

УДК 536.5:536.6:621.36:006.05

## АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОВЕРОЧНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ ТЕПЛОПОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© Ковтун Светлана, Грищенко Татьяна, Декуша Леонид, Воробьев Леонид, 2007

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2, а, Киев, Украина

[teplomer@ukr.net](mailto:teplomer@ukr.net)

*Розглянуто актуальні питання метрологічного забезпечення теплопоточних вимірювань, а саме створення апаратури для перевірювальної схеми відтворення та передавання розміру одиниці густини теплового потоку.*

*Рассмотрены актуальные вопросы метрологического обеспечения теплопоточных измерений, а именно создание аппаратуры для поверочной схемы воспроизведения и передачи размера единицы плотности теплового потока.*

*Pressing questions of heat flow taking measurement assurance, namely creation of equipment for the testing scheme reproduction and transfers of the unit size of a heat flow density are considered.*

Для решения многих задач, связанных с экономным расходованием энергоресурсов и, в частности, с теплосбережением, существенно увеличился спрос на средства измерения тепловых величин, среди которых всё более важную роль играют средства измерения теплового потока. Сегодня метрологическое обеспечение этой области измерений регламентировано методикой, разработанной в СНИИМ Госстандарта СССР (г. Новосибирск) еще в 1988 году, в которой приведена поверочная схема для средств измерения поверхностной плотности теплового потока в диапазоне  $10 \div 2000 \text{ Вт/м}^2$  [1]. В порядке реализации этой схемы были разработаны методы и комплекс средств метрологической аттестации контактных преобразователей теплового потока. Во главе поверочной схемы находится установка высшей точности УВТ-53-А-88 [2, 3], включающая в себя установку для создания и измерения аксиального теплового потока с заданной поверхностной плотностью и пропускания этого потока через аттестуемый контактный ПТП, а также набор термоэлектрических контактных ПТП для хранения воспроизводимой единицы и проверки стабильности установки.

УВТ применяют для воспроизведения с наивысшей на момент ее создания точностью единицы поверхностной плотности теплового потока и передачи ее аттестуемым преобразователям рабочим эталоном, в качестве которого применяют термоэлектрические биметаллические гальванические и полупроводниковые контактные ПТП с пределами допускаемых относительных погрешностей от 1,5 до 3% [1].

Для передачи размера единицы поверхностной плотности теплового потока от исходного эталона рабочим средствам измерения этой величины непосредственно в Украине в Институте технической теплофизики НАН Украины были разработаны и аттестованы тем же СНИИМ Госстандарта СССР образцовые установки кондуктивного типа КГУ-1-25, КГУ-3-20, КГУ-2-25 [4, 5]. Но после распада Союза основная часть наработок по метрологическому обеспечению, в том числе и исходная образцовая аппаратура, в области измерений плотности теплового потока стали наследием России, у нас же остались лишь градуировочные установки типа КГУ. К сожалению, эти установки за прошедший более чем пятнадцатилетний промежуток времени выработали свой технический ресурс, устарела элементная база их электронных блоков, вследствие чего установки утратили, по существу, эталонный характер.

Несмотря на то, что упомянутая выше поверочная схема по межгосударственному соглашению стран-участниц СНГ в области метрологии, стандартизации и сертификации остаётся действующей на территории Украины, работы последних лет по методологии измерения плотности теплового потока и повышение требований к точности средств метрологического обеспечения теплопоточных измерений потребовали снижения погрешности образцовой аппаратуры, и как следствие, разработки новой материальной базы, отвечающей современному уровню науки и технологии.

В ИТТФ НАН Украины в этом направлении были осуществлены фундаментальные аналитические исследования [4, 5, 6], на основании которых предложены

составляющие аппаратуры для поверочной схемы воспроизведения и передачи размера единицы поверх-

ностной плотности теплового потока, представленной на рис. 1.

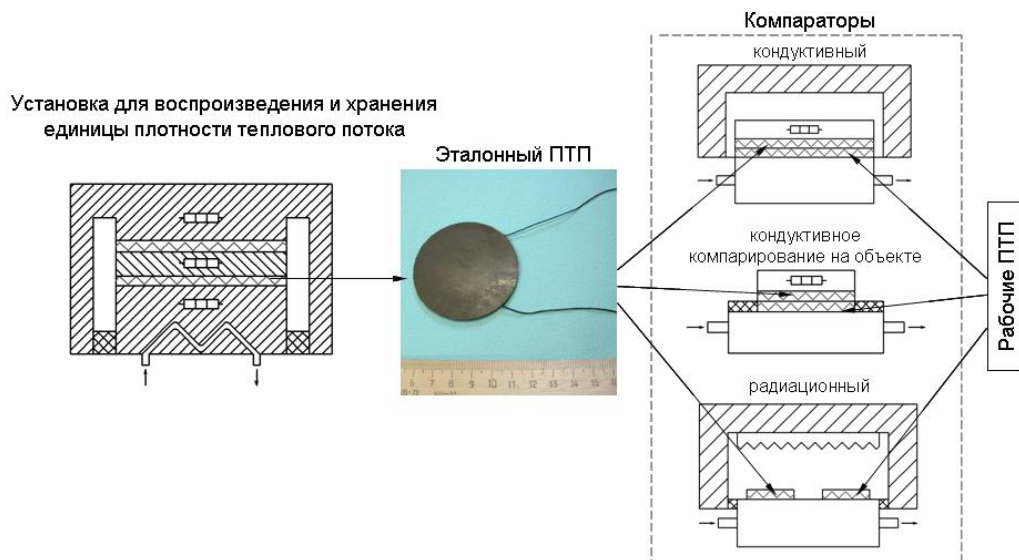


Рис. 1. Составляющие приборного обеспечения поверочной схемы для воспроизведения и передачи размера единицы поверхностной плотности теплового потока

В качестве возможного исходного звена поверочной схемы для воспроизведения, хранения и передачи размера единицы поверхностной плотности теплового потока создана установка кондуктивного типа для воспроизведения и хранения единицы поверхностной плотности теплового потока в пределах от  $10 \text{ Вт/м}^2$  до  $20 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$  в диапазоне значений температуры от  $300 \text{ К}$  до  $500 \text{ К}$ , а в качестве средства передачи этой единицы разработан комплект эталонных преобразователей теплового потока (ППП) вида вспомогательной стенки на базе термоэлектродной пары копель-никель. В установке реализован абсолютный метод определения коэффициента преобразования эталонного ПТП в условиях стационарного теплового режима при кондуктивном способе подведения нормированной плотности теплового потока. Передача же воспроизводимой единицы осуществляется посредством компарирования эталонного ПТП с рабочим и может быть реализована как в кондуктивном, так и в радиационном компараторах.

Для достижения высшей точности воспроизведения единицы поверхностной плотности теплового потока в метрологической установке при задании нормированного теплового потока необходимо соблюдать требование об одномерности теплового потока, проходящего через аттестуемый ПТП.

Практически же в известных градуировочных установках реальные погрешности измерения теплового потока или его поверхностной плотности достаточно высоки, если сравнивать с точностными возможностями электрических измерений. Причина этого кроется в наличии многих факторов, влияющих на поле тепловых потоков и приводящих к неидентичности заданного нормированного теплового потока и измеренного преобразователем.

Факторами, влияющими на точность воспроизведения и передачи единицы теплового потока при кондуктивной теплопередаче, являются контактные термические сопротивления между торцовыми поверхностями ПТП и соприкасающимися с ними поверхностями источника и стока теплоты, условия теплообмена на боковой поверхности ПТП, собственное термическое сопротивление ПТП и соотношение между эффективным поперечным размером ПТП и его высотой.

На одномерность поля тепловых потоков внутри ПТП оказывает влияние совокупность вышеперечисленных факторов, аналитическое исследование степени влияния которых выполнено путем решения уравнения теплопроводности при граничных условиях, соответствующих рассматриваемой задаче, что позволило аргументировано принять практические

меры по предотвращению возможных искажений теплового поля [7, 8]. Из аналитического решения путем вычислительных экспериментов получены значения отношений плотностей среднеинтегрального по поверхностям ПТП на входе и выходе из него и нормированного тепловых потоков  $q_{CP}^{BX} / q_0$  и  $q_{CP}^{ВЫХ} / q_0$ , где  $q_{CP}^{BX}$  и  $q_{CP}^{ВЫХ}$  – плотности теплового потока, среднеинтегрального по поверхностям на входе и на выходе ПТП,  $q_0$  – плотность нормированного теплового потока.

Результаты счета систематизированы и графически представлены в табл.1 семействами графиков зависимостей этих отношений от текущего относительного радиуса  $r / h_{ПТП}$  при вариациях геометрического параметра ПТП  $k = D_{ПТП} / h_{ПТП}$  (10, 20, 30, 40) и отношений термических сопротивлений: контактного к собственному термосопротивлению ПТП  $R_K / R_{ПТП}$  ( $10^{-9}$ ;  $10^{-3}$ ;  $10^{-2}$ ;  $10^{-1}$ ; 0,5; 1) и контактного к термосопротивлению по боковой поверхности ПТП  $R_K / R_{БОК}$  ( $10^{-3}$ ;  $5 \cdot 10^{-3}$ ;  $10^{-1}$ ;  $5 \cdot 10^{-1}$ ). Кроме того, в табл. 1 пунктиром нанесены поправки, которые учитывают влияние на мощность задающего нагревателя указанных термических сопротивлений при вариации геометрического параметра ПТП.

Анализируя полученные графики, можно констатировать, что во время аттестации необходимо обеспечить отношение термических сопротивлений  $R_K / R_{ПТП}$  в диапазоне значений от 0,1 до 0,5. Учитывая, что в реальных установках отношение  $R_{ПТП} / R_{БОК}$  лежит в пределах от 0,01 до 0,05 при геометрическом параметре  $k \geq 30$ , видно, что значения поправки  $K^q$  лежат в пределах  $\pm 0,2\%$ .

Как показывают эти исследования, совершенно нет необходимости обеспечивать минимальное контактное сопротивление, так как имеется оптимум в соотношениях между контактным термосопротивлением и собственным термосопротивлением ПТП, которое открывает возможность при наличии информации о термосопротивлении  $R_{ПТП}$  и контроле суммарного термического сопротивления во время измерений добиваться оптимальных условий аттестации ПТП.

Совокупность полученных результатов позволяет подобрать при проектировании эталонных ПТП такой комплекс геометрических размеров ПТП и тепловых режимов, что в зоне его чувствительного элемента

тепловой поток является одномерным. С увеличением коэффициента теплопроводности ПТП и геометрического параметра ПТП  $k$  зона одномерности теплового потока по поверхности ПТП существенно расширяется. Поправка  $K^q$  в зависимости от термического сопротивления теплообмену в газовой прослойке между боковой поверхностью ПТП и защитным экраном может достигать 0,5%. Минимизировать ее можно увеличением геометрического параметра ПТП  $k$  и поддержанием соотношения между контактным термосопротивлением и собственным термическим сопротивлением ПТП на уровне 0,5, при котором эта поправка не превышает 0,1%. Уровень искажений теплового поля от относительной высоты ПТП практически не зависит, а зависит от теплообмена на боковой поверхности.

Полученные теоретические результаты использованы при разработке метрологической установки, конструктивная схема теплового блока которой представлена на рис. 2.

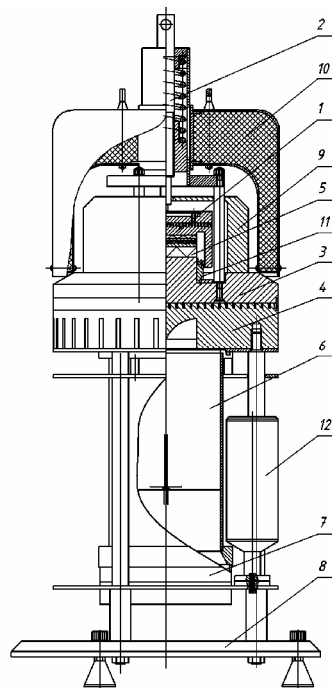
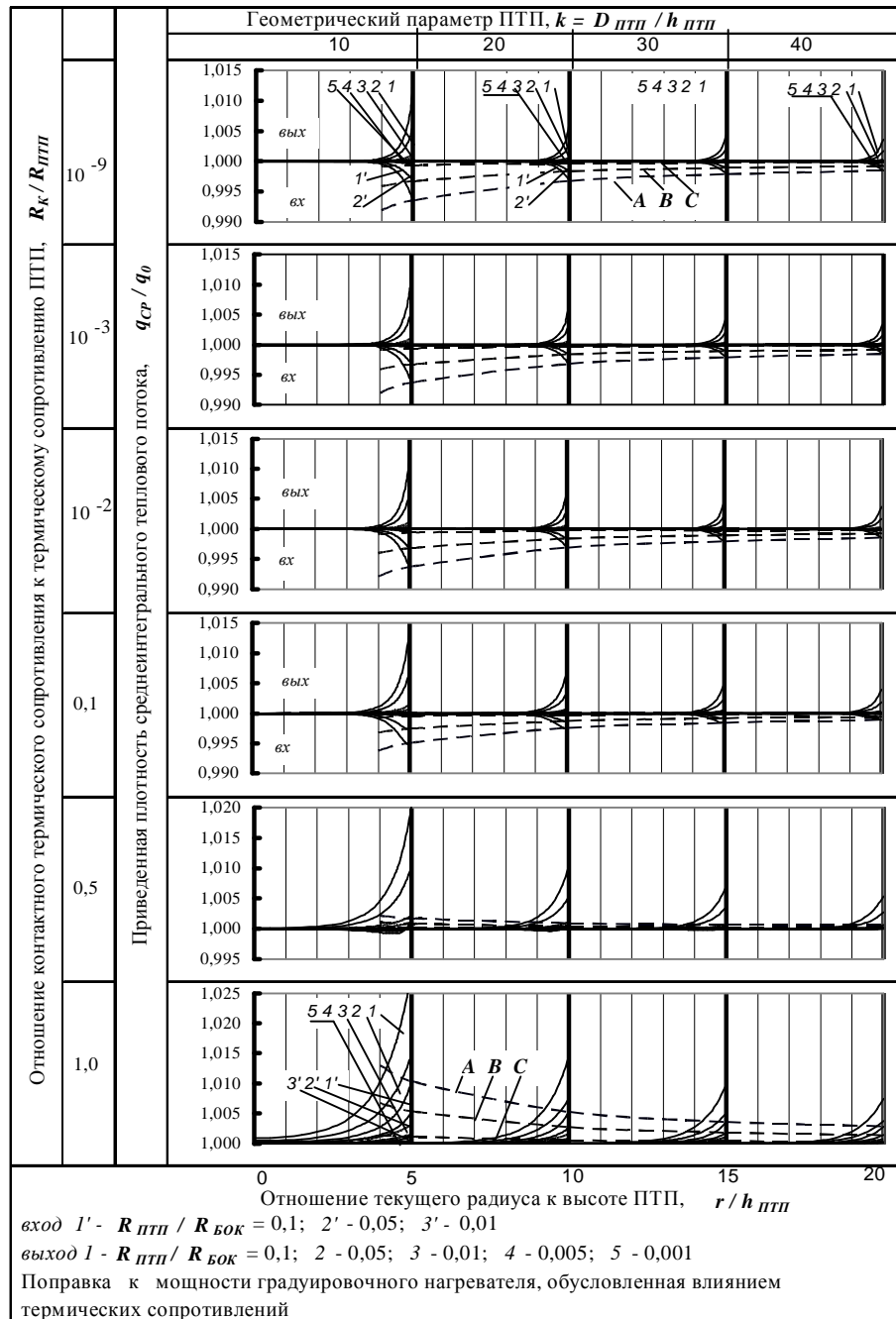


Рис. 2. Конструктивная схема теплового блока метрологической установки: 1 – градуировочная головка; 2 – прижимное устройство; 3 – теплосток; 4 – радиатор; 5 – аттестуемый ПТП; 6 – воздуховод; 7 – вентилятор; 8 – станина; 9 – температуровыравнивающий экран; 10 – теплоизоляционный колпак; 11 – центрирующая тулка; 12 – блок термостатирования опорных спаев термомпар

Таблица 1

Зависимости отношений плотностей среднеинтегрального по поверхностям ПТП на входе и выходе из него и нормированного тепловых потоков  $q_{CP}^{BX} / q_0$  и  $q_{CP}^{ВЫХ} / q_0$  от текущего относительного радиуса  $r / h_{ПТП}$  при вариациях геометрического параметра ПТП  $k = D_{ПТП} / h_{ПТП}$



Градуировочная головка содержит задающий электрический нагреватель, вспомогательный ПТП, совмещенный с теплозащитным экраном, верхний охранный нагреватель и теплосток. Аттестуемый ПТП располагают в зазоре между задающим нагревателем и теплостком.

Одномерность теплового потока на входе в аттестуемый ПТП достигается применением в качестве источника теплоты изотермического нагревателя, строго обеспечивающего на теплопринимающей поверхности ПТП равномерную постоянную температуру, то есть граничное условие первого рода ( $T_H = \text{const}$ ). Аттестуемый ПТП должен обладать равномерным коэффициентом теплопроводности. На выходе из ПТП одномерность теплового потока достигается выполнением теплостока из высокотеплопроводного металла.

Для обеспечения работы абсолютным методом в установке предусмотрен вспомогательный ПТП, сигнал которого на нулевом значении получают за счет работы охранный нагревателя, а весь тепловой поток от задающего нагревателя направляется в аттестуемый ПТП.

Это позволяет определить градуировочную характеристику аттестуемого ПТП по результатам прямых измерений его термоЭДС  $E_{ПТП}$  при заданной постоянной электрической мощности  $W$ , подводимой к задающему нагревателю, по формуле:

$$K_{ПТП} = \frac{W}{E_{ПТП} \times F_{ПТП}},$$

где  $F_{ПТП}$  – площадь аттестуемого ПТП.

Теплозащитный экран конструктивно совмещен с корпусом верхнего (охранного) нагревателя, выполненным из высокотеплопроводного металла, что обеспечивает равенство их температур в режиме нулевого сигнала вспомогательного ПТП. Благодаря этому предотвращаются тепловые потери или притоки через боковую поверхность аттестуемого ПТП из окружающей среды, что также способствует одномерности теплового потока.

Особенностью установки является вспомогательный ПТП, состоящий из двух идентичных преобразователей теплового потока, выполненных в одной плоскости. Первый из них предназначен для измерения теплового потока, который может поступать от задающего нагревателя, а второй – для регулирования

мощности охранный нагревателя до достижения нулевого сигнала первого вспомогательного ПТП.

При незначительном изменении тепловых условий эксперимента по значению сигнала первого вспомогательного ПТП в режиме реального времени можно внести соответствующие поправки в расчет градуировочной характеристики аттестуемого ПТП.

Конструкция градуировочной головки позволяет выполнять аттестацию или поверку ПТП, выполненных в форме диска диаметром 60 мм и высотой от 0,5 до 6,5 мм.

Основное требование к эталонному ПТП, если его аттестация выполняется в метрологической установке кондуктивного типа, заключается в одинаковости геометрической формы и поперечных размеров рабочих поверхностей ПТП и посадочного места в градуировочном устройстве, т.е. чтобы площади обеих торцовых поверхностей ПТП были равны, соответственно, площадям теплоотдающей поверхности источника теплоты и теплопринимающей поверхности теплостока.

Следующее требование состоит в однородности термического сопротивления ПТП.

Для обеспечения однородного по теплофизическим свойствам поля в ПТП он должен состоять из двух зон: зоны с чувствительным элементом (ЧЭ) и охранной зоны по периметру ЧЭ, имеющей одинаковые с ЧЭ теплофизические свойства. Технологически это достигается путем изготовления охранной зоны из такой же спирали термoeлементов, из какой изготовлен ЧЭ. Размеры охранной зоны относительно поперечного размера ПТП выбирают, исходя из условий теплообмена в градуировочном устройстве.

Эталонный ПТП должен обеспечивать передачу единицы теплового потока (или поверхностной плотности теплового потока) как в условиях радиационного, так и кондуктивного компарирования. В связи с этим размеры охранной зоны должны учитывать не только краевые эффекты, которые имеют место при его градуировке в установке высшей точности, но и те краевые эффекты, которые возникают при передаче единицы теплового потока рабочему ПТП в компараторе как кондуктивного, так и радиационного типа.

Как следует из [9] максимальная протяженность краевых эффектов в ПТП наблюдается при радиационном компарировании. Поэтому ширина охранной зоны эталонного ПТП, предназначенного для работы в

радиационном компараторе, должна быть не меньше 5 толщин ПТП:  $r_{ПТП} - r_{ЧЭ} \approx 5h_{ПТП}$ .

Исходя из вышесказанного, диаметр зоны чувствительного элемента ПТП составил 40 мм при диаметре ПТП 60 мм, а толщина ПТП составила 2 мм (см. рис. 3).

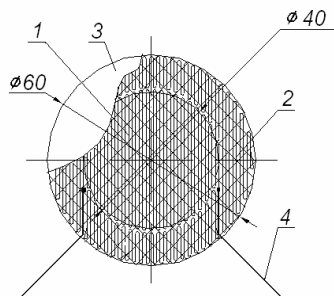


Рис. 3. Конструктивная схема эталонного ПТП:

- 1 – чувствительная зона; 2 – охранный элемент;  
3 – заливочный компаунд

Нижнее звено поверочной схемы для воспроизведения, хранения и передачи размера единицы поверхностной плотности теплового потока должно состоять из рабочих метрологических установок, предназначенных для определения функции преобразования рабочих ПТП. Аттестация рабочих ПТП выполняется, как правило, методом компарирования по эталонному ПТП, предназначенному для передачи единицы поверхностной плотности теплового потока аттестуемому ПТП.

Градуировочные компараторы могут быть как радиационными, так и кондуктивными.

Кондуктивное компарирование реализуется с применением эталонного и градуируемого ПТП, которые устанавливают соосно друг на друга и помещают между двумя изотермическими поверхностями: нагревателя и теплостока. Одна из возможных конструкций кондуктивного компаратора приведена на рис. 4.

Основными элементами компаратора являются: градуировочная головка, которая содержит задающий нагреватель, прижимное устройство, с помощью которого можно регулировать контактные сопротивления между элементами термостолбика, активный боковой температуровыравнивающий экран, система съема теплоты и блок термостатирования опорных спаев термопар.

Корректность кондуктивного компарирования зависит от термического сопротивления ПТП, соотношения его геометрических размеров, размеров чувствительного элемента и охранной зоны.

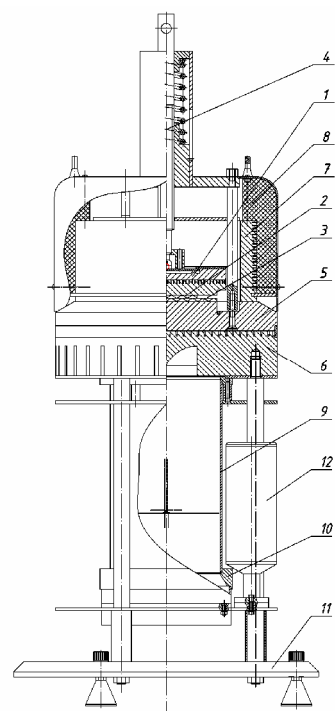


Рис. 4. Конструктивная схема теплового блока кондуктивного компаратора: 1 – градуировочная головка; 2 – эталонный ПТП; 3 – аттестуемый ПТП; 4 – прижимное устройство; 5 – теплосток; 6 – радиатор; 7 – температуровыравнивающий экран; 8 – теплоизоляционный колпак; 9 – воздуховод; 10 – вентилятор; 11 – станина; 12 – блок термостатирования опорных спаев термопар

Характер распределения вдоль приведенного радиуса  $r/h_{ПТП}$  относительных плотностей  $q/q_H$  локального теплового потока, представленный на рис. 5, показывает, что путем вариаций отношения  $r/h_{ПТП}$  можно подобрать такие геометрические размеры ПТП, что измеренный тепловой поток будет идентичен нормированному тепловому потоку с заданной точностью.

Площади ПТП не обязательно должны быть одинаковыми, единственным условием является то, что бы чувствительный элемент эталонного ПТП полностью перекрывал чувствительный элемент градуируемого ПТП.

Преимуществом радиационного компаратора является возможность градуировки ПТП, площадь тепловоспринимающей поверхности которого не одинакова с площадью эталонного ПТП.

Основное требование к тепловоспринимающим поверхностям образцового и градуируемого ПТП состоит в одинаковости их степеней черноты, а

требование к самому компаратору – равномерность поля тепловых потоков в зоне размещения преобразователей, причем вклад кондуктивно – конвективной составляющей в нормированный поток теплового излучения должен быть на несколько порядков меньше основного радиационного потока.

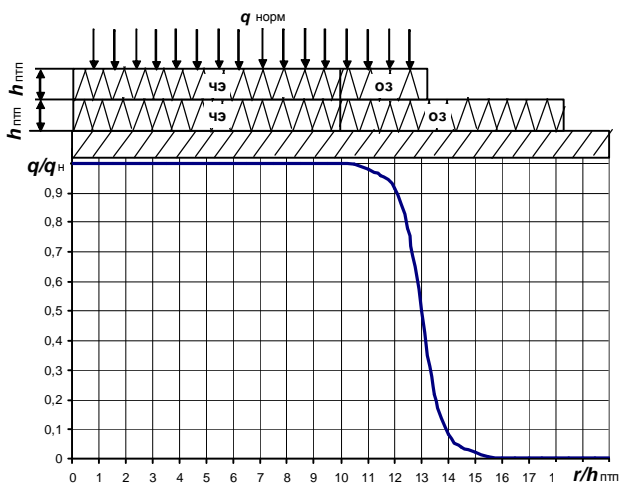


Рис. 5. Характер распределения вдоль приведенной радиальной координаты относительной плотности среднего по высоте ПТП теплового потока

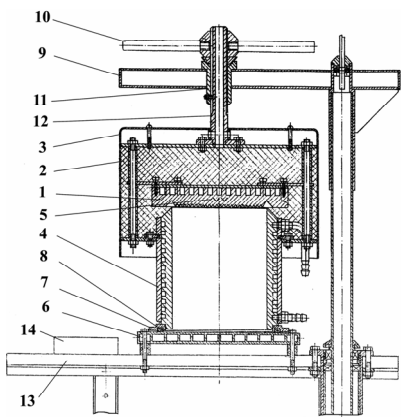


Рис. 6. Конструктивная схема теплового блока радиационного компаратора: 1 – излучатель, 2 – корпус, 3 – кожух, 4 – бленда, 5 – спаи ТХА, 6 – теплосток, 7 – кольцо, 8 – уплотнительный элемент, 9 – кронштейн, 10 – рукоятка, 11 – осевой винт, 12 – направляющая, 13 – столешница, стойки теплового блока; 14 – клеммная колодка

Радиационный компаратор может быть выполнен по приведенной на рис. 6 схеме, которая предполагает наличие в установке плоских изотермического нагревателя и термостатированного теплостока, на поверх-

ности которого устанавливают градуируемый и эталонный ПТП. Особенностью этого компаратора является применение полированного зеркально отражающего экрана, термостатируемого при той же температуре, что и теплосток. Излучатель, выполненный из высокотеплопроводного металла в виде плоской модели АЧТ за счет V-образных кольцевых проточек, и зеркально отражающий термостатированный экран обеспечивают практически полное отсутствие конвективных потоков в зоне расположения ПТП при удовлетворительной равномерности поля тепловых потоков.

Для определения плотности среднеинтегрального по поверхности теплостока теплового потока в отсутствие отражающего экрана и при наличии были выполнены исследования угловых коэффициентов  $j_{1-2,зерк}$  и  $j_{1-2}$ . Полученные результаты приведены на рис. 7.

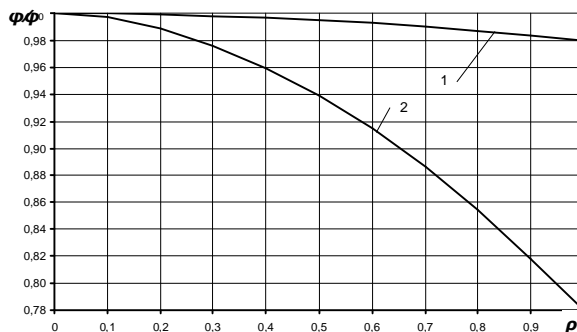


Рис. 7. Распределение локальных угловых коэффициентов по поверхности теплостока: 1 –  $j = j_{1-2,зерк}$  (с экраном); 2 –  $j = j_{1-2}$  (без экрана)

Созданная аппаратура позволяет разработать и внедрить национальную поверочную схему воспроизведения и передачи размера единицы плотности теплового потока.

1. МИ 1855-88 Государственная поверочная схема для средств измерений поверхностной плотности теплового потока в диапазоне 10 – 2000 Вт/м<sup>2</sup> / Методические указания. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 5 с. 2. Томбасов Е.А., Лозинская О.И., Черепанов В.Я. Образцовая установка для градуировки и поверки преобразователей теплового потока // Метрология: ежемесячное приложение к науч.-техн. журналу “Измерит. техника”. – 1987. – №1. – С. 31–39. 3. Томбасов Е.А., Черепанов В.Я., Калинин А.Н.

*Разработка и исследование средств метрологической аттестации преобразователей теплового потока // Измер. техника. – 1987. – №5. – С. 30–32. 4. Геращенко О.А., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Сало В.П. Аппаратура для метрологической аттестации первичных преобразователей теплового потока // Пром. теплотехника – 1991. – Т.13 №4 – С.64–69. 5. Декуша Л.В. Теплометрические измерительные преобразователи для исследования сложного теплообмена: Дисс. ... канд. техн. наук. – Киев, 1990. – 278 с. 6. Разработка в интересах энергосбережения комплекса аппаратуры нового поколения для определения и исследования метрологических характеристик первичных преобразователей теплового потока / Отчет о НИР (заключительный), “Контакт-3”. – № Госрегистрации 0197U012859. – К.: Институт технической*

*теплофизики НАН Украины. – 1999. – 137 с. 7. Декуша Л.В., Грищенко Т.Г., Менделеева Т.В. Особенности воспроизведения единицы плотности теплового потока кондуктивным способом // Вимірювальна техніка та метрологія, 2003. – №63. – С. 31–39. 87. Теоретические и практические основы проектирования образцовых средств воспроизведения единицы плотности теплового потока / Отчет о НИР (заключительный). – № Госрегистрации 0103U005193. – К.: Институт технической теплофизики НАН Украины. – 2005. – 131 с. 9. Декуша Л.В., Грищенко Т.Г., Менделеева Т.В. Особенности радиационного компарирования для передачи единицы плотности теплового потока // Вимірювальна техніка та метрологія, 2006. – № 66. – С. 64–75.*

УДК 536.6

## **ПРИЕМНИКИ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВНЕДРЕНИЯ СТАНДАРТОВ ГОСТ 24632-81, ГОСТ 12.1.044-89, ДСТУ БВ.2.7-70-98 (ГОСТ 30444-97) В УКРАИНЕ**

© Трикоз Павел, Декуша Леонид, Воробьев Леонид, Шаповалов Вячеслав, Мазуренко Александр, 2008

Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина

[teplomer@ukr.net](mailto:teplomer@ukr.net)

*Наведено описання приладів для вимірювання та безперервного контролю густини усіх складових радіаційного теплового потоку від полум'я під час вогневих випробувань різних речовин, виробів та матеріалів на спалах та пожежну безпеку.*

*Представлено описание приборов, предназначенных для измерения и непрерывного контроля плотности всех составляющих радиационного теплового потока от пламени при огневых испытаниях различных веществ, изделий и материалов на воспламеняемость и пожаробезопасность.*

*The description of devices, used for measurement and continuous control of all components of radiant heat flow rate from the fire during test firing of various substances, products and materials on ignitability and combustibility is described.*

Огневые испытания различных веществ, изделий и материалов на воспламеняемость и пожаробезопасность обязательно проходят при наличии теплового излучения. Это вызывает необходимость измерения и непрерывного контроля плотности всех составляющих радиационного теплового потока от пламени (результатирующего, падающего и поглощенного), воздействующего на контролируемое изделие [1, 2].

Осуществление такого контроля возможно лишь при наличии испытательного оборудования и средств измерения на основе первичных преобразователей теплового потока и температуры. Измерение поверхностной плотности падающего теплового потока регламентировано стандартами, для приборного обеспечения которых в отделе теплотрии ИТТФ НАН Украины созданы абсолютные полостные приемники