

УДК 536.3

## **Применение полусферических радиационных экранов со степенью черноты, зависящей от температуры, для снижения теплообмена между двумя концентрическими полусферами**

**М. Тораби<sup>1</sup>, А. Азис<sup>2</sup>, С. Саедодин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Университет Семнана, Семнан, Иран*

<sup>2</sup>*Университет Гонзага, Спокан, США*

E-mail: Torabi\_mech@yahoo.com

Метод сальдо применен для расчета передачи тепла излучением между двумя концентрическими полусферами, разделенными двумя полусферическими защитными экранами, степень черноты которых зависела от температуры. Три различных материала использовались для изготовления радиационных экранов: оксид алюминия, карбид кремния и вольфрам. Снижение теплообмена за счет экранов зависит не только от характеристик поверхности двух экранов, но и от расположения экранов. Представлены наглядные примеры, иллюстрирующие влияние температурно-зависимой степени черноты и расположения экранов на процентное снижение теплообмена. Результаты анализа могут быть использованы в решении подобных задач.

**Ключевые слова:** система концентрических полусфер, радиационные экраны, степень черноты поверхности, зависящая от температуры, расположения экранов, метод сальдо.

### **Введение**

Теплообмен излучением — один из основных видов теплообмена, который во многих случаях приобретает первостепенное значение по сравнению с теплопроводностью и конвекцией. Например, обычно в высокоэффективных изоляционных материалах теплообмен теплопроводностью и конвекцией подавляется за счет удаления среды из пространства между двумя поверхностями. Это делает тепловое излучение преобладающим видом теплообмена даже для систем, работающих при низких температурах, как в криогенных резервуарах-хранилищах. Один из способов снижения теплообмена излучением между двумя поверхностями — это использование материалов с высокой степенью черноты поверхности. Однако он не всегда жизнеспособен. Поэтому альтернативным, часто используемым подходом является применение радиационных экранов между теплообменными поверхностями [1]. Эти экраны не отводят энергию из системы, они лишь создают дополнительное термическое сопротивление на пути теплового потока, что приводит к снижению общего теплообмена между первоначальными теплообменными поверхностями. Кроме использования для целей теплообмена, радиационные экраны также используют в медицинской и стоматологической практике [2–4]. С целью снижения теплообмена радиационные экраны изготавливаются из материалов

с низкой степенью черноты (высокой отражательной способностью) для минимизации радиационного теплообмена между горячей и холодной поверхностями. Кроме того, степени черноты поверхностей радиационного экрана могут отличаться [5]. Анализ радиационного теплообмена между поверхностями, разделенными радиационными экранами, часто проводится по методу сальдо. Подобные балансовые методы также используются для анализа других видов теплообмена, таких как естественная или вынужденная конвекция [6–9]. Метод также полезен для расчета радиационного теплообмена между отдельными поверхностями в таких системах, как многослойные плоские покрытия солнечных коллекторов и дымоходов [10–12].

Для нового применения метода сальдо авторы работы [13] ввели концепцию результирующего пропускания и вывели замкнутое выражение для результирующего излучения между двумя параллельными частично поглощающими и отражающими серыми пластинами, разделенными одним радиационным экраном. Они также обобщили метод результирующего пропускания для сферической и цилиндрической формы. В работе [14] было обнаружено, что температура в морозильной камере может быть снижена на 2 К за счет покрытия стенок холодильника у конденсатора и компрессора алюминиевой фольгой, действующей как тепловой барьер. Достаточно полное представление метода можно найти в книге [15]. Недавно был исследован теплообмен излучением между двумя полусферическими поверхностями с одним и двумя радиационными экранами и рассчитано снижение потока излучения [16]. Данная модель допускает изменение степени черноты при изменении температуры и учитывает угловые коэффициенты между поверхностями. Были представлены три примера для иллюстрации влияния температурно-зависимой степени черноты на снижение теплообмена при использовании одного и двух тепловых экранов. Подобные расчеты для цилиндрических экранов проведены в работе [17].

В настоящей работе обсуждается проблема радиационного обмена между полусферами с одним и двумя радиационными экранами и возможности оптимизации за счет изменения материала радиационных экранов. Рассматриваются три материала: оксид алюминия, карбид кремния и вольфрам. Выбор этих материалов позволят изучить разные излучательно-температурные характеристики. В то время как степень черноты вольфрама существенно увеличивается с температурой, степень черноты оксида алюминия значительно снижается с ростом температуры. С другой стороны, карбид кремния имеет степень черноты, слабо зависящую от температуры. Конфигурации, исследованные в этой работе, используются не только в промышленности, но и в космической и военной промышленности для изготовления головных частей космических кораблей и баллистических ракет.

### 1. Математическое моделирование

Рассмотрим две концентрических полусферы, как показано на рис. 1, а. Для анализа делаются следующие упрощающие допущения:

- 1 — все поверхности являются диффузными и серыми;
- 2 — в пространстве между полусферами — вакуум;
- 3 — сопротивление теплопроводности радиационных экранов пренебрежимо мало;
- 4 — температура горячей и холодной полусферических поверхностей сохраняется постоянной для всех расчетов;
- 5 — две концентрических полусферы, все экраны находятся в радиационном равновесии;
- 6 — степени черноты внутренней и внешней поверхностей экрана одинаковы.

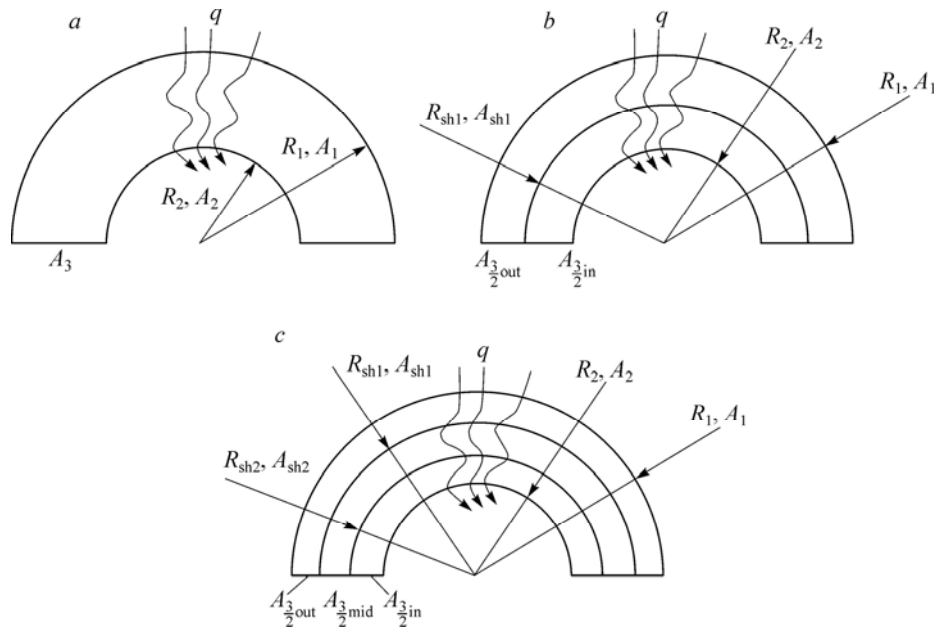


Рис. 1. Поперечный разрез двух концентрических полусфер. Без радиационного (а), с радиационным (б), с двумя радиационными (с) экранами.

Излучение между двумя серыми конечными поверхностями моделируется как излучение между двумя черными поверхностями с тремя сопротивлениями между ними, двумя поверхностными сопротивлениями, связанными с серой природой поверхности, и пространственным сопротивлением, которое свидетельствует о том, что излучение от одной поверхности полностью не задерживается другой. В целом, степень черноты поверхности  $\varepsilon$  является функцией длины волны и температуры поверхности, т. е.  $\varepsilon = \varepsilon(\lambda, T)$ . Особый тип поверхности, называемой серой диффузной поверхностью, определяется как поверхность, у которой степень черноты не зависит от длины волны и направления [18]. Для черной поверхности, у которой  $\varepsilon = 1$ , излучение, испускаемое поверхностью в единицу времени с единицы площади, дается выражением:

$$E_b = \sigma T^4. \tag{1}$$

С помощью метода сальдо результирующий радиационный поток между внешней и внутренней поверхностями двух концентрических полусфер без экранов (рис. 1, а) может быть рассчитан как:

$$(Q_{\text{net}})_{\text{without-shield}} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{R_{12}} + \frac{E_{b1} - E_{b3}}{R_{13}}, \tag{2}$$

где

$$E_{b1} - E_{b2} = \sigma(T_1^4 - T_2^4), \tag{3}$$

$$E_{b1} - E_{b3} = \sigma(T_1^4 - T_3^4), \tag{4}$$

$$R_{12} = \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{1-2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}, \tag{5}$$

$$R_{13} = \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{1-3}} + \frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3 A_3}. \tag{6}$$

Подставляя уравнения (3)–(6) в уравнение (2), мы получаем

$$(Q_{\text{net}})_{\text{without-shield}} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{1-2}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} + \frac{\sigma(T_1^4 - T_3^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{1-3}} + \frac{1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3 A_3}}, \quad (7)$$

где угловые коэффициенты  $F_{1-2}$  и  $F_{1-3}$  могут рассчитываться с использованием следующего выражения, выведенного в [19]:

$$F_{3-2} = \frac{1}{2\pi} \left\{ -\left(R^2 - 1\right)^{0,5} + R^2 \tan^{-1} \left( \frac{1}{R^2 - 1} \right)^{0,5} + 2 \tan^{-1} \left( R^2 - 1 \right)^{0,5} - \frac{\pi}{2} \right\}. \quad (8)$$

Используя соотношение взаимности и алгебру угловых коэффициентов, получим

$$F_{1-2} = \frac{1}{R^2} \times \left\{ \frac{5}{4} - \frac{1}{2\pi} \left\{ -\left(R^2 - 1\right)^{0,5} + R^2 \tan^{-1} \left( \frac{1}{R^2 - 1} \right)^{0,5} + 2 \tan^{-1} \left( R^2 - 1 \right)^{0,5} \right\} \right\}, \quad (9)$$

$$F_{1-3} = \frac{R^2 - 1}{2R^2} \times \left\{ 1 - \frac{1}{2\pi} \left\{ -\left(R^2 - 1\right)^{0,5} + R^2 \tan^{-1} \left( \frac{1}{R^2 - 1} \right)^{0,5} + 2 \tan^{-1} \left( R^2 - 1 \right)^{0,5} - \frac{\pi}{2} \right\} \right\}, \quad (10)$$

где

$$R = R_1 / R_2. \quad (11)$$

Чтобы сравнить теплообмен между поверхностями с радиационными экранами и без них, результирующий тепловой поток между внешней и внутренней поверхностями с одним радиационным экраном может быть рассчитан как:

$$(Q_{\text{net}})_{\text{with-one-shield}} = Q_{1-(3/2)\text{out}} + Q_{\text{sh}1-(3/2)\text{in}} + Q_{\text{sh}1-2}, \quad (12)$$

где  $Q_{1-(3/2)\text{out}}$ ,  $Q_{\text{sh}1-(3/2)\text{in}}$  и  $Q_{\text{sh}1-2}$  могут быть определены с помощью следующих выражений:

$$Q_{1-(3/2)\text{out}} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_3^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{1-(3/2)\text{out}}} + \frac{1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3 A_{(3/2)\text{out}}}}, \quad (13)$$

$$Q_{\text{sh}1-(3/2)\text{in}} = \frac{\sigma(T_{\text{sh}1}^4 - T_3^4)}{\frac{1-\varepsilon_{\text{sh}1}}{\varepsilon_{\text{sh}1} A_{\text{sh}1}} + \frac{1}{A_{\text{sh}1} F_{\text{sh}1-(3/2)\text{in}}} + \frac{1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3 A_{(3/2)\text{in}}}}, \quad (14)$$

$$Q_{\text{sh}1-2} = \frac{\sigma(T_{\text{sh}1}^4 - T_2^4)}{\frac{1-\varepsilon_{\text{sh}1}}{\varepsilon_{\text{sh}1} A_{\text{sh}1}} + \frac{1}{A_{\text{sh}1} F_{\text{sh}1-2}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}}, \quad (15)$$

тогда как  $T_{\text{sh}1}$  и  $\varepsilon_{\text{sh}1}$  определяются из следующего уравнения:

$$Q_{1-\text{sh}1} = Q_{\text{sh}1-(3/2)\text{in}} + Q_{\text{sh}1-2}. \quad (16)$$

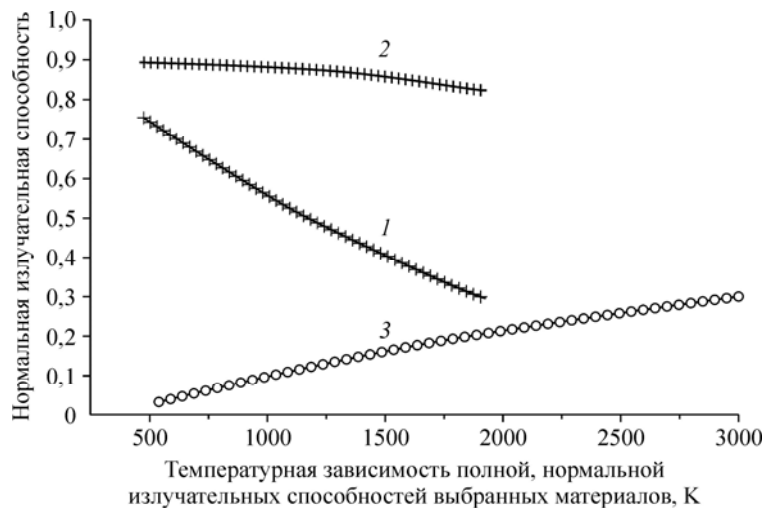


Рис. 2. Степень черноты в направлении нормали к поверхности как функция температуры [5].  
1 — оксид алюминия, 2 — карбид кремния, 3 — вольфрам.

Как упоминалось ранее, степень черноты экрана — это функция температуры. Из-за того, что степень черноты и температура каждого экрана неизвестны, было разработано представление данных (рис. 2) в виде полинома. Это полиномиальное уравнение вместе с (16) дает два нелинейных алгебраических уравнения с двумя неизвестными  $T_{sh1}$  и  $\varepsilon_{sh1}$ , которые решались с помощью пакета MATLAB, применяя соответствующее начальное приближение и программу **fsolve**, решение системы проводилось квази-ньютоновским методом. Итерации повторялись до разницы в  $10^{-12}$ . Это обеспечило очень высокую точность численных результатов. Таким же образом, как для одного экрана, чистый теплообмен может быть определен для двух экранов, помещенных между основными поверхностями

$$(Q_{net})_{\text{with-two-shield}} = Q_{1-(3/2)\text{out}} + Q_{sh1-(3/3)\text{mid}} + Q_{sh2-(3/3)\text{in}} + Q_{sh2-2}. \quad (17)$$

Для расчета  $T_{sh1}$ ,  $T_{sh2}$ ,  $\varepsilon_{sh1}$  и  $\varepsilon_{sh2}$  были предложены два полинома для представления данных по степени черноты двух материалов (см. рис. 2). Эти два полинома вместе с последующими уравнениями:  $Q_{1-sh1} = Q_{sh1-(3/3)\text{mid}} + Q_{sh1-sh2}$  и  $Q_{sh1-sh2} = Q_{sh2-(3/3)\text{in}} + Q_{sh2-2}$ , дают четыре нелинейных алгебраических уравнения для четырех неизвестных  $T_{sh1}$ ,  $T_{sh2}$ ,  $\varepsilon_{sh1}$  и  $\varepsilon_{sh2}$  которые вновь решаются в среде MATLAB, применяя соответствующее начальное приближение, и при помощи программы **fsolve** с использованием квази-ньютоновского метода. Разность между итерациями  $10^{-12}$  устанавливалась для прекращения итерационного процесса, который, как отмечено выше, давал очень точные численные результаты.

## 2. Примеры расчетов

Используя стратегию решения, выведенную в разделе 1, проведем численные расчеты снижения теплообмена между двумя концентрическими полусферами при расположении между ними одного или двух радиационных экранов, как показано на рис. 1. Расчеты проводятся для всех трех материалов, представленных на рис. 2.

**Пример 1.** Рассмотрим две концентрические полусферы (см. рис. 1, а). Как упоминалось ранее, пространство между этими двумя полусферами отделялось от внешнего пространства пластиной  $A_3$ . Температура внешней полусферы — 873,15 °К, ее радиус — 100 см, а степень черноты — 0,28. Температура внутренней полусферы — 330 °К, радиус — 50 см, а степень черноты — 0,13. Температура пластины  $A_3$  — 330 °К, а степень черноты — 0,13. Если один экран радиуса 75 см помещается между наружной и внутренней полусферами (рис. 1, б), результирующий поток, температуру и степень черноты экрана можно рассчитать следующим образом:

$$(Q_{\text{net}})_{\text{without-shield}} = 14649,6466 \text{ W}.$$

Для экрана из оксида алюминия:

$$(Q_{\text{net}})_{\text{with-one-shield}} = 13177,3929 \text{ W}, \quad T_{\text{sh1}} = 821,7554^\circ \text{K}, \quad \varepsilon_{\text{sh1}} = 0,6180;$$

снижение теплового потока в процентах составляет:

$$\begin{aligned} & \frac{(Q_{\text{net}})_{\text{without-shield}} - (Q_{\text{net}})_{\text{with-one-shield}}}{(Q_{\text{net}})_{\text{without-shield}}} \times 100 = \\ & = \frac{14649,6466 - 13177,3929}{14649,6466} \times 100 = 10,0497 \%. \end{aligned}$$

Таким же образом для экрана из карбида кремния:

$$(Q_{\text{net}})_{\text{with-one-shield}} = 13614,0120 \text{ W}, \quad T_{\text{sh1}} = 827,8050^\circ \text{K}, \quad \varepsilon_{\text{sh1}} = 0,8846;$$

процентное снижение теплового потока составляет:

$$\frac{14649,6466 - 13614,0120}{14649,6466} \times 100 = 7,0693 \%.$$

И наконец, для вольфрамового экрана:

$$(Q_{\text{net}})_{\text{with-one-shield}} = 8512,8369 \text{ W}, \quad T_{\text{sh1}} = 745,8773^\circ \text{K}, \quad \varepsilon_{\text{sh1}} = 0,0668;$$

процентное снижение теплового потока составляет:

$$\frac{14649,6466 - 8512,8369}{14649,6466} \times 100 = 41,8904 \%.$$

**Пример 2.** Рассмотрим две концентрические полусферы из примера 1. Если два экрана из одинакового материала для снижения теплообмена между внутренней полусферой и внешним пространством располагаются на радиусах 66,67 и 83,33 см (рис. 1, с), тепловой поток, снижение теплового потока в процентах, температуру и степень черноты радиационных экранов можно рассчитать следующим образом:

$$(Q_{\text{net}})_{\text{without-shield}} = 14649,6466 \text{ W}.$$

Для экрана из оксида алюминия, используя рис. 2 и решая уравнения (15)–(17) совместно, получим:

$$(Q_{\text{net}})_{\text{with-one-shield}} = 11943,0966 \text{ W},$$

$$T_{\text{sh1}} = 825,9366^\circ \text{K}, \quad \varepsilon_{\text{sh1}} = 0,6165, \quad T_{\text{sh2}} = 790,3873^\circ \text{K}, \quad \varepsilon_{\text{sh2}} = 0,6292;$$

процентное снижение теплового потока составляет:

$$\begin{aligned} & \frac{(Q_{\text{net}})_{\text{without-shield}} - (Q_{\text{net}})_{\text{with-two-shields}}}{(Q_{\text{net}})_{\text{without-shield}}} \times 100 = \\ & = \frac{14649,6466 - 11943,0966}{14649,6466} \times 100 = 18,4751 \%. \end{aligned}$$

Таким же образом для экрана из карбида кремния:

$$(Q_{\text{net}})_{\text{with-one-shield}} = 12655,7126 \text{ W},$$

$$T_{\text{sh1}} = 829,3988^\circ \text{K}, \quad \varepsilon_{\text{sh1}} = 0,8846, \quad T_{\text{sh2}} = 805,5816^\circ \text{K}, \quad \varepsilon_{\text{sh2}} = 0,8851;$$

процентное снижение теплового потока составляет:

$$\frac{14649,6466 - 12655,7126}{14649,6466} \times 100 = 13,6107 \%.$$

И наконец, для вольфрамового экрана:

$$(Q_{\text{net}})_{\text{with-one-shield}} = 6634,3749 \text{ W},$$

$$T_{\text{sh1}} = 793,2673^\circ \text{K}, \quad \varepsilon_{\text{sh1}} = 0,0732, \quad T_{\text{sh2}} = 647,0081^\circ \text{K}, \quad \varepsilon_{\text{sh2}} = 0,0530;$$

процентное снижение теплового потока составляет:

$$\frac{14649,6466 - 6634,3749}{14649,6466} \times 100 = 54,7130 \%.$$

На основании этих двух примеров можно сделать вывод, что с помощью одного вольфрамового экрана с низкой степенью черноты можно получить снижение теплообмена больше, чем при использовании двух радиационных экранов из оксида алюминия или карбида кремния с относительно высоким значением степени черноты.

**Пример 3.** Рассмотрим две концентрические полусферы из примера 1. Если два экрана из разных материалов для снижения теплообмена между внутренней полусферой и внешним пространством располагаются на радиусах 66,67 и 83,33 см (рис. 1, с), снижение теплового потока в процентах, температуру и степень черноты радиационного экрана можно рассчитать аналогично примеру 2. Температура, степень черноты, результирующий тепловой поток и процентное снижение теплового потока для шести моделей показаны в таблице.

Из таблицы видно, что модель № 5 наиболее подходит для снижения теплообмена между двумя концентрическими полусферами, если мы хотим использовать два радиационных экрана из разных материалов. Интересно отметить, что несмотря на то, что температуры радиационных экранов модели № 6 ниже, чем температуры модели № 5, результирующий радиационный поток и его процентное снижение у модели № 6 ниже, чем у модели № 5. Это происходит из-за более высокой степени черноты второго радиационного экрана модели № 6. На основании таблицы можно сделать вывод о том, что, если мы хотим выбрать лучшую комбинацию двух радиационных экранов из разных материалов, предпочтительно расположить экраны с более низкой степенью черноты ближе к поверхности с относительно высокой температурой.

Таблица

## Процентное снижение результирующего теплового потока, температуры и степени черноты двух радиационных экранов из разных материалов

Модель	Экран на радиусе 66,67 см			Экран на радиусе 83,33 см			$(Q_{\text{net}})_{\text{with-two-shields}}, W$	Процентное снижение теплового потока, %
	Материал	Температура, °К	Степень черноты	Материал	Температура, °К	Степень черноты		
№ 1	Оксид алюминия	824,1668	0,6171	Карбид кремния	795,2574	0,8852	12230,8590	16,5108
№ 2	Оксид алюминия	845,2122	0,6097	Вольфрам	725,2736	0,0639	8707,0776	40,5645
№ 3	Карбид кремния	831,0985	0,8846	Оксид алюминия	800,1369	0,6257	12332,1286	15,8196
№ 4	Карбид кремния	848,6930	0,8842	Вольфрам	730,3288	0,0646	8864,7199	39,4885
№ 5	Вольфрам	757,2165	0,0683	Оксид алюминия	642,6961	0,6836	7467,4224	49,0266
№ 6	Вольфрам	755,7042	0,0681	Карбид кремния	642,2522	0,8870	7496,4208	48,8286

## Заключение

В настоящей статье метод сальдо был использован для расчета теплообмена между двумя концентрическими полусферами с одним или двумя радиационными экранами. Ввиду того, что учитывалась зависимость степени черноты экрана от температуры, уравнения теплообмена пришлось решать совместно с данными по степеням черноты при различной температуре. Было обнаружено, что из трех изученных материалов экранов один вольфрамовый экран с низкой степенью черноты дает большее снижение теплообмена, чем два экрана из оксида алюминия или карбида кремния с относительно высокой степенью черноты. Обнаружено, что при использовании двух экранов из одного материала лучше выбирать материал с низкой степенью черноты. Это согласуется с выводом классического анализа радиационных экранов [15]. При использовании двух радиационных экранов из разных материалов экран с более низкой степенью черноты должен быть ближе к поверхности с более высокой температурой для большего снижения теплообмена.

## Обозначения

$A$  — площадь поверхности, м<sup>2</sup>,

$E_b$  — плотность потока интегрального излучения абсолютно черного тела, Вт/м<sup>2</sup>,

$F$  — угловой коэффициент,

$Q$  — поток интегрального результирующего излучения, Вт,

$R$  — радиус полусферы, м,

$T$  — абсолютная температура, К.

## Греческие символы

$\varepsilon$  — степень черноты,

$\lambda$  — длина волны,

$\sigma$  — Постоянная Стефана–Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>.

## Список литературы

1. Holman J.P. Heat Transfer. 10th edn. New York: McGraw-Hill. 2009.
2. Mantri S.S., Bhasin A.S. Preventive prosthodontics for head and neck radiotherapy // J. Clin. Diagnostic Res. 2010. Vol. 4. P. 2958–2962.



3. **Zemnick C., Woodhouse S.A., Gewanter R.M., Raphael M., Piro J.D.** Rapid prototyping technique for creating a radiation shield // J. Prosthetic Dentistry. 2007. Vol. 97. P. 236–241.
4. **Brosky M.E., Lee C., Bartlett T.S., Lo S.** Fabrication of a radiation bolus prosthesis for the maxillectomy patient // J. Prosthetic Dentistry. 2000. Vol. 83. P. 119–121.
5. **Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S.** Fundamentals of heat and mass transfer. 6th edn. New York: John Wiley and Sons. 2007.
6. **Afonso C., Castro M.** Air infiltration in domestic refrigerators: The influence of the magnetic seals conservation // Intern. J. Refrigeration. 2010. Vol. 33. P. 856–867.
7. **Jamalud-Din S.D., Rees D.A.S., Reddy B.V.K., Narasimhan A.** Prediction of natural convection flow using network model and numerical simulations inside enclosure with distributed solid blocks // Heat Mass Transfer. 2010. Vol. 46. P. 333–343.
8. **Zuoco J., Campo A.** Network model for the numerical simulation of transient radiative transfer process between the thick walls of enclosures // Applied Thermal Engng. 2006. Vol. 26. P. 673–679.
9. **Zuoco J., Alhamab F., Gonzalez Fernandez C.F.** Analysis of laminar forced convection with network simulation in thermal entrance region of ducts // Int. J. Thermal Sci. 2004. Vol. 43. P. 443–451.
10. **Gao W., Lin W., Liu T., Xia C.** Analytical and experimental studies on the thermal performance of cross-corrugated and flat-plate solar air heaters // Applied Energy. 2007. Vol. 84. P. 425–441.
11. **Eisenmann W., Vajen K., Ackermann H.** On the correlations between collector efficiency factor and material content of parallel flow flat-plate solar collectors // Solar Energy. 2004. Vol. 76. P. 381–387.
12. **Bernardes M.A.D.S., Vob A., Weinrebe G.** Thermal and technical analyses of solar chimneys // Solar Energy. 2003. Vol. 75. P. 511–524.
13. **Micco C.D., Aldao C.M.** On the net radiation method for heat transfer // Eur. J. Phys. 2003. Vol. 24. P. 81–89.
14. **Afonso C., Matos J.** The effect of radiation shields around the air condenser and compressor of a refrigerator on the temperature distribution inside it // Int. J. Refrigeration 2006. Vol. 29. P. 1144–1151.
15. **Howell J.R., Siegel R., Menguc M.P.** Thermal radiation heat transfer. 5th edn. New York: CRC Press, 2010.
16. **Saedodin S., Torabi M., Moghimi Kandelousi J., Maghsoudlou N.** Application of net radiation transfer method for optimization and calculation of reduction heat transfer, using spherical radiation shields // World Applied Sciences J. 2010. Vol. 11, No. 4. P. 457–461.
17. **Saedodin S., Torabi M., Maghsoudlou N., Moghimi Kandelousi J.** Calculation of reduction heat transfer using cylindrical radiation shields // Intern. Rev. Mech. Engng. 2010. Vol. 4, No. 7. P. 924–928.
18. **Modest M.F.** Radiative Heat Transfer. 2nd edn. New York: Academic Press. 2003.
19. **Chung B.T.F., Naraghi M.H.N.** Some exact solutions for radiation view factors from spheres // AIAA J. 1981. Vol. 19. P. 1077–1081.

*Статья поступила в редакцию 20 июня 2011 г.  
после переработки 21 октября 2011 г.*