



Черепанов Виктор Яковлевич

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООБМЕНА И ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ**

05.11.15 – “Метрология и метрологическое обеспечение”  
05.11.01 – “Приборы и методы измерения (измерение  
параметров теплоносителей)”

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Новосибирск – 2005

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии  
“Сибирский государственный ордена Трудового Красного Знамени  
научно-исследовательский институт метрологии”

Научный консультант – доктор технических наук,  
профессор  
Рогачевский Борис Михайлович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Алейников Александр Федорович;  
доктор технических наук, профессор  
Петров Виктор Петрович;  
доктор технических наук, профессор  
Терехов Виктор Иванович.

Ведущая организация – Федеральное государственное унитарное  
предприятие “Всероссийский государственный научно-исследовательский  
институт метрологии им. Д.И. Менделеева” (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится 25 ноября 2005 г. в 15 час. на заседании  
диссертационного совета Д 212.251.01 при Сибирской государственной  
геодезической академии (СГГА) по адресу: 630108, г. Новосибирск,  
ул. Плахотного, 10, СГГА, ауд. 403.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГГА

Автореферат разослан «12» октября 2005 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Малинин В.В.

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 10.10.2005.

Формат 60 × 84 1/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 2,44. Уч.-изд. л. 1,62. Тираж 100 экз.

Заказ 111 .

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГГА  
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.

2006-4  
16909

2186057

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Все тела в природе – твердые, жидкие и газообразные имеют собственную температуру, которая изменяется в пространстве и во времени. Эти изменения связаны с процессами теплообмена между телами, интенсивность и направление которого определяется важнейшей физической величиной – тепловым потоком. Существуют три вида теплообмена: кондуктивный – обусловленный механизмами теплопроводности тел, конвективный – осуществляемый за счет движения жидкости или газа и радиационный – обусловленный тепловым электромагнитным излучением тел. Интенсивность теплового потока при этом определяется не только разностью температур тел, находящихся в процессе теплообмена, но и их свойствами (теплопроводностью, коэффициентами теплового излучения), а также физической величиной, отражающей особенности контактного взаимодействия тел, находящихся в разных агрегатных состояниях (коэффициентом теплоотдачи). Таким образом основными параметрами, характеризующими теплообмен, являются тепловой поток, температура, теплопроводность, коэффициент теплоотдачи и коэффициенты теплового излучения.

Наиболее достоверную информацию о теплофизических свойствах веществ и параметрах, характеризующих процессы теплообмена, получают на основе измерений. Наиболее значительный вклад в теоретическое обоснование и создание методов и средств получения такой информации внесли отечественные ученые Кондратьев Г.М., Чудновский А.Ф., Буравой С.Е., Гордов А.Н., Дульнев Г.Н., Курепин В.В., Олейник Б.Н., Платунов Е.С., Походун А.И., Сергеев О.А., Ярышев А.Н. (Ленинградская школа теплофизических измерений); Попов М.М., Кириллин В.А., Шейндлин А.Е., Жоров Г.А., Пелецкий В.Э., Петров В.А., Свет Д.Я., Соколов В.А., Улыбин С.А., Филиппов Л.П., Хрусталева Б.А. Чеховской В.Я. (Московская школа); Кутателадзе С.С., Стрелков П.Г., Груздев В.А., Крафтмахер Я.А., Пауков И.Е., Рубцов Б.А. (Новосибирская школа); Герашенко О.А., Грищенко Т.Г., Назаренко Л.А. (Украинская школа); Гомельский К.З., Зиновьев Е.Е., Ивлиев А.Д. (Уральская школа); Чашкин Ю.Р. (Хабаровская школа), а также зарубежные ученые д-р Ковач Т. (Венгрия), проф. Лин-Шан-Кан (Китай), д-р Штук Д. (Германия), д-р Хакимов О.Ш. (Узбекистан), проф. Квин Т. (Англия), д-р Дюриш С. (Словакия).

Безусловно, что наряду с развитием теплофизического приборостроения, для получения достоверной и точной измерительной информации необходимо наличие технической и нормативной базы метрологического обеспечения тепловых измерений.

Развитие в СССР науки и технологий в послевоенные годы стимулировало развитие метрологии теплофизических измерений, прежде



всего, для нужд оборонных отраслей промышленности. Совершенствовались поверочные схемы для средств измерений температуры (расширение диапазона и повышение точности), были созданы поверочные схемы для средств измерений количества теплоты, теплоемкости, теплопроводности, температурного коэффициента линейного расширения твердых тел.

Обострившиеся в последние десятилетия мировые энергетические проблемы, а также переход России к рыночным условиям хозяйствования сместили акценты направленности теплофизических измерений, главным образом, в теплоэнергетику и теплосбережение. На первый план вышли задачи учета тепла, требующие прежде всего точных измерений теплового потока и количества теплоты в системах теплоснабжения. В свою очередь решение этих задач приводит к необходимости поиска эффективных путей теплосбережения, основанных на измерениях и на последующем сокращении тепловых потерь через ограждающие конструкции зданий и сооружений. Поэтому все более необходимыми и важными из тепловых величин становятся измерения параметров теплообмена, а также измерения эксплуатационных параметров теплоносителя, таких как его температура, расход, теплоемкость (энтальпия), тепловой поток, создаваемый теплоносителем, и выделившейся в системе отопления количество теплоты. Измерения этих параметров определяют качество учетных операций при взаиморасчетах между поставщиками и потребителями тепла и являются технической основой энергосбережения, а, следовательно, в соответствии с законами РФ «Об обеспечении единства измерений» и «Об энергосбережении» такие измерения подлежат обязательному государственному метрологическому контролю и надзору и требуют наличия не только необходимого и достаточного, но и, желательного, опережающего уровня метрологического обеспечения.

Однако в настоящее время такой уровень не достигнут. Отсутствуют государственные эталоны и соответствующие поверочные схемы для средств измерений теплового потока и количества теплоты в системах теплоснабжения, для средств измерений коэффициентов теплового излучения, для средств измерений теплоемкости теплоносителей и их расхода в диапазоне рабочих температур. Требуют совершенствования эталоны и государственные поверочные схемы для средств измерений теплопроводности и поверхностной плотности теплового потока с целью расширения диапазона измерений и уменьшения погрешностей. Необходимо также совершенствование средств передачи размера единиц и методик выполнения измерений температуры поверхности, поверхностной плотности теплового потока, коэффициента теплоотдачи и температуры теплоносителей. Поэтому перед отечественной метрологией стоит проблема поэтапного решения задач создания и совершенствования методов и средств обеспечения единства измерений основных параметров теплообмена и теплоносителей.

Данная диссертационная работа направлена на решение указанной проблемы. Этим определяется ее актуальность.

## **Цель работы и задачи исследований**

Цель настоящей диссертационной работы – решение проблемы повышения точности и обеспечения единства измерений параметров теплообмена и теплоносителей.

Для достижения этой цели необходимо на основе разработки, теоретических и экспериментальных исследований решить задачи создания комплекса методов и средств воспроизведения и передачи размера единиц измерения основных параметров теплообмена и параметров теплоносителя; создания и разработки на основе этого комплекса государственных поверочных схем для средств измерений поверхностной плотности теплового потока, коэффициентов теплового излучения, теплового потока и количества теплоты в системах теплоснабжения; разработки методов и средств прецизионных измерений поверхностной плотности теплового потока, температуры поверхности, теплопроводности, коэффициентов теплоотдачи и теплового излучения, а также теплового потока и количества теплоты в системах теплоснабжения, расхода, температуры и теплоемкости теплоносителей.

## **Объект исследования**

Методы и средства высшей точности для воспроизведения и передачи размера единиц измерения, а также прецизионные средства измерений основных параметров теплообмена и теплоносителей.

## **Методы исследования**

При решении поставленных задач использовались методы теории теплообмена, теории подобия, положения термодинамики, теплофизики и физики твердого тела, методы теории инженерно-физического эксперимента, теоретической и прикладной метрологии.

## **Научная новизна:**

– предложен новый подход к созданию и классификации методов и средств теплофизических измерений, основанный на использовании принципов адиабатического формирования (с помощью открытой адиабатической оболочки) тепловых потоков или теплотрического (с помощью тепломеров) измерения тепловых потоков в системе теплообмена ядро – оболочка;

– на основе предложенного подхода впервые с использованием принципов адиабатической калориметрии и теплотрического компарирования теоретически обоснованы и экспериментально исследованы методы и созданы эталонные средства измерений поверхностной плотности теплового потока;

– впервые созданы методы и эталонные средства измерений интегральных коэффициентов теплового излучения материалов, использующие принципы адиабатического формирования и прецизионной теплотрии, а также стандартные образцы излучательных свойств и метод одновременного компарирования радиационных тепловых потоков;

– предложен новый модуляционный метод разновременного компарирования физических величин и созданы измерительные установки для точных измерений интегральной излучательной способности материалов;

– впервые предложена концепция метрологического обеспечения теплосчетчиков, основанная на прямом измерении теплового потока и количества теплоты в системах теплоснабжения; предложен и создан комплекс новых теплотрических методов и средств для измерений этих физических величин при эксплуатационных значениях температур, давлений и реальных значениях теплофизических свойств теплоносителей.

### **Практическая ценность и значимость**

Результаты теоретических исследований положены в основу разработки технических средств метрологического обеспечения измерений поверхностной плотности теплового потока, температуры поверхности, коэффициентов теплового излучения и теплопроводности материалов; расхода, температуры, теплоемкости, количества теплоты и теплового потока в системах теплоснабжения. Это позволило:

– создать Государственную поверочную схему и тем самым метрологически обеспечить испытания, поверку и калибровку контактных средств измерений поверхностной плотности теплового потока в диапазоне от 10 до 2000 Вт/м<sup>2</sup> при температурах от 200 до 400 К;

– повысить точность контактных средств измерений температуры теплообменных поверхностей объектов техники в диапазоне от минус 200 до 650 °С;

– расширить диапазон измерений теплопроводности в область малых значений (менее 0,2 Вт/(м·К)) на основе существующих эталонных мер теплопроводности и высоких значений (более 100 Вт/(м·К)) на основе использования открытой адиабатической оболочки;

– обеспечить единство измерений интегральных коэффициентов теплового излучения материалов в диапазоне от 0,10 до 0,99 при температурах от 200 до 850 К;

– создать техническую базу для проведения испытаний и поверки средств учета тепла при эксплуатационных значениях температур (от 20 до 180 °С) и давлений (до 100 МПа) теплоносителя, а также при реальных значениях его теплофизических свойств;

– создать эталонные установки и высокоточные средства для воспроизведения и передачи размеров единиц измерений основных параметров теплообмена и теплоносителей.

## Внедрение результатов работы

Основные результаты работы реализованы и внедрены:

– в ФГУП «Сибирский государственный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт метрологии» (г. Новосибирск) в установке высшей точности УВТ 53-А-88 и Государственной поверочной схеме для средств измерений поверхностной плотности теплового потока в диапазоне от 10 до 2000 Вт/м<sup>2</sup> (МИ 1855-88); в методе и эталонной установке расходомерной массовой 1-го разряда УМПР СНИИМ (зарегистрирована в Госресстре под № 26578-04); в рабочем месте для поверки преобразователей теплового потока РМП ПТП; в теплотрическом методе и проливном стенде для испытаний и поверки теплосчетчиков; в методе и теплотрической установке для измерений теплопроводности теплоизоляционных материалов; в автоматизированном компьютерном комплексе для градуировки преобразователей температуры поверхности, используемых в микроэлектронной технике; в методе и измерительных установках эталонного назначения для исследования и аттестации стандартных образцов излучательных свойств; в методе и компараторе для исследований температурной зависимости интегральных коэффициентов теплового излучения материалов; в адиабатическом калориметре для измерений теплоемкости металлов в нестационарном режиме; в измерительных установках для исследований теплоемкости, интегральной полусферической излучательной способности и электросопротивления металлов и сплавов модуляционным методом; в установке для аттестации плоских преобразователей температуры поверхности; в методе и установке для определения температуры Кюри чистых ферромагнетиков; в установке для определения малых потерь в ферромагнетиках теплотрическим методом; в малогабаритных ампулах для реализации реперных точек температурной шкалы; в установке для исследований температурной зависимости коэффициента теплоотдачи отопительных приборов;

– в ФГУП «Федеральный научно-производственный центр «Алтай» (г. Бийск) в методе и установке для определения температуропроводности стеклопластиков в диапазоне от минус 100 до 150 °С, основанной на закономерностях симметричного нагрева плоских образцов с постоянной скоростью; в методе и установке для измерений теплопроводности полимерных резиноподобных материалов при температурах от минус 100 до 250 °С в динамическом режиме, основанной на методе симметричного нагрева образцов с теплотрическим способом определения мощности нагревателя; в дифференциальном калориметре с идентичными теплотрическими ячейками для динамических измерений теплоемкости и определения температур фазовых превращений в полимерных материалах при их циклическом нагружении при температурах от минус 150 до 300 °С; в методе и аппаратуре для метрологической аттестации поверхностных преобразователей температуры в диапазоне от 50 до 300 °С с погрешностью

менее 1%, содержащей малоинерционный поверхностный термостат с системой автоматического поддержания температурного режима и эталонный измеритель температуры поверхности стержневого типа со следящей компенсацией теплоотвода; в методе и прецизионном измерителе теплопроводности особо чистых металлов в диапазоне значений более 200 Вт/(м·К) при температурах от 0 до 95 °С с погрешностью менее 5%, основанном на адиабатическом методе формирования аксиального теплового потока в цилиндрическом образце.

Созданные на основе этих научно-технических разработок и решений измерительный и метрологический комплексы внедрены на предприятии и используются для исследований стабильности свойств специальных полимерных материалов и изделий; для проверки контактных преобразователей температуры и определения их метрологических характеристик в условиях, максимально приближенных к условиям их эксплуатации на поверхностях объектов техники; для создания датчиков высокоинтенсивных тепловых потоков, действие которых основано на решении обратной задачи теплопроводности и которые используются для исследований тепловых режимов при стендовых испытаниях объектов техники;

– в ФГУП «Сибирский научный институт авиации им С.А.Чаплыгина» (г. Новосибирск) в методе и установке для градуировки плоских поверхностных преобразователей температуры и теплового потока в климатическом диапазоне температур; в кондуктивном методе и теплотрическом компараторе КТМ-01 для определения метрологических характеристик плоских преобразователей теплового потока в диапазоне от 10 до 2000 Вт/м<sup>2</sup> с погрешностью менее 2%; в калориметрическом методе для определения объемной теплоемкости и энтальпии радиоэлектронных блоков с погрешностью менее 5%.

Результаты этих работ использовались при создании и совершенствовании технологии специальных преобразователей температуры и теплового потока, необходимых для исследований надежности и ресурса бортового оборудования летательных аппаратов и их теплового режима;

– в ФГУП «Научно-производственное объединение измерительной техники» (г. Королев, Московской области) в методе и низкотемпературном теплотрическом компараторе для метрологической аттестации градиентных термомеров при температурах от 120 до 100 °С с погрешностью менее 5%.

Метод и установка использовались для исследований специальных термомеров-преобразователей теплового потока, предназначенных для исследований тепловых режимов объектов ракетной техники;

– в ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (г. Москва) в методах и аппаратуре для метрологического обеспечения измерений коэффициентов теплового излучения материалов: в радиационном методе, основанном на уравнивании потоков излучения от стандартного и исследуемого образцов; в компараторе

излучательных свойств КИС-01 с неселективным дифференциальным радиометром; в широкодиапазонном (от 50 до 600 °С) измерителе температуры поверхности с автоматической компенсацией теплоотвода по контактному термопреобразователю стержневого типа; в адиабатическом измерителе типа «черное тело» для диапазона температур от 50 до 600 °С.

Внедрение этих результатов работы заложило основы метрологического обеспечения терморadiационных характеристик материалов, имеющих важное значение для развития авиакосмической техники;

– в ФГУП «Ростест-Москва» при выполнении работ в рамках государственного метрологического контроля путем использования рекомендаций «ГСИ. Малогабаритный проливной стенд поверочный». Методика поверки теплосчетчиков и водосчетчиков методом непосредственного сличения (МИ 2452-97) и «ГСИ. Теплосчетчики в составе автоматизированных систем». Типовая программа испытаний для целей утверждения типа (МИ 2479-98);

– в ОАО «Научно-производственное предприятие «Эталон» (г. Омск) используются результаты диссертационной работы, направленные на освоение серийного производства следующих средств приборного и метрологического обеспечения параметров теплообмена и параметров теплоносителей: сухоблочных термостатов ТР-1М и ТС-250-1, предназначенных для поверки средств измерений температуры, в том числе термопреобразователей в составе теплосчетчиков в диапазоне от 50 до 250 °С; термопреобразователей сопротивления с унифицированным выходным сигналом ТС1У 9313 (от минус 200 до 600 °С) и ТСМУ 9313 (от минус 50 до 150 °С) для измерений температуры жидких сред в теплоэнергетике; малоинерционных поверхностных термоэлектрических преобразователей ТХА 9909 и ТХК 9909 для измерений температуры плоских поверхностей в диапазонах от минус 40 до 260 °С и от минус 40 до 600 °С; гибких пластинчатых поверхностных термопреобразователей типа «вспомогательная стенка» ТХА 0001, ТХК 0001, ТСП 9703, ТСМ 9703, предназначенных для измерений температуры плоских, цилиндрических и криволинейных поверхностей в диапазоне от минус 60 до 700 °С; поверхностного термостата ТПР 200-ТТ-1, предназначенного для поверки средств измерений температуры поверхности в диапазоне от 50 до 200 °С с погрешностью менее 0,1 °С; малогабаритных ампул для реализации реперных точек плавления галлия и затвердевания индия Международной температурной шкалы МТШ-90 с целью их дальнейшего использования при поверке прецизионных термометров из состава теплосчетчиков; теплотрических расходомеров-теплосчетчиков и установки для их испытаний и поверки, основанной на использовании измерительных теплотрических теплообменников; оптоволоконного пирометра ПЛ-7, предназначенного для использования в жестких условиях эксплуатации, в том числе в атомной энергетике, для измерений температуры от 400 до 2000 °С.

## Апробация работы

Основное содержание выполненных разработок и исследований докладывалось и обсуждалось более, чем на 30 международных, всесоюзных и всероссийских конференциях, конгрессах и семинарах, в том числе на Всесоюзном семинаре «Метрологическое обеспечение измерений высоких температур и параметров плазмы» (Харьков, 1979); III Всесоюзном совещании по низкотемпературным измерениям и их метрологическому обеспечению (Москва, 1982); IV Всесоюзной конференции «Метрологическое обеспечение теплофизических измерений при низких температурах» (Хабаровск, 1985); III Всесоюзной конференции «Метрологическое обеспечение температурных и теплофизических измерений в области высоких температур» (Харьков, 1986); Всесоюзной конференции «Современное состояние теплофизического приборостроения» (Севастополь, 1987); IV Всесоюзной конференции «Методы и приборы для точных dilatометрических исследований в широком диапазоне температур» (Ленинград, 1988); VI Всесоюзной конференции «Электротермометрия – 88» (Луцк, 1988); on IMECO-TC 12 Workshop on «Surface thermal measurements» (Budapest, 1988, 1995); VIII Всесоюзной конференции по теплофизическим свойствам веществ (Новосибирск, 1988); V Всесоюзной конференции «Метрологическое обеспечение теплофизических измерений при низких температурах» (Хабаровск, 1988); Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Новосибирск, 1992, 1996, 1998, 2000, 2002, 2004); on European scientific metrological conference «150<sup>th</sup> Anniversary of Russian Metrological Service» (St. Petersburg, 1992); Первой Российской конференции по проблемам термометрии (Подольск, 2001); III Научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение учета энергетических ресурсов» (Москва, 2001); Всероссийском семинаре «Метрологические аспекты промышленной термометрии» (Обнинск, 2002); Международной конференции по проблемам коммерческого учета энергоносителей «Теплосиб» (Новосибирск, 2002, 2003, 2004, 2005); III Международной конференции «Проблемы промышленной теплотехники» (Киев, 2003); Международном научном семинаре «Радиационные измерения истинной температуры тел с неизвестной излучательной способностью» (Москва, 2003); Второй Всероссийской конференции по проблемам термометрии (Обнинск, 2004); Всероссийском семинаре-совещании «Практическое применение контактных и пирометрических средств температурных измерений и средств их метрологического обеспечения» (Омск, 2005); Международном научном конгрессе «Гео-Сибирь» (Новосибирск, 2005), а также на семинарах и совещаниях в ведущих научных и метрологических центрах мира: Институте тепло- и массообмена (Минск, 1987), Метрологическом институте Венгрии (Будапешт, 1987), Институтах прикладной оптики и современной химии (Сиань, 1991, 2001), Физико-техническом институте (Берлин-Брауншвейг,

1994), Научно-технической комиссии (НТК) Госстандарта (Москва, 1993, 2001), Национальном метрологическом институте (Пекин, 1997), Национальном центре стандартизации и метрологии (Алма-Ата, 1998), Словацком метрологическом институте (Братислава, 2003).

### **Публикации**

Основные результаты и содержание диссертационной работы отражены в 89 опубликованных научных работах и в 3 нормативных документах по метрологии. Новизну разработок подтверждают 5 авторских свидетельств и 5 патентов на изобретения.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, библиографии и приложений. Работа содержит 275 страниц, в том числе 65 иллюстраций и 11 таблиц. В библиографии приведено 250 наименований.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1 Разработанные методы измерения тепловых потоков, основанные на использовании открытой адиабатической оболочки, позволили создать средства высшей точности для **воспроизведения** размера единиц измерения поверхностной плотности теплового потока, интегральных коэффициентов теплового излучения и теплопроводности материалов.

2 Предложенные теплотрические методы компарирования позволили создать новые эффективные средства **передачи** размера единиц измерения основных параметров теплообмена.

3 Выдвинутая автором идея и концепция метрологического обеспечения измерений теплового потока и количества теплоты в системах теплоснабжения, основанная на использовании измерительных теплообменников, открывает новые возможности повышения точности воспроизведения и передачи размера этих физических величин при эксплуатационных значениях параметров теплоносителей.

4 Полученные в работе результаты являются основой формирования нового научно-технического направления в метрологическом обеспечении теплофизических измерений – обеспечение единства измерений параметров теплообмена и теплоносителей.

### **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность работы, определены ее цели и задачи, изложены научная новизна и практическая значимость диссертации, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведена

общая характеристика содержания работы, данные об ее апробации и реализации результатов.

В первом разделе рассмотрены теоретические аспекты, состояние и задачи метрологического обеспечения теплотрии, как направления измерительной техники, посвященного измерениям тепловых потоков, а также определяющих их интенсивность физических величин – параметров теплообмена и эксплуатационных параметров теплоносителя. При этом используется тождество понятий: тепловой поток  $P$ , создаваемый системой теплоснабжения, и тепловой поток на теплообменных поверхностях ограждающих конструкций зданий и сооружений. Действительно, для стационарного температурного режима количество теплоты, выделяемое системой теплоснабжения, и соответствующий тепловой поток равны тепловым потокам (потерям тепла) на поверхности ограждающих конструкций, как это следует из их баланса:

$$P = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (1)$$

где  $i$  – число участков поверхности объекта с тепловыми потоками  $Q_i$ .

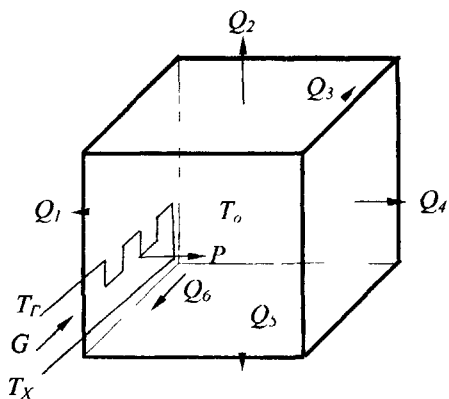


Рисунок 1 – Модель объекта теплотребления

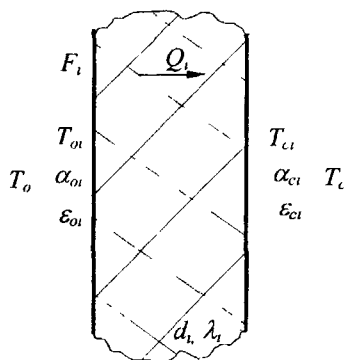


Рисунок 2 – К определению теплового потока через ограждающую конструкцию

На основе анализа тепловой модели объекта теплотребления (рисунок 1) показана взаимосвязь параметров теплообмена с параметрами теплоносителя. Получено основное уравнение теплотребления, которое следует из (1) и связывает температуру отапливаемого помещения с этими параметрами

$$T_o = T_c + \frac{K_s G \Delta T_{IX}}{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{\tilde{\alpha}_{oi}} + \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\tilde{\alpha}_{ci}} \right] F_i}, \quad (2)$$

где  $T_c$  – температура окружающей среды;

$F_i$  – площадь теплообменной поверхности  $i$ -ой зоны;

$d_i, \lambda_i$  – ее толщина и теплопроводность материала ограждающих конструкций объекта теплоснабжения;

$\tilde{\alpha}_{oi}, \tilde{\alpha}_{ci}$  – эффективные коэффициенты теплоотдачи на внутренних и внешних поверхностях ограждающих конструкций;

$K_s$  – коэффициент Шуга, учитывающий свойства теплоносителя и, прежде всего, зависимость его энтальпии (теплоемкости) от температуры и давления;

$G$  – расход теплоносителя;

$\Delta T_{IX}$  – понижение его температуры после прохождения по объекту (разность температур в подающем  $T_i$  и отводящем  $T_x$  трубопроводах).

Эффективные коэффициенты теплоотдачи  $\tilde{\alpha}_{oi}$  и  $\tilde{\alpha}_{ci}$  являются функциями коэффициентов конвективной составляющей теплоотдачи и ее радиационной составляющей (рисунок 2), которая, в свою очередь, зависит от значений интегральных полусферических коэффициентов теплового излучения  $\varepsilon_{oi}$  и  $\varepsilon_{ci}$  внутренних и внешних поверхностей ограждающих конструкций, а также от их температур  $T_{oi}$ ,  $T_{ci}$ .

Для решения главной задачи энергосбережения требуется обеспечить заданное значение  $T_o$  при минимальных затратах тепла, выделяемого в объекте системой теплоснабжения, а это зависит от значений физических величин, входящих в уравнения (1) и (2). Величины  $Q, T, \lambda, \varepsilon, \alpha$  в работе предложено относить к основным параметрам теплообмена, а величины  $P, K_s, G, T_i, T_x$  – к параметрам теплоносителя.

Поскольку все физические величины, входящие в формулу (2), являются параметрами, от которых прямо или косвенно зависят значения тепловых потоков, определяющих температурный режим объектов теплоснабжения, то их измерения, наряду с измерениями тепловых потоков (и их поверхностной плотности), предложено объединить одним понятием «теплетрия», введенным О.А. Герашенко.

Далее рассмотрены состояние и вопросы развития метрологического обеспечения измерений каждой из этих физических величин.

**Тепловой поток** – всеобъемлющая физическая величина, определяющая интенсивность и направление движения теплоты в окружающем человека мире и обеспечивающая тем самым возможность его существования. Поэтому точные измерения тепловых потоков становятся основой энергоресурсосбережения и одним из важных направлений развития метрологии.

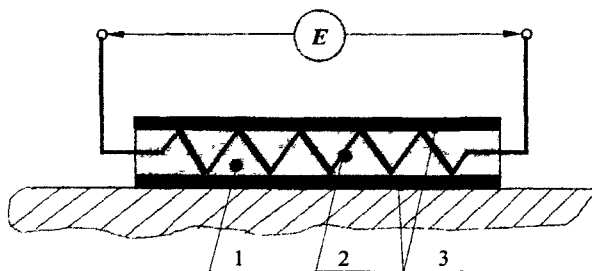


Рисунок 3 – Устройство контактного преобразователя теплового потока (тепломера): 1 – слой материала с постоянным термическим сопротивлением, 2 – дифференциальный термопреобразователь, 3 – контактные пластины

Рассмотрены основные источники погрешностей измерения плотности теплового потока контактными преобразователями, устройство которых представлено на рисунке 3. Получено соотношение, устанавливающее связь относительной погрешности с качеством теплового контакта преобразователей с поверхностью объекта (термостата) и с их теплофизическими свойствами при стационарном тепловом потоке

$$\sigma_q = \frac{-(Bi + \tilde{Bi} + Bi_k)}{1 + Bi + \tilde{Bi} + Bi_k}, \quad (3)$$

где  $Bi$ ,  $\tilde{Bi}$ ,  $Bi_k$  - критерии подобия Био, соответственно, для объекта, преобразователя и воздушного зазора между объектом и преобразователем.

Получено соотношение, устанавливающее связь абсолютной динамической погрешности измерения  $\delta_v$  плотности теплового потока контактными преобразователями с полной теплоемкостью  $C_{II}$  и скоростью  $v$  изменения их температуры

$$\delta_v = -vC_{II} / F_{II}, \quad (4)$$

где  $F_{II}$  – площадь контактной поверхности преобразователя.

Это соотношение позволяет, в частности, устанавливать границы допустимой нестационарности температурных режимов при измерениях тепловых потоков, например, в эталонных установках для воспроизведения и передачи размера единицы плотности теплового потока. Оно позволяет также вводить поправки к показаниям преобразователей при исследованиях нестационарного теплообмена. Для этого их необходимо снабжать датчиками температуры, с помощью которых можно определять скорость ее изменения. Кроме того необходимо располагать сведениями по полной теплоемкости преобразователей.

Показано, что для обеспечения высокой точности измерений перечень метрологических характеристик, особенно для эталонных (образцовых)

датчиков теплового потока должен содержать: диапазон измеряемых значений плотности теплового потока, значения коэффициента преобразования и погрешности его определения, термического сопротивления, полной теплоемкости, интегрального коэффициента теплового излучения и внутреннего электрического сопротивления встроенных дифференциальных преобразователей температуры. Кроме этого при использовании преобразователей теплового потока в широком диапазоне температур необходимо знание температурных зависимостей указанных свойств преобразователей. Обеспечение точности определения этих зависимостей является важной задачей метрологии в области контактной теплотометрии.

Рассмотрены вопросы повышения точности контактных измерений **температуры поверхности** твердых тел, находящихся в теплообмене с окружающей средой. Предложена трактовка понятия температуры поверхности, как температуры поверхностного слоя вещества (материала), по всей толщине которого температура одинакова с заданной точностью. Заданная точность определяется условиями конкретной измерительной задачи. В связи с этим для определения температуры поверхности тела достаточно измерить температуру его поверхностного слоя, внутри которого температура одинакова с точностью до заданной погрешности ее измерения.

Проведен анализ основных источников погрешностей, возникающих при измерении температуры поверхности термостатов плоскими и стержневыми преобразователями температуры. Получено соотношение для расчета суммарной абсолютной погрешности плоских термопреобразователей, обусловленной контактным термическим сопротивлением и «эффектом экранирования»:

$$\delta = \left[ \frac{Bi \tilde{Bi}}{(1 + Bi)(1 + Bi + \tilde{Bi})} + \frac{Bi_k}{1 + Bi + \tilde{Bi} + Bi_k} \right] (T_o - T_{cp}), \quad (5)$$

где  $T_o$ ,  $T_{cp}$  - значения температур поверхности термостата и среды.

Соотношение позволяет проводить оценку погрешностей измерения температуры поверхности контактными преобразователями с учетом конкретных условий теплообмена и особенностей конструкции датчиков температуры поверхности.

Предложены, экспериментально исследованы и внедрены основные типы конструкций контактных датчиков температуры поверхности: плоские терморезисторные, выполненные в виде тонких пластин, в частности, с чувствительным элементом из чистого напыленного алюминия, стержневые термоэлектрические с чувствительным элементом, расположенным внутри силфона, уменьшающего его тепловую связь с окружающей средой, а также стержневые термоэлектрические датчики с компенсацией теплоотвода по термоэлектродам путем их подогрева переменным током. Для этих датчиков найдено, рассчитано и экспериментально подтверждено оптимальное

значение расстояния от поверхности до чувствительного элемента (спаев) вспомогательного термопреобразователя, служащего для определения равенства температур спаев, при котором наступает компенсация теплового потока.

Рассмотрены проблемные вопросы расширения сферы метрологического обеспечения измерений **теплопроводности** твердых тел в область малых и высоких ее значений. Показано, что при измерении теплопроводности теплоизоляционных материалов главной задачей является точное измерение теплового потока, проходящего через образец исследуемого материала, а для материалов с высокой теплопроводностью – измерение малых разностей температур в исследуемых образцах.

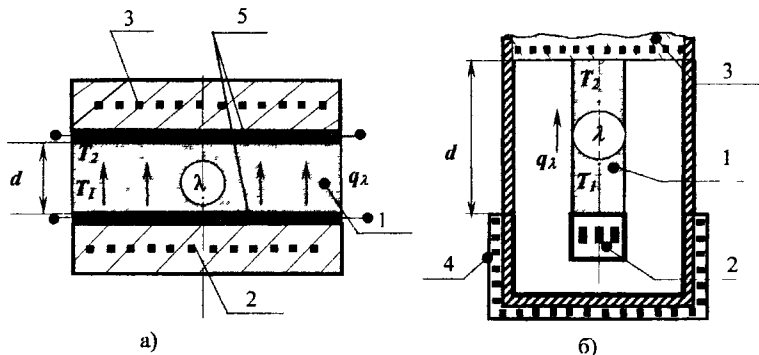


Рисунок 4 – Тепловые модели измерения теплопроводности:

- а) теплотметрический метод пластины; б) абсолютный адиабатический метод стержня: 1 – образец, 2 – нагреватель, 3 – холодильник, 4 – адиабатический экран, 5 – термомеры

Предложены пути решения этих проблем, а также проведены оценки максимально возможных точностей измерения теплопроводности таких материалов. Показано, что для многих задач теплосбережения целесообразно измерять не теплопроводность образцов теплоизоляторов, а значение теплового сопротивления или коэффициентов теплопередачи реальных изделий (рисунок 4 а). Для измерения теплопроводности твердых тел с высокой теплопроводностью ( $\lambda > 100 \text{ Вт/(м·К)}$ ) предложена и реализована конструкция тепловой измерительной ячейки (рисунок 4 б) для измерений индивидуальных значений теплопроводности материалов и сплавов и ее температурной зависимости. Ее особенностью является сочетание метода открытой адиабатической оболочки, позволяющей наиболее точно сформулировать и измерить тепловой поток через образец, с техническим решением, исключающим контактные термические сопротивления образца к нагревателем и холодильником.

Измерения другого параметра теплообмена **коэффициента теплоотдачи** имеет ряд особенностей, которые ограничивают или делают нецелесообразной возможность обеспечения их единства эталонами и специальной поверочной схемой. Чаще всего на практике принято рассчитывать значения этого коэффициента на основе эмпирических соотношений, полученных на основе экспериментальных данных и теории подобия. Однако в связи с необходимостью решения задач теплосбережения и, в частности, учета тепла (в том числе поквартирного), требуются более точные сведения о значениях коэффициента теплоотдачи, которые могут быть получены только на основе измерений. Показано, что особенность таких измерений заключается в том, что полученные значения относятся только к конкретной измерительной задаче, которые характеризуют специфику процесса теплообмена в системе поверхность твердого тела – окружающая среда (движущиеся газ или жидкость) и зависят сложным образом от свойств поверхности и ее температуры, а также от свойств окружающей среды, скорости ее перемещения, температуры, давления и многих других факторов. Получены экспериментальные данные о зависимости коэффициентов теплоотдачи отопительных приборов от температуры и сделан вывод о значительном (более 50 %) вкладе радиационной составляющей теплообмена в значение этого коэффициента. Сделано заключение, что метрологическое обеспечение измерений коэффициента теплоотдачи может быть основано на обеспечении единства измерений температуры поверхности, плотности теплового потока или количества теплоты приборами и системами учета тепла.

Проведен анализ существующих методов и средств измерений интегральных (полусферических и нормальных) **коэффициентов теплового излучения** (ИКТИ) материалов с точки зрения научно-технической возможности обеспечения единства их измерений. При этих измерениях, как и при измерениях теплопроводности, возникают проблемы точного определения теплового потока, излучаемого образцом, и, самое главное, особо точного измерения температуры его поверхности, поскольку в расчетных формулах большинства существующих методов измерения этой физической величины значение температуры входит в четвертой степени.

Показано, что наибольшую точность задания и измерения тепловых потоков обеспечивает вакуумный адиабатический калориметр с открытой (односторонней) адиабатизацией образца. При низких температурах целесообразно использовать для этих целей преобразователи теплового потока (теплометрический метод). Относительная погрешность определения тепловых потоков на поверхности образца составляет в этих случаях менее 0,5 % в диапазоне температур от минус 100 до 650 °С.

Для точных измерений температуры излучающей поверхности образца предложен метод моделирования температуры (метод двух преобразователей), заключающейся в том, что на поверхности образца размещают миниатюрный чувствительный элемент (спай) дифференциального преобразователя температуры. Его второй спай

располагают в специальном тепловом блоке с основным термометром – носителем температурной шкалы, температура которого поддерживается равной температуре поверхности образца и измеряется основным термометром. Проведен анализ тепловой модели такой схемы измерения с учетом полученных выше соотношений для толщины поверхностного слоя, определяющего понятие «температура поверхности». Показано, что погрешность измерения в этом случае составляет не более 0,4 %, а, следовательно, реально достижимая погрешность измерений ИКТИ составляет около 1 %.

Проведен анализ точностных возможностей существующих теплоизмерительных приборов и систем, основанных на измерениях параметров теплоносителя – расхода и температуры теплоносителя, а также на использовании стандартных справочных данных по его теплоемкости (энтальпии).

Рассмотрены вопросы метрологического обеспечения измерений температуры в системах и приборах измерения количества теплоты. Предложена физическая модель преобразователя температуры, измеряющего температуру теплоносителя. Показано, что температура  $t_{ч3}$  чувствительного элемента такого преобразователя является сложной функцией многих физических величин

$$t_{ч3} = f(\alpha, F, L, \lambda, S, \varepsilon, t_x, t_{cm}), \quad (6)$$

которая может быть получена в явном виде из решения уравнения, отражающего баланс тепловых потоков, воздействующих на чувствительный элемент

$$\alpha(t_x - t_{ч3})F = \frac{\lambda_2 S_2}{L}(t_{ч3} - t_{c1}) + 4\epsilon\sigma t_{ч3}^3(t_{ч3} - t_{c1})F, \quad (7)$$

из которого следует формула для инженерных расчетов:

$$t_{ч3} = \frac{t_x + K_T t_{c1}}{1 + K_T}, \quad (8)$$

где  $K_T = \lambda_2 S_2 / \alpha F L$ ,

$\lambda_2$  и  $S_2$  - эффективные значения теплопроводности и площади поперечного сечения армировки, защитного чехла и соединительных проводов датчика температуры,

$L$ ,  $F$  - глубина погружения и площадь поверхности датчика в зоне чувствительного элемента,

$\alpha$ ,  $\varepsilon$  - параметры конвективного и радиационного теплообмена поверхности датчика.

Полученные на основе теоретического анализа тепловой модели датчика температуры значения погрешностей подтверждены экспериментально и демонстрируют необходимость принятия специальных мер для повышения точности измерений температуры теплоносителя. Это и требования к конструкции датчиков и требования к специфике поперечного оборудования. Высказана идея использования малогабаритных реперных точек на основе фазовых переходов галлия и индия для повышения точности

определения метрологических характеристик термометров, входящих в состав теплосчетчиков.

Обеспечение единства измерений массового расхода жидкостей основано на проливных расходомерных установках, работающих в диапазоне температур теплоносителя (воды) ниже 95 °С. Следовательно, достоверность показаний приборов и систем учета тепла, имеющих верхнее значение диапазона температур теплоносителя от 150 до 180 °С, остается под вопросом.

Рассмотрен адиабатический метод и калориметрическая установка для исследований температурной зависимости теплоемкости  $c_V$  жидкостей. Показано, что снижение погрешности измерений теплоемкости до значений, менее 0,1 % трудно или пока вообще неосуществимо.

Показано, что традиционная поэлементная поверка теплосчетчиков, основанная на измерениях этих параметров, несовершенна.

Предложена и рассмотрена концепция метрологического обеспечения приборов и систем учета количества теплоты и теплового потока в системах теплоснабжения, основанная, прежде всего, на комплексном определении метрологических характеристик этих средств измерений. Показана возможность повышения точности на основе предложенной автором идеи прямого измерения теплового потока в эталонных средствах воспроизведения и передачи размера единиц этих физических величин.

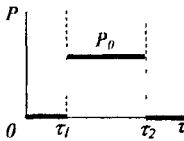
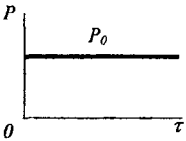
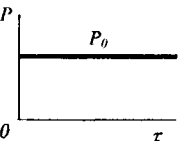
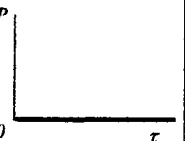
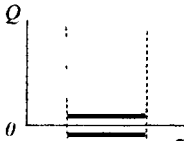

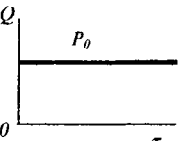

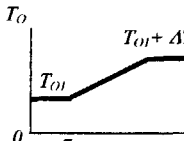
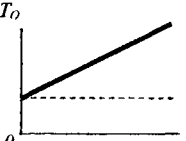
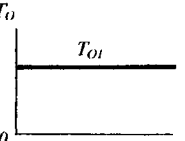
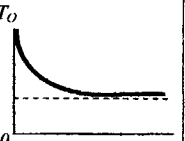
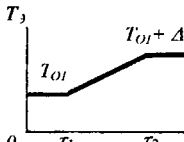
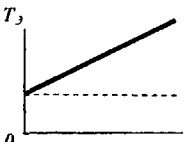
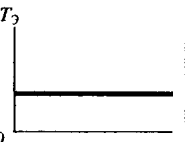

**Второй раздел** диссертации содержит результаты работ по созданию калориметрических методов и средств воспроизведения размера единиц поверхностной плотности теплового потока и коэффициентов теплового излучения материалов. Научно-техническую основу созданных методов и средств составляет предложенная автором классификация методов измерения тепловых свойств веществ, а также их обобщение при рассмотрении модели теплообмена в системе исследуемое ядро (образец) – оболочка (тепловой экран). В общем виде уравнение, описывающее баланс тепловых потоков в такой модели, имеет вид

$$P(\tau) - Q(T_o, T_s, \lambda, \alpha, \varepsilon) = C(T_o) \frac{dT_o}{d\tau}, \quad (9)$$

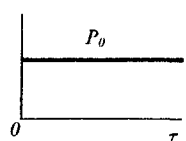
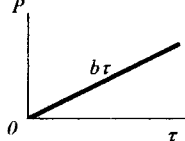
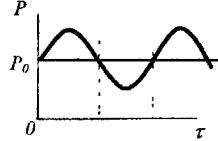
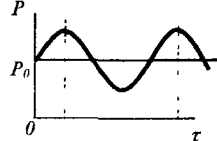
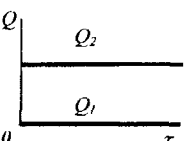
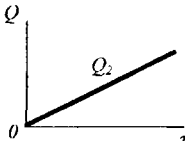
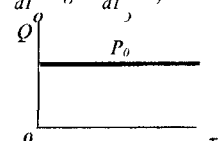
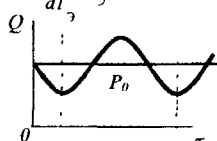
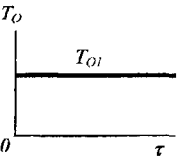
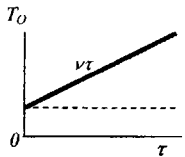
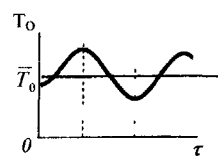
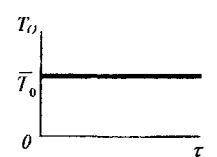
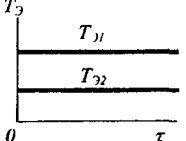
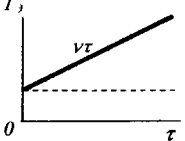
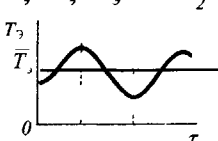
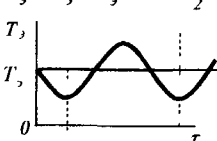
где  $P(\tau)$  – мощность источника тепла, выделяемого в ядре,  $Q(T_o, T_s, \lambda, \alpha, \varepsilon)$  – тепловой поток между ядром и оболочкой,  $C(T_o)$  – полная теплоемкость ядра,  $dT_o/d\tau$  – скорость изменения температуры ядра,  $T_o, T_s$  – температура ядра и оболочки,  $\lambda$  – теплопроводность среды между ядром и оболочкой,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на поверхности ядра,  $\varepsilon$  – приведенный полусферический интегральный коэффициент теплового излучения в системе ядро – оболочка.

В таблице 1 представлены обобщение и классификация методов измерения тепловых величин, основанные на рассмотрении температурных режимов ядра и оболочки (температуры  $T_o$  и  $T_s$ ), характера изменения

**Таблица 1 - Калориметрические методы измерения тепловых свойств веществ и параметров теплообмена**

Метод	Адиабатический стационарный	Адиабатический динамический	Неадиабатический стационарный	Неадиабатический динамический
Параметр Измеряемая величина и расчетная формула	$C = \frac{P_0 \Delta \tau}{\Delta T}$	$C = \frac{P_0}{v} = P_0 \frac{dt}{dI_0}$ v – скорость изменения $T_0$	$\varepsilon = \frac{K \varepsilon P_0}{T_0^4 - T_3^4}$ $\lambda = \frac{KP_0}{T_0 - T_3}$	$\varepsilon = \frac{vK_C C}{T_0^4 - T_3^4}$ $K_C$ - постоянная
P	$P = P_0 (\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2)$ $P = 0 (\tau > \tau_2)$ 	$P = P_0$ 	$P = P_0$ 	$P = 0$ 
Q	$Q = 0$ 	$Q = 0$ 	$Q = P_0$ 	$Q = Q(\vartheta)$ 
$T_0$	$T_0 = T_{01} (\tau < \tau_1)$ $T_0 = T_{01} + \Delta T (\tau > \tau_1)$ 	$T_0 = T_{01}(\tau) + T_{30}$ 	$T_0 = T_{01}$ 	$T_0 = T_0(\vartheta)$ 
$T_3$	$T_3 = T_0$ 	$T_3 = T_0(\vartheta) + T_{30}$ 	$T_3 < T_{01}$ 	$T_3 < T_0(\vartheta)$ 

Продолжение таблицы 1

Полуадиабатический стационарный	Полуадиабатический динамический	Адиабатический модуляционный	Неадиабатический модуляционный
$\varepsilon = \frac{K P}{\varepsilon_0} \frac{T_{01}^4 - T_{32}^4}{T_{01}^4 - T_{32}^4}$ $\lambda = \frac{K \lambda P_0}{T_{01} - T_{32}}$ $q = \frac{P_0}{F}$	$q = \frac{P - vC}{F}$ $\alpha = -\frac{q}{T_{01} - T_{32}}$	$C = \frac{p}{\omega \theta_0}$	$\varepsilon = \frac{p}{4\sigma T_3^3 \theta_3 F}$
$P = P_0$ 	$P = b\tau$ 	$P = P_0 + p \sin \omega \tau$ 	$P = P_0 + p \sin \omega \tau$ 
$Q_1 = 0, Q_2 = P_0$ 	$Q_1 = 0, Q_2 = b\tau$ 	$\bar{Q} = P_0$ $\frac{dQ}{dT} \theta_0 = \frac{dQ}{dT} \theta_0$ 	$\bar{Q} = P_0$ $p - \frac{dQ}{dT} \theta_0$ 
$T_0 = T_{01}$ 	$T_0 = v\tau + T_{32}$ 	$T_0 = \bar{T}_0 + \theta_0 \sin(\omega\tau - \frac{\pi}{2})$ 	$T_0 = \bar{T}_0, \theta_0 = 0$ 
$T_{31} = T_{01}$ $T_{32} < T_{01}$ 	$T_{31} = v\tau + T_{32}$ $T_{32} < T_{01}$ 	$\bar{T}_3 < \bar{T}_0$ $T_3 = \bar{T}_3 + \theta_3 \sin(\omega\tau - \frac{\pi}{2})$ 	$\bar{T}_3 < T_0$ $T_3 = \bar{T}_3 + \theta_3 \sin(\omega\tau - \frac{\pi}{2})$ 

мощности источника  $P$  во времени и зависимости теплового потока от параметров теплообмена.

Адиабатический стационарный метод применялся в ранних работах автора по исследованию термодинамических свойств теплоносителей, в частности, удельной теплоемкости и энтальпии. Этот опыт в дальнейшем был использован им при создании динамического адиабатического калориметра для исследований теплоемкости металлов и сплавов до  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ , а также при создании новых модуляционных (адиабатического и неадиабатического) методов измерения теплоемкости и интегральной излучательной способности металлов и сплавов. В свою очередь этот комплекс работ привел автора к идее использования открытой адиабатической оболочки для создания средств высшей точности для воспроизведения размера единиц измерения сразу нескольких параметров теплообмена ( $q$ ,  $\varepsilon$ ,  $\lambda$ ).

Рассмотрены особенности, пути повышения точности и расширения диапазона измерений адиабатического метода и установки (рисунок 5) для воспроизведения единицы **поверхностной плотности теплового потока** УВТ 53-А-88, возглавляющей Государственную поверочную схему для средств измерений поверхностной плотности теплового потока в диапазоне от 10 до  $2000\text{ Вт/м}^2$  при температурах от 200 до 400 К, созданных по предложению и при непосредственном участии автора. Аналогичные установки были созданы для аттестации специальных полупроводниковых термоэлектрических преобразователей теплового потока в диапазоне температур от 50 до  $650\text{ }^\circ\text{C}$ , а также набор измерительных установок, реализующих адиабатический метод измерений, которые использовались для градуировки и поверки крупногабаритных тепломеров (рисунок 6) при температурах от 20 до  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Кроме этого создана измерительная установка для исследования динамических погрешностей преобразователей теплового потока.

При этом предложен оригинальный способ задания квазилинейного нарастания теплового потока, основанный на закономерностях конвективного теплообмена при линейном нарастании мощности источника теплового потока.

На основе метода открытой адиабатической оболочки разработаны и исследованы установки эталонного назначения для измерений полусферического интегрального коэффициента теплового излучения (ИКТИ) материалов и покрытий в диапазоне значений от 0,1 до 0,95 при температурах от минус 50 до  $650\text{ }^\circ\text{C}$  с погрешностью от 1 до 2,5 %. С помощью этих измерительных установок изучены температурные зависимости ИКТИ ряда материалов и покрытий, которые рекомендованы для использования и внедрены в качестве стандартных образцов излучательных свойств.

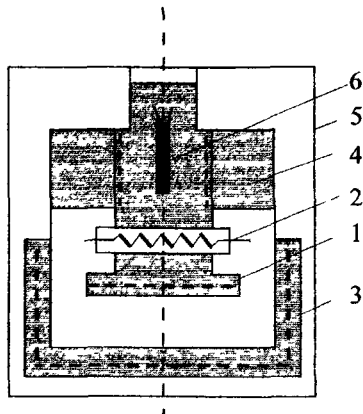


Рисунок 5 – Схема тепловой измерительной ячейки УВТ 53-А-88:  
 1 – нагреватель, 2 – эталонный ПТП, 3 – адиабатический экран,  
 4 – холодильник, 5 – корпус вакуумной камеры ( $T \approx -196^\circ\text{C}$ ),  
 6 – преобразователь температуры

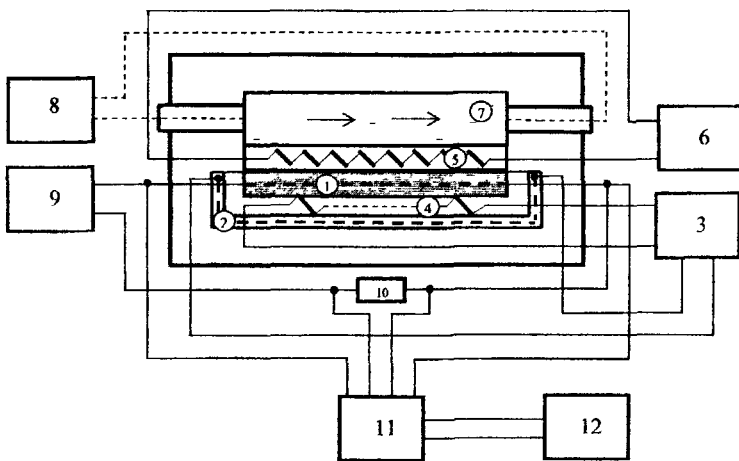


Рисунок 6 – Установка эталонного назначения для поверки крупногабаритных термомеров: 1 – нагреватель, 2 – адиабатический экран, 3 – регулятор температуры, 4 – дифференциальный термоэлектрический термопреобразователь, 5 – исследуемый ПТП, 6 – милливольтметр, 7 – холодильник, 8 – термостат, 9 – источник напряжения, 10 – мера сопротивления, 11 – переключатель, 12 – милливольтметр

В качестве исходного эталонного средства измерений нормального ИКТИ ( $\epsilon_{in}$ ) предложена и воплощена в действующую установку идея создания теплового излучателя типа «черное тело» с контролируемым коэффициентом излучения (рисунок 7). Отличительной особенностью такого излучателя является наличие открытой адиабатической оболочки, со стороны боковой поверхности и одного торца окружающей цилиндрический нагревательный блок, имеющий конструкцию модели АЧТ. За счет этого весь тепловой поток, равный мощности нагревателя  $P$ , выходит в виде теплового излучения через открытое выходное отверстие, имеющее площадь  $F$ . В стационарном режиме выполняется баланс мощности нагревателя и потока теплового излучения, а, следовательно, выполняется соотношение

$$\epsilon_{in} = \frac{P}{\sigma T_o^4 F}, \quad (10)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,

$T_o$  – абсолютная температура излучателя, измеренная при равенстве температур  $T_o$  АЧТ и оболочки  $T_2$  основным термометром – носителем температурной шкалы.

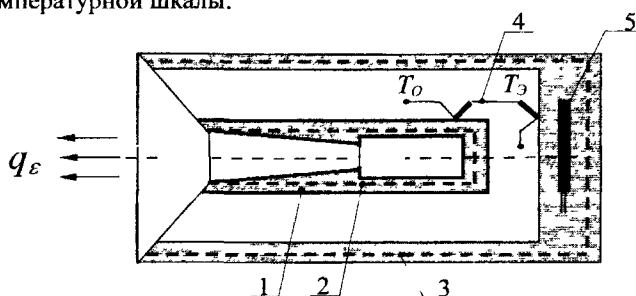


Рисунок 7 – Излучатель «черное тело» с контролируемым коэффициентом теплового излучения: 1 – модель АЧТ, 2 – нагреватель, 3 – адиабатический экран, 4 – дифференциальная термопара, 5 – основной термометр

Такой излучатель воспроизводит значение  $\epsilon_{in}$  в диапазоне от 100 до 600 °С с погрешностью менее 1,5 %.

Идея формирования теплового потока незамкнутой (открытой) адиабатической оболочкой реализована автором при создании измерительной ячейки (рисунок 6а) для точных измерений теплопроводности образцов особо чистой меди, которая используется в качестве теплового сопротивления для изготовления датчиков теплового потока высокой интенсивности.

**Раздел третий** посвящен методам и средствам передачи размера единиц измерения параметров теплообмена: поверхностной плотности

теплового потока и интегрального коэффициента теплового излучения материалов, а также методикам и средствам поверки измерителей температуры поверхности и теплотрическим методам и средствам измерений теплопроводности. Дан анализ методов компарирования, предложена их классификация как одновременное и разнесенное во времени (разновременное) компарирование. Предложен новый модуляционный метод разновременного компарирования значений физических величин применительно к измерениям интегрального полусферического коэффициента теплового излучения материалов. Проведена сравнительная оценка методов компарирования по их метрологическим характеристикам и перспективам развития. Приведены примеры эффективности и результаты экспериментального исследования модуляционного метода, в частности для точного определения температур Кюри чистых металлов.

Примером одновременного компарирования коэффициентов преобразования эталонного и поверяемого преобразователей теплового потока является разработанный, исследованный и внедренный автором теплотрический компаратор КТМ, предназначенный для определения метрологических характеристик датчиков теплового потока в широком диапазоне температур от 150 до 400 К (рисунок 8).

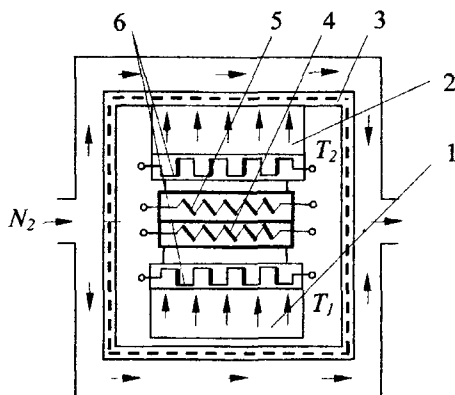


Рисунок 8 Низкотемпературный кондуктивный компаратор для сличения ПТП: 1 – блок нагревателя, 2 – блок холодильника, 3 – охлаждаемая газообразным азотом термостатированная камера, 4 – поверяемый ПТП, 5 – образцовый ПТП, 6 – Пельтье-батареи

Компаратор основан на сравнении показаний идентичных по форме и размерам поверяемого и эталонного ПТП, когда через них проходит одинаковый тепловой поток. Тепловой поток плотностью  $q$  создается термоэлектрическими Пельтье-батареями за счет разности температур нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$ , между которыми помещены в виде «сэндвича» сличаемые ПТП.

В этом случае

$$q = K_o E_o = K_x E_x, \quad E_x = \frac{K_o}{K_x} E_o, \quad (11)$$

где  $K_o$ ,  $E_o$  и  $K_x$ ,  $E_x$  – коэффициенты преобразования и сигналы соответственно эталонного и поверяемого ПТП. Погрешность компаратора в диапазоне от 150 до 400 К не превышает 1,5 %.

Для исследований температурной зависимости ИКТИ материалов автором предложен метод и разработан компаратор радиационных тепловых потоков КИС-01 (рисунок 9), основанный на уравнивании с помощью неселективного теплотметрического радиометра потоков теплового излучения от образцов с разными значениями ИКТИ: исследуемого ( $\varepsilon_m^o$ ) и стандартного с известным значением ( $\varepsilon_m^x$ ) ИКТИ.

Расчетная формула имеет вид

$$\varepsilon_m^x = \varepsilon_m^o T_o^4 / T_x^4. \quad (12)$$

Погрешность компарирования коэффициентов излучения составляет менее 1,5 ÷ 2,5 % при температурах от 100 до 650 °С.

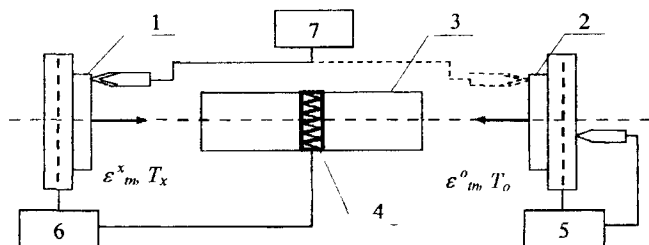


Рисунок 9 – Компаратор излучательных свойств: 1 – исследуемый образец с нагревателем, 2 – стандартный образец с нагревателем, 3 – дифференциальный радиометр, 4 – термомер, 5 – регулятор температуры стандартного образца, 6 – регулятор температуры исследуемого образца, 7 – термомер с компенсацией теплоотвода

Предложена и реализована методика поверки плоских преобразователей температуры с помощью термопреобразователя стержневого типа с компенсацией теплоотвода в диапазоне от 50 до 300 °С.

Созданы измерительные установки для исследований теплопроводности полимеров и теплоизоляторов динамическим и стационарным теплотметрическими методами в диапазоне температур от минус 100 до 300 °С.

Особенностью динамической установки является высокая производительность и возможность определять аномальное поведение теплопроводности материалов в области структурных превращений. Установка, использующая стационарный режим, основана на зависимости

теплового потока, пронизывающего образец, от термического сопротивления эталонных мер теплопроводности. Это дает возможность исследовать материалы со значениями теплопроводности ниже, чем у эталонных мер. Тем самым решается вопрос метрологического обеспечения измерений теплопроводности теплоизоляционных материалов ( $\lambda < 0,2 \text{ Вт/(м·К)}$ ).

**В четвертом разделе** рассмотрены вопросы развития метрологического обеспечения измерений параметров теплоносителей.

Приведены результаты проведенных при участии автора исследований метрологических характеристик малогабаритных ампул для воспроизведения реперных точек температурной шкалы МТШ-90 галлия ( $\approx 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и индия ( $\approx 156 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Показано, что высокие стабильность и точность (погрешность воспроизведения температуры менее  $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ ) позволяют использовать эти средства измерений в качестве эталонных при создании специализированных термостабилизирующих устройств для поверки термометрических каналов теплосчетчиков.

Для метрологического обеспечения измерений массового расхода теплоносителей в рамках данной работы создана, исследована и внесена в Госреестр средств измерений эталонная 1-го разряда расходомерная установка УМПР СНИИМ. Это единственная за Уралом установка такого класса обеспечивает поверку эталонных расходомеров и каналов измерения расхода эталонных теплосчетчиков в диапазоне от  $0,02$  до  $140 \text{ т/ч}$  с границами относительной погрешности не более  $\pm 0,05 \%$  (доверительная вероятность  $0,99$ ) при температурах до  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Высокая точность установки обеспечивается за счет периодической калибровки взвешивающего устройства по вторичному эталону единицы силы ВЭТ 32-1-85.

Рассмотрены результаты разработки и исследований нового направления в области измерений основных параметров теплоносителей и создания средств их метрологического обеспечения. В основу этого направления положены предложенные автором теплотрические методы. Сущность методов заключается в следующем. Нагретый теплоноситель, проходя по теплообменнику, охлаждается и создает тепловой поток  $Q$ . При этом его температура понижается на некоторое значение  $\Delta t$ . В предположении постоянства удельной теплоемкости  $c_v$  от его температуры справедливо соотношение

$$Q = c_v G \Delta t, \quad (13)$$

где  $G$  – массовый расход теплоносителя. Показано, что это широко известное соотношение можно эффективно использовать в различных вариантах для определений параметров теплоносителей: значений  $Q$  – по измерениям  $G$  и  $\Delta t$  при известных значениях  $c_v$  (например, для чистой дистиллированной воды); значений  $G$  – по известным значениям  $c_v$  и измеренным значениям  $Q$ ,  $\Delta t$ ; значений  $c_v$  – по измеренным значениям  $Q$ ,  $G$ ,  $\Delta t$ . Последний вариант важен для практики в случае, когда теплоемкость

реального теплоносителя значительно отличается от рекомендуемых табличных значений.

Однако наиболее перспективно использовать соотношение (13) для определения теплового потока  $P$ , создаваемого теплоносителем в объекте теплопотребления. Для этой цели предложен новый тип теплосчетчика (рисунок 10), содержащий специальный теплообменник, снабженный тепломерами, измеряющими  $Q$ , и высокочувствительными дифференциальными датчиками температуры для измерений  $\Delta t$ .

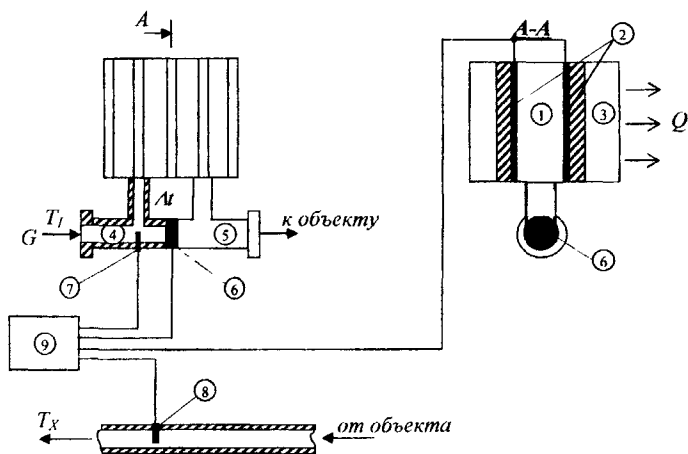


Рисунок 10 – Теплометрический расходомер-теплосчетчик:

1 – теплообменник, 2 – тепломеры, 3 – радиаторы, 4 – подводящий трубопровод, 5 – отводящий трубопровод, 6 – измеритель малых разностей температур, 7, 8 – термометры, 9 – тепловычислитель

Значение расхода теплоносителя определяется по формуле

$$G = \frac{Q}{c_p \Delta t} = \frac{K_1 E_1}{c_p K_2 E_2}, \quad (14)$$

( $K_1$ ,  $E_1$  и  $K_2$ ,  $E_2$  – коэффициенты преобразования и сигналы датчиков потока и малых разностей температур), а значение теплового потока, создаваемого теплоносителем в объекте теплопотребления, можно рассчитать по формуле

$$P = \frac{K_1 K_3}{K_2} \cdot \frac{E_1 E_3}{E_2}, \quad (15)$$

где  $K_3$ ,  $E_3$  – коэффициент преобразования и сигнал дифференциально включенных датчиков температуры, измеряющих разность температур  $\Delta T = T_1 - T_2$  до и после объекта теплопотребления.

Особенностью предложенного метода и прибора являются отсутствие необходимости данных по теплофизическим свойствам используемого

теплоносителя, а также требований к длине прямолинейных участков трубопровода в местах монтажа теплосчетчика.

Разработаны, изготовлены и исследованы макеты различных вариантов конструкций таких расходомеров-теплосчетчиков. Полученные результаты подтверждают возможность использования этих приборов в качестве эталонных (образцовых), в частности, в предлагаемой поверочной схеме для средств измерений количества теплоты и теплового потока в системах теплоснабжения.

Одним из путей повышения точности теплосчетчиков является предложенная автором идея прямого измерения теплового потока, передаваемого системой теплоснабжения в контур отопления объекта с помощью преобразователей теплового потока (тепломеров). Для этого предложено использовать измерительные теплообменники, в которых функцию теплообменных пластин выполняют специальные плоские тепломеры (рисунок 11).

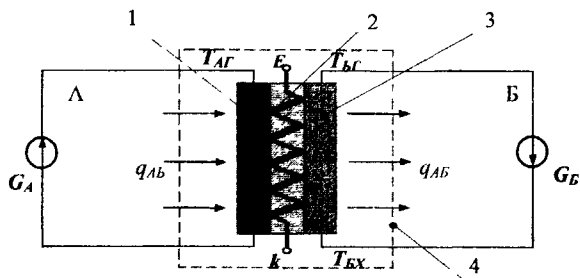


Рисунок 11 – Схема двухкамерного измерительного теплообменника: А – контур теплоснабжения, Б – контур теплопотребления; 1 – «горячая» камера, 2 – тепломер, 3 – «холодная» камера, 4 – теплоизоляция

Рассмотрены вопросы теории таких измерительных теплообменников, в которых тепломеры выполняют двойную функцию: во-первых, обеспечивают тепловую связь между камерами теплообменника, которая определяется коэффициентом теплопередачи  $k$  и характеризуется тепловым потоком с плотностью  $q_{ab}$ , и, во-вторых, формирует электрический сигнал  $E$ , пропорциональный плотности этого теплового потока.

Количество теплоты  $W$ , полученное контуром теплопотребления Б из контура А за интервал времени  $[\tau_1, \tau_2]$  вычисляется интегрирующим устройством по формуле

$$W = K_q F \int_{\tau_1}^{\tau_2} E d\tau, \quad (16)$$

где  $K_q$  и  $F$  - коэффициент преобразования и площадь контактной поверхности тепломера.

На основе анализа процессов теплопередачи в таком измерительном теплообменнике получено соотношение, имеющее важное значение для развития методов и средств измерения параметров теплоносителя

$$\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B} = \frac{T_{AI} - T_{AX}}{T_{BI} - T_{BX}} = \frac{K_A G_A}{K_B G_B}. \quad (17)$$

Здесь  $K_A$  и  $K_B$  - коэффициенты Штука для теплоносителей в контурах А и Б.

Это соотношение позволяет определить, например, значения (а также их температурную зависимость) реального теплоносителя по известным или измеренным параметрам  $K_B$ ,  $G_B$ ,  $\Delta T_B$  «эталонного» теплоносителя в «холодном» контуре Б. В качестве «эталонного» теплоносителя может использоваться дистиллированная вода, свойства которой наиболее изучены. Аналогично можно исследовать температурную зависимость погрешности преобразователей расхода, установленных в контуре А, по известным значениям  $K_A$ ,  $K_B$ ,  $G_B$ ,  $\Delta T_A$ ,  $\Delta T_B$ . Важно, что при этом не требуется выполнения измерений теплового потока, проходящего через теплообменные пластины.

Выведена также основополагающая формула, устанавливающая взаимосвязь между плотностью теплового потока и задаваемыми при расчетах теплообменника параметрами теплообмена и теплоносителя

$$\begin{aligned} q_{Ab} &= \frac{K_A G_A}{F} (T_{AI} - T_{BX}) \left[ \frac{1}{2} + \frac{K_A G_A}{2K_B G_B} + \frac{K_A G_A}{kF} \right]^{-1} = \\ &= \frac{K_B G_B}{F} (T_{AI} - T_{BX}) \left[ \frac{1}{2} + \frac{K_B G_B}{2K_A G_A} + \frac{K_B G_B}{kF} \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (18)$$

где  $k$  - коэффициент теплопередачи тепломера, который определяется по формуле

$$k = \left[ \frac{1}{\alpha_A} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_B} \right]^{-1}, \quad (19)$$

где  $\alpha_A$ ,  $\alpha_B$  - коэффициенты теплоотдачи на поверхностях тепломера, контактирующих, соответственно с контурами А и Б;

$d$ ,  $\lambda$  - толщина и теплопроводность тепломера.

Получена формула для оценочных инженерных расчетов измерительных тепломеров для случая, когда ( $G_A = G_B$ ;  $K_A$ ,  $K_B$  не зависят от температуры и давления

$$q_{Ab} = (T_{AI} - T_{BX}) \left[ \frac{1}{k} + \frac{F}{K_A G_A} \right]^{-1}, \quad (20)$$

из которой следует

$$a) \quad k = 0, q_{Ab} = 0; \quad k \rightarrow \infty, \quad q_{Ab} = \frac{K_A G_A}{F} (T_{AI} - T_{BX}); \quad (21)$$

$$b) \quad G_A = 0, q_{Ab} = 0; \quad G_A \rightarrow \infty, \quad q_{Ab} = k(T_{AI} - T_{BX}).$$

Видно, что при увеличении коэффициента теплопередачи  $k$  (вариант - а) плотность теплового потока  $q_{Ab}$  все больше определяется параметрами теплоносителя, а при увеличении расхода  $G_A$  - параметрами теплообмена (вариант - б).

Получены оптимальные значения характеристик тепломеров с точки зрения высокой чувствительности и малого сопротивления теплопередаче.

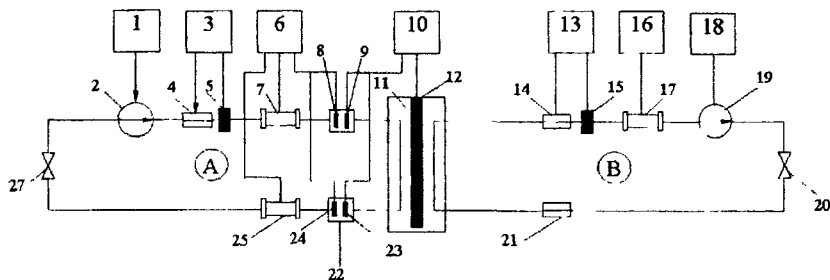


Рисунок 12 - Схема проливной теплометрической установки: А - измерительный контур: 1 - блок управления расходом, 2 - насос, 3 - регулятор температуры, 4 - нагреватель, 5 - датчик температуры, 6 - поверяемый тепловычислитель, 7 - поверяемый преобразователь расхода № 1, 8 - поверяемый термопреобразователь № 1, 9 - эталонный термопреобразователь № 1, 10 - измерительно-вычислительный комплекс, 11 - измерительный теплообменник, 12 - набор эталонных преобразователей теплового потока, 22 - термостат № 2, 23 - эталонный термопреобразователь № 2, 24 - поверяемый термопреобразователь № 2, 25 - поверяемый термопреобразователь № 2, 26 - эталонный расходомер, 27 - вентиль; В - контур охлаждения: 13 - регулятор температуры, 14 - нагреватель, 15 - датчик температуры, 16 - измеритель расхода, 17 - преобразователь расхода, 18 - блок управления расходом, 19 - насос, 20 - вентиль, 21 - радиатор охлаждения

Показано, что использование измерительных теплообменников открывает целый ряд новых возможностей по сравнению с традиционными приборами учета тепла и средствами их метрологического обеспечения.

Во-первых, это создание на их основе испытательных и поверочных проливных установок. Такая установка разработана и изготовлена (рисунок 12), ведутся ее экспериментальные исследования. Главные преимущества установки:

- возможность испытаний теплосчетчиков, установленных в контуре А, при температурах вплоть до 180 °С с целью определения температурной зависимости их погрешности в условиях, соответствующих эксплуатационным;

– возможность использования при испытаниях и поверке в качестве теплоносителей различных жидкостей и исследование влияния их свойств на погрешность используемых теплосчетчиков;

– возможность испытаний и поверки “единых” теплосчетчиков и комплектной поверки любых других приборов учета и исключение за счет этого неопределенностей, связанных с несовершенством правил суммирования погрешностей, которые используются при существующей поэлементной поверке.

Погрешность измерения количества теплоты  $\delta_w$  поверяемыми приборами учета определяется на такой установке сравнением их показаний с значениями, полученными измерительным теплообменником

$$\delta_w = K_s \int_{\tau_1}^{\tau_2} G \Delta T dt - K_q F \int_{\tau_1}^{\tau_2} E dt . \quad (22)$$

Во-вторых, это создание эталонной установки, возглавляющей государственную поверочную схему для средств измерений теплового потока и количества теплоты в системах теплоснабжения (необязательно водяного!). Такой эталон на тепловые потоки до 100 кВт с погрешностью уровня  $0,1 \div 0,2$  % планируется создать на основе исследований упомянутой проливной теплометрической установки для испытаний и поверки теплосчетчиков. Для выполнения этой задачи в настоящее время ведутся работы по повышению точности воспроизведения размера единицы плотности теплового потока в 5 – 10 раз и расширению диапазона воспроизводимых значений до  $5 \div 10$  кВт/м<sup>2</sup>.

В-третьих, это разработка на основе измерительных теплообменников теплометрических приборов учета, используемых в качестве образцовых и рабочих средств измерений, одним из дополнительных преимуществ которых, помимо указанных выше, является отсутствие требований к наличию и длинам прямолинейных участков.

Естественно, что для испытаний и последующих процедур поверки таких средств измерения необходимы только горячеводный эталон и поверочные установки, также основанные на использовании измерительных теплообменников.

Предлагаемый путь создания средств прямого измерения количества теплоты в системах теплоснабжения на основе измерительных теплообменников позволяет повышать точность учета тепла независимо от наличия таких возможностей для средств измерения расхода жидкостей и емкостей, которые в настоящее время, на наш взгляд, в значительной степени ограничены.

**В пятом разделе** приведены результаты работ по созданию государственных поверочных схем для средств измерений поверхностной плотности теплового потока, интегральных коэффициентов теплового излучения материалов, количества теплоты и тепловых потоков в системах

водяного теплоснабжения. Рассмотрены вопросы научно-технического обеспечения жизнеспособности этих поверочных схем с учетом результатов, полученных при выполнении данной диссертационной работы. Показана возможность дальнейшего повышения точности и расширения диапазона воспроизводимых и передаваемых поверочными схемами единиц измерения. На основе этого формулируются задачи по совершенствованию концепции развития метрологического обеспечения измерений параметров теплообмена и теплоносителей.

### **Основные результаты работы:**

– предложена модель объекта теплопотребления, устанавливающая взаимосвязь параметров теплоносителей с параметрами теплообмена, получено основное уравнение теплопотребления, определяющее возможности вариаций параметров теплообмена и теплоносителей при решении задач энергосбережения;

– показана и реализована возможность использования контактных преобразователей температуры поверхности со следящей компенсацией теплоотвода в качестве эталонных (образцовых) средств измерения при массовых градуировках (поверках) плоских термопреобразователей с помощью поверхностных термостатов;

– предложена классификация методов измерения параметров теплообмена, основанная на особенностях формирования и измерения тепловых потоков в системе образец-оболочка; теоретически обоснованы предельные возможности точности измерений тепловых величин в измерительных системах с замкнутыми и открытыми адиабатическими оболочками; установлены критерии стационарности температурных режимов таких измерительных систем в зависимости от требуемых показателей точности измерений;

– разработаны, исследованы и внедрены в метрологическую практику прецизионные измерительные установки высшей точности, основанные на адиабатическом калориметрическом методе и предназначенные для воспроизведения размера единиц поверхностной плотности теплового потока и интегральных коэффициентов теплового излучения материалов в широком диапазоне температур;

– проведен анализ различных способов компарирования тепловых величин, как главного метода передачи размера единицы физических величин от эталонов к рабочим средствам измерений; предложен, теоретически обоснован и экспериментально исследован новый модуляционный метод компарирования;

– разработаны, исследованы и внедрены теплотемпературный компаратор и компаратор излучательных свойств материалов, предназначенные для передачи размера единиц в поверочных схемах для средств измерений

поверхностной плотности теплового потока и интегральных коэффициентов теплового излучения;

– разработаны измерительные установки для исследований температурной зависимости материалов с экстремальными значениями теплопроводности, в том числе, для исследований эффективных теплоизоляторов; полученные на установках данные по теплопроводности материалов внедрены в промышленность;

– предложена концепция метрологического обеспечения приборов и систем учета количеств теплоты и теплоносителя, основанная на использовании прецизионных измерительных теплообменников в качестве средств воспроизведения и передачи размеров единиц количества теплоты и теплового потока;

– впервые предложены, теоретически обоснованы, разработаны и экспериментально исследованы различные варианты теплотрических расходомеров-теплосчетчиков, предназначенных, в частности, для использования в качестве рабочих эталонов в поверочной схеме для средств измерений количества теплоты в системах теплоснабжения;

– предложен новый метод испытаний и поверки теплосчетчиков при реальных эксплуатационных параметрах теплоносителей, основанный на использовании измерительных теплообменников; получены основные формулы для расчета таких теплообменников, устанавливающие взаимосвязь параметров теплоносителя с параметрами теплообмена;

– создана Государственная поверочная схема для средств измерений поверхностной плотности теплового потока в диапазоне  $10 \div 2000 \text{ Вт/м}^2$ ; разработаны проекты Государственных поверочных схем для средств измерений интегральных коэффициентов теплового излучения материалов, а также теплового потока и количества теплоты в системах теплоснабжения.

### **Работы, опубликованные по теме диссертации**

1 Томбасов, Е.А., Курочкина, Л.А., Черепанов, В.Я. Калориметрическая установка для измерения теплоемкости низкокипящих жидкостей // Труды Сибирского НИИ метрологии. Вып.1. — 1969. — С. 134—141.

2 Томбасов, Е.А., Черепанов, В.Я. Термодинамические свойства фреона-12 в диапазоне температур  $-70...75 \text{ }^\circ\text{C}$  // Труды Сибирского НИИ метрологии. Вып. 6. — 1970. — С. 166—170.

3 А.с. 368501. Способ измерения температуры поверхности твердого тела // Пак, В., Черепанов, В.Я.; опубл. 1973, Бюл. № 9. — 3 с.

4 Черепанов, В.Я. Исследование адиабатического калориметра для измерения теплоемкости металлов в нестационарном режиме // В сб. "Вопросы стандартизации метрологии и техники точных измерений". — М.: Изд-во стандартов, 1973. — С. 105—109.

5 Черепанов, В.Я. Методика определения тепловых потерь образца в адиабатическом калориметре с непрерывным вводом тепла // Труды метрологических ин-тов СССР. Вып. 148 (208). — 1973. — С. 62—69.

6 Черепанов, В.Я., Краснов, В.А. Об одном способе компенсации теплоотвода по термопаре при измерении температуры проволочных образцов // Труды метрологических ин-тов СССР. Вып. 148 (208). — 1973. — С. 56—61.

7 А.с. 543861. Способ измерения теплоемкости // Крафтмахер, Я.А., Черепанов, В.Я.; опубл. 1977, Бюл. №3 — 2 с.

8 Гомбасов, Е.А., Глазырин, П.С., Полукеев, Г.П., Челмодеев, В.Е., Черепанов, В.Я. Метод измерения теплопроводности плохих проводников тепла в нестационарном режиме // Инженерно-физический журнал. — 1978. — № 5. — С. 875—878.

9 Крафтмахер, Я.А., Черепанов, В.Я. Компенсация тепловых потерь при измерении теплоемкости модуляционным методом // Теплофизика высоких температур. — 1978. — т. 16. — № 3. — С. 647—649.

10 Черепанов, В.Я. Применение стандартного образца СОТС-2 для аттестации нового варианта модуляционного метода // Измерительная техника. — 1978. — № 9. — С. 58—60.

11 А.с. 631788. Способ определения интегральной излучательной способности материалов // Черепанов, В.Я.; опубл. 1978, Бюл. № 41 — 2 с.

12 Черепанов, В.Я. Экспериментальная оценка методической погрешности измерения температуры проволочных образцов // Метрология и точные измерения. Реферативн. инф. — 1978. — № 11. — С. 18—21.

13 Черепанов, В.Я. Модуляционный метод измерения интегральной излучательной способности // Теплофизика высоких температур. — 1979. — т. 17. — № 1. — С. 395—399.

14 Черепанов, В.Я. Измерения интегральной излучательной способности материалов и возможности их метрологического обеспечения // В сб. "Метрологическое обеспечение измерений высоких температур и параметров плазмы". Тезисы докладов Всесоюзного семинара. Харьков, 1979. — С. 45—46.

15 Черепанов, В.Я. Исследование интегральной излучательной способности никеля вблизи точки Кюри // Инженерно-физический журнал. — 1979. — т. 37. — № 6. — С. 1131—1132.

16 Гомбасов, Е.А., Черепанов, В.Я. Установка для измерения температуропроводности теплоизоляционных материалов // Заводская лаборатория. — 1980. — № 5. — С. 422—423.

17 Черепанов, В.Я. Модуляционный метод относительных измерений интегральной излучательной способности материалов // Промышленная теплотехника. — 1981. — т. 3. — № 1. — С. 53—58.

18 Черепанов, В.Я. Относительные измерения интегральной излучательной способности материалов модуляционным методом // Измерительная техника. — 1981. — № 5. — С. 36—38.

19 Черепанов, В.Я. Одновременное измерение интегральной излучательной способности и температурной зависимости электросопротивления модуляционным методом // Измерительная техника. — 1981. — № 9. — С. 43—46.

20 Томбасов, Е.А., Иванов, Н.П., Калинин, А.Н., Черепанов, В.Я. Исследование кондуктивных методов градуировки и поверки преобразователей теплового потока // III Всесоюзное совещание по низкотемпературным измерениям и их метрологическому обеспечению. Тезисы докладов. — М. — 1982. — С. 66—68.

21 Черепанов, В.Я. Измерение интегральной излучательной способности модуляционным методом при низких температурах // III Всесоюзное совещание по низкотемпературным измерениям и их метрологическому обеспечению. Тезисы докладов. — М. — 1982. — С. 68—70.

22 Калинин, А.Н., Соколова, Л.С., Дучков, А.Д., Черепанов, В.Я. Исследования теплового компаратора применительно к измерениям теплопроводности горных пород // Геология и геофизика. — 1983. — № 3. — С. 116—122.

23 А. с. 1093915. Устройство для градуировки датчиков теплового потока // Калинин, А.Н., Томбасов, Е.А., Воробьев, Ю.Г., Иванов, Н.П., Черепанов, В.Я.; опубли. 1984, Бюл. № 19. — 2 с.

24 Черепанов, В.Я. Методы измерения теплоемкости и интегральной излучательной способности металлов и сплавов, основанные на модуляции температуры теплового экрана // Диссертация на соискание ученой степени кандидата техн. наук. — Новосибирск. — 1983. — 165 с.

25 Черепанов, В.Я. Методы измерения теплоемкости и интегральной излучательной способности металлов и сплавов, основанные на модуляции температуры теплового экрана // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата техн. наук. — Ленинград. — 1983. — 17 с.

26 Геращенко, О.А., Грищенко, Т.Г., Калинин, А.Н., Томбасов, Е.А., Черепанов, В.Я. Особенности кондуктивной градуировки преобразователей теплового потока в вакуумном адиабатическом калориметре // Промышленная теплотехника. — 1984. — т. 6. — № 5. — С. 60—64.

27 Калинин, А.Н., Кринский, Ю.П., Нартикоев, В.Д., Семашко, С.В., Черепанов, В.Я. Компаратор теплопроводности КТ-3 // Приборы и техника эксперимента. — 1984. — № 1. — С. 200—202.

28 Ступин, В.П., Калинин, А.Н., Хрипунов, А.Д., Черепанов, В.Я. Измерение температуры некоторых авиационных сплавов с учетом их излучательной способности пирометрами АПИР-С // Авиационная промышленность. — 1985. — № 1. — С. 52—54

29 Томбасов, Е.А., Лозинская, О.М., Черепанов, В.Я. О метрологическом обеспечении контактной теплометрии // IV Всесоюзная конференция "Метрологическое обеспечение теплофизических измерений при низких температурах". Тезисы докладов. Хабаровск, 1985. — С. 27.

30 Черепанов, В.Я. Использование методов моделирования при измерениях температуры в теплофизическом эксперименте // IV Всесоюзная конференция "Метрологическое обеспечение теплофизических измерений при низких температурах". Тезисы докладов. Хабаровск, 1985. — 166 с.

31 А. с. 1236329. Цифровой термометр // Кринский, Ю.П., Обухов, В.Н., Черепанов, В.Я.; опубл. 1984, Бюл. № 21. — 2 с.

32 Шемелина, О.С., Новотоцкий-Власов, Ю.Р., Черепанов, В.Я. Пленочный алюминиевый термометр сопротивления // Приборы и техника эксперимента. — 1986. — № 4. — С. 200—202.

33 Мисяченко, И.И., Черепанов, В.Я. Создание средств метрологической аттестации в области измерений интегральных коэффициентов теплового излучения материалов // III Всесоюзная конференция "Метрологическое обеспечение температурных и теплофизических измерений в области высоких температур". Тезисы докладов. Харьков, 1986. — С. 346—348.

34 Калинин, А.Н., Томбасов, Е.А., Черепанов, В.Я. Разработка и исследование средств метрологической аттестации преобразователей теплового потока // Измерительная техника. — 1986. — № 7. — С. 58—61.

35 Томбасов, Е.А., Лозинская, О.М., Черепанов, В.Я. Образцовая установка для градуировки и поверки преобразователей теплового потока // Метрология. — 1987. — № 1. — С. 34—38.

36 Томбасов, Е.А., Лозинская, О.М., Черепанов, В.Я. Исследование метрологических характеристик контактных термоэлектрических преобразователей теплового потока // Научно-техническая конференция "Современное состояние теплофизического приборостроения". Тезисы докладов. Севастополь, 1987. — С. 54.

37 Мисяченко, И.И., Черепанов, В.Я. Использование метода двух преобразователей при измерении температуры в образцовом dilatометре // IV Всесоюзная конференция "Методы и приборы для точных dilatометрических исследований в широком диапазоне температур". Тезисы докладов. Ленинград, 1988. — С. 47—48.

38 Черепанов, В.Я. Разработка и изготовление компаратора и образцовых мер для метрологической аттестации измерительных установок для исследования интегральных коэффициентов теплового излучения // Отчет по НИР № 0186.0024496. — Новосибирск: СНИИМ, 1987. — 35 с.

39 Кринский, Ю.П., Мисяченко, И.И., Томбасов, Е.А., Ямшанов, В.А., Черепанов, В.Я. Установка для аттестации плоских преобразователей температуры поверхности // VI Всесоюзная конференция "Электротермометрия-88". Тезисы докладов. Луцк, 1988. — С. 227—228.

40 Мисяченко, И.И., Черепанов, В.Я. Компаратор для исследования температурной зависимости интегральных коэффициентов теплового излучения материалов // VIII Всесоюзная конференция по теплофизическим свойствам веществ. Тезисы докладов. Новосибирск, 1988. — С. 163—164.

41 Калинин, А.Н., Шебанов, С.М., Черепанов, В.Я. К вопросу о механизме теплопроводности углепластиков с хаотичным армированием

// VIII Всесоюзная конференция по теплофизическим свойствам веществ. Тезисы докладов. Новосибирск, 1988. — С. 194—195.

42 Борода, Е.А., Шебанов, С.М., Черепанов, В.Я. О зависимости теплоемкости и термодинамических функций углепластиков от условий термообработки // VIII Всесоюзная конференция по теплофизическим свойствам веществ. Тезисы докладов. Новосибирск, 1988. — С.194-195.

43 Томбасов, Е.А., Лозинская, О.М., Черепанов, В.Я. Государственная поверочная схема для средств измерений поверхностной плотности теплового потока в диапазоне 10... 2000 Вт/м<sup>2</sup> // V Всесоюзная конференция " Метрологическое обеспечение теплофизических измерений при низких температурах". Тезисы докладов. Хабаровск, 1988. — С. 346.

44 МИ 1855-88. Государственная поверочная схема для средств измерений поверхностной плотности теплового потока в диапазоне 10 ÷ 2000 Вт/м<sup>2</sup>. Месячные указания // Томбасов, Е.А., Лозинская, О.М., Черепанов, В.Я. — Введ. 1989—01—01. — М.: Изд-во стандартов, 1988. — 5 с.

45 Мисяченко, И.И., Черепанов, В.Я. Измерительная установка для исследования и аттестации стандартных образцов излучательных свойств // Научно-технический сборник "Вопросы авиационной науки и техники". Авиационные материалы. Оптико-физические свойства материалов. 1989.— С. 44—49.

46 Мисяченко, И.И., Крицкий, Ю.П., Черепанов, В.Я. Нулевой метод и компаратор для исследований температурной зависимости интегральных коэффициентов теплового излучения материалов // Метрология. — 1990. — №5. — С. 40—47.

47 Таньков, А.Ю., Чепурная, З.П., Черепанов, В.Я. Автоматизированный компьютерный комплекс для градуировки специальных термопреобразователей, используемых в микроэлектронной технике // Труды международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (АПЭП-92). Новосибирск, 1992. — т. 5. — С. 24—25.

48 Cherepanov, V.Ya. Thermal physics Measurement metrological Provision in Siberian Region // European scientific metrological Conference "150<sup>th</sup> Anniversary of the Russian Metrological Service". St. Petersburg. — 1992. — P. 122—123.

49 Ступин, В.П., Колесников, В.И., Черепанов, В.Я. Сравнительный метод и установка для измерений теплопроводности теплоизоляционных материалов // Измерительная техника. — 1994. — №4. — С.35 —37.

50 Cherepanov, V.Ya. Metrological problems of heat exchange parameters measurements on the solid surface // IMECO-TC12 Workshop on "Surface thermal measurements". Budapest. — 1995. — P. 111—118.

51 Черепанов, В.Я. Исследование воспроизводимости точек Кюри чистых металлов // ГИТП «Фундаментальная метрология». (Сборник отчетов за 1995 г.). Новосибирск, 1995. — С. 261—263.

52 Бикмухаметов, К.А., Черепанов, В.Я. Возможность создания средств высшей точности для измерения физических величин на основе волоконно-оптических преобразователей // Труды третьей международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (АПЭП-96). Новосибирск, 1996. — т. 5. — С. 117.

53 Мамонов, А.А., Рыбак, П.И., Черепанов, В.Я., Чепурная, З.П. Определение точек Кюри чистых ферромагнетиков // Труды третьей международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (АПЭП-96). Новосибирск, 1996. — т. 5. — С. 118—119.

54 Мамонов, А.А., Таньков, А.Ю., Черепанов, В.Я. Определение малых потерь в ферромагнетиках теплотрическим методом // Труды третьей международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (АПЭП-96). Новосибирск, 1996. — т. 5. — С. 120—121.

55 Черепанов, В.Я. Исследование воспроизводимости точек Кюри чистых металлов // ГИТП "Фундаментальная метрология". (Сборник отчетов за 1996 г.). Новосибирск, 1996. — С. 201—202.

56 Рекомендация МИ 2452-97. ГСИ. Малогабаритный проливной стенд поверочный (МПСП). Методика поверки теплосчетчиков и водосчетчиков методом непосредственного сличения // Рогачевский, Б.М., Калинин, А.Н., Береснев, В.К., Черепанов, В.Я. Казань, 1997. — 17 с.

57 Рекомендация МИ 2479-98. ГСИ. Теплосчетчики в составе автоматизированных систем. Типовая программа испытаний для целей утверждения типа // Рогачевский, Б.М., Черепанов, В.Я. Новосибирск, 1998. — 24 с.

58 Баталов, С.С., Черепанов, В.Я. Разработка и исследование теплотрических приборов учета тепла // Труды IV Международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (АПЭП-98). Новосибирск, 1998. — т. 9. — С. 3—4.

59 Таньков, А.Ю., Чепурная, З.П., Черепанов, В.Я. Создание средств метрологического обеспечения термометрии в приборах учета тепла // Труды IV Международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (АПЭП-98). Новосибирск, 1998. — т. 9. — С. 7—8.

60 Мамонов, А.А., Рыбак, П.И., Сергеев, В.Г., Черепанов, В.Я. Результаты исследований точки Кюри гадолиния // Труды IV Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения" (АПЭП-98). Новосибирск, 1998. — т. 9. — С. 5—6.

61 Пат. 2152599 Российская Федерация. Теплосчетчик-расходомер // Баталов, С.С., Черепанов, В.Я.; опубл. 1998, Бюл. № 36. — 2 с.

62 Пат. 2124188 Российская Федерация. Теплосчетчик-расходомер // Баталов, С.С., Черепанов, В.Я.; опубл. 1998, Бюл. № 36. — 2 с.

63 Рогачевский Б.М., Черепанов В.Я. О программе испытаний теплосчетчиков и водосчетчиков с целью утверждения типа // Законодательная и прикладная метрология, 1999. — № 1. — С. 39.

64 Калинин А.Н., Черепанов В.Я. Состояние метрологического обеспечения измерений в области теплосбережения // Труды второй Сибирской Региональной научно-практической конференции «Сибметрология-99». Новосибирск, 1999. — № 1. — С. 24—25.

65 Рогачевский, Б.М., Черепанов, В.Я. Актуальные вопросы испытаний и поверки тепло и водосчетчиков // Труды второй Сибирской Региональной научно-практической конференции «Сибметрология-99». Новосибирск, 1999. — № 1. — С. 39.

66 Пат. 2152008 Российская Федерация. Устройство для поверки теплосчетчиков // Баталов, С.С., Черепанов, В.Я.; опубл. 2000, Бюл. № 18. — 2 с.

67 Джаббаров, Р.Р., Хакимов, О.Ш., Черепанов, В.Я. Установка для измерения теплового сопротивления теплоизоляционных материалов // Труды пятой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП 2000). Новосибирск, 2000. — С. 220.

68 Черепанов, В.Я. Вопросы метрологического обеспечения измерений температуры в системах учета количества теплоты // Первая Всероссийская конференция по проблемам гермометрии «Температура 2001». Тезисы докладов. Подольск, 2001. — С. 12.

69 Калинин, А.Н., Черепанов, В.Я. Метрологическое обеспечение Сибири в сфере теплосбережения // III Научно-техническая конференция «Метрологическое обеспечение учета энергетических ресурсов». Сборник докладов. — М. — 2001. — ч.1. — С. 127—135.

70 Никоненко, В.А., Черепанов, В.Я. Разработка и освоение производства средств приборного и метрологического обеспечения измерений в теплосбережении // III Научно-техническая конференция «Метрологическое обеспечение учета энергетических ресурсов». Сборник докладов. — М. — 2001. — ч.1. — С. 145—149.

71 Джаббаров, Р.Р., Хакимов, О.Ш., Черепанов, В.Я. Калориметр для определения суммарного теплового сопротивления текстильных материалов // Измерительная техника. — 2001. — № 5. — С. 43—45.

72 Лахов, В.М., Черепанов, В.Я. О концепции метрологического обеспечения приборов и систем учета тепла // Материалы Международной конференции «Теплосиб-2002». Новосибирск, 2002. — С. 265—269.

73 Черепанов, В.Я. Вопросы метрологического обеспечения измерений температуры в системах учета количества теплоты // Приборы. — 2002. — № 6. — С. 63—66.

74 Черепанов, В.Я. Установка для изучения температурной зависимости погрешностей теплосчетчиков // Материалы шестой Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2000). Новосибирск, 2002. — С. 123—124.

75 Черепанов, В.Я. Измерение температур теплоносителя и поверхности твердых тел // Мир измерений. — 2002. — № 11/12. — С. 21—26.

76 Черепанов, В.Я. Разработка и исследование метода и технических средств применительно к созданию государственных эталонов единиц поверхностной плотности теплового потока и тепловой мощности (энергии) // Отчет по НИР № 02200303469. — Новосибирск: СНИИМ, 2002. — 35 с.

77 Пат. 2182319 Российская Федерация. Теплосчетчик-расходомер // Баталов, С.С., Черепанов, В.Я.; опубл. 2002, Бюл. № 13. — 2 с.

78 Черепанов, В.Я. Теллометрические методы измерения параметров теплоносителя // Материалы 2-й Международной научно-практической конференции «Теплосиб-2003». Новосибирск, 2003. — С. 35—40.

79 Гришин, А.А., Черепанов, В.Я. Развитие метрологического обеспечения теплометрии // Промышленная теплотехника. — 2003. — т.25. — № 4. — С. 461—462.

80 Черепанов, В.Я. Теллометрические теплосчетчики // Промышленная теплотехника. — 2003. — т.25. — № 4. — С. 487—489.

81 Шевелев, Ю.В., Черепанов, В.Я. Реализация реперных точек температурной шкалы в малогабаритных ампулах // Измерит. техника. — 2004. — № 2. — С. 39—42.

82 Черепанов, В.Я. Метрологическое обеспечение измерений основных параметров теплообмена и теплоносителя // Материалы 3-й международной научно-практической конференции «Теплосиб - 2004». Новосибирск, 2004. — С. 67—76.

83 Джаббаров, Р.Р., Каюмов, М.А., Хакимов, О.Ш., Черепанов, В.Я. Двухэтапный метод измерения скорости охлаждения тепловой ячейки калориметра // Измерит. техника. — 2004. — № 4. — С. 51—53.

84 Черепанов, В.Я. Методы и средства определения метрологических характеристик контактных преобразователей теплового потока // Измерительная техника. — 2004. — № 8. — С. 17—21.

85 Бадашов, Е.Я., Чуркин, М.В., Шейнин, Э.М., Черепанов, В.Я. Эталонная расходомерная установка СНИИМ // Материалы VII Международной конференции «АПЭП-2004». Новосибирск, 2004. — т.3. — С. 96—98.

86 Бадашов, Е.Я., Дегтярев, С.В., Чуркин, М.В., Шейнин, Э.М., Черепанов, В.Я. Определение параметров теплообмена на поверхности отопительных приборов // Материалы VII Международной конференции «АПЭП-2004». Новосибирск, 2004. — т.3. — С. 102—108.

87 Шевелев, Ю.В., Черепанов, В.Я. Реализация реперных точек индия и галлия в малогабаритных ампулах // Приборы. — 2004. — № 9. — С. 52—56.

88 Черепанов, В.Я. Измерительные теплообменники. Вопросы теории и применения // Материалы 4-й Международной научно-практической конференции «Теплосиб-2005». — Новосибирск: Агентство «Сибпринт», 2005. — С. 72—81.

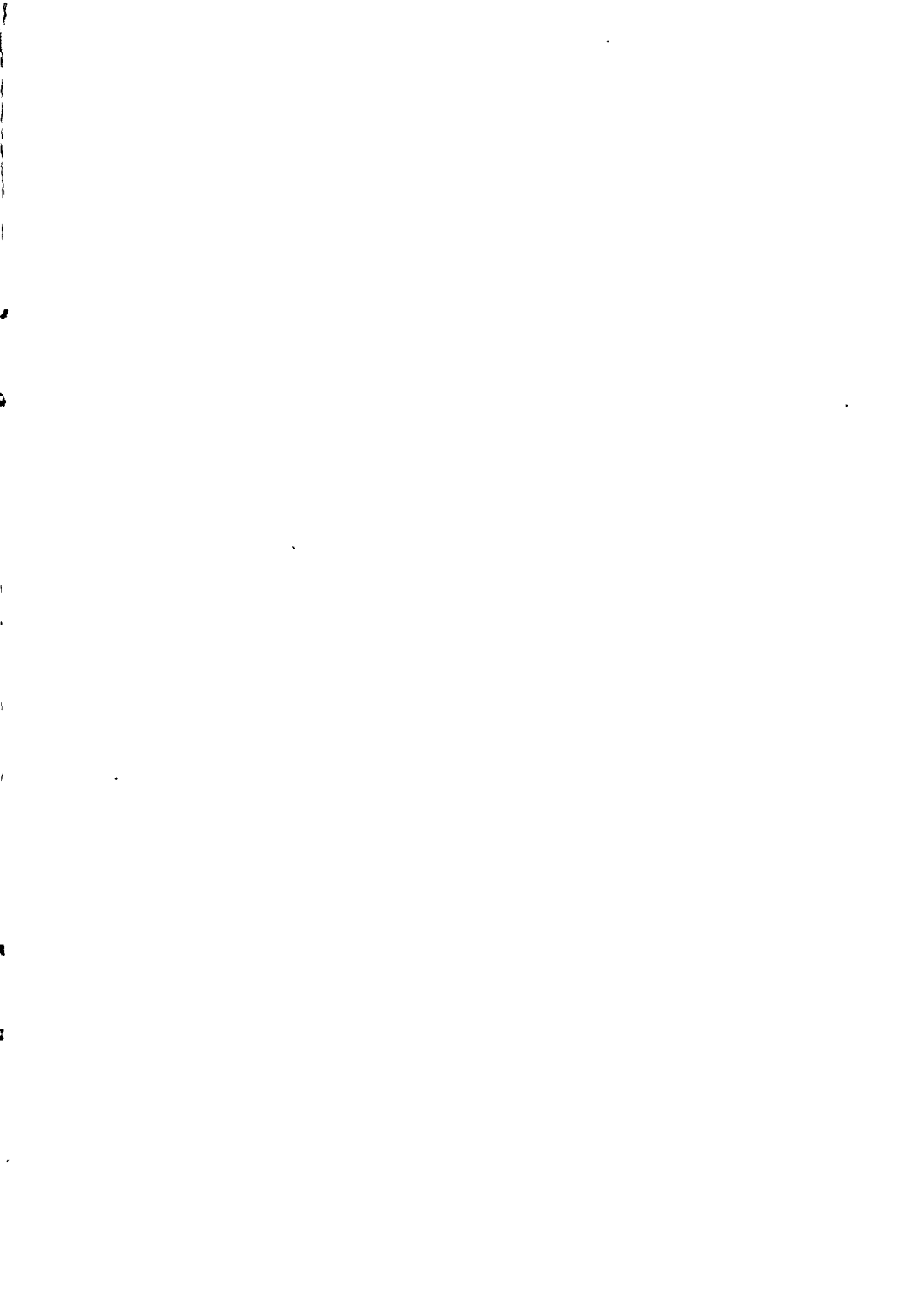
89 Пат.2247330 Российская Федерация. Преобразователь расхода // Баталов, С.С., Черепанов; опубл. 2005, Бюл. № 6. — 2 с.

90 Черепанов, В.Я. Разработка методов и средств метрологического обеспечения измерений коэффициентов теплового излучения материалов // Сборник материалов научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2005». Специализированное приборостроение, метрология. — Новосибирск: СГТА, 2005. — т.6. — С. 176—181.

91 Черепанов, В.Я. Измерение параметров теплообмена и состояние их метрологического обеспечения // Энергосбережение и энергетика в Омской области. — 2005. — № 2 (15). — С. 74—83.

92 Черепанов, В.Я. Точные измерения температуры поверхности твердых тел контактными термометрами // Приборы. — 2005. — № 7. — С. 45—53.

93 Черепанов, В.Я. Измерения параметров теплообмена // Мир измерений. — 2005. — № 9. — С. 4 — 15.



№ 19257

РНБ Русский фонд

2006-4

16909