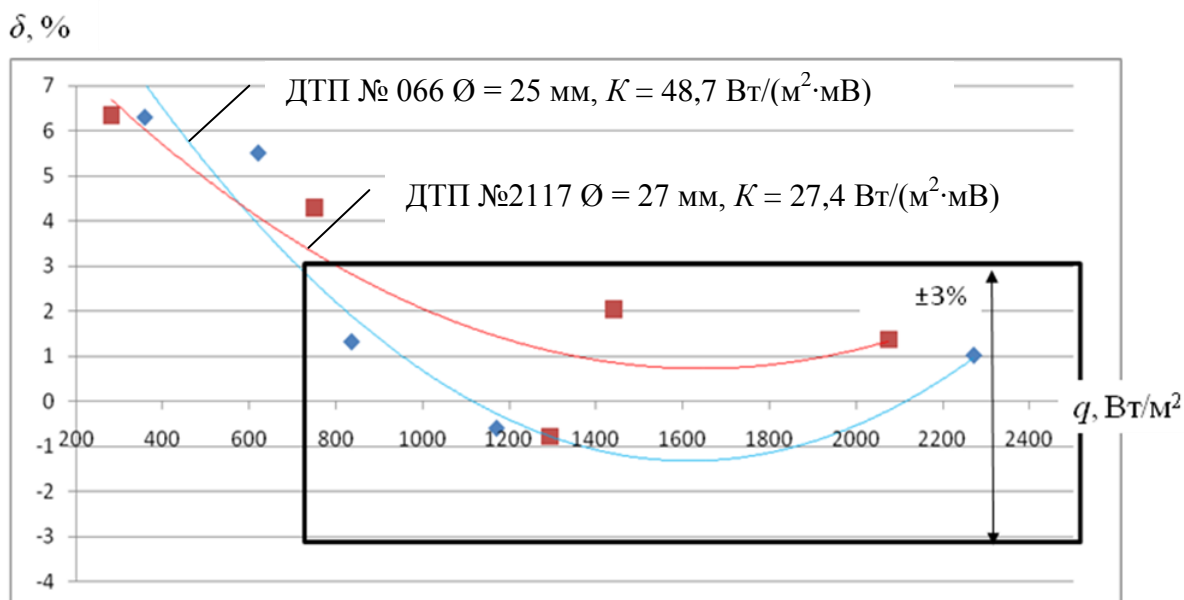


Рисунок 5 – Зависимость погрешности определения коэффициента преобразования от плотности теплового потока

Для исследований температурной зависимости коэффициента преобразования датчиков использовалась термобатарея Пельтье, которая размещалась между датчиком и сосудом с тающим льдом. Наличие тающего льда позволяет стабилизировать отвод тепла от термобатареи, что способствует установлению стационарного теплового потока. Значения температуры поверяемых датчиков регулируется током в термобатарее.

Установлено (рисунок 6), что в наиболее используемом на практике диапазоне температуры от 0 до 35 °С коэффициент преобразования изменяется не более 1,5 % на каждые 10 °С.

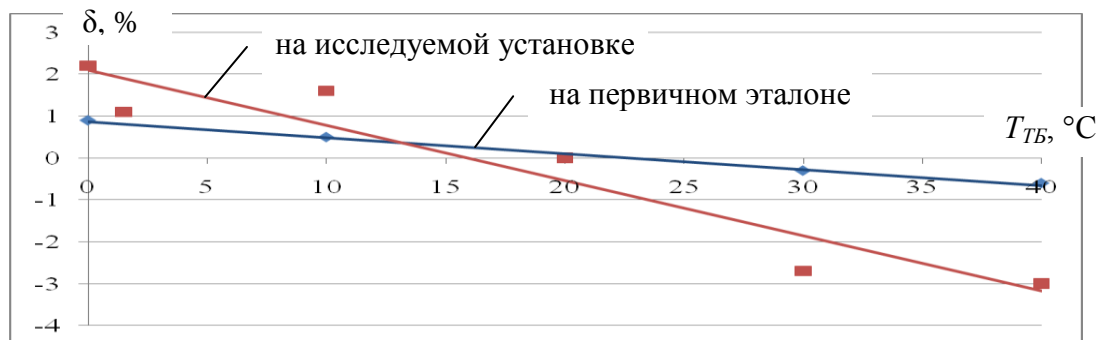
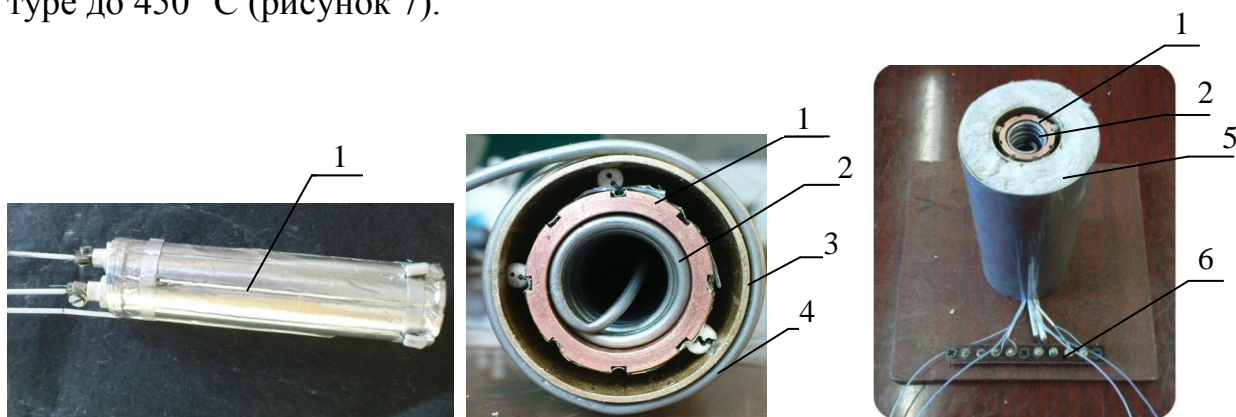


Рисунок 6 – Температурная зависимость коэффициента преобразования

Эти результаты стали подтверждением работоспособности радиационно-конвективного метода и основанием для создания теплового блока, предназначенного для получения более высоких значений плотности теплового потока (до  $10 \text{ кВт/м}^2$ ). В связи с этим были разработаны и изготовлены новый тепловой излучатель и адиабатический экран, предназначенные для работы при температуре до  $450^\circ\text{C}$  (рисунок 7).



1 – тепловой излучатель; 2 – нагреватель излучателя; 3 – адиабатический экран; 4 – нагреватель экрана; 5 – теплоизолирующий кожух; 6 – клеммная колодка

Рисунок 7 – Тепловой блок

Для исследований нового теплового блока были изготовлены два специальных датчика, коэффициенты преобразования которых были определены на кондуктивном компараторе КТМ-01.

Зависимость, приведенная на рисунке 8, показывает, что при исследованиях этих датчиков на радиационно-конвективной установке (плотность теплового потока от  $3500 \text{ Вт/м}^2$  до  $10 \text{ кВт/м}^2$ ) относительная погрешность определения коэффициента преобразования составляет не более 3 %, что соответствует требованиям новой поверочной схемы.

При помощи этих датчиков был опробован новый вариант радиационно-конвективного метода, основанный на их непосредственном сличении. При этом датчики располагаются последовательно по отношению к тепловому потоку вблизи выходного отверстия излучателя в виде «сэндвича». Один из датчиков выполняет функцию эталонного, а другой – поверяемого. Исследования

показали, что относительная погрешность определения коэффициента преобразования при этом не превышает 1,5 %.

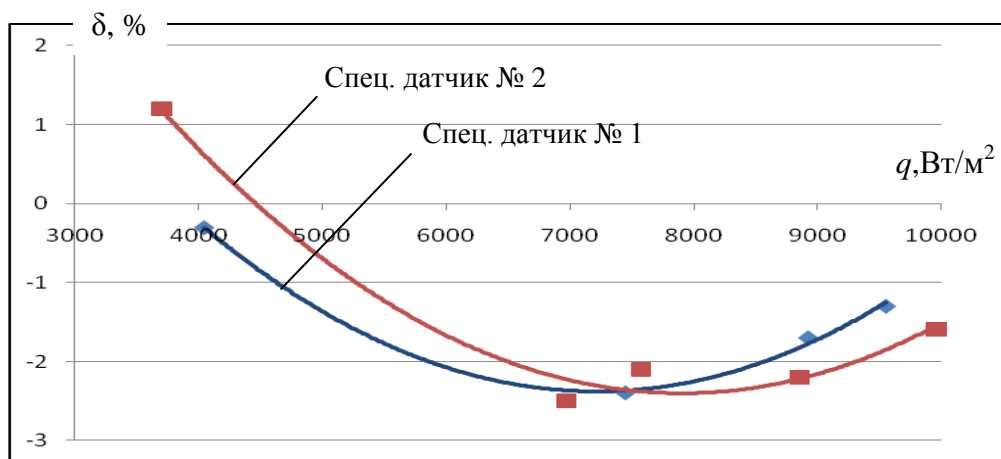


Рисунок 8 – Погрешность определения коэффициента преобразования специальных датчиков

В таблице 2 приведены расчетные и экспериментальные оценки метрологических характеристик, полученные в результате исследований созданной теплотрической установки.

Таблица 2 – Метрологические характеристики установки

Характеристики	Значение
Плотность теплового потока	от 3 500 до 10 000 Вт/м <sup>2</sup>
Относительная погрешность определения коэффициента преобразования	не более 2,5 %
Температура излучателя	от 250 до 450 °С
Время выхода излучателя на стационарный режим	150 мин
Время выхода излучателя на стационарный режим после перемонтажа датчика	20 мин
Скорость изменения температуры излучателя в стационарном режиме	0,005 °С/мин
Разность температур $T_0$ и $T_3$	0,04 °С
Неисключенная систематическая погрешность воспроизведения плотности теплового потока для 3 500 Вт/м <sup>2</sup> , в том числе: погрешность из-за теплопроводности проводов $\delta_{\lambda}^{np} = 0,0006$ %, погрешность из-за теплопроводности остаточного газа $\delta_{\lambda}^g = 0,05$ %, погрешность из-за радиационного теплообмена $\delta_{\varepsilon} = 0,005$ %, погрешность, обусловленная нестационарностью $\delta_{\nu} = 0,2$ %.	0,3 %
Неисключенная систематическая погрешность воспроизведения плотности теплового потока для 10 кВт/м <sup>2</sup> , в том числе: погрешность из-за теплопроводности проводов $\delta_{\lambda}^{np} = 0,0002$ %, погрешность из-за теплопроводности остаточного газа $\delta_{\lambda}^g = 0,02$ %, погрешность из-за радиационного теплообмена $\delta_{\varepsilon} = 0,002$ %, погрешность, обусловленная нестационарностью $\delta_{\nu} = 0,08$ %	0,1 %
Относительная средняя квадратическая погрешность воспроизведения плотности теплового потока при $\delta_{U_n} = 0,02$ %; $\delta_{U_o} = 0,05$ %; $\delta_D = 0,7$ %; $\delta_R = 0,01$ %	1%

Полученные расчетным путем оценки погрешностей воспроизведения имеют более низкие значения, чем полученные экспериментально результаты. Это объясняется дополнительными погрешностями, связанными с передачей единицы плотности теплового потока, которые вызваны, в основном, несовершенством используемых датчиков.

В целом полученные результаты соответствуют требованиям новой государственной поверочной схемы для средств измерений поверхностной плотности теплового потока, предъявляемым к эталонным теплотеметрическим установкам, для которых значения погрешности должно составлять от 1,5 до 3,0 %.

*Четвертый раздел* посвящен возможности экспериментального уточнения константы Больцмана  $k$  методом радиационной калориметрии.

В настоящее время готовится новое определение единицы температуры – кельвина, для которого предлагается использовать фиксированное значение постоянной Больцмана.

Это позволит уйти от необходимости фиксировать значение температуры тройной точки воды (ТТВ), в действительности зависящее от технологии изготовления и использования сосудов, в которых реализуется эта главная реперная точка Международной температурной шкалы.

Принятое в настоящее время значение этой константы равно  $1,3806504 \cdot 10^{-23}$  Дж/К с относительной стандартной неопределенностью  $1,7 \cdot 10^{-6}$ . Считается, что переход к новому определению кельвина может быть целесообразным, если измерить константу Больцмана с относительной стандартной неопределенностью  $1 \cdot 10^{-6}$ .

В данной работе предложено выполнить уточнение константы Больцмана на основе адиабатического теплового излучателя, находящегося при температуре наиболее воспроизводимых реперных точек температурной шкалы. Подобный метод, использованный ранее в известных работах Т. Квина и Дж. Мартина (Quinn T.J. и Martin J.E.), основан на связи плотности радиационного теплового потока  $q_A$ , испускаемого абсолютно черным телом (АЧТ), с его температурой  $T_A$  и температурой  $T_o$  калориметра, принимающей излучение АЧТ:

$$q_A = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T_A^4 = \sigma(T_A^4 - T_o^4), \quad (13)$$

где  $c = 299\,792\,458$  м/с – скорость света;  $h = 6,6260693 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;  $\sigma = 5,670393 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана–Больцмана.

Калориметрические измерения  $q_A$  позволили этим авторам найти постоянную Стефана–Больцмана  $\sigma$  экспериментальным путем и рассчитать затем константу Больцмана по формуле:

$$k = \left[ \frac{15c^2 h^3}{2\pi^5} \sigma \right]^{1/4}. \quad (14)$$

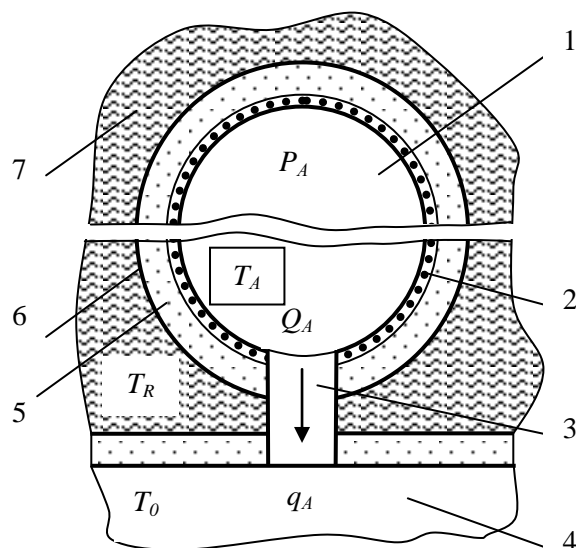
Анализ соотношения (14) позволяет сделать следующие выводы:

– коэффициенты перед константой  $\sigma$  в настоящее время определены с более высокой (как минимум на порядок) точностью по сравнению с необходимой точностью определения  $k$ ;

– наличие в соотношении корня четвертой степени предъявляет при определении  $k$  меньшие требования к точности значения константы  $\sigma$ ;

– при известном с высокой точностью значении температуры  $T_A$  абсолютно черного тела погрешность определения  $\sigma$  будет зависеть, главным образом, от достигнутой точности измерений плотности теплового потока  $q_A$ .

В данной работе предлагается другой метод определения  $\sigma$ , основанный на применении адиабатического излучателя. Схема реализации метода приведена на рисунке 9. Излучатель  $1$  в виде модели АЧТ снабжен электрическим нагревателем  $2$  с регулируемой мощностью. Полость излучателя снабжена отверстием  $3$  с площадью поперечного сечения  $S$ . Излучатель окружен наиболее эффективной теплоизоляцией  $5$ , например, экранно-вакуумной. Внешняя поверхность теплоизоляции контактирует с оболочкой  $6$ , помещенной в среду чистого вещества  $7$ , находящегося при известной температуре  $T_R$  одной из реперных точек температурной шкалы. Излучение полости модели АЧТ в виде теплового потока плотностью  $q(T_A)$  направлено через отверстие  $3$  в другую полость  $4$ , температура  $T_0$  которой ниже температуры  $T_R$ . Излучающая и поглощающая полости находятся в вакууме. Регулируя мощность  $P_A$  нагревателя, можно изменять температуру  $T_A$  излучающей полости. Тепловой поток  $Q_A$  сводится к минимуму благодаря тому, что температура  $T_A$  поддерживается максимально близкой к температуре  $T_R$  оболочки путем подбора мощности нагревателя.



$1$  – излучатель;  $2$  – электрический нагреватель;  $3$  – отверстие;  $4$  – поглощающая полость;  $5$  – теплоизоляция;  $6$  – оболочка;  $7$  – чистое вещество

Рисунок 9 – Принципиальная схема реализации радиационно-калориметрического метода

Если задать в рамках решаемой измерительной задачи значения  $P_A$  мощности нагревателя и погрешности  $\Delta T$  поддержания равенства температуры излучателя и оболочки, то относительная погрешность  $\delta_p$  определения мощности, которая идет на нагрев излучателя и формирует поток излучения, будет равна

$$\delta_p = \frac{Q_\lambda}{P_A} = \left( \frac{\lambda_1 F_1}{d} + \frac{\lambda_2 F_2}{l} \right) \frac{\Delta T}{P_A}. \quad (15)$$

Для экранно-вакуумной теплоизоляции ( $\lambda_1 = 3 \cdot 10^{-5}$  Вт/(м·К)) при  $\Delta T = 1$  мК,  $P_A = 0,1$  Вт,  $F_1 = 1 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup>,  $d = 1 \cdot 10^{-2}$  м,  $\lambda_2 = 50$  Вт/(м·К),  $F_2 = 0,1$  мм<sup>2</sup>,  $l = 0,1$  м значение погрешности  $\delta_p$  составляет  $8 \cdot 10^{-7}$ . Само значение мощности  $P_A$  постоянного электрического тока можно измерить с пренебрежимо малой погрешностью, составляющей менее  $1 \cdot 10^{-7}$ .

Другим важным, но часто не принимаемым во внимание фактором при установлении требований к АЧТ является условие стационарности его температуры, соблюдение которого особенно необходимо при применении теплового излучателя с адиабатической оболочкой. Влияние этого фактора на точность измерений теплового потока  $q_A$  можно оценить, используя данные по теплоемкости  $C_A$  излучателя и скорости  $\nu$  изменения (дрейфа) его температуры.

Требование стационарности определяется малостью значения  $Q_\nu$  по сравнению с  $P_A$ , например  $Q_\nu < 1 \cdot 10^{-7} P_A$ . Из этого условия при  $P_A = 0,1$  Вт и, например,  $C_A = 80$  Дж/К,  $Q_\nu = 1 \cdot 10^{-8}$  Вт следует, что дрейф температуры не должен превышать  $4,5 \cdot 10^{-6}$  К/час. Это очень жесткое требование к стабилизации температуры. Однако для таких реперных точек шкалы, как тройная точка воды и точка плавления галлия, его можно выполнить.

Для нахождения значения  $q_A$  весьма важен также вопрос о максимально возможной точности измерений площади  $S$  выходного отверстия излучателя. Эталонкопия единицы длины обеспечивает определение диаметра отверстий с абсолютной погрешностью, не превышающей  $\Delta = (0,01 + 0,4 D)$  мкм, где  $D$  – диаметр, выраженный в метрах. Если  $D = 0,02$  м, то  $\Delta = 0,016$  мкм. При этом относительная погрешность  $\delta_S$  определения площади отверстия составит  $1,6 \cdot 10^{-6}$ .

Если излучатель находится при температуре  $T_A$ , равной температуре реперной точки  $T_R$ , например, тройной точки воды или галлия, то относительная погрешность  $\delta_T$  составит  $5 \cdot 10^{-7}$  при  $T_R = 273,1600 \pm 1 \cdot 10^{-4}$  К и  $1 \cdot 10^{-6}$  при  $T_R = 302,9146 \pm 2 \cdot 10^{-4}$  К.

Относительная погрешность  $\delta_\sigma$  определения постоянной Стефана–Больцмана (при  $\epsilon = 1$ ) в соответствии с формулой

$$\delta_\sigma = 1,4 \sqrt{\delta_p^2 + \delta_S^2 + 4\delta_T^2} \quad (16)$$

при полученных выше значениях ( $\delta_p = 0,8 \cdot 10^{-6}$ ,  $\delta_S = 1,6 \cdot 10^{-6}$ ,  $\delta_T = 1 \cdot 10^{-6}$  (Ga) и  $\delta_T = 0,5 \cdot 10^{-6}$  (H<sub>2</sub>O)) составит:

$$\delta_\sigma(\text{Ga}) = 3,8 \cdot 10^{-6}; \quad \delta_\sigma(\text{H}_2\text{O}) = 2,9 \cdot 10^{-6}.$$

Таким образом, в соответствии с формулой (16), погрешность определения константы Больцмана предлагаемым методом составляет:

$$\delta_k(\text{Ga}) = 0,95 \cdot 10^{-6}; \delta_k(\text{H}_2\text{O}) = 0,73 \cdot 10^{-6}.$$

Полученные значения, не превышают требуемый результат, составляющий, как показано выше,  $1 \cdot 10^{-6}$ . Таким образом, проведенный анализ подтверждает принципиальную возможность уточнения постоянной Больцмана методом радиационной калориметрии.

Предложенный радиационно-калориметрический метод может быть использован также в фундаментальной метрологии для уточнения значений температуры реперных точек, основанных на фазовых переходах чистых веществ.

*В заключении* приведены основные результаты работы:

– на основе анализа существующих методов и эталонных средств метрологического обеспечения измерений плотности теплового потока предложен радиационно-конвективный метод воспроизведения и передачи единицы поверхностной плотности теплового потока в области ее высоких значений;

– проведены теоретические и экспериментальные исследования предложенного метода на основе адиабатического теплового излучателя и подтверждена его работоспособность при высоких значениях плотности теплового потока;

– разработана теплоизмерительная установка, реализующая предложенный метод, и исследованы ее метрологические характеристики, которые соответствуют требованиям для ее использования в новой поверочной схеме в качестве эталонной;

– подтверждена возможность применения радиационно-калориметрического метода на основе адиабатического излучателя для экспериментального уточнения константы Больцмана.

#### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Курбатова, Н.А. Анализ возможности экспериментального уточнения константы Больцмана радиационно-калориметрическим методом / Н.А. Курбатова, Г.В. Симонова, В.Я. Черепанов // Измерительная техника. – 2011. – № 10. – С. 21–24.

2 Курбатова, Н.А. Радиационно-конвективный метод и установка для проверки датчиков теплового потока на основе адиабатического излучателя / Н.А. Курбатова, В.Я. Черепанов // Измерительная техника. – 2011. – № 6. – С. 48–50.

3 Kurbatova, N.A. A radiation-convective method and equipment for checking heat flux sensors based on an adiabatic radiator / N.A. Kurbatova, V.Ya. Cherepanov // [Measurement Techniques](#). SpringerLink. – 2011, Volume 54, No 6. – P. 698–702.

4 Курбатова, Н.А. Методика калибровки тепловых излучателей для определения характеристик оптико-электронных приборов / Н.А. Курбатова, Д.П. Троценко // Сборник трудов конференции молодых ученых. – СПб: ЛИТМО, 2009. – Вып. 3. – С. 254–259.

5 Курбатова, Н.А. Измерительная установка для исследований температурных и тепловых полей полости модели АЧТ / Н.А. Курбатова, Д.П. Троценко, В.Я. Черепанов // ГЕО-Сибирь-2009. Т. 5. Специализированное приборо-

строение, метрология, теплофизика, микротехника. Ч. 2: сб. матер. V Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2009», 20–24 апреля 2009 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2009. – С.118–120.

6 Курбатова, Н.А. Сравнительный анализ различных методик определения коэффициентов преобразования датчиков теплового потока / Н.А. Курбатова // Сб. тр. аспирантов и молодых ученых. – Новосибирск: СГГА, 2010. – С. 14–19.

7 Курбатова, Н.А. Радиационный метод поверки датчиков теплового потока на основе адиабатического излучателя / Н.А. Курбатова, В.Я. Черепанов // ГЕО-Сибирь-2010. Т. 5. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии. Ч. 2: сб. матер. VI Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2010», 19–29 апреля 2010 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2010. – С. 118–123.

8 Курбатова, Н.А. Установка для поверки датчиков теплового потока на основе адиабатического излучателя / Н.А. Курбатова, В.Я. Черепанов // Материалы междунар. конференции «Актуальные вопросы электронного приборостроения – АПЭП-2010». – Новосибирск: НГТУ, 2010. – С. 31–34.

9 Курбатова, Н.А. Радиационный метод и установка для поверки датчиков теплового потока на основе адиабатического излучателя / Н.А. Курбатова // Матер. Межотраслевой конф. по проблемам новых технологий. – Миасс: МСНТ, 2010. – С. 30–33.

10 Курбатова, Н.А. Исследование температурной зависимости коэффициента преобразования датчиков теплового потока радиационно-конвективным методом / Н.А. Курбатова // ГЕО-Сибирь-2011. Т. 5. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии. Ч. 2: сб. матер. VII Междунар. научн. конгресса «ГЕО-Сибирь-2011», 19–29 апреля 2011 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГГА, 2011. – С. 242–245.

11 Курбатова, Н.А. Анализ возможности экспериментального уточнения константы Больцмана радиационно-калориметрическим методом / Н.А. Курбатова, Г.В. Симонова, В.Я. Черепанов // Сб. тез. докл. IV Всероссийской и стран-участниц КОOMET конф. по проблемам термометрии «ТЕМПЕРАТУРА-2011»: тез. докл., 2011. – С. 10.

12 Исследование новых методов и эталонных средств метрологического обеспечения теплотрии / А.Д. Зонова, Н.А. Курбатова, Д.О. Пряшин и др. // Сб. тез. докл. IV Всероссийской и стран-участниц КОOMET конф. по проблемам термометрии «ТЕМПЕРАТУРА-2011»: тез. докл., 2011. – С. 145–146.

13 Разработка новых методов и средств метрологического обеспечения теплотрии / Н.А. Курбатова, Д.П. Троценко, В.Я. Черепанов и др. // Промышленная теплотехника. – 2011. – Т 33 (№ 7). – С. 128.

14 Курбатова, Н.А. Теплотрическая установка эталонного назначения для поверки датчиков теплового потока / Н.А. Курбатова, В.Я. Черепанов // Вестник СГГА. – Новосибирск. – 2011. – № 1 (14). – С. 87–96.

В работах, выполненных в соавторстве, личный вклад автора Курбатовой Н.А. находится в равных долях с соавторами.