

$$\tau = [1 - ((n-1)/(n+1))^2]^2, \quad (5)$$

де  $n$  – показник заломлення матеріалу лінзи при цій довжині хвилі.

Що ж стосується уникнення впливу “крайових ефектів”, то цю проблему доцільно вирішувати, видовжуючи торчакові частини моделі АЧТ металевими циліндрами, що перешкоджають утворенню повітряних потоків.

**Висновки.** Дослідження підтверджують можливість створення малогабаритних низькотемпературних та економних моделей АЧТ на базі елементів Пельтье для градування і верифікації засобів пірометрії та окреслюють напрями її реалізування. Перспективним видається широке впровадження таких моделей АЧТ в регіональних центрах стандартизації та метрології чи

підприємствах, що випускають пірометри, пірометричні системи та інші безконтактні засоби вимірювання параметрів теплового випромінювання.

1. <http://www.raytek.com>.
2. <http://www.omsketalon.ru>.
3. <http://www.mikroakustika>.
4. <http://www.diagnost.ru>.
5. Malek Z., Strajblova J. Konstrukce referencniho spoje termoclanku pro velmi presna mereni teploty. // Cs. Cas. fys., №18, 1968, s. 95.
6. Roth H., Walz H. Nullpunkt-Thermostat fur Thermoelemente // Siemens-Zeitschrift, v. 41, №6, s. 539.
7. Ананичук Л.І., Луцке О.Я., Вихор Л.М., Місава К., Сузукі Н. Комп'ютерні методи оптимізації холодильників // Термоелектрика, №3, 2002, с. 17 – 25.
8. Гордов А.Н. Основы пирометрии. – М., 1971.
9. Шпигельман Е.С., Ивенский С.Н., Шишкина И.И. Методы обеспечения единства измерений в области пирометрии излучения // Труды метрологических институтов СССР, 1975. – Вып. 183(243).

УДК 536.2:536.3:536.6:629.7:697.34

## ОСОБЕННОСТИ РАДИАЦИОННОГО КОМПАРИРОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ ПЛОТНОСТИ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

© Декуша Леонид, Грищенко Татьяна, Менделеева Татьяна, 2006

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, 03057, г.Киев, Украина

*Розроблено теоретичні засади, надано практичні рекомендації щодо проектування радіаційних компараторів для передавання одиниці густини теплового потоку робочим засобам. Сформульовано вимоги до еталонних перетворювачів теплового потоку. Наведено описання установки ІТТФ НАН України для метрологічної атестації та періодичних перевірок перетворювачів теплового потоку.*

*Разработаны теоретические основы и даны практические рекомендации по проектированию радиационных компараторов для передачи единицы плотности теплового потока рабочим средствам. Сформулированы требования, предъявляемые к эталонному преобразователю теплового потока. Приведено описание установки ИТТФ НАН Украины для метрологической аттестации и периодических поверок рабочих преобразователей теплового потока.*

*Theoretical bases are developed, and practical recommendations on designing radiating comparators for transfer of heat flux density unit to working means are given. The requirements to the certified reference heat flux sensors are formulated. The description of IET NAS of Ukraine device for metrological certification and periodic verifications of working heat flux sensors is resulted.*

Градуировка любого преобразователя теплового потока сводится к измерению нормированного теплового потока или его плотности. Из трех основных видов теплообмена – конвекции, кондукции и теплового излучения – последние два лучше всего поддаются эталонированию. В связи с этим теплоточная градуировка по способу подведения тепловой энергии к градуируемому преобразователю теплового потока (ППП) является радиационной или кондуктивной независимо от способа отведения теплоты [1].

При всех достоинствах кондуктивного способа подведения тепловой энергии (в метрологических установках) у него есть ограничения: площади соприкасающихся поверхностей источника теплоты, градуируемого ППП и стока теплоты должны быть одинаковыми, поверхности ППП должны быть плоскопараллельными и очень тщательно обработанными, а термическое сопротивление однородно по всему ППП. Если невозможно выполнение этих требований, используется метрологическая установка с

радиационным подводом теплоты. Преимуществом радиационной градуировочной установки, реализующей относительный метод измерения, т.е. компарирование по эталонному ПТП, является возможность градуировки преобразователей, площади тепловоспринимающих поверхностей которых не совпадают с площадью эталонного ПТП.

В метрологической установке радиационного типа нормированный тепловой поток задается от источника теплового излучения. Основное требование к тепловоспринимающим поверхностям эталонного и градуируемого ПТП – одинаковость 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.

Наиболее производительной и универсальной является установка, которая базируется на применении плоских конструкций нагревателя и термостатированного теплостока, на поверхности которого устанавливаются оба ПТП (эталонный и градуируемый). Особенностью этой схемы является применение бокового полированного зеркально отражающего экрана, термостатируемого при той же температуре, что и теплосток. Излучатель, выполненный из металла в виде плоской модели АЧТ за счет V-образных кольцевых проточек, вместе с зеркально отражающим термостатированным экраном обеспечивает при удовлетворительной равномерности поля тепловых потоков практически полное отсутствие конвективной составляющей в зоне расположения ПТП.

Именно этой схеме отдано предпочтение при конструировании рабочей градуировочной установки нового поколения (модель РГУ-2), созданной в ИТТФ НАН Украины.

Установка РГУ-2 применяется для градуировки, метрологической аттестации и периодических проверок плоских ПТП вида вспомогательной стенки различной формы (диск, прямоугольник) и размеров: поперечный размер от 10 до 200 мм, высота от 1 до 10 мм. Может быть также применена для градуировки нестандартизованных средств измерения теплового потока, имеющих ПТП в качестве чувствительного элемента.

В установке РГУ-2 реализован сравнительный метод определения коэффициента преобразования ПТП, состоящий в том, что тепловое излучение фикси-

рованной плотности теплового потока от источника теплового излучения одновременно подводится к градуируемому и эталонному преобразователям, расположенным на термостатированном теплостоке. Обеспечиваются равноудаленность тепловоспринимающих поверхностей обоих ПТП от источника теплового излучения и одинаковые значения степеней черноты их поверхностей ( $\varepsilon_{ПТП} = \varepsilon_0$ ).

Если эталонный и градуируемый ПТП идентичны по геометрическим размерам и теплофизическим характеристикам, то ввиду равенства плотностей потоков теплового излучения, воспринятых их поверхностями, расчетной формулой для определения градуировочного коэффициента ПТП является соотношение

$$k_{ПТП} = k_0 E_0 / E_{ПТП}, \quad (1)$$

где  $k_{ПТП}$  и  $k_0$  – градуировочные коэффициенты, а  $E_{ПТП}$  и  $E_0$  – сигналы градуируемого и эталонного ПТП, соответственно.

Значение градуировочного коэффициента ПТП равно среднему арифметическому результатов, полученных в точках рабочего диапазона измерений:

$$k_{ПТП} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i, \quad (2)$$

где  $k_i$  – значения градуировочного коэффициента, полученные в  $n$  точках диапазона измерений, причем  $n \geq 3$ .

Внешний вид установки показан на рисунке 1, а конструктивная схема теплового блока – на рис. 2.

В состав установки входят стойка 1 с расположенным в ней тепловым блоком 2 и жидкостным термостатом 3, стойка 4 с сервисными приборами (см. рис. 1).

Тепловой блок, предназначенный для размещения градуируемого (градуируемых) и эталонного ПТП и обеспечения требуемых режимов градуировки, содержит источник теплового излучения (далее – ИТИ), теплосток и систему термостатирования. ИТИ состоит из излучателя 1, смонтированного в корпусе 2, снабженном кожухом 3, и термостатируемого экрана 4 (см. рис. 2).

Излучатель 1 является плоской моделью абсолютно черного тела. Он выполнен из нержавеющей стали в виде диска с верхним продольным и нижним радиальным оребрениями, термоокисидированными в печи при  $T = 1000$  °С. В пазы верхних ребер излучателя вложен нихромовый нагреватель в

кварцевых трубках в количестве 12 штук с последовательным включением по электрическому току. Снизу по центру диска излучателя зачеканены спаи двух хромель-алюмелевых термопар 5, изолированных керамической соломкой. Выводы от термопар и нагревателя собраны в кабель с металлическим экраном и выведены через верхнюю часть корпуса излучателя.

Оребрение снизу излучателя обеспечивает высокий коэффициент излучения его теплоизлучающей поверхности. Нижняя часть корпуса 2 соединена с термостатируемым экраном 4, который исключает влияние окружающей среды на поле теплового излучения. Внутренняя поверхность экрана полирована, что обеспечивает условия максимального отражения теплового излучения ИТИ с целью создания однородного теплового поля на тепловоспринимающей поверхности теплостока.

Теплосток 6, предназначенный для размещения на его тепловоспринимающей поверхности ПТП и



Рис. 1. Внешний вид установки РГУ-2:

1 – стойка теплового блока, 2 – тепловой блок, 3 – термостат, 4 – стойка с сервисными приборами

отведения воспринятой энергии теплового излучения, представляет собой плоский теплообменник, изготовленный из дюралюминиевой плиты прямоугольной формы с внутренними фрезерованными каналами для циркуляции термостатированного хладагента.

Поверхность теплостока имеет две рабочие зоны, ограниченные двумя одинаковыми кольцами, назначение которых – выделить два идентичные равномерно облучаемые поля, на которых размещают эталонный и градуируемые ПТП (15 и 16). Каждое из колец является посадочным местом для ИТИ. Их диаметр соответствует диаметру уплотнительного элемента 8 экрана.

ИТИ закреплен на Г-образном кронштейне 9, с помощью которого осуществляются повороты ИТИ на левое и правое поля теплостока, а при помощи рукоятки 10, осевого винта 11 и направляющей 12 обеспечено движение ИТИ вверх-вниз до касания с кольцом 7.

На столешнице 13 стойки теплового блока закреплена клеммная колодка 14.

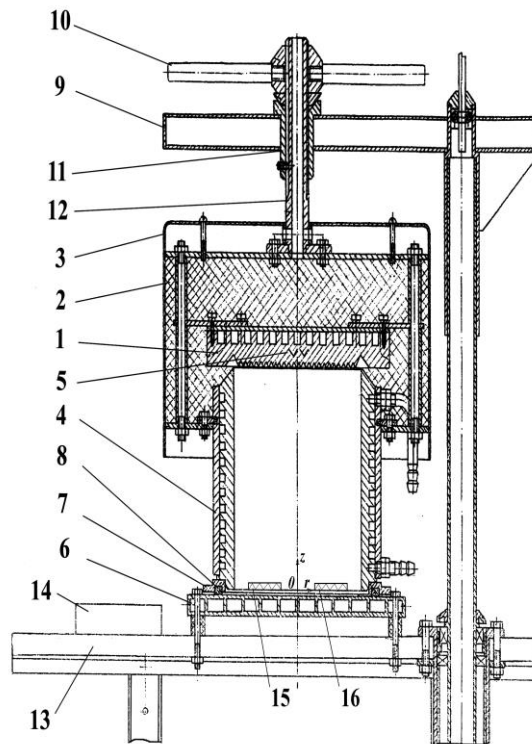


Рис. 2. Конструктивная схема теплового блока:

1 – излучатель, 2 – корпус, 3 – кожух, 4 – экран термостатированный, 5 – спаи ТХА, 6 – теплосток, 7 – кольцо, 8 – уплотнительный элемент, 9 – кронштейн, 10 – рукоятка, 11 – осевой винт, 12 – направляющая, 13 – столешница стойки теплового блока, 14 – клеммная колодка, 15 – эталонный ПТП, 16 – рабочий ПТП

Система термостатирования теплового блока служит для поддержания теплоотдающих поверхностей ПТП при одинаковой температуре, а также для отведения тепловой энергии, аккумулированной корпусом ИТИ, экраном и теплостоком. В нее входят жидкостный термостат U15C и систему трубопроводов.

Отведение теплоты, аккумулированной хладагентом при прохождении каналов экрана и теплостока, производится при помощи холодильника термостата и последовательно включенного с холодильником медного трубчатого теплообменника, который помещен внутрь термостата. Оба подключены к водопроводной сети.

Наличие на теплостоке двух идентичных зон под размещение ПТП не только способствует экономии времени, но расширяет и возможности установки. Продолжительность работы на установке сокращается, так как подготовительные работы с очередной группой ПТП выполняют на свободном поле одновременно с выполняемой градуировкой предыдущей группы ПТП, находящихся внутри кольца, на которое опущен тепловой блок.

Если необходимо градуировать ПТП большого размера, не позволяющего разместить его на одном поле с эталонным ПТП, одно из полей используется для задания теплового режима в тепловом блоке и измерения нормированной плотности потока теплового излучения эталонным ПТП, а на второе поле помещают градуируемый ПТП. Экспонирование эталонного и градуируемого ПТП производится попеременным опусканием ИТИ на кольца обоих полей.

При любом способе задания нормированного теплового потока для достижения высшей точности измерения необходимо обеспечить одномерность теплового потока, проходящего через градуируемый ПТП. Это требование вытекает из наличия многих факторов, влияющих на поле тепловых потоков и приводящих к неидентичности заданного теплового потока и измеренного преобразователем вида вспомогательной стенки.

К факторам, влияющим на погрешность воспроизведения единицы теплового потока и передачи ее от эталонного ПТП к рабочему при радиационном способе подведения тепловой энергии в метрологической установке высшей точности, относятся:

– вклад неконтролируемых конвективной или конвективно-кондуктивной составляющих в нормированный поток теплового излучения;

– соотношения между геометрическими размерами полости ИТИ (диаметра тепловоспринимающей поверхности теплостока и высоты экрана), геометрических размеров ПТП, а также чувствительного элемента и охранной зоны ПТП;

– характер распределения локальных угловых коэффициентов по тепловоспринимающей поверхности, на которой установлен градуируемый ПТП;

– наличие отражающего экрана;

– соотношение температуры излучателя, температуры термостатирования теплостока и экрана;

– термическое сопротивление ПТП и контактное термическое сопротивление;

– интенсивность теплообмена по боковой поверхности ПТП.

Выбор конструктивных размеров как компаратора, так и эталонного и градуируемого ПТП основан на результатах аналитического решения ряда задач.

Для правильного выбора геометрических размеров полости ИТИ решена задача о распространении кондуктивного теплового потока через газовую среду (воздух) в полости. Расчеты для приведенной плотности теплового потока  $q(z=0)/q_0$  для сечения  $z=0$ , соответствующего тепловоспринимающей поверхности теплостока, выполнены для полости в зависимости от безразмерного радиуса  $r/R$  теплостока при вариации относительной высоты экрана  $H/R$  по формуле [2]:

$$\frac{q(z=0)}{q_0} = 2(H/R) \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_m \rho)}{J_1(\mu_m)} \cdot \frac{1}{sh(\mu_m H/R)}, \quad (3)$$

где  $q_0$  – плотность теплового потока через однородную неограниченную пластину;  $J_0(x)$  и  $J_1(x)$  – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков, соответственно;  $\mu_m$  – корни характеристического уравнения  $J_0(\mu_m) = 0$ ;  $\rho = r/R$ ,  $H$  – высота экрана;  $R$  – радиус тепловоспринимающей поверхности теплостока.

Полученные результаты представлены на рис. 3. Они показывают, что приведенная плотность теплового потока  $q(z=0)/q_0 < 0,1$  для значений относительной высоты экрана  $H/R > 2,25$  (кривые 1, ..., 4).

Эксперименты, выполненные на макете излучающей полости при равенстве температур экрана и теплостока и состоящие из прямых измерений плотности теплового потока по дну полости (аналог поверхности теплостока) при вариации ее отно-

сительной высоты, показали, что при значениях отношения  $H/R > 2$  кондуктивные тепловые потоки через газовую среду в полости в нижней ее области на 2-3 порядка меньше потока теплового излучения..

Теплообмен излучением между поверхностью ИТИ и тепловоспринимающей поверхностью теплостока рассчитывают по зависимости:

$$q = \sigma \cdot \epsilon_{np} \cdot \varphi_{1-2} \cdot (T_{ИТИ}^4 - T_{ТС}^4), \quad (4)$$

где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана–Больцмана,  $T_{ИТИ}, T_{ТС}$  – температура, соответственно, источника теплового излучения и теплостока,  $\epsilon_{np}$  – приведенная степень черноты,  $\varphi_{1-2}$  – угловой коэффициент теплообмена излучением, который определяется для полости в отсутствие зеркально полированного термостатированного экрана и при его наличии, соответственно, по таким формулам [3]:

$$\varphi_{1-2} = 1 + 0,5 \cdot (H/R)^2 - 0,5 \cdot (H/R) \cdot \sqrt{(H/R)^2 + 4}, \quad (5)$$

$$\varphi_{1-2,зерк} = 0,5 \cdot (1 + \varphi_{1-2}). \quad (6)$$

Полученные по (5) и (6) результаты вычислений приведены на рис. 4.

На основе описанных двух вычислительных экспериментов принято решение о геометрических

размерах проектируемой установки. Исходя из номенклатуры типоразмеров ПТП, выпускаемых и подлежащих аттестации и поверкам, значение для относительной высоты экрана полости  $H/R$  взято равным 2,34 при диаметре рабочей части поверхности теплостока 200 мм. Наличие зеркально отражающего термостатированного экрана приводит к увеличению расчетного среднего углового коэффициента более, чем в четыре раза.

Для анализа степени равномерности теплового потока по поверхности теплостока рассмотрены также распределения относительных угловых коэффициентов  $\varphi_{1-2}/\varphi_0$  и  $\varphi_{1-2,зерк}/\varphi_0$  по этой поверхности. Отнесение выполнено к значению углового коэффициента  $\varphi_0$  при значении текущего безразмерного радиуса  $\rho = r/R = 0$ , где  $R$  – радиус рабочей зоны.

Вычисление относительного углового коэффициента выполнено по формуле [3]:

$$\varphi_{1-2}/\varphi_0 = \frac{0,5}{\varphi_0} \left( 1 - \frac{X-1}{\sqrt{(X+1)^2 - (2 \cdot \rho)^2}} \right), \quad (7)$$

где  $X = (H/R)^2 + \rho^2$ , а  $\varphi_{1-2,зерк}/\varphi_0$  – по формуле (6).

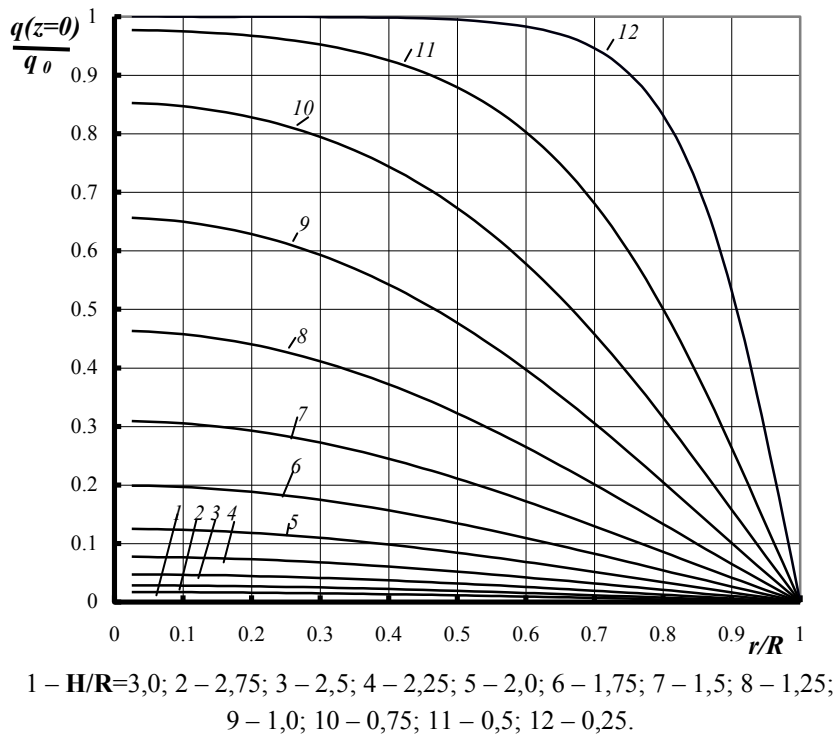


Рис. 3. Зависимость приведенной плотности кондуктивного теплового потока от безразмерного радиуса теплостока при вариации относительной высоты экрана

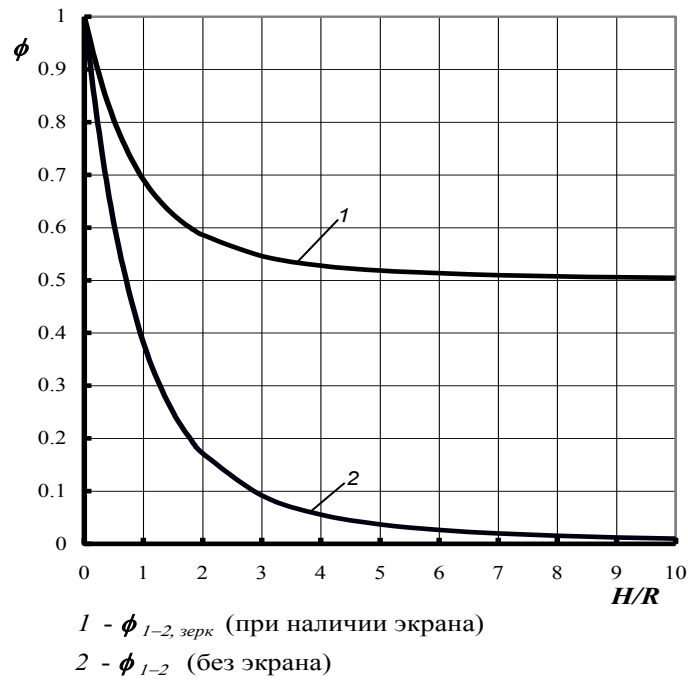


Рис. 4. Зависимости угловых коэффициентов от относительной высоты экрана

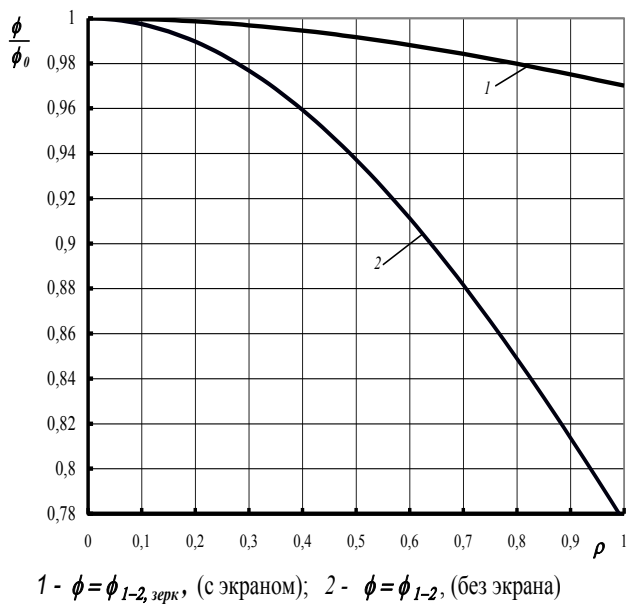


Рис. 5. Распределение локальных угловых коэффициентов по поверхности теплостока

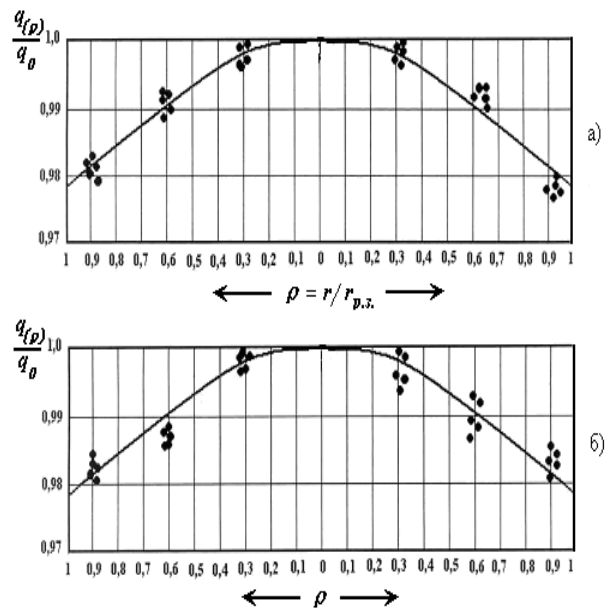


Рис. 6. Распределение приведенной плотности потока теплового излучения в двух взаимно перпендикулярных направлениях (а и б)

— — теоретическая кривая;  
 ● — экспериментальные точки

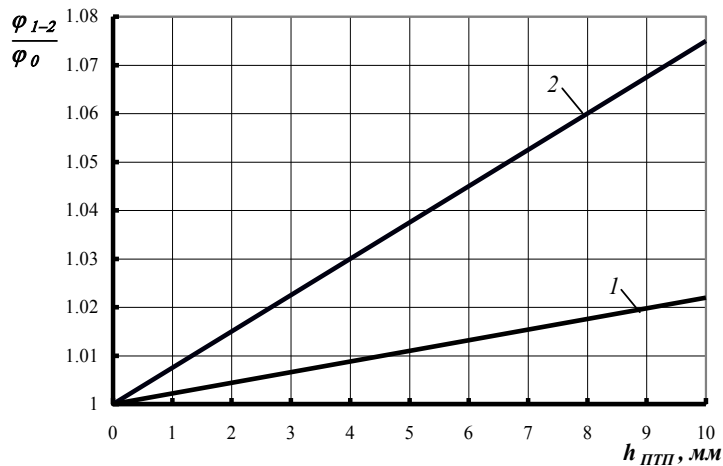


Рис. 7. Зависимость угловых коэффициентов от высоты ПТП:  
1 – с экраном, 2 – без экрана

На рис. 5 приведены результаты численного эксперимента, полученные для значения  $H/R = 2,34$ . Они показывают, что применение термостатированного отражающего экрана способствует улучшению равномерности распределения локальных угловых коэффициентов по тепловоспринимающей поверхности теплостока почти на порядок. Неравномерность на площадке  $0,6R$  не превышает 1 %, а на площадке  $0,8R$  – 2 % и при необходимости может быть учтена соответствующей поправкой. Степень равномерности теплового поля в зоне, ограниченной кольцом, исследована не только теоретически, но и экспериментально. Исследовано распределение приведенной плотности потока теплового излучения  $q(\rho)/q_0$  в тепловом блоке установки РГУ-2. Экспериментальные результаты в сравнении с полученным ранее теоретическим распределением вдоль радиуса теплостока приведены на рис. 6. Как видим, на площадке с радиусом  $0,6R$  неравномерность теплового поля не превышает 1%, а на площадке с радиусом  $0,9R$  – 2% ( $R$  – радиус рабочей зоны теплостока, равный 100 мм).

Из этих графиков можно сделать вывод о том, что максимальная методическая погрешность из-за неравномерности поля тепловых потоков на поверхности теплостока внутри кольца порядка 2% и может быть учтена поправкой.

Значения относительного углового коэффициента в зависимости от высоты аттестуемого ПТП приведены на рис. 7 для установки, выполненной по схеме с применением экрана (см. график 1) и без него

(см. график 2). Как видим, при варьировании высоты ПТП от 0 до 10 мм при наличии экрана изменение относительного углового коэффициента почти порядка 2%. Причем, в силу линейности этой зависимости, неодинаковость высот эталонного и аттестуемого ПТП легко учитывается поправкой, либо устраняется с помощью дополнительной прокладки из высоко-теплопроводного материала.

Требования к конструкции эталонного и аттестуемого ПТП для случая радиационного компарирования определены по результатам аналитического исследования влияния таких факторов, как относительный радиус ПТП ( $r/h_{\text{ППП}}$ ), условия теплообмена на тепловоспринимающей и боковой поверхностях ПТП и соотношение термических сопротивлений ПТП и его контакта с теплостоком. Для получения искомых распределений плотностей теплового потока и температур использовано решение задачи, описанной в [4], учитывая радиационный теплообмен между ИТИ и поверхностями ПТП через эффективные коэффициенты теплообмена:

$$q = \alpha_e (T_{\text{ИТИ}} - T_{\text{ППП}}), \quad (8)$$

где  $\alpha_{e,\text{верх}} = \alpha_{\text{верх}} = \varepsilon_{\text{пр,верх}} \cdot \sigma \cdot \varphi_{\text{верх}} \cdot (T_{\text{ИТИ}} + T_{\text{ППП,верх}})(T_{\text{ИТИ}}^2 + T_{\text{ППП,верх}}^2)$  (9)

и  $\alpha_{e,\text{бок}} = \alpha_{\text{бок}} = \varepsilon_{\text{пр,бок}} \cdot \sigma \cdot \varphi_{\text{бок}} \cdot (T_{\text{ИТИ}} + T_{\text{ППП,бок}})(T_{\text{ИТИ}}^2 + T_{\text{ППП,бок}}^2)$

$$\alpha_{e,\text{бок}} = \alpha_{\text{бок}} = \varepsilon_{\text{пр,бок}} \cdot \sigma \cdot \varphi_{\text{бок}} \cdot (T_{\text{ИТИ}} + T_{\text{ППП,бок}})(T_{\text{ИТИ}}^2 + T_{\text{ППП,бок}}^2) \quad (10)$$

эффективные коэффициенты теплообмена ИТ с тепловоспринимающей и боковой поверхностями ПТП, соответственно,  $T_{\text{ИТИ}}$  – температура, ИТИ,

$T_{ПТП,верх}, T_{ПТП,бок}$  – температура тепловоспринимающей и боковой поверхностей ПТП, соответственно.

Тепловая модель для этой задачи приведена на рис. 8.

Учитывая специфику метрологической установки радиационного типа, можно утверждать, что  $\alpha_{бок} \leq \alpha_{верх}$ . Предельный случай (когда  $\alpha_{верх} = \alpha_{бок} = \alpha_e$ ) с точки зрения обеспечения точности измерений является самым неблагоприятным. Система обладает осевой симметрией, и математическая задача описывается известным уравнением теплопроводности [4], при этом граничное условие на верхнем торце ПТП такое:

$$\frac{1}{\beta} \frac{\partial \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \rho} + Bi_{верх} \cdot \vartheta(\zeta, \rho) = 0 \quad \text{при } \zeta = 1, \quad (11)$$

где  $Bi_{верх} = \alpha_{верх} \cdot h_{ПТП} / \lambda_{ПТП}$ .

Решение для функции температуры в безразмерном виде имеет вид:

$$\vartheta(\zeta, \rho) = K_t \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0(v_n \rho) S_n(\zeta), \quad (12)$$

где  $J_0(v_n \rho)$  – функция Бесселя первого рода нулевого порядка;  $v_n$  – собственные числа, определяемые из характеристического уравнения  $v J_0'(v) + Bi \cdot J_0(v) = 0$ ;

$$K_t = 0,5 \cdot k / Bi_{верх}, \quad k = D_{ПТП} / h_{ПТП},$$

$$A_n = \frac{2Bi}{(v_n) J_0(v_n) (Bi^2 + v_n^2)},$$

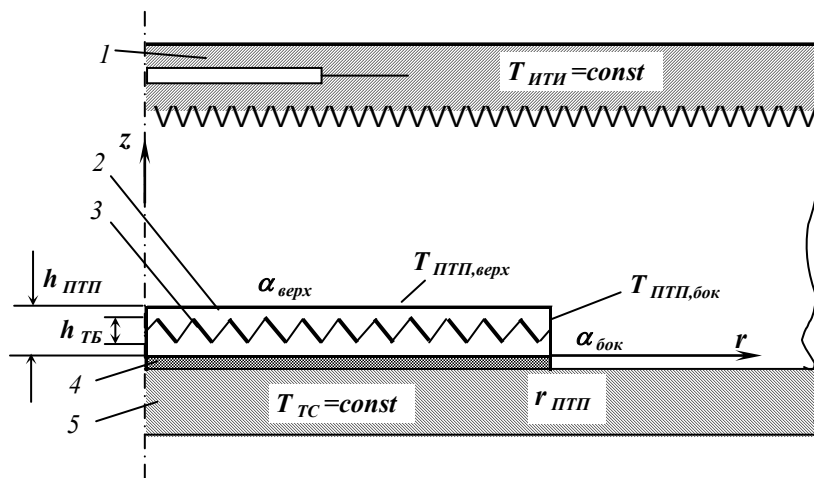


Рис. 8. Тепловая модель метрологической установки с радиационным подводом тепловой энергии:

1 – ИТИ (АЧТ), 2 – ПТП, 3 – термобатарея, 4 – слой контактного термического сопротивления, 5 – теплоток

$$S_n(\zeta) = [B_n(\zeta) + C_n(\zeta)] / Z_n(M),$$

$$B_n(\zeta) = \vartheta_1(\text{sh}(v_n M \zeta) + D_{n,2} \text{ch}(v_n M \zeta)),$$

$$C_n(\zeta) = \vartheta_2(\text{sh}(v_n M (1 - \zeta)) + D_{n,1} \text{ch}(v_n M (1 - \zeta))),$$

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

$$D_{n,1} = 2\beta \cdot v_n / k, \quad D_{n,2} = 2v_n / (k \cdot Bi_{верх}),$$

$$M = h_{ПТП} / r_{ПТП}, \quad \beta = R_K / R_{ПТП}.$$

Безразмерная локальная производная от температуры  $\partial \vartheta(\zeta, \rho) / \partial \zeta$  выражается формулой:

$$\frac{\partial \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \zeta} = K_q \sum_{n=1}^{\infty} A_n v_n J_0(v_n \rho) P_n(\zeta), \quad (13)$$

здесь  $K_q = Bi_{верх}$ . С учетом указанных формул отношение плотности локального теплового потока к плотности теплового потока в отсутствие теплообмена на боковой поверхности, т. е. приведенная плотность локального теплового потока, определяется таким выражением:

$$\frac{q_{лок}(z, r)}{q_0} = \frac{\partial \vartheta(\zeta, \rho) / \partial \zeta}{\Delta \vartheta} \cdot (1 + 1 / Bi_{верх} + R_{T2} / R_{ПТП}), \quad (14)$$

где  $\Delta \vartheta = 1$  для данных условий, а  $\partial \vartheta(\zeta, \rho) / \partial \zeta$  определяется (13).

Результаты расчета приведенных плотностей локальных тепловых потоков по (14) на входе в ПТП и выходе из него для трех значений верхнего числа Био при вариации отношения термических сопротивлений  $R_K / R_{ПТП}$  и отношения диаметра ПТП к его высоте  $D_{ПТП} / h_{ПТП}$  представлены на рис. 9.



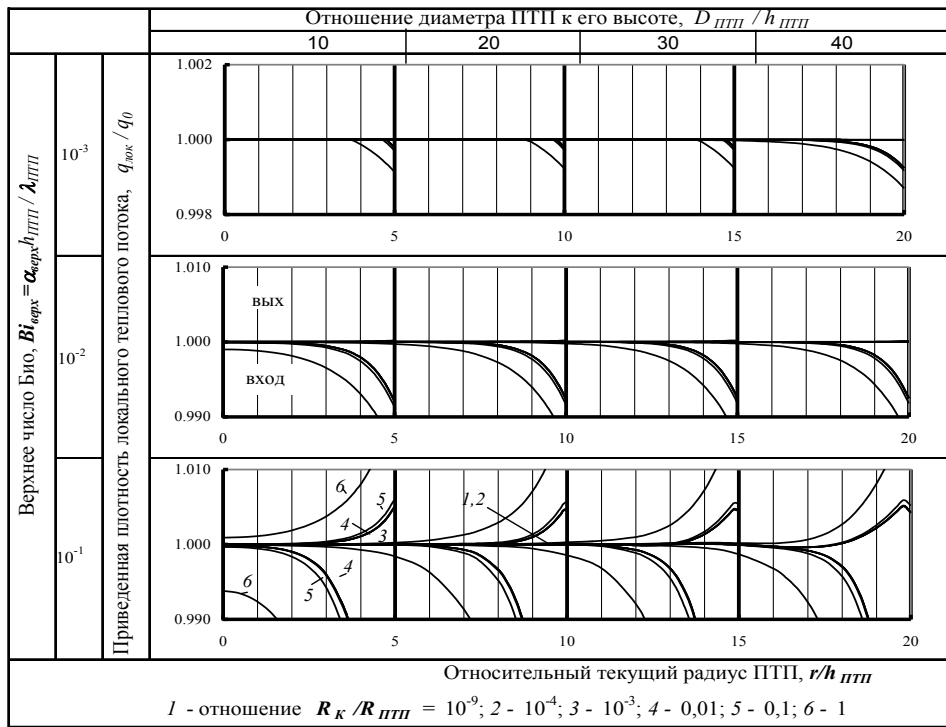


Рис. 9. Приведенные плотности локального теплового потока на входе в ПТП и выходе из него в зависимости от относительного радиуса ПТП при вариации значений верхних чисел Био, отношения контактного термического сопротивления к термическому сопротивлению ПТП и диаметра ПТП к его высоте

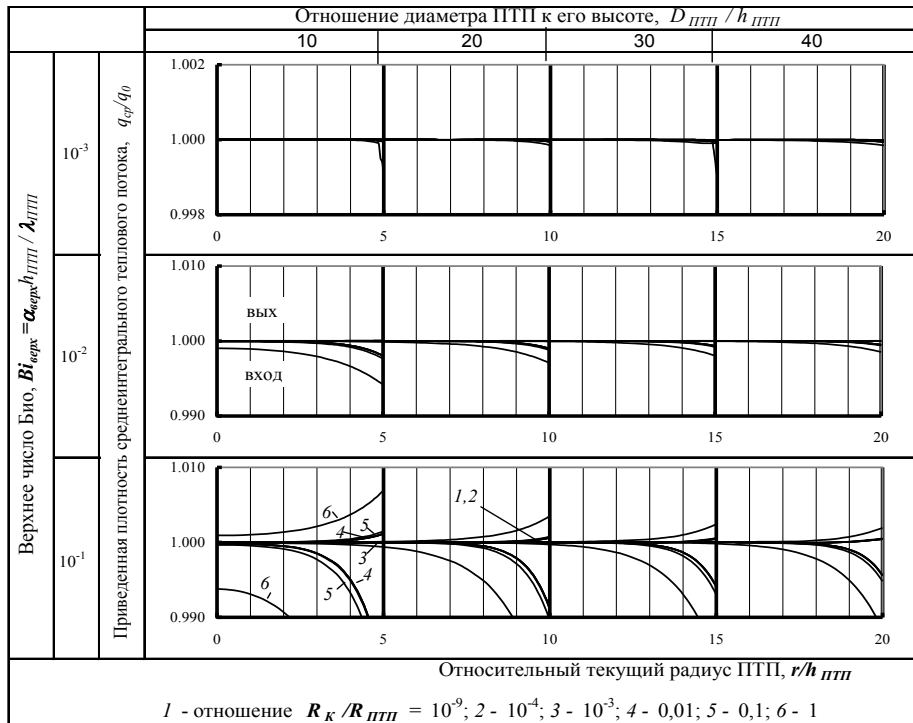


Рис. 10. Приведенные плотности среднеинтегрального теплового потока на входе в ПТП и выходе из него в зависимости от относительного радиуса ПТП при вариации значений верхних чисел Био, отношения контактного термического сопротивления к термическому сопротивлению ПТП и отношения диаметра ПТП к его высоте

Отношение плотности среднеинтегрального теплового потока к плотности теплового потока в отсутствие теплообмена на боковой поверхности, т. е. приведенная плотность среднеинтегрального теплового потока, определяется таким выражением:

$$\frac{q_{cp}(z,r)}{q_0} = q_{cp}(\zeta, \rho) \cdot (1 + 1/Bi_{\text{верх}} + R_{T2}/R_{\text{ППП}}), \quad (15)$$

где

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

$$q_{cp}(\zeta, \rho) = \frac{1}{\pi \rho^2} \int_0^\rho \frac{\partial \vartheta(\zeta, \rho)}{\partial \vartheta} 2\pi \rho d\rho = 2K_q \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{J_1(v_n \rho)}{\rho} P_n(\zeta). \quad (16)$$

Результаты расчета приведенных плотностей среднеинтегральных тепловых потоков по (15) на входе в ПТП и выходе из него для трех значений верхнего числа Био при вариации отношения термических сопротивлений  $R_k/R_{\text{ППП}}$  и отношения диаметра ПТП к его высоте  $D_{\text{ППП}}/h_{\text{ППП}}$  представлены на рис. 10.

Как правило, батарея термоэлементов преобразователя вида вспомогательной стенки защищена электроизоляционным покрытием, в связи с чем спаи термоэлементов расположены в сечениях на определенной глубине вспомогательной стенки. Это приводит к тому, что сигнал термобатареи ПТП пропорционален разности температур между этими сечениями, а не между наружными поверхностями ПТП. В зоне одномерности соотношение между приведенной плотностью среднеинтегрального теплового потока  $\frac{q_{cp}}{q_0}$ , разностью среднеинтегральных безразмерных температур  $\Delta \vartheta_{cp}$  и относительной высотой термобатареи  $h_{\text{ТБ}}/h_{\text{ППП}}$  определяется выражением:

$$\frac{q_{cp}}{q_0} = \frac{\Delta \vartheta_{cp}}{(h_{\text{ТБ}}/h_{\text{ППП}})} (1 + 1/Bi_{\text{верх}} + R_{T2}/R_{\text{ППП}}), \quad (17)$$

где среднеинтегральная по плоской поверхности безразмерная температура вычисляется по формуле

$$\vartheta_{cp} = \frac{1}{\pi \rho^2} \int_0^\rho \vartheta(\zeta, \rho) 2\pi \rho d\rho = 2K_t \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{J_1(v_n \rho)}{v_n \rho} F_n(\zeta)$$

$$\vartheta_{cp} = \frac{1}{\pi \rho^2} \int_0^\rho \vartheta(\zeta, \rho) 2\pi \rho d\rho = 2K_t \cdot \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{J_1(v_n \rho)}{v_n \rho} F_n(\zeta). \quad (18)$$

Результаты расчетов приведенных плотностей среднеинтегральных тепловых потоков по (17) для трех значений числа Био  $Bi_{\text{верх}}$  в зависимости от относительного радиуса ПТП  $r/h_{\text{ППП}}$  при вариации значений отношения высоты термобатареи к высоте ПТП  $h_{\text{ТБ}}/h_{\text{ППП}}$  и отношения диаметра ПТП к его высоте  $R_k/R_{\text{ППП}}$  графически представлены на рис. 11 при  $R_k/R_{\text{ППП}} = 1$  и на рис. 12 при  $R_k/R_{\text{ППП}} = 0$ .

Анализ этих результатов показал необходимость изготовления эталонного ПТП обязательно с охранной зоной шириной не менее пяти высот ПТП. Желательно, чтобы и рабочий ПТП, если он подвергается аттестации методом радиационного компарирования, тоже имел охранную зону. Размер охранной зоны рабочего ПТП выбирают, исходя из условий его дальнейшего применения с использованием рекомендаций, приведенных в [4]. Кроме того, при радиационном компарировании целесообразно применить высоко-теплопроводные смазки для существенного снижения контактного термического сопротивления.

При проектировании установки РГУ-2 решена задача по обеспечению возможности задания плотности потока теплового излучения в диапазоне от 10 до 10<sup>4</sup> Вт/м<sup>2</sup>. В связи с этим были рассчитаны возможные тепловые потоки в зависимости от температуры излучателя  $T_{\text{ИТИ}}$  и температуры термостатирования  $T_{\text{ТС}}$  теплостока и экрана. На рис. 13 представлены плотности потока теплового излучения в зависимости от температуры излучателя в диапазонах значений от 250 до 550 К (рис. 13, а) и от 250 до 750 К (рис. 13, б) при вариации температуры термостатирования от 273 до 373 К с шагом в 20 К.

Как показывают графики рис. 13, выбранная схема построения метрологической установки позволяет путем изменения температур ИТИ и теплостока задавать нормированную плотность теплового излучения как в широком диапазоне ее значений, так и в температурном интервале, что открывает возможность получения температурной зависимости оцененной функции преобразования ПТП на радиационном компараторе.

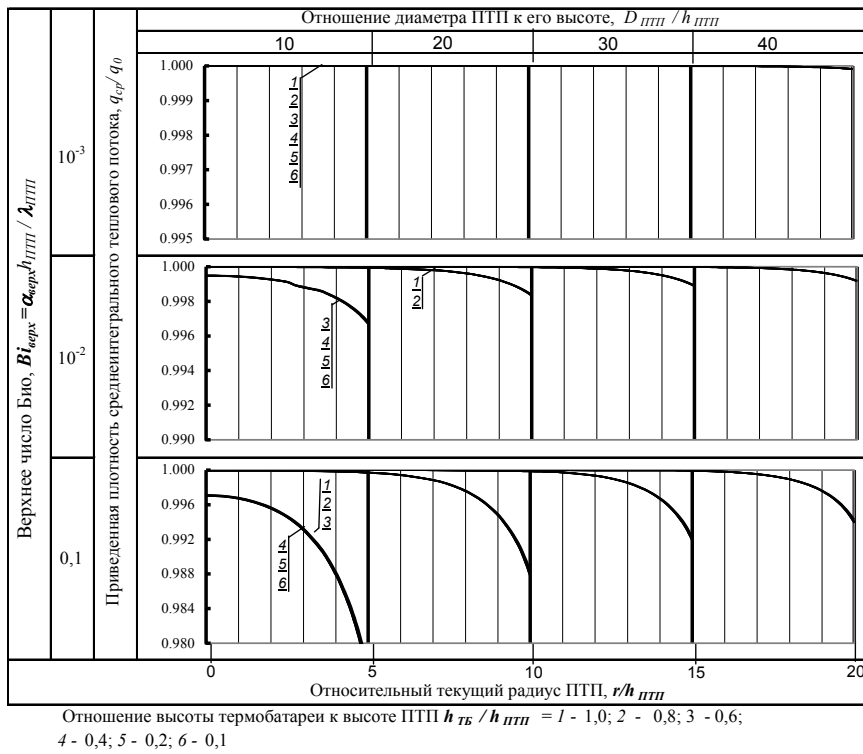


Рис. 11. Приведенные среднееинтегральные тепловые потоки в зависимости от относительного радиуса ПТП при вариации значений верхнего числа Био, отношения высоты термобатареи к высоте ПТП и отношения диаметра ПТП к его высоте при  $R_k/R_{ПТП} = 1$

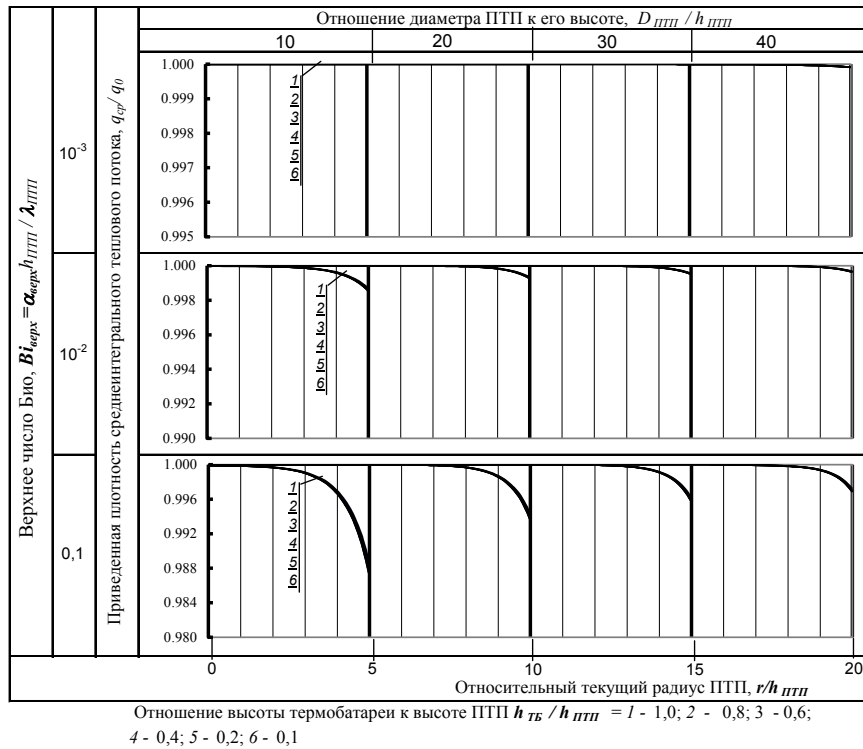


Рис. 12. Приведенные среднееинтегральные тепловые потоки в зависимости от относительного радиуса ПТП при вариации значений верхнего числа Био, отношения высоты термобатареи к высоте ПТП и отношения диаметра ПТП к его высоте при  $R_k/R_{ПТП} = 0$

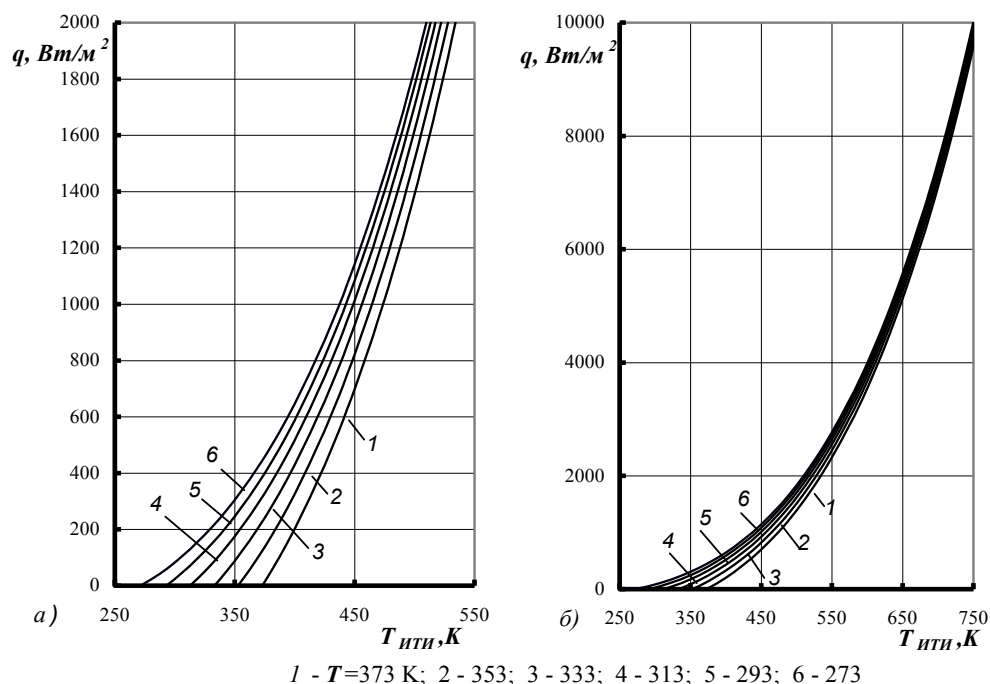


Рис. 13. Зависимости плотности теплового потока от температуры излучателя  $T_{итп}$  при вариации температуры термостатирования  $T_{ТС}$

Установка обеспечивает весь диапазон значений плотности потока теплового излучения, необходимый для аттестации не только приборов серии ИТП, но и всей номенклатуры ПТП (кроме специальных), пользующихся спросом в Украине и странах СНГ.

1. Геращенко О.А. Основы теплотетрии. – К., 1971.  
 2. Исаев С.И., Кожин И.А. и др. Теория тепломассообмена: Учебник для вузов / Под ред. А.И.Леонтьева.- М., 1979. 3. Уонг Х. основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. – М., 1979. 4. Определение тепловых потоков через ограждающие конструкции: Методика М 00013184.5.023-01/ Разработчики Т.Г.Грищенко и др. – К., 2002.