

УДК 536.3

## **Круговые экраны теплового излучения с зависимыми от температуры коэффициентами излучения: расчет переходных и стационарных процессов**

**Х. Ю, С. Ли, С. Ху, З. Ли, А. Чен**

*Циндаоский технологический университет, Циндао, Китай*

E-mail: lxuquan@163.com

Потери тепла излучением являются основным видом тепловых потерь в термальных системах. В настоящей работе проведено численное исследование переходной характеристики двух круговых экранов теплового излучения, вставленных между двумя параллельными круглыми поверхностями с коэффициентами излучения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ . Полагалось, что эти две основные излучающие поверхности и два радиационных экрана имели одинаковые размеры. Также предполагалось, что радиационные экраны имеют различные коэффициенты излучения на верхней ( $\varepsilon_3$  и  $\varepsilon_5$ ) и нижней ( $\varepsilon_4$  и  $\varepsilon_6$ ) поверхностях, которые являются разными, но линейными функциями температуры. Рассматриваемая конфигурация позволяет подробно исследовать в первую очередь переходные температурные и теплообменные характеристики системы. Приводятся некоторые новые результаты по переходным температурным и теплообменным характеристикам системы, таким как влияние местоположения экрана, коэффициент излучения экрана, температурная зависимость коэффициента излучения экрана, размеры системы, температура горячей и холодной поверхностей и коэффициенты излучения горячей и холодной поверхностей. Было замечено, что увеличение температуры первого радиационного экрана при изменении таких параметров как излучательная способность поверхности, расстояние между радиационными экранами или температура горячей поверхности, не обязательно уменьшают температуру второго радиационного экрана.

**Ключевые слова:** круговой экран теплового излучения, переходная характеристика, установившаяся температура экрана, интенсивность теплопередачи, температурно-зависимая излучательная способность.

### **Введение**

Теплопередача излучением является одним из основных видов теплопередачи. Понимание и прогнозирование поведения энергии излучения приобретает решающее значение во многих практических ситуациях, поэтому исследование такого вида теплопередачи не является только теоретической задачей. В высокоэффективных теплоизоляционных материалах принято подавление переноса тепла за счет теплопроводности и конвекции посредством вакуумирования пространства между двумя поверхностями. При этом тепловое излучение становится основным режимом потери тепла даже в низкотемпературных приложениях, таких как изоляция криогенных резервуаров.

Непрозрачные круговые экраны теплового излучения, сделанные из материалов с низкой излучательной способностью (высокой отражательной способностью), используются во многих приложениях с целью снижения результирующего радиационного обмена между горячей и холодной поверхностями. В качестве примера можно привести

размещение тонкого металлического экрана излучения перед краем цилиндрического криогенного топливного бака для защиты его от нежелательного солнечного излучения [1]. В другом приложении холодная панель в нижней части вакуумной камеры нуждается в защите от чрезмерного излучения горячих внутренних поверхностей камер, поэтому необходимая защита обеспечивается размещением радиационного экрана над и близко к панели. В зависимости от применения экраны теплового излучения бывают плоской, цилиндрической и сферической формы. Количество экранов может варьироваться от одного, как в двух вышеупомянутых примерах, до десятков единиц в многослойной теплоизоляции криогенных систем, где экраны укладываются параллельно (обычно 60 единиц на дюйм) и разделяются материалом прокладки с низкой теплопроводностью, например, из полиэстера или нейлона [2–4]. Отметим, что коэффициент излучения верхней стороны экрана может отличаться от коэффициента его нижней стороны [1].

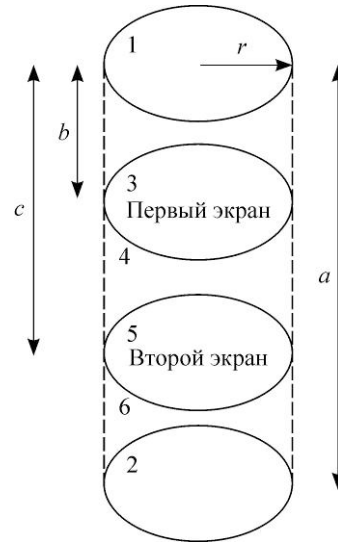
Сетка излучения (сетевой подход) [5–10] обычно применяется в учебниках по теплообмену для анализа эффективности экранов излучения в плоской, цилиндрической и сферической конфигурациях. Авторы работы [8] разработали интерактивную компьютерную программу, которая может быть использована для прогнозирования эффективности конечных плоских, цилиндрических и сферических экранов с постоянными коэффициентами излучения. Авторы [9] допускают вариации коэффициентов излучения верхней и нижней поверхностей экрана как функций косинуса угла излучения от нормали. Эта направленная модель вместе с предположением о больших поверхностях дали аналитическое решение для поведения температуры экрана и чистого радиационного теплообмена между горячими и холодными поверхностями в присутствии экрана. В работе [10] было рассчитано снижение теплоотдачи, достигаемое благодаря двум цилиндрическим серым экранам, состоящим из смеси оксида алюминия, карбида кремния и вольфрама, позволяющим излучательной способности каждого из этих материалов меняться линейно в зависимости от температуры. Был сделан вывод о том, что при использовании двух экранов из разных материалов экран с меньшей излучательной способностью должен быть обращен к поверхности с высокой температурой для большего сокращения теплопередачи. Аналогичный вывод был сделан при повторении эксперимента с тепловым экраном со сферическим излучением [11, 12]. Авторы работы [13] дополнили анализ исследованием сокращения переноса тепла излучением между двумя концентрическими полусферами. В работе [13] была дана оценка теплопередаче и потере мощности в ячейке теплоэлектрического преобразователя энергии со щелочными металлами (АМТЕС) в виде бесконечно длинного цилиндра с электролитом с внутренним подогревом, окруженного коаксиальным экраном с излучением и зеркальным конденсатором. Чтобы проверить правильность теоретического подхода, авторы [14] провели комбинированное аналитико-экспериментальное исследование. Одиночные или множественные полупрозрачные цилиндрические экраны были помещены между двумя серыми диффузно отражающими поверхностями, и было установлено, что расхождение между теорией и экспериментом составило менее 38 %. В работе [15] было описано интересное применение радиационного экрана в быстрой термической обработке, когда экран обеспечивал регулирование температуры подложки вне зависимости от излучательной способности.

Большинство остальных исследований, связанных с изучением экранов теплового излучения, ведутся в отношении криогенной изоляции. Например, авторы [16] написали монографию, посвященную вопросу упрощения расчетов теплообмена с радиационными экранами. В работе [17] рассматривается термодинамическая оптимизация радиационных экранов, используемых в теплозащите криогенных пространств. Авторы [18] определили оптимальные температуры трех радиационных экранов на основе анализа генерации энтропии. В работах [19], [20] изучалась комбинированная оптимизация радиационных экранов и механических опор и были представлены результаты по оптимальным температурам экранов и по оптимальным расстояниям между экранами. В работе [14] было минимизировано влияние излучения от поверхностей конденсатора

Рис. 1. Конечный радиационный экран между двумя параллельными поверхностями.

и компрессора на внутреннюю температуру морозильных камер путем покрытия стены рефрижератора около конденсатора и компрессора алюминиевой фольгой как одним радиационным экраном. Было отмечено, что применение алюминиевой фольги снизило внутреннюю температуру воздуха на 2 К.

Насколько известно авторам, анализ теплообмена между круглыми формами с радиационными экранами между ними до сих пор не проводился. Использование радиационного экрана между такими поверхностями значительно уменьшает теплообмен и повышает эффективность тепловой системы. Целью настоящей работы является изучение переходного и установившегося состояний двух круглых радиационных экранов, вставленных между двумя круглыми серыми поверхностями. Предполагается, что коэффициенты излучения обеих (верхней и нижней) поверхностей экрана являются линейными функциями температуры. При подробном исследовании рассматриваемой конфигурации выявлено влияние нескольких параметров на переходные и установившиеся температуры экранов, теплообмен между поверхностями, энергию экранов и коэффициент теплоотдачи  $s$  и без экранов.



### Математическое моделирование

На рис. 1 изображена круговая серая диффузная поверхность с радиусом  $r$ , обращенная к другой круговой поверхности с идентичным радиусом. Поверхности разделены расстоянием  $a$ . Пусть  $T_1$  и  $T_2$  — это температуры, а  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  — коэффициенты излучения этих поверхностей. Два круглых радиационных экрана с радиусом  $r$  и толщиной  $\delta$  внезапно помещаются между поверхностями. Пространство между двумя основными поверхностями полностью вакуумировано, следовательно, это пространство является термически нейтральной средой. С точки зрения теплового излучения среда между верхней и нижней поверхностями не поглощает, а полностью пропускает излучение. Кроме того, поскольку толщины радиационных экранов очень малы, теплопроводностью экранов можно пренебречь. Это обстоятельство уже отмечалось в литературе [20, 21]. Учитывая это предположение, автоматически исключаящее из моделирования теплопроводность материалов, можно значительно упростить математические уравнения исследуемой системы. Обозначим плотность и удельную теплоемкость материала радиационных экранов как  $\rho$  и  $c_p$ . Пусть  $\varepsilon_3(T_s)$  и  $\varepsilon_5(T_s)$  — коэффициенты излучения верхних поверхностей, а  $\varepsilon_4(T_s)$  и  $\varepsilon_6(T_s)$  — коэффициенты излучения нижних поверхностей экранов. Первый экран размещается на расстоянии  $b$  от верхней поверхности, а второй — на расстоянии  $c$  от верхней поверхности. Предполагалось, что температуры и коэффициенты излучения горячих и холодных поверхностей остаются одинаковыми.

Используя баланс энергии на экранах, получим дифференциальное уравнение, описывающее переходную характеристику экранов, в следующем виде:

$$\rho c_p \delta \frac{dT_{s,34}}{dt} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_{s,34}^4(t))}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{13}} + \frac{1-\varepsilon_3(T_{s,34})}{\varepsilon_3(T_{s,34})}} - \frac{\sigma(T_{s,34}^4(t) - T_{s,56}^4(t))}{\frac{1-\varepsilon_4(T_{s,34})}{\varepsilon_4(T_{s,34})} + \frac{1}{F_{45}} + \frac{1-\varepsilon_5(T_{s,56})}{\varepsilon_5(T_{s,56})}}, \quad (1)$$

$$\rho c_p \delta \frac{dT_{s,56}}{dt} = \frac{\sigma(T_{s,34}^4(t) - T_{s,56}^4(t))}{\frac{1 - \varepsilon_4(T_{s,34})}{\varepsilon_4(T_{s,34})} + \frac{1}{F_{45}} + \frac{1 - \varepsilon_5(T_{s,56})}{\varepsilon_5(T_{s,56})}} - \frac{\sigma(T_{s,56}^4(t) - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_6(T_{s,56})}{\varepsilon_6(T_{s,56})} + \frac{1}{F_{62}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}}, \quad (2)$$

$$T_{s,34}(0) = T_{s,56}(0) = T_{s,i}, \quad (3)$$

где первый член в правой части уравнения (1) обозначает результирующую энергию излучения, получаемую верхней поверхностью экрана от горячей поверхности 1, а второе слагаемое дает результирующую энергию, отдаваемую нижней поверхностью экрана верхней поверхности следующего экрана. Разница между этими членами — есть скорость, с которой накапливается энергия в первом экране, как представлено в левой части уравнения (1). Первый член справа в уравнении (2) обозначает результирующую радиационную энергию, получаемую верхней поверхностью второго экрана от нижней поверхности первого экрана, а второе слагаемое дает чистую энергию, поставляемую нижней поверхностью второго экрана на холодную поверхность. Разница между этими членами — есть скорость, с которой накапливается энергия во втором экране, как представлено в левой части уравнения (2). Уравнение (3) дает начальную ( $t = 0$ ) температуру двух экранов.

Для двух параллельных коаксиальных дисков одинакового радиуса — горячей поверхности 1 и верхней поверхности первого экрана 3 — аналитическое выражение для угловых коэффициентов приводится из работ [1, 8]:

$$F_{13} = \left( X - \sqrt{X^2 - 4} \right) / 2, \quad (4)$$

где  $X = (2R^2 + 1) / R^2$  и  $R = r/a$ . Уравнение (4) может также использоваться для расчета  $F_{45}$  и  $F_{62}$ .

Из работ [1, 9, 10] видно, что коэффициент излучения каждого конкретного материала напрямую зависит от температуры. Хотя это отношение является по сути нелинейным, подобно многим другим явлениям его можно рассматривать как линейное соотношение [22]. В пределах конкретных длин волн линейная функция излучательной способности в зависимости от температуры, рассчитываемой на основе конечных точек, является приемлемой. Исходя из этого, предполагается, что коэффициенты излучения  $\varepsilon_3(T_s)$ ,  $\varepsilon_4(T_s)$ ,  $\varepsilon_5(T_s)$  и  $\varepsilon_6(T_s)$  являются линейными функциями  $T_s$ :

$$\varepsilon_3(T_{s,34}) = \varepsilon_{3,r} (1 + \alpha (T_{s,34} - T_r)), \quad (5)$$

$$\varepsilon_4(T_{s,34}) = \varepsilon_{4,r} (1 + \beta (T_{s,34} - T_r)), \quad (6)$$

$$\varepsilon_5(T_{s,56}) = \varepsilon_{5,r} (1 + \alpha (T_{s,56} - T_r)), \quad (7)$$

$$\varepsilon_6(T_{s,56}) = \varepsilon_{6,r} (1 + \beta (T_{s,56} - T_r)), \quad (8)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — постоянные, а нижний индекс  $r$  обозначает значения при расчетной температуре  $T_r$ .

Мгновенное значение теплового потока между поверхностью 1 и верхней поверхностью первого экрана 3 определяется по формуле:

$$q_{13} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_{s,34}^4(t))}{(1 - \varepsilon_1) / \varepsilon_1 + 1 / F_{13} + (1 - \varepsilon_3(T_{s,34})) / \varepsilon_3(T_{s,34})}. \quad (9)$$

Аналогично, мгновенное значение теплового потока между нижней поверхностью первого экрана (поверхность 4) и верхней поверхностью второго экрана (поверхность 5) определяется как:

$$q_{45} = \frac{\sigma(T_{s,34}^4(t) - T_{s,56}^4(t))}{(1 - \varepsilon_4(T_{s,34})) / \varepsilon_4(T_{s,34}) + 1/F_{45} + (1 - \varepsilon_5(T_{s,56})) / \varepsilon_5(T_{s,56})}. \quad (10)$$

Соответственно, мгновенное значение теплового потока между нижней поверхностью второго экрана 6 и поверхностью 2 определяется как:

$$q_{62} = \frac{\sigma(T_{s,56}^4(t) - T_2^4)}{(1 - \varepsilon_6(T_{s,56})) / \varepsilon_6(T_{s,56}) + 1/F_{62} + (1 - \varepsilon_2) / \varepsilon_2}. \quad (11)$$

Энергия в первом и втором экранах определяется следующим образом:

$$E_{st,34} = q_{13} - q_{45}, \quad (12)$$

$$E_{st,56} = q_{45} - q_{62}. \quad (13)$$

Из-за неудобства обезразмеривания уравнений (1)–(8) в исследовании будут рассмотрены алюминиевые экраны с различными коэффициентами излучения на их верхней и нижней поверхностях и исследованы термические характеристики системы с точки зрения размерных переменных.

### Результаты и обсуждение

Сильно нелинейная система обыкновенных дифференциальных уравнений (1)–(3) решалась численно с использованием хорошо обоснованного метода четвертого-пятого порядка Рунге–Кутты–Фельберга (RK45). Точность этого метода была неоднократно подтверждена в многочисленных приложениях [23]. Для всех численных результатов, представленных здесь, использовались следующие значения переменных, если не указывалось иное:

$a = 1$  м,  $b = 0,3$  м,  $c = 0,4$  м,  $r = 0,2$  м,  $T_1 = 700$  К,  $T_2 = 400$  К,  $T_r = 300$  К,  $T_{s,34}(0) = T_{s,56}(0) = 300$  К,  $\alpha = 0,002$  К<sup>-1</sup>,  $\beta = 0,003$  К<sup>-1</sup>,  $\delta = 0,001$  м,  $c_p = 900$  Дж/(кг·К),  $\rho = 2700$  кг/м<sup>3</sup>,  $\varepsilon_1 = 0,8$ ,  $\varepsilon_2 = 0,6$ ,  $\varepsilon_{3,r} = \varepsilon_{5,r} = 0,3$ ,  $\varepsilon_{4,r} = \varepsilon_{6,r} = 0,2$ .

Шаблонные численные расчеты температур экранов, скорости теплообмена и скорости накопления энергии в экранах, полученные с помощью численного решения, изображены на рис. 1–13.

Рисунки 2, 3 показывают, что при воздействии высокой температуры реакция экрана быстрее в случае, когда он расположен ближе к горячей поверхности ( $d = 0,02$  м). На рисунках указано значение каждого конкретного параметра. Например, на рис. 2 верхняя линия соответствует температуре первого экрана с  $d = 0,02$  м, средняя линия соответствует температуре первого экрана с  $d = 0,05$  м, а нижняя линия соответствует температуре первого экрана с  $d = 0,08$  м. На рис. 2 и 3 время, затрачиваемое экраном для достижения теплового равновесия, варьируется от 8 до 10 минут в зависимости от его расположения (рис. 2).

Из рис. 4 видно, что теплообмен между горячей и верхней поверхностями экрана ( $q_{13}$ ) вначале увеличивается, достигает максимального значения, а затем затухает до значения установившегося состояния. Видно, что пик теплопередачи происходит в первые 100 секунд после вставки экрана. Как следовало ожидать, пик теплопередачи достигается, если экран размещен в самом ближнем положении к горячей поверхности ( $d = 0,02$  м). Поскольку экран достигает более высокой температуры, когда находится

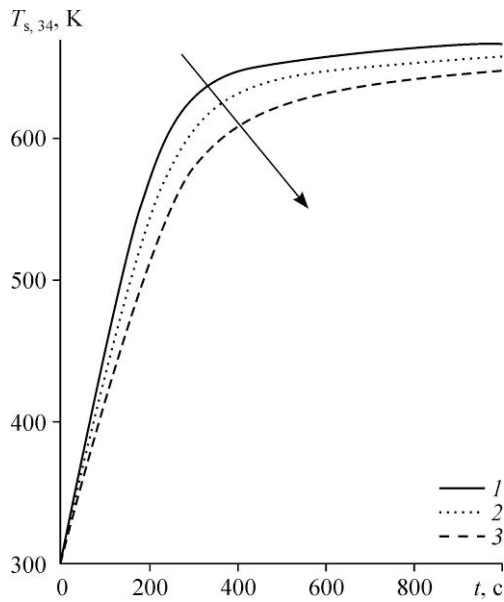


Рис. 2. Влияние положения первого экрана на нестационарную температуру первого экрана.  $d = 0,02$  (1),  $0,05$  (2),  $0,08$  (3) м.

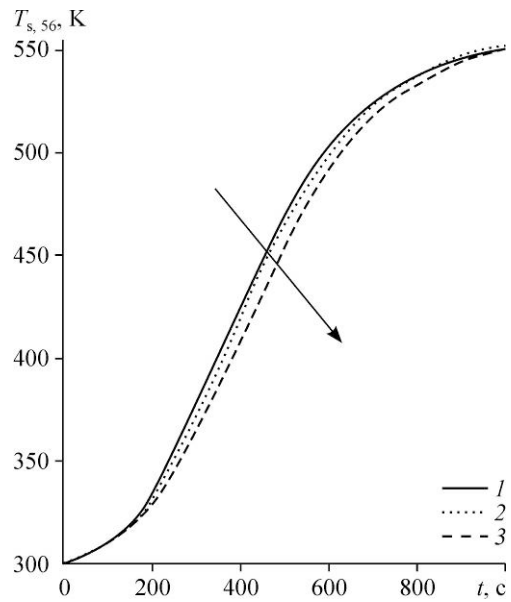


Рис. 3. Влияние положения второго экрана на нестационарную температуру второго экрана. Обозначение см. на рис. 2.

ближе всего к горячей поверхности, он также передает больше энергии от нижней поверхности к холодной поверхности ( $q_{62}$ ), как показано на кривых рис. 4. На рис. 5 видно, что в начале переноса  $q_{62}$  отрицательно, так как в это время температура экрана меньше, чем температура поверхности 2, зафиксированная на 400 К.

Предполагая, что верхняя поверхность экрана серая, диффузная и фиксированная в месте расположения экрана, мы графически изобразили влияние  $\varepsilon_3$  и  $\varepsilon_5$  на тепловые характеристики системы на рис. 6–8. Рисунки 6 и 7 показывают, что по мере уменьшения

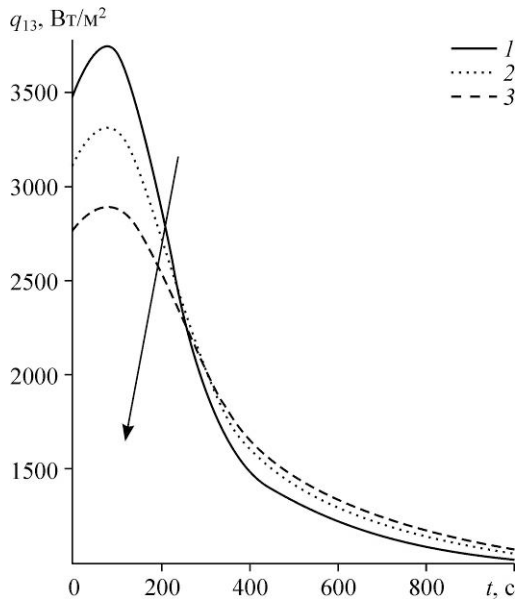


Рис. 4. Влияние положения первого экрана на теплоперенос между горячей поверхностью и верхней поверхностью первого экрана. Обозначение см. на рис. 2.

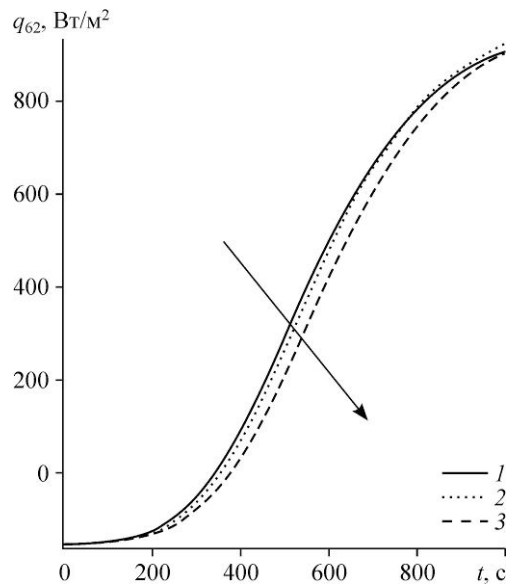


Рис. 5. Влияние положения первого экрана на теплоперенос между нижней поверхностью второго экрана и холодной поверхностью. Обозначение см. на рис. 2.

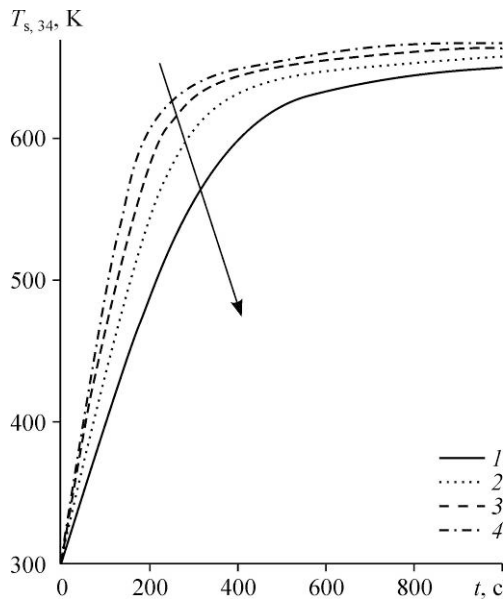


Рис. 6. Влияние коэффициента излучения верхней поверхности экрана на температурную реакцию первого экрана.  $\epsilon_{3,r} = \epsilon_{5,r} = 0,5$  (1), 0,4 (2), 0,3 (3), 0,2 (4).

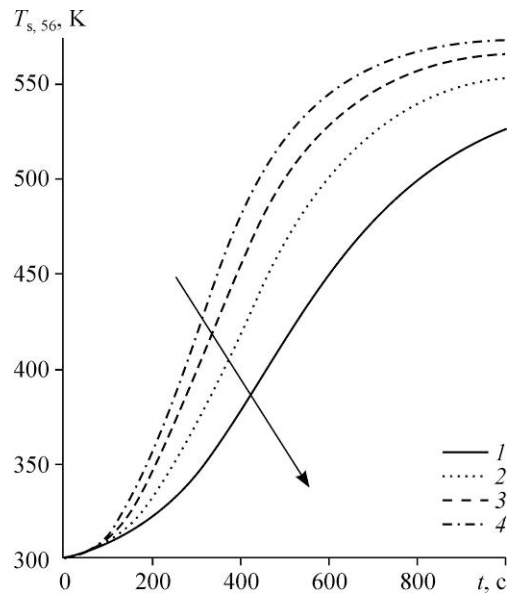


Рис. 7. Влияние коэффициента излучения верхней поверхности экранов на температурную реакцию второго экрана. Обозначение см. на рис. 6.

обоих коэффициентов ( $\epsilon_3$  и  $\epsilon_5$ ) температура экрана становится ниже за счет постепенного снижения количества энергии, поглощаемой верхней поверхностью экрана. Однако время, необходимое экрану для достижения теплового равновесия, увеличивается по мере уменьшения  $\epsilon_3$  и  $\epsilon_5$ . Рисунок 8 показывает, что при использовании различных параметров излучательной способности значение теплопереноса между двумя экранами заметно отличается.

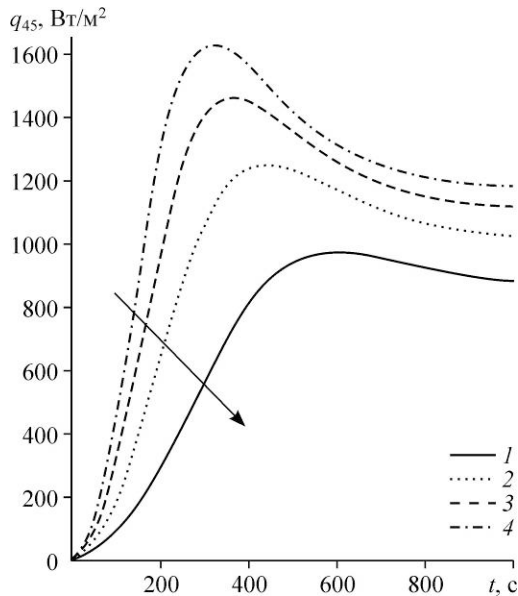


Рис. 8. Влияние коэффициента излучения верхней поверхности экрана на теплоперенос между нижней поверхностью первого экрана и верхней поверхностью второго экрана. Обозначение см. на рис. 6.

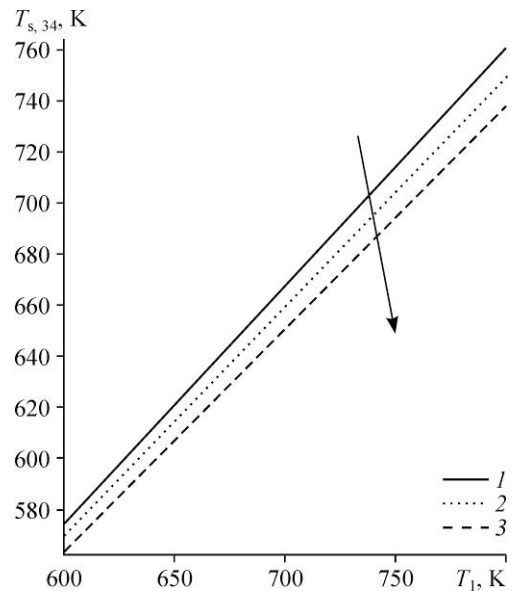


Рис. 9. Влияние положения первого экрана и температуры поверхности 1 на установившуюся температуру первого экрана. Обозначение см. на рис. 2.

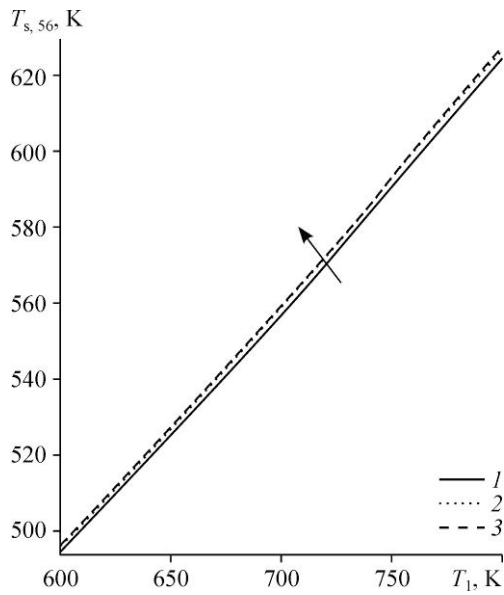


Рис. 10. Влияние положения первого экрана и температуры поверхности на установившуюся температуру второго экрана. Обозначение см. на рис. 2.

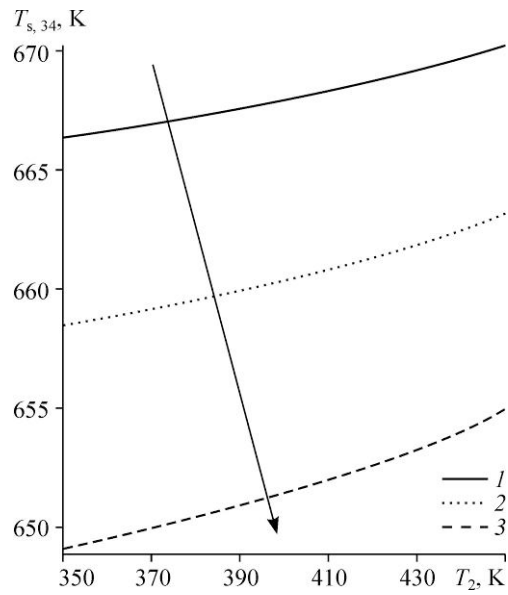


Рис. 11. Влияние положения первого экрана и температуры поверхности 2 на установившуюся температуру первого экрана. Обозначение см. на рис. 2.

При уменьшении верхнего параметра излучательной способности обоих экранов в паре  $\varepsilon_3, \varepsilon_5$  тепловой поток между двумя радиационными экранами  $q_{45}$  становится ниже (см. рис. 8). Наблюдаются интересные тенденции подъема и спада величины теплового потока между двумя радиационными экранами, что обусловлено переходной особенностью этого явления.

Рисунок 9 показывает влияние положения первого экрана ( $b$ ) и температуры  $T_1$  (поверхность 1) на установившуюся температуру первого экрана. При температуре  $T_2$ , зафиксированной на 400 К, температура экрана возрастает по мере роста  $T_1$  и уменьшения  $d$ . Однако, как можно видеть на рис. 10, эта тенденция противоположна для температуры второго экрана. Это подтверждает предположение, что увеличение значения температуры в одном экране может быть не равно уменьшению температуры в другом экране. Полученный факт ранее не исследовался в литературе. Аналогичное поведение можно увидеть на рис. 11 и 12, которые подтверждают приведенные выше обсуждения. Хотя увеличение расстояния уменьшает температуру первого радиационного экрана (рис. 11), это приводит к увеличению значения температуры для второго радиационного экрана. Данный факт может объясняться тем, что увеличение расстояния между первым

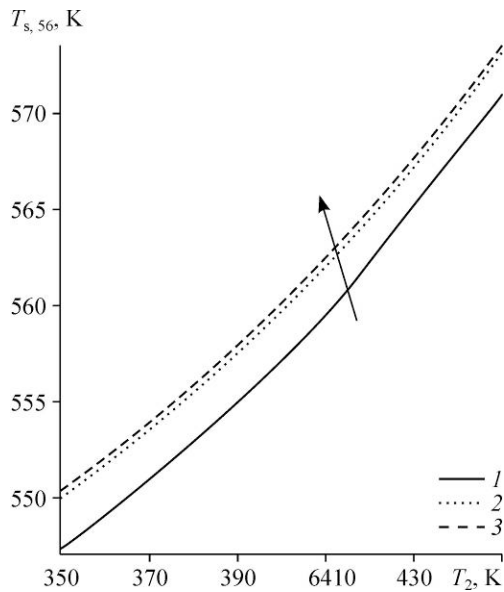


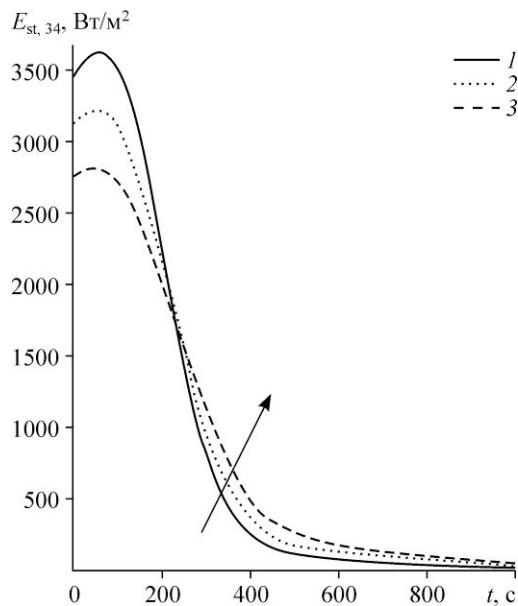
Рис. 12. Влияние положения первого экрана и температуры поверхности 2 на установившуюся температуру второго экрана. Обозначение см. на рис. 2.



Рис. 13. Влияние положения первого экрана на накопление энергии в первом экране.  
Обозначение см. на рис. 2.

радиационным экраном и горячей поверхностью уменьшает расстояние между первым и вторым радиационными экранами, а следовательно и температура второго радиационного экрана увеличивается.

На рис. 13 представляет эталонные данные о накопленной энергии в первом экране по отношению к положению экрана в пределах рассматриваемой тепловой системы. Как видно, значение накопленной энергии сначала возрастает, достигает пика, а затем начинает угасать до своего равновесного значения, которое равно нулю. Эта тенденция может быть рассмотрена по аналогии с рис. 4 и не требует подробного обсуждения.



### Заключение

Проблема радиационной теплопередачи между двумя круговыми поверхностями изучалась с помощью численного метода RK45 для случая, когда два экрана излучения вставлялись между горячей и холодной круговыми поверхностями. Были рассмотрены коэффициенты излучения, зависящие от температуры поверхности, и проанализированы различные положения экранов излучения. Было отмечено, что тепловой поток излучения между вторым радиационным экраном и холодной поверхностью может быть отрицательным в течение первых секунд моделирования переходного процесса переноса. При использовании разных значений коэффициентов излучения экранов было отмечено, что переходная температура сильно зависит от излучательной способности поверхностей. Получено, что наблюдаемое увеличение температуры первого радиационного экрана не ведет к увеличению второго радиационного экрана.

### Список обозначений

$a$ — расстояние между поверхностями 1 и 2,	$T_1$ — температура поверхности 1 (горячая поверхность),
$b$ — расстояние между поверхностью 1 и экраном 1,	$T_2$ — температура поверхности 2 (холодная поверхность),
$c$ — расстояние между поверхностью 1 и экраном 2,	$T_r$ — эталонная температура,
$c_p$ — удельная теплоемкость обоих экранов,	$T_s(t)$ — температура экрана в любой момент времени,
$F_{ij}$ — коэффициент видимости между поверхностями $i$ и $j$ ,	$T_{s,i}$ — начальная температура экрана,
$q_{ij}$ — теплообмен между поверхностями $i$ и $j$ ,	
$t$ — время,	

### Греческие символы

$\alpha$ — измерения вариаций излучательной способности $\varepsilon_3$ в зависимости от температуры,	$\varepsilon_4$ — излучательная способность нижней поверхности экрана 1,
$\beta$ — измерения вариаций излучательной способности $\varepsilon_4$ в зависимости от температуры,	$\varepsilon_5$ — излучательная способность верхней поверхности экрана 2,
$\delta$ — толщина обоих экранов,	$\varepsilon_6$ — излучательная способность нижней поверхности экрана 2,
$\varepsilon_1$ — излучательная способность поверхности 1,	$\rho$ — плотность материала обоих экранов,
$\varepsilon_2$ — излучательная способность поверхности 2,	$\sigma$ — постоянная Стефана-Больцмана.
$\varepsilon_3$ — излучательная способность верхней поверхности экрана 1,	

### Список литературы

1. **Bergman T.L., Levine A.S., Incropera F.P., DeWitt D.P.** Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th Ed. 2011. 1048 p.
2. **Johnson W.L.** Thermal performance of cryogenic multilayer insulation at various layer spacings // M.S. Thesis, University of Central Florida, Orlando, FL, 2010.
3. **Spacecraft Thermal Control Handbook. Vol. II: Cryogenics / Ed. M. Donanbedian.** The Aerospace Press, El-Segundo, CA, 2003. 641 p.
4. **Krishnaprakash C.K., Badari K.N., Dutta P.** Heat transfer correlations for multilayer insulation systems // Cryogenics. 2000. Vol. 40. P. 431–435.
5. **Oppenheim A.K.** Radiation analysis by the network method // Trans. ASME. 1956. Vol. 27. P. 725–735.
6. **Shurcliff W.A.** Transmission and reflection loss of multi-plate planar window of a solar radiation collector: formulas and tabulations of results for the case of  $n = 1.5$  // Solar Energy. 1974. Vol. 16. P. 149–154.
7. **Micco C.D., Aldao C.M.** On the net radiation method for heat transfer // European J. Physics. 2003. Vol. 24. P. 81–89.
8. **Aziz A., Suseno J.** Interactive computer program for the analysis and design of radiation shields // Int. J. Applied Engng Education. 1985. Vol. 1. P. 213–233.
9. **Howell J.R., Siegel R., Mengüç M.P.** Thermal radiation heat transfer. 5th Ed. N.Y.: Taylor and Francis, 2010. 987 p.
10. **Saedodin S., Torabi M., Maghsoundlou N., Kandelousi J.M.** Calculation of reduction heat transfer using cylindrical radiation shields // Int. Review of Mechanical Engng. 2010. Vol. 4. P. 924–928.
11. **Saedodin S., Torabi M., Kandelousi J.M., Maghsoundlou N.** Application of net radiation method for optimization and calculation of reduction heat transfer using spherical radiation shields // World Applied Sci. J. 2010. Vol. 11. P. 457–461.
12. **Saedodin S., Barforoush M.S.M., Torabi M.** Calculation of reduction heat transfer using hemispherical shields with temperature-dependent emissivity // J. Applied Sci. 2011. Vol. 11. P. 2238–2243.
13. **Тораби М., Азис А., Саедодин С.** Применение полусферических радиационных экранов со степенью черноты, зависящей от температуры, в присутствии источника/стока тепла, магнитного поля и теплового излучения // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 4. P. 497–505.
14. **Neill W., Rasmussen J.R., Olsen S.L.** Effect of radiation shields on power and efficiency of internally heated AMTEC cell // Proc Intersociety Energy Conversion Engng Conf. 1992. Vol. 3. P. 117–121.
15. **Guers S., Slanik M., Scott D., Rabi Baliga B.** A study of semitransparent cylindrical radiation shields // Proc Intersociety Energy Conversion Engng Conf. 2001. Vol. 1. P. 637–642.
16. **Timans P.J., Morishige R.N., Wasserman Y.** Emissivity-independent rapid thermal processing using radiation shield // Proc. Materials Research Society Symp., 1997. Vol. 470. P. 57–62.
17. **Osburn J., Sollami B.J.** Simp. calculations of thermal radiation shields // Chemical Engineer. 1969. Vol. 76. P. 139–142.
18. **Bejan A.** Entropy generation minimization. CRC Press, Boca Raton, 1996.
19. **Маргынковский В.С., Чейлях В.Т., Шнайд И.М.** Термодинамическая эффективность охлаждаемых экранов в вакуумной низкотемпературной изоляции // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1971. № 2. С. 118–122.
20. **Eyssa Y.M., Okasha O.** Thermodynamic optimization of thermal radiation shields for cryogenic apparatus // Cryogenics. 1978. Vol. 18. P. 305–307.
21. **Aziz A.** Heat conduction with maple. R.T. Edwards. Philadelphia, 2006. 279 p.
22. **DeWitt D.P., Nutter G.D.** Theory and practice of radiation thermometry. 1th Ed. Wiley-Interscience, 1988. 1138 p.
23. **Chato J.C., Khodadadi J.M.** Optimization of cooled shields in insulations // ASME J. Heat Transfer. 1984. Vol. 106. P. 871–875.

*Статья поступила в редакцию 11 марта 2015 г.,  
после доработки — 4 мая 2015 г.*