

УДК 536.6

Расчет снижения роли радиационно-кондуктивного переноса тепла в процессе экранировки излучения толстостенными концентрическими сферами с температурно-зависимыми излучательными способностями

Ф. Джаббари, С. Саедодин

Университет Семнана, Семнан, Иран

E-mail: fj_jabbari@semnan.ac.ir

Изучается сложный теплообмен между двумя толстостенными концентрическими сферами. Аналитический подход к его моделированию вызван растущим интересом к проблеме создания экранов для защиты от радиационного теплопереноса. Проведены вычисления для общей скорости теплообмена, температуры и коэффициента излучения поверхности для случая размещения одного или двух толстостенных тепловых экранов между двумя толстостенными сферами. Вычисления показали, что размещение одного экрана с низким коэффициентом излучения более эффективно для снижения теплообмена, чем два экрана с более высоким коэффициентом. Также предложены оптимальные комбинации экранов, выполненных из различных материалов.

Ключевые слова: радиационный теплообмен, проводимость, теплозащитный экран, толстостенные сферы, коэффициент излучения, аналитическое исследование.

Введение

Тепловая защита имеет множество практических применений — от металлургии до астрономии, поэтому управление радиационным теплопереносом остается важной задачей. Одним из способов снижения радиационного теплообмена является использование поверхностей с высоким коэффициентом отражения. Кроме того, теплообмен можно уменьшить путем размещения теплозащитных экранов с низким коэффициентом излучения [1].

Экраны выполняются в виде тонких параллельных высокоотражающих пластин и размещаются между поверхностями. Высокоэффективная теплоизоляция может состоять из многих слоев, разделенных слоями вакуума. Это обеспечивает последовательность радиационных и теплопроводных барьеров. В действительности экраны являются тепловым сопротивлением, размещенным на пути теплообмена для уменьшения скорости теплопереноса. Если эти экраны имеют значительную толщину, подобно рассматриваемым в настоящей статье, то в процессе теплообмена имеет место суммарное сопротивление теплопроводности и излучению, и такая мера еще больше снижает общую скорость теплопередачи. Особенно важным представляется использование приема многослойной теплоизоляции для низкотемпературных приложений, например, для изоляции криогенных резервуаров [2].

Излучательная способность для каждой стороны экранов может быть различной из-за разнице в температуре или свойствах поверхности [3]. В работе [4] изучались случаи радиационного теплопереноса между двумя концентрическими цилиндрами, а в работе [5] — между двумя концентрическими полуцилиндрами. Также исследовался механизм уменьшения теплопереноса при наличии цилиндрических теплоэкранов относительно коэффициента излучения, зависящего от температуры. В ряде работ изучалось ослабление теплопереноса между двумя концентрическими полусферами [6, 7] и двумя концентрическими сферами [8] при наличии сферических теплоэкранов, имеющих зависящий от температуры коэффициент излучения. Авторы этих работ проанализировали явления теплопереноса с использованием метода чистого излучения. В работе [9] исследовались эффекты излучения для конденсатора и компрессора холодильника, при этом стены конденсатора, компрессора и самого холодильника были покрыты алюминиевой фольгой, выбранной в качестве радиационного экрана. Авторы пришли к выводу, что листы алюминия уменьшают внутреннюю температуру на 2 К. В работах [10, 11] изучался радиационный и конвективный теплообмен для случая пакетированных теплоэкранов, применяемых в вакуумно-изоляционных панелях. В последнее время были опубликованы статьи в области совместного теплопроводно-конвективно-радиационного теплообмена с применением теплозащитных экранов [12, 13].

В настоящей работе приводится аналитический расчет радиационного теплообмена между двумя толстыми сферами, а также представлены вычисления для уменьшения теплообмена при наличии одного или двух теплозащитных экранов. В соответствии с этим проводилась оптимизация размещения двух теплозащитных экранов, выполненных из различных материалов. Для иллюстрации влияния температурозависимого коэффициента излучения на эффективность ослабления теплообмена рассматриваются два примера — с одним и двумя экранами.

Математическое моделирование

Рассмотрим две концентрические толстые сферы (рис. 1а), внося следующие предположения для упрощения анализа задачи:

- все поверхности — рассеивающие и серые;
- газ откачан из пространства между сферами;
- тепловым сопротивлением излучающих экранов и сфер пренебречь нельзя;

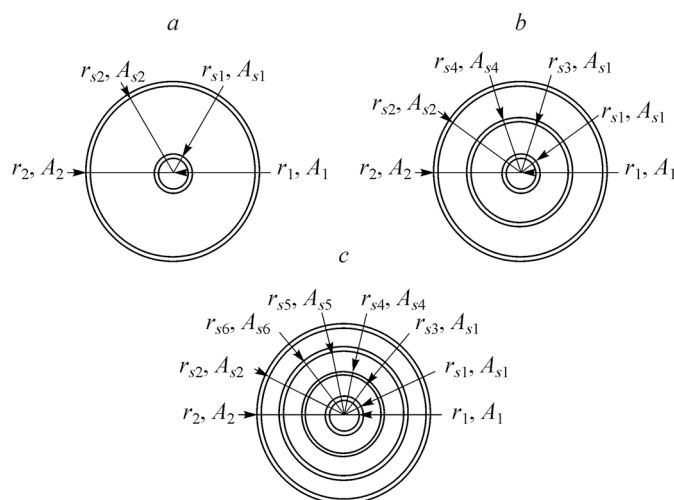


Рис. 1. Поперечное сечение системы из двух концентрических сфер. а — без теплозащитного экрана, б — с одним экраном, в — с двумя экранами.

- для всех вариантов вычислений температуры холодной и горячей сферы поддерживаются на постоянном уровне;
- концентрические сферы и все экраны находятся в радиационном равновесии;
- внутренняя и внешняя поверхности экрана имеют различные излучательные способности из-за разных температур.

В концепции радиационного теплообмена тепловая энергия, излучаемая в единицу времени с единицы черной поверхности, согласно закону Стефана–Больцмана описывается уравнением

$$E_b = \sigma T^4. \quad (1)$$

Таким образом, скорость радиационного теплообмена между двумя пластинами может быть записана в виде

$$(Q_{\text{rad}})_{\text{without-shield}} = (E_{bs1} - E_{bs2}) / R_{s1-s2}, \quad (2)$$

$$E_{bs1} - E_{bs2} = \sigma(T_{s1}^4 - T_{s2}^4). \quad (3)$$

В общем случае излучательная способность поверхности (ε) есть функция длины волны излучения и температуры поверхности, то есть $\varepsilon = \varepsilon(\lambda, T)$. Особый вид поверхности, известный как «серая рассеивающая поверхность», определяется как поверхность, для которой коэффициент излучения не зависит от длины волны и направления излучения, $\varepsilon = \varepsilon(T)$ [14]. В настоящей работе сделано предположение, что все излучающие поверхности «серые», то есть коэффициент излучения зависит только от температуры.

Тепловое сопротивление между поверхностями A_{s1} , A_{s2} , где имеет место радиационный теплоперенос, описывается уравнением

$$R_{s1-s2} = \frac{1 - \varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{s1} A_{s1}} + \frac{1}{A_{s1} F_{s1-s2}} + \frac{1 - \varepsilon_{s2}}{\varepsilon_{s2} A_{s2}}. \quad (4)$$

Тогда скорость теплообмена между двумя поверхностями запишется в виде

$$(Q_{\text{rad}})_{\text{without-shield}} = (E_{bs1} - E_{bs2}) / \left(\frac{1 - \varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{s1} A_{s1}} + \frac{1}{A_{s1} F_{s1-s2}} + \frac{1 - \varepsilon_{s2}}{\varepsilon_{s2} A_{s2}} \right). \quad (5)$$

Следовательно, можно вычислить радиационный теплоперенос между двумя пластинами. Для концентрических сфер имеем $F_{s1-s2} = 1$, а фактор формы является независимым от температуры или коэффициента излучения поверхности. Но кроме радиационного теплообмена имеет место теплопроводность по толщине поверхностей. В сферических координатах общее дифференциальное уравнение для теплопроводности принимает следующий вид (6):

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{u'''}{k}, \quad (6)$$

где u''' — скорость генерации тепла, например, за счет конверсии электрической энергии в тепловую по формуле RI^2 , тепла от топливных элементов ядерных реакторов или тепла от экзотермической химической реакции. Согласно условиям задачи, тепловой поток всегда является постоянным и теплообмен происходит только в радиальном направлении (r), в объеме нет источников тепла, поэтому уравнение (6) принимает вид:

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dT}{dr} \right) = 0. \quad (7)$$

Таким образом, можно найти распределение температуры для каждой сферы:

$$T_1(r) = -C_1/r + C_2, \quad (8)$$

$$T_2(r) = -C_3/r + C_4, \quad (9)$$

где $T_1(r)$ — распределение температуры для внутренней сферы, $T_2(r)$ — распределение температуры для внешней сферы. По закону теплопроводности теплообмен между A_{s1}, A_1 и A_{s2}, A_2 запишется в виде

$$Q_{\text{cond},1} = -K_1 A(r) (dT_1(r)/dr) = -K_1 \cdot 4\pi \cdot C_1, \quad (10)$$

$$Q_{\text{cond},2} = -K_2 A(r) (dT_2(r)/dr) = -K_2 \cdot 4\pi \cdot C_3. \quad (11)$$

Для вычисления всех констант C_i следует использовать граничные условия, учитывая приведенные ранее предположения о том, что внутренняя и внешняя поверхности имеют высокую и низкую температуры, и теплообмен на границе каждой поверхности считается одинаковым. Эти физические факторы отражены в следующих уравнениях:

$$r = r_1 : -C_1/r + C_2 = T_1, \quad (12)$$

$$r = r_{s1} : Q_{\text{cond},1} = (Q_{\text{rad}})_{\text{without-shield}}, \quad (13)$$

$$r = r_{s2} : Q_{\text{cond},2} = (Q_{\text{rad}})_{\text{without-shield}}, \quad (14)$$

$$r = r_2 : -C_3/r + C_4 = T_2. \quad (15)$$

При этом следует принять во внимание, что коэффициент излучения для поверхности и коэффициент теплопроводности являются функциями температуры. Уравнения (12)–(15) были получены из заданных граничных условий. Коэффициенты C_i , температура, излучательные способности и теплопроводности на пластине A_{s1} и A_{s2} являются неизвестными для этих уравнений. Поскольку последние два параметра зависят от температуры, то неизвестные параметры можно получить решением системы уравнений (12–15) с температурозависимой теплопроводностью и коэффициентом излучения, используя MATLAB (рис. 2, 3).

Аналогично процедуре решения уравнений для теплообмена без экранов, можно вычислить теплообмен для системы с тепловыми экранами. Следовательно, можно вычислить скорость теплообмена, процент уменьшения общего теплообмена, температуры и излучения для каждой поверхности в случае, когда между сферами установлены

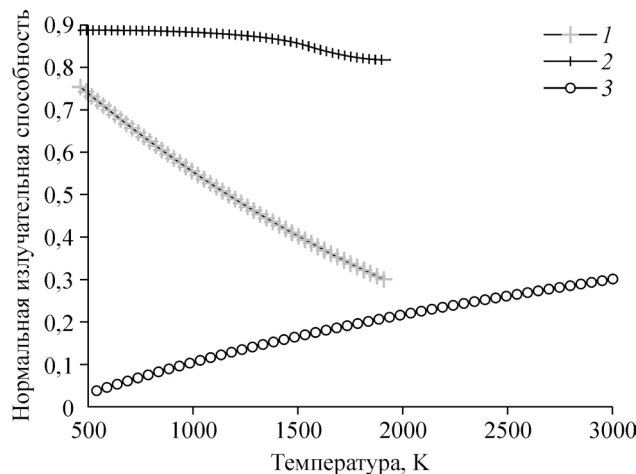


Рис. 2. Нормальный коэффициент излучения как функция температуры [15].

1 — оксид алюминия, 2 — карбид кремния, 3 — вольфрам.

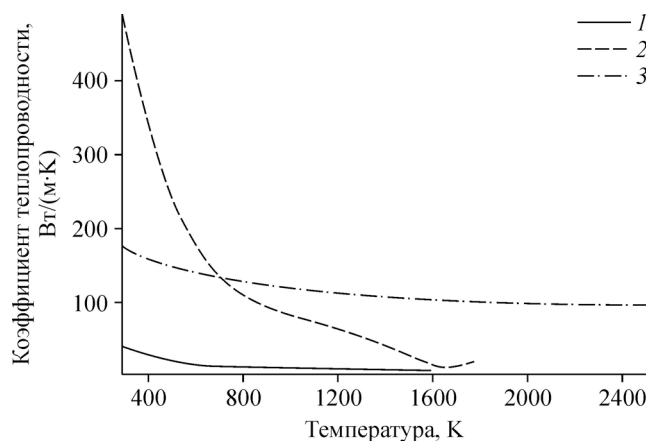


Рис. 3. Теплопроводность как функция температуры [16–18].
Обозначения см. на рис. 2.

один или два тепловых экрана. В настоящей статье проведены указанные вычисления для трех выбранных материалов — окиси алюминия, карбида кремния и вольфрама, что отображено на рис. 2.

Пример 1. Рассматриваются две концентрические сферы из окиси алюминия со стенками толщиной 3 мм (рис. 1а). Пластина A_1 имеет температуру 573,15 К и радиус 20 см, пластина A_2 имеет температуру 300,15 К и радиус 110,3 см. Если между ними разместить экран толщиной 3 мм и радиусом 45 см (рис. 1б), то можно вычислить процент снижения теплообмена, температуры и коэффициентов излучения для экрана и сферы по следующим соотношениям: $(Q_{\text{rad}})_{\text{without-shield}} = 1912,149\text{W}$; $T_{s1} = 572,495\text{K}$, $\varepsilon_{s1} = 0,6786$; $T_{s2} = 300,1602\text{K}$, $\varepsilon_{s2} = 0,7827$.

Для случая одного экрана из окиси алюминия можно найти численные значения указанных параметров: $(Q_{\text{rad}})_{\text{with-one-shield}} = 1521,4217\text{W}$; $T_{s1} = 572,629\text{K}$, $\varepsilon_{s1} = 0,6786$; $T_{s2} = 300,1581\text{K}$, $\varepsilon_{s2} = 0,7827$; $T_{s3} = 390,4784\text{K}$, $\varepsilon_{s3} = 0,7472$; $T_{s4} = 390,4158\text{K}$, $\varepsilon_{s4} = 0,7472$. При этом процент снижения общего теплообмена составит $\frac{(Q_{\text{rad}})_{\text{without-shield}} - (Q_{\text{rad}})_{\text{with-one-shield}}}{(Q_{\text{rad}})_{\text{without-shield}}} \cdot 100 = 20,43\%$.

Аналогично, для экрана, изготовленного из карбида кремния, получим величины $(Q_{\text{rad}})_{\text{with-one-shield}} = 1640,872\text{W}$; $T_{s1} = 572,5882\text{K}$, $\varepsilon_{s1} = 0,6786$; $T_{s2} = 300,1587\text{K}$, $\varepsilon_{s2} = 0,7827$; $T_{s3} = 385,1889\text{K}$, $\varepsilon_{s3} = 0,8898$; $T_{s4} = 385,1836\text{K}$, $\varepsilon_{s4} = 0,8898$. Процент ослабления теплообмена из-за наличия экрана составит $((1912,1495 - 1640,872)/1912,1495) \cdot 100 = 14,19\%$.

Для случая экрана из вольфрама получим: $(Q_{\text{rad}})_{\text{with-one-shield}} = 161,0444\text{W}$; $T_{s1} = 573,0948\text{K}$, $\varepsilon_{s1} = 0,6784$; $T_{s2} = 300,1509\text{K}$, $\varepsilon_{s2} = 0,7827$; $T_{s3} = 439,1838\text{K}$, $\varepsilon_{s3} = 0,038$; $T_{s4} = 439,1826\text{K}$, $\varepsilon_{s4} = 0,038$. Процент ослабления теплообмена из-за наличия экрана составит $((1912,1495 - 161,0444)/1912,1495) \cdot 100 = 91,58\%$.

Пример 2. Рассматриваются две концентрические сферы из примера 1. Для снижения теплообмена между внутренней и внешней сферой в определенных местах размещаются два экрана из одинакового материала толщиной 3 мм так, чтобы их радиусы равнялись 50 и 80 см (рис. 1с). Тогда ослабление теплообмена, температуры, коэффициентов излучения для экранов и сфер можно рассчитать по вышеприведенным формулам: $(Q_{\text{rad}})_{\text{without-shield}} = 1912,1495\text{W}$; $T_{s1} = 572,4957\text{K}$, $\varepsilon_{s1} = 0,6786$; $T_{s2} = 300,1602\text{K}$, $\varepsilon_{s2} = 0,7827$.

Для случая двух экранов из окиси алюминия получим $(Q_{\text{rad}})_{\text{with-two-shield}} = 1488,8745 \text{ W}$; $T_{s1} = 572,6401 \text{ K}$, $\varepsilon_{s1} = 0,6786$; $T_{s2} = 300,1579 \text{ K}$, $\varepsilon_{s2} = 0,7827$; $T_{s3} = 400,3555 \text{ K}$, $\varepsilon_{s3} = 0,7433$; $T_{s4} = 400,3044 \text{ K}$, $\varepsilon_{s4} = 0,7434$; $T_{s5} = 337,6459 \text{ K}$, $\varepsilon_{s5} = 0,7678$; $T_{s6} = 337,6292 \text{ K}$, $\varepsilon_{s6} = 0,7678$. Процент ослабления теплообмена из-за наличия экранов составит $\frac{(Q_{\text{rad}})_{\text{without-shield}} - (Q_{\text{rad}})_{\text{with-two-shield}}}{(Q_{\text{rad}})_{\text{without-shield}}} \cdot 100 = 22,14 \%$.

Аналогично, для двух экранов из карбида кремния получим $(Q_{\text{rad}})_{\text{with-two-shield}} = 1616,9105 \text{ W}$; $T_{s1} = 572,5963 \text{ K}$, $\varepsilon_{s1} = 0,6786$; $T_{s2} = T_{s2} = 300,1586 \text{ K}$, $\varepsilon_{s2} = 0,7827$; $T_{s3} = 391,8317 \text{ K}$, $\varepsilon_{s3} = 0,8898$; $T_{s4} = 391,8274 \text{ K}$, $\varepsilon_{s4} = 0,8898$; $T_{s5} = 336,2831 \text{ K}$, $\varepsilon_{s5} = 0,8892$; $T_{s6} = 336,2817 \text{ K}$, $\varepsilon_{s6} = 0,8892$. Процент ослабления теплообмена из-за наличия экранов составит $((1912,1495 - 1616,9105) / 1912,1495) \cdot 100 = 15,44 \%$.

Для случая двух экранов из вольфрама имеем $(Q_{\text{rad}})_{\text{with-two-shield}} = 150,3092 \text{ W}$; $T_{s1} = 573,0985 \text{ K}$, $\varepsilon_{s1} = 0,6784$; $T_{s2} = 300,1508 \text{ K}$, $\varepsilon_{s2} = 0,7827$; $T_{s3} = 486,5871 \text{ K}$, $\varepsilon_{s3} = 0,0448$; $T_{s4} = 486,5861 \text{ K}$, $\varepsilon_{s4} = 0,0448$; $T_{s5} = 374,3371 \text{ K}$, $\varepsilon_{s5} = 0,0286$; $T_{s6} = 374,3367 \text{ K}$, $\varepsilon_{s6} = 0,0286$. Процент ослабления теплообмена из-за наличия экранов равен $((1912,1495 - 150,3092) / 1912,1495) \cdot 100 = 92,14 \%$.

Пример 3: Рассмотрим случай двух концентричных сфер из примера 1. Если разместить два экрана с толщиной 3 мм и с радиусами 50 и 80 см для ослабления теплообмена между внутренней и внешней сферой (рис. 1с), то общее уменьшение теплообмена, температуры и коэффициентов излучения для установленных экранов и сфер будет вычисляться в том же порядке, что и для примера 2. Температура, коэффициенты излучения, чистый теплоперенос и процент ослабления теплообмена для описанных шести моделей приведены в таблице. Видно, что модель № 5 имеет лучшие параметры по уменьшению теплообмена между двумя концентрическими толстыми сферами (при наличии возможности применять экраны из различных материалов). Из приведенных в таблице данных можно сделать вывод, что лучшая комбинация для теплоэкранов из различных материалов достигается при размещении экрана с низкой излучательной способностью ближе к горячей поверхности.

Выводы

В настоящей работе изучалась скорость радиационного теплообмена между двумя концентрическими сферами с толстыми стенками. Были проведены расчеты для полного теплообмена, процентного снижения теплообмена, температуры, излучательной способности поверхности для случаев одного или двух толстостенных теплозащитных экранов, размещенных между внутренней и внешней сферами. Результаты анализа показали, что толстостенные экраны понижают теплообмен сильнее, чем тонкие экраны, для которых теплопроводность пренебрежимо мала по сравнению с радиационным теплообменом. Было обнаружено, что один экран из вольфрама с низкой излучательной способностью обеспечивает большее снижение теплообмена, чем два экрана, выполненных из окиси алюминия или из карбида кремния с более высокой излучательной способностью. Было показано, что если применять экраны, выполненные из одного материала, то лучше использовать материал с низкой излучательной способностью. При установке экранов, выполненных из различных материалов, для более эффективного снижения полного теплообмена следует размещать экран с низкой излучательной способностью ближе к сфере с высокой температурой. Также вычисления для экранов, выполненных из карбида кремния, показали, что в изученном интервале температур излучательная способность для поверхности экрана практически неизменна. Кроме того, излучательная способность для внешней поверхности внутренней сферы и для внутренней поверхности внешней сферы при любом числе теплозащитных экранов из любого материала остается постоянной.

Таблица
Общее ослабление теплообмена, температуры, коэффициентов излучения для двух теплоэкранов, выполненных из различных материалов

Модель, №	Экран на позиции с радиусом 50 см		Экран на позиции в радиусом 80 см		A_{s1}		A_{s2}		Мощность, Вт	Снижение теплообмена, %	
	Материал	Температура, К	Коэф. излучения	Материал	Температура, К	Коэф. излучения	Температура, К	Коэф. излучения			
1	Al_2O_3	A_{s3}	395,3154	0,7453	SiC	A_{s5}	334,2954	0,8892	0,7827	1513,138	20,87
		A_{s4}	395,2642	0,7453		A_{s6}	334,2941	0,8892			
2	Al_2O_3	A_{s3}	534,2037	0,6927	W	A_{s5}	434,3738	0,0373	0,7827	467,8	75,54
		A_{s4}	534,1804	0,6927		A_{s6}	434,3726	0,0373			
3	SiC	A_{s3}	397,3943	0,8899	Al_2O_3	A_{s5}	339,8272	0,767	0,7827	1590,721	16,81
		A_{s4}	397,39	0,8899		A_{s6}	339,8092	0,767			
4	SiC	A_{s3}	536,1174	0,8902	W	A_{s5}	436,6789	0,0377	0,7827	485,021	74,63
		A_{s4}	536,1153	0,8902		A_{s6}	436,6778	0,0377			
5	W	A_{s3}	433,636	0,0372	Al_2O_3	A_{s5}	305,3253	0,7806	0,7827	177,765	90,70
		A_{s4}	433,6349	0,0372		A_{s6}	305,3235	0,7806			
6	W	A_{s3}	433,2903	0,0372	SiC	A_{s5}	304,7939	0,8888	0,7827	181,173	90,52
		A_{s4}	433,2892	0,0372		A_{s6}	304,7937	0,8888			

Список обозначений

A — площадь поверхности, м ² ,	W — Химический символ вольфрама,
F — фактор формы,	α — коэффициент теплопроводности, м ² /с,
K — тепловая проводимость, Вт/(м·К),	ε — излучательная способность,
Q — чистый теплообмен, Вт,	θ — полярный угол, рад,
R — радиус сферы, м,	λ — длина волны, м,
t — время, с,	σ — константа Стефана–Больцмана, Вт/(м ² ·К ⁴),
T — абсолютная температура, К,	u'' — удельное теплообразование, Вт/м ³ .

Список литературы

1. **Holman J.P.** Heat transfer. 10th Edn. N.Y.: McGraw-Hill. 2009. 987 p.
2. **Howell J.R., Siegel R., Menguc M.P.** Thermal radiation heat transfer. 5th ed.. N.Y.: CRC Press, 2010. 997 p.
3. **Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S.** Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th Ed. NJ: John Wiley & Sons, 2007. 997 p.
4. **Saedodin S., Torabi M., Maghsoudlou N., Moghimi Kandelousi J.** Calculation of reduction heat transfer using cylindrical radiation shields // Int. Review of Mechanical Engng. 2010. Vol. 4, No. 7. P. 924–928.
5. **Saedodin S., Motaghedi Barforoush M.S., Torabi M.** Reduction heat transfer between two concentric semi-cylinders using radiation shields with temperature-dependent emissivity // Frontiers in Heat and Mass Transfer. 2011. Vol. 2. P. 044001-1–044001-4.
6. **Saedodin S., Motaghedi Barforoush M.S., Torabi M.** Calculation of reduction radiation heat transfer using hemisphere shields with temperature-dependent emissivity // J. of Applied Sci. 2011. Vol. 11, No. 12. P. 2238–2243.
7. **Тораби М., Азис А., Саедодин С.** Применение полусферических радиационных экранов со степенью черноты, зависящей от температуры, для снижения теплообмена между двумя концентрическими полусферами // Теплофизика и аэромеханика. 2012 Т. 19, № 4. С. 497–505.
8. **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 Sci. J. 2010. Vol. 11, No. 4. P. 457–461.
9. **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. of Refrigeration. 2006. Vol. 29. P. 1144–1151.
10. **Jang C., Kim J., Song T.-H.** Combined heat transfer of radiation and conduction in stacked radiation shields for vacuum insulation panels // Energy and Buildings. 2011. Vol. 43, No. 12. P. 3343–3352.
11. **Jongmin Kim, Jang Choonghyo, Tae-Ho Song.** Combined heat transfer in multi-layered radiation shields for vacuum insulation panels: Theoretical/numerical analyses and experiment // Applied Energy. 2012. Vol. 94. P. 295–302.
12. **Dehghan M., Rahmani Y., Ganji D.D., Saedodin S., Valipour M.S., Rashidi S.** Convection–radiation heat transfer in solar heat exchangers filled with a porous medium: Homotopy perturbation method versus numerical analysis // Renewable Energy. 2015. Vol. 74. P. 448–455.
13. **Dehghan M., Mahmoudi Y., Valipour M.S., Saedodin S.** Combined-conduction-convection-radiation heat transfer of slip flow inside a micro-channel filled with a porous material // Transport in Porous Media. 2015. Vol. 108. P. 413–436.
14. **Modest M.F.** Radiative Heat Transfer. 2nd Ed. N.Y.: Academic Press, 2003. 822 p.
15. **Jabbari F., Aziz A., Saedodin S., Torabi M.** Transient thermal analysis of a rectangular radiation heat shield with spatially dependent emissivities // Arabian J. for Sci. and Engng. 2013. Vol. 38, No. 12. P. 3495–3504.
16. **Touloukian Y.S.** Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials. 1967. Vol 4, pt 1, sect 1. P. 8–47.
17. **Abdou M.A., Hadid A.H., Raffray A.R., Tillack M.S., Tizuka T.** Modelling, analysis and experiments for fusion nuclear technology // FNT Progress Report: Fusion Engng and Design 6, 1988. P. 3–64.
18. **Blanket E.** ITER Documentation Series. No. 29. Shield Design and Material Data Base. IAEA. Vienna, 1991.

Статья поступила в редакцию 16 марта 2015 г.,
после переработки — 14 апреля 2015 г.