

9
НА ДОК
НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи

ТВЕРСКАЯ Елена Сергеевна

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМ СОСТОЯНИЕМ
МНОГОСЛОЙНОЙ СТЕНКИ
И ОПТИМИЗАЦИЯ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ**

Специальности: 05.13.01 – Системный анализ, управление и
обработка информации

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая
теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Москва – 2005

Работа выполнена в Московском государственном техническом
университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель:	д.ф.-м.н., проф. Волков И.К.
Научный консультант:	к.т.н., доц. Аттетков А.В.
Официальные оппоненты:	д.ф.-м.н., проф. Формалев В.Ф.
	к.ф.-м.н., с.н.с. Ермолаев Б.С.

Ведущая организация: Московская государственная академия
тонкой химической технологии
им. М.В. Ломоносова

Защита диссертации состоится «___» _____ 2005 года
в ___ часов ___ мин. на заседании диссертационного совета
Д 212.141.15 при Московском государственном техническом универ-
ситете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауман-
ская ул., д. 5.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью
организации, просим высылать по адресу: 105005, Москва, 2-я Бау-
манская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю
совета Д 212.141.15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им.
Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «___» _____ 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.т.н., профессор



Кувыркин Г.Н.

Актуальность темы. В приложениях математической теории теплопроводности важное место занимают задачи управления температурным полем, оптимизации и оценивания эффективных значений теплофизических и геометрических параметров конструкции, предназначенной для функционирования в условиях интенсивных внешних тепловых воздействий, а также задачи, связанные с разработкой перспективных методов и средств ее тепловой защиты. Специфика процесса формирования температурного поля в твердом теле в существенной степени зависит от пространственно-временной структуры воздействующего теплового потока. В теоретических исследованиях основное внимание уделяют осесимметричным пространственно-распределенным (с интенсивностью гауссовского типа) тепловым потокам. Результаты воздействия концентрированных (круговых, кольцевых и других правильных геометрических форм) тепловых потоков изучены в значительно меньшей степени.

На основании анализа имеющейся информации можно утверждать, что к задачам, требующим проведения дополнительных исследований, следует отнести задачу об определении достаточных условий существования оптимальной толщины системы «охлаждаемая стенка – теплозащитное покрытие», находящейся под воздействием осесимметричных пространственно-распределенных и концентрированных тепловых потоков в стационарных и импульсно-периодических режимах. Особый интерес представляют теплоизоляции, использующие термоэлектрические явления для регулирования температурного поля или термостатирования конструкций. Одним из основных элементов подобных теплоизоляций является термоактивная прокладка, образующая промежуточный слой в системе «конструкция – теплозащитное покрытие».

Трудности, возникающие при исследованиях процесса формирования температурного поля в системе «конструкция – термоактивная прокладка – теплозащитное покрытие» методами математического моделирования, хорошо известны. Поэтому при построении математической модели рассматриваемой системы учитывают

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1715953

Тверская Е.С. Управление т

МГТУ
ИМ. Н.Э. БАУМАНА
БИБЛИОТЕКА

специфические особенности термоактивной прокладки и используют условия сопряжения, обеспечивающие на поверхности контакта равенство температур и разрыв тепловых потоков. Заметим, что до настоящего времени отсутствуют результаты анализа возможностей не только оптимального (в каком-то смысле), но и программного изменения температурного поля на защищенной поверхности системы «конструкция – термоактивная прокладка – теплозащитное покрытие».

Цель и задачи исследования. Цель проведенных исследований – обоснование возможностей управления температурным состоянием экранированной стенки, защищенная поверхность которой находится под воздействием внешнего теплового потока, а незащищенная – охлаждается внешней средой, путем оптимизации ее параметров и использования термоактивной прокладки.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих основных задач:

1. Параметрический анализ специфических особенностей стационарного температурного поля однослойной стенки, обусловленных типом внешнего теплового потока, воздействующего на одну из ее поверхностей при условии, что вторая охлаждается внешней средой.

2. Параметрический анализ стационарного температурного поля стенки с покрытием, защищенная поверхность которой находится под воздействием осесимметричного теплового потока с интенсивностью гауссовского типа в импульсно-периодическом режиме, а незащищенная – охлаждается внешней средой, и определение достаточных условий существования оптимальной толщины рассматриваемой системы «стенка – теплозащитное покрытие».

3. Обоснование условий сопряжения в системе «стенка – термоактивная прокладка – теплозащитное покрытие».

4. Исследование процесса формирования температурного поля в системе «стенка – термоактивная прокладка – теплозащитное покрытие» и обоснование возможностей управления им с использованием термоактивной прокладки.

5. Параметрический анализ стационарного температурного поля в системе «стенка – теплозащитное покрытие» при наличии в изучаемой системе термоактивной прокладки, функционирующей по принципу обратной связи (обобщенный вариант задачи 2).

6. Реализация идеи уточнения модели «сосредоточенная емкость» для описания процесса формирования температурного поля в стенке с покрытием, защищенная поверхность которой находится под воздействием внешнего теплового потока, а незащищенная – охлаждается внешней средой.

Методы исследования. При решении задач, возникающих в ходе выполнения диссертационной работы, использовались различные классы математических методов: методы теории интегральных преобразований и математической физики; методы теории обыкновенных дифференциальных уравнений и математического анализа; методы теории функций комплексного переменного и математической теории теплопроводности.

Достоверность и обоснованность полученных результатов гарантируется строгостью используемого математического аппарата и подтверждается сравнением результатов, полученных с использованием различных методов и вычислительных экспериментов. Сформулированные в работе допущения обоснованы как путем их содержательного анализа, так и метода математического моделирования. Результаты диссертационной работы согласуются с результатами, полученными ранее другими авторами и другими методами в частных и предельных случаях.

Научная новизна. Установлено, что вне зависимости от типа теплового потока (пространственно-распределенного с интенсивностью гауссовского типа, концентрированного кольцевого и концентрированного кругового), воздействующего в импульсно-периодическом режиме на одну из поверхностей изотропной стенки при охлаждении другой ее поверхности внешней средой, при выполнении определенных условий существует оптимальная толщина этой стенки, обеспечивающая минимальное значение установившейся температуры ее наиболее нагретой точки.

Доказано, что импульсно-периодический режим концентрированного нагрева охлаждаемой стенки через круговую область может приводить к существованию ее оптимальной толщины, обеспечивающей не только минимальную, но и максимальную установившуюся температуру ее наиболее нагретой точки.

Найдены достаточные условия существования оптимальной толщины экранированной стенки, защищенная поверхность которой находится под воздействием осесимметричного пространственно-распределенного теплового потока с интенсивностью гауссовского типа в импульсно-периодическом режиме, а незащищенная – охлаждается внешней средой.

Разработаны и теоретически обоснованы условия сопряжения в системе «стенка – термоактивная прокладка – теплозащитное покрытие».

Получены различные аналитические представления решения задачи о нахождении температурного поля в системе «стенка – термоактивная прокладка – теплозащитное покрытие», позволившие обосновать возможность управляемого воздействия на процесс формирования изучаемого температурного поля.

Найдены достаточные условия существования оптимальной толщины экранированной стенки при наличии термоактивной прокладки, функционирующей по принципу обратной связи.

Идентифицирована уточненная модель «сосредоточенная емкость» для описания процесса формирования температурного поля в экранированной стенке, защищенная поверхность которой находится под воздействием внешнего теплового потока, а незащищенная – охлаждается внешней средой.

Практическая ценность диссертационной работы связана с ее прикладной ориентацией, а полученные результаты могут быть использованы при исследовании и прогнозировании температурного состояния многослойных конструкций, разработке эффективных методов управления их температурным полем и средств тепловой защиты в условиях воздействия внешних осесимметричных пространственно-распределенных и концентрированных тепловых потоков.

Диссертация является составной частью фундаментальных научных исследований, проводимых в рамках научно-исследовательской работы аспирантов высших учебных заведений Минобразования РФ «Математическое моделирование процессов формирования температурных полей в многослойных областях,

их оптимизация и управление» (грант А03-2.8-151), а полученные результаты частично использованы при выполнении научно-исследовательской работы «Разработка методов расчета сопряженного тепломассопереноса в элементах конструкций управляющих ракетных двигателей космических аппаратов» гранта Минобразования РФ по фундаментальным исследованиям в области технических наук (грант Т02-14.0-1812).

На защиту выносятся следующие положения:

1. Результаты параметрического анализа стационарного температурного поля изотропной стенки, одна из поверхностей которой охлаждается внешней средой, а другая находится под воздействием осесимметричного теплового потока (пространственно-распределенного с интенсивностью гаусовского типа, концентрированного кругового и концентрированного кольцевого) в импульсно-периодическом режиме.

2. Достаточные условия существования оптимальной толщины экранированной стенки, незащищенная поверхность которой охлаждается внешней средой, а защищенная – находится под воздействием осесимметричного пространственно-распределенного теплового потока с интенсивностью гауссовского типа, функционирующего в импульсно-периодическом режиме.

3. Условия сопряжения в системе «стенка – термоактивная прокладка – теплозащитное покрытие».

4. Обоснование возможности управляемого воздействия на процесс формирования температурного поля системы «стенка – термоактивная прокладка – теплозащитное покрытие».

5. Достаточные условия существования оптимальной толщины экранированной стенки при наличии термоактивной прокладки, функционирующей по принципу обратной связи.

6. Уточненная модель «сосредоточенная емкость» для описания процесса формирования температурного поля в экранированной стенке, незащищенная поверхность которой охлаждается внешней средой, а защищенная – находится под воздействием внешнего теплового потока.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на 2-й Международной конференции «Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы» (Москва, 2003), 11-й Международной конференции «Математика, компьютер, образование» (Дубна, 2004), Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений» (Жуковский, 2004), V Минском научном форуме «Тепломассообмен ММФ-2004» (Минск, 2004), 3-й Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике» (Москва, 2005).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 5-и научных статьях [1-3,5,7] и 3-х тезисах докладов [4,6,8].

Личный вклад соискателя. Все исследования, изложенные в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включен лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю, заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 126 страницах, содержит 41 иллюстрацию. Библиография включает 121 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту, приведены данные о структуре и объеме диссертационной работы.

В первой главе проведен анализ особенностей процесса формирования стационарного температурного поля в плоской изотропной стенке в зависимости от типа воздействующего осесимметричного теплового потока (пространственно-распределенного или концентрированного), функционирующего в импульсно-периодическом

режиме, с использованием следующей математической модели:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial Fo} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \Theta}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2}, \quad Fo > 0, \quad 0 < x < H, \quad \rho \geq 0; \quad (1)$$

$$\Theta(\rho, x, Fo)|_{Fo=0} = 0; \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial \Theta(\rho, x, Fo)}{\partial x} \right|_{x=H} = Bi (J - \Theta(\rho, x, Fo)|_{x=H}); \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial \Theta(\rho, x, Fo)}{\partial x} \right|_{x=0} = \mu Bi [\Theta(\rho, x, Fo)|_{x=0} - 1] - Q(\rho) \Phi(Fo), \quad (4)$$

где при любых фиксированных $Fo > 0$ и $x \in (0; H)$ функции $\Theta(\rho, x, Fo)$ и $Q(\rho)$, как функции ρ , являются оригиналами интегрального преобразования Ханкеля нулевого порядка;

$$\Phi(Fo) = \frac{Fo^*}{Fo^* + \Delta Fo^*} + \exp(-\gamma Fo) \varphi(Fo);$$

$$\varphi(Fo) = \sum_{n=0}^{\infty} \{ \eta [Fo - n(Fo^* + \Delta Fo^*)] - \eta [Fo - Fo^* - n(Fo^* + \Delta Fo^*)] \};$$

$$\Theta = \frac{T - T_0}{T_c^0 - T_0}; \quad Fo = \frac{a t}{z_*^2}; \quad \rho = \frac{r}{z_*}; \quad x = \frac{z}{z_*}; \quad H = \frac{l}{z_*};$$

$$\mu = \frac{\alpha_0}{\alpha_l}; \quad Bi = \frac{\alpha_l z_*}{\lambda}; \quad J = \frac{T_c^l - T_0}{T_c^0 - T_0}; \quad Q = \frac{q z_*}{\lambda (T_c^0 - T_0)};$$

$T(r, z, t)$ – температура стенки в точке с координатами (r, z) в момент времени t в цилиндрической системе координат rOz ; q – удельная мощность (плотность) теплового потока, имеющая осесимметричное распределение $q = q(r)$; T_0 – постоянная начальная температура стенки, отличная от температуры внешней среды T_c^l ; l – толщина стенки; z_* – выбранная единица масштаба, определяемая типом воздействующего осесимметричного теплового потока; λ – коэффициент теплопроводности; a – коэффициент температуропроводности; α – коэффициент теплоотдачи; $Fo^* + \Delta Fo^*$ – период импульсно-периодического режима воздействия теплового потока; Fo^* – длительность активной фазы его воздействия; γ – коэффициент затухания теплового потока; $\eta(\cdot)$ – единичная функция Хевисайда. Конкретный вид граничного условия (4) исходной математической

модели (1) – (4) будет определен типом воздействующего осесимметричного теплового потока. В проведенных исследованиях рассмотрены пространственно-распределенный тепловой поток с интенсивностью гауссовского типа

$$Q(\rho) = Q_0 \exp(-k^2 \rho^2),$$

где k – коэффициент сосредоточенности теплового потока, и и концентрированные – круговой ($R = 0$) и кольцевой ($R \in (0, 1)$)

$$Q(\rho) = Q_0 [\eta(\rho - R) - \eta(\rho - 1)],$$

где $R = r_0/r_1$; r_0, r_1 – внутренний и внешний радиусы зоны воздействия теплового потока.

Для нахождения стационарного температурного поля рассматриваемой стенки сначала было найдено решение задачи (1) – (4) в изображениях интегральных преобразований Ханкеля нулевого порядка по ρ и Лапласа по Γ_0 с последующим обращением интегрального преобразования Ханкеля и использованием предельной теоремы операционного исчисления.

Результаты вычислительных экспериментов указывают на возможность существования оптимальной толщины $\text{opt}\{H\}$ стенки, обеспечивающей минимальную установившуюся температуру ее наиболее нагретой точки. Увеличение интенсивности теплоотдачи на поверхности $x = H$ стенки (возрастание Bi) приводит к монотонному убыванию (вплоть до нуля) значения $\text{opt}\{H\}$. Причем, в отличие от режима воздействия осесимметричного теплового потока с интенсивностью гауссовского типа, воздействие кругового и кольцевого тепловых потоков приводит к существованию отличной от нуля толщины стенки, обеспечивающей не только минимальную, но и максимальную установившуюся температуру ее наиболее нагретой точки.

Вторая глава посвящена решению задачи об определении достаточных условий существования оптимальной толщины $\text{opt}\{H\}$ плоской изотропной стенки (толщины H) с теплозащитным покрытием (толщины ϵ). С незащищенной стороны стенка охлаждается

внешней средой с постоянными температурой и коэффициентом теплоотдачи, а со стороны теплозащитного покрытия – находится под воздействием как осесимметричного теплового потока с интенсивностью гауссовского типа, функционирующего в импульсно-периодическом режиме, так и внешней среды с постоянными температурой и коэффициентом теплоотдачи.

Для описания процесса формирования температурного поля в системе «стенка – теплозащитное покрытие» была использована нестационарная двумерная математическая модель теплопроводности в цилиндрической системе координат при наличии идеального теплового контакта в системе. В результате анализа этой модели установлено, что температурное поле в изучаемой системе представляет собой сумму трех составляющих, две из которых обусловлены воздействием внешних сред, теплообмен с которыми реализуется по закону Ньютона. Характер формирования подобных составляющих хорошо изучен, а специфические особенности интересующего нас стационарного температурного поля от них не зависят. Поэтому, в целях упрощения дальнейших рассуждений, было решено ограничиться анализом лишь той составляющей, которая определяет процесс формирования температурного поля в плоской изотропной стенке с теплозащитным покрытием, незащищенная поверхность которой охлаждается внешней средой с постоянной температурой, равной начальной температуре стенки, а со стороны покрытия – подверженной воздействию теплового потока с интенсивностью гауссовского типа в импульсно-периодическом режиме.

С использованием интегральных преобразований Ханкеля нулевого порядка и Лапласа определена установившаяся температура наиболее нагретой точки рассматриваемой стенки. При проведении параметрического анализа этой установившейся температуры установлено, что при любой фиксированной толщине стенки увеличение толщины ее покрытия приводит к монотонному снижению искомой установившейся температуры $\Theta(H, \varepsilon)$. Поэтому условия существования оптимальной толщины стенки были найдены при фиксированной толщине покрытия.

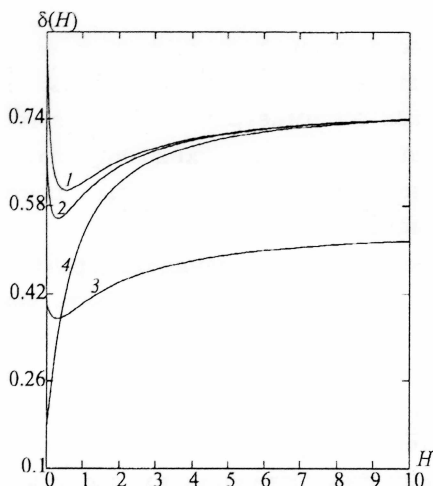


Рис. 1. Зависимость нормированной установившейся температуры $\delta(H) = [k^2(Fo^* + \Delta Fo^*)(Q_0 Fo^*)^{-1}] \Theta(H, 1)$ наиболее нагретой точки экранированной стенки от ее толщины H при различных значениях критерия Био и коэффициента сосредоточенности k импульсно-периодического теплового потока с интенсивностью гауссовского типа: 1 - $Bi = 1$, $k = 100$; 2 - $Bi = 1.3$, $k = 100$; 3 - $Bi = 1$, $k = 1$; 4 - $Bi = 5$, $k = 100$

В соответствии с результатами вычислительных экспериментов, частично представленных на рис. 1, можно утверждать, что, в случае существования оптимальной толщины стенки с покрытием, возрастание значения Bi при фиксированном k сопровождается уменьшением значения $\text{opt}\{H\}$ вплоть до нуля (рис. 1, кривые 1, 2, 4). Увеличение значения k , соответствующее уменьшению дисперсии воздействующего потока, сопровождается резким увеличением значения $\text{opt}\{H\}$ при фиксированном значении Bi (рис. 1, кривые 1 и 3).

Следует также заметить, что полученные условия являются достаточными, и их нарушение может быть связано как с существованием оптимальной толщины экранированной стенки (рис. 1, кривая 3), так и с ее отсутствием (рис. 1, кривая 4).

В третьей главе для анализа влияния термоактивной прокладки на тепловое состояние системы «стенка – термоактивная

прокладка – теплозащитное покрытие» были проанализированы принципы функционирования термоактивных прокладок, обоснованы условия сопряжения в изучаемой системе и предложена следующая математическая модель:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta_1}{\partial Fo} &= \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial x^2}, \quad Fo > 0, \quad \varepsilon < x < \varepsilon + H; \\ \varepsilon_* \frac{d \langle \Theta(Fo) \rangle}{dFo} &= \left. \frac{\partial \Theta_1(x, Fo)}{\partial x} \right|_{x=\varepsilon+0} - \Lambda \left. \frac{\partial \Theta_2(x, Fo)}{\partial x} \right|_{x=0-0} - \\ &\quad - Q_*(Fo), \quad Fo > 0, \quad 0 < x < \varepsilon; \\ \frac{\partial \Theta_2}{\partial Fo} &= \chi^2 \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial x^2}, \quad Fo > 0, \quad -l < x < 0; \\ \Theta_1(x, Fo)|_{Fo=0} &= \langle \Theta(Fo) \rangle|_{Fo=0} = \Theta_2(x, Fo)|_{Fo=0} = 0; \\ \left. \frac{\partial \Theta_1(x, Fo)}{\partial x} \right|_{x=\varepsilon+H} &= Bi \left\{ J - \Theta_1(x, Fo)|_{x=\varepsilon+H} \right\}; \\ \Theta_1(x, Fo)|_{x=\varepsilon+0} &= \langle \Theta(Fo) \rangle = \Theta_2(x, Fo)|_{x=0-0} \\ \left. \frac{\partial \Theta_2(x, Fo)}{\partial x} \right|_{x=-l} &= -\frac{Q(Fo)}{\Lambda}, \end{aligned}$$

где H , ε , l – безразмерные толщины стенки, термоактивной прокладки и теплозащитного покрытия соответственно; ε_* – критерияльный безразмерный параметр, определяемый как соотношением теплофизических характеристик материалов изучаемой системы, так и толщин стенки и теплозащитного покрытия; $\langle \Theta(Fo) \rangle$ – среднеинтегральная по толщине термоактивной прокладки температура; Q_* – удельная мощность теплопоглощения в термоактивной прокладке; Λ и χ^2 – безразмерные параметры, характеризующие относительную теплопроводность стенки и ее теплоинерционные свойства относительно теплозащитного покрытия.

Установлено, что для достижения преследуемой цели наибольший интерес представляет анализ температуры на теплоизолированной поверхности стенки. Проведен анализ влияния режимов функционирования термоактивной прокладки на температурное поле экранированной стенки, т.е. возможность программного управления теплоизоляцией. Для этого были рассмотрены два случая: полной компенсации воздействия внешнего теплового потока

(режим термостатирования; рис. 2) и программного изменения температуры на теплоизолируемой поверхности стенки (рис. 3). Установлено существование ситуаций, в которых невозможно обеспечение программного изменения температуры на теплоизолируемой поверхности стенки в стандартном классе функций-оригиналов, задающих закон теплопоглощения в термоактивной прокладке.

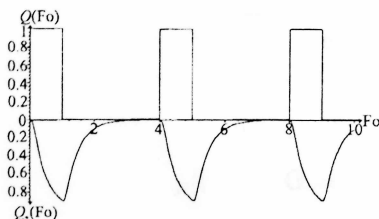


Рис. 2. Временная зависимость компенсирующего теплопоглощения $Q_*(Fo)$ термоактивной прокладки в импульсно-периодическом режиме внешнего теплового воздействия $Q(Fo)$ при $Q_0 = 1$, $Fo^* = 1$ и $\Delta Fo^* = 3$

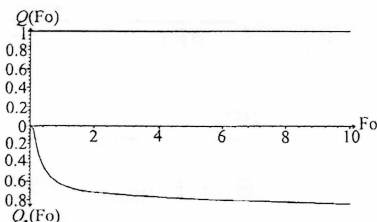


Рис. 3. Временная зависимость компенсирующего теплопоглощения $Q_*(Fo)$ термоактивной прокладки в режиме внешнего теплового воздействия постоянного мощности $Q(Fo) \equiv Q_0 = 1$ при $\epsilon_* = 0.1$

Для системы «стенка – термоактивная прокладка – теплозащитное покрытие» достаточные условия существования оптимальной толщины стенки, обеспечивающей минимальную установившуюся температуру ее наиболее нагретой точки, были найдены для режима функционирования термоактивной прокладки по принципу обратной связи.

В соответствии с результатами вычислительных экспериментов, частично представленных на рис. 4, можно утверждать, что в случае существования оптимальной толщины плоской изотропной стенки с теплозащитным покрытием и промежуточным слоем в виде термоактивной прокладки, функционирующей по принципу обратной связи, возрастание значения Bi при фиксированном k сопровождается уменьшением значения $\text{opt}\{H\}$ вплоть до нуля (см.

рис. 4, кривые 1, 2, 3, 4). Увеличение значения k сопровождается ростом значения $\text{opt}\{H\}$ при фиксированном Bi (см. рис. 4, кривые 2, 5, 6).

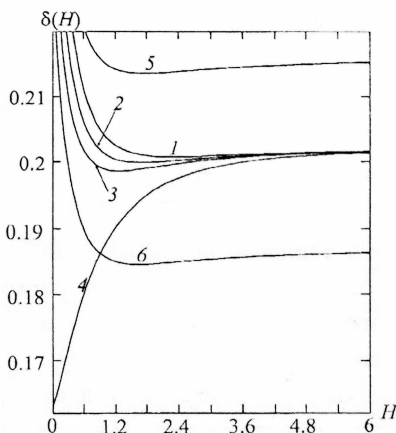


Рис. 4. Зависимость нормированной температуры $\delta(H) = [k^2 (Fo^* + \Delta Fo^*) (Q_0 Fo^*)^{-1}] \Theta(H, 1)$ наиболее нагретой точки экранированной стенки от ее толщины H при различных значениях критерия Био и коэффициента сосредоточенности k импульсно-периодического теплового потока с интенсивностью гауссовского типа: **1** - $\text{Bi} = 0.5$, $k = 1$; **2** - $\text{Bi} = 0.6$, $k = 1$; **3** - $\text{Bi} = 0.7$, $k = 1$; **4** - $\text{Bi} = 1.5$, $k = 1$; **5** - $\text{Bi} = 0.6$, $k = 1.1$; **6** - $\text{Bi} = 0.6$, $k = 0.9$

Четвертая глава посвящена корректному уточнению математической модели «сосредоточенная емкость», описывающей температурное поле экранированной стенки при воздействии на нее со стороны покрытия осесимметричного теплового потока, с целью качественного расширения диапазона применимости упрощенного аналога исходной «точной» модели.

Для построения уточненной модели «сосредоточенная емкость»:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial Fo} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \Theta}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2}, \quad Fo > 0, \quad 0 < x < H, \quad \rho \geq 0;$$

$$\frac{\partial \langle \Theta(\rho, Fo) \rangle}{\partial Fo} = \chi^2 \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \langle \Theta(\rho, Fo) \rangle}{\partial \rho} \right) + \Lambda \frac{\partial \Theta(\rho, x, Fo)}{\partial x} \right|_{x=0+0} + \\ + Q(\rho, Fo) \}, \quad Fo > 0, \quad -1 < x < 0, \quad \rho \geq 0;$$

$$\Theta(\rho, x, Fo)|_{Fo=0} = \langle \Theta(\rho, Fo) \rangle|_{Fo=0} = 0;$$

$$\frac{\partial \Theta(\rho, x, Fo)}{\partial x} \bigg|_{x=-1} = -Q(\rho, Fo);$$

$$\Lambda \frac{\partial \Theta(\rho, x, Fo)}{\partial x} \bigg|_{x=0+0} = \mu \{ \Theta(\rho, x, Fo)|_{x=0+0} - \langle \Theta(\rho, Fo) \rangle \};$$

$$\frac{\partial \Theta(\rho, x, Fo)}{\partial x} \bigg|_{x=H} = -Bi \Theta(\rho, x, Fo)|_{x=H}$$

предполагалось, что тепловой поток на защищенной поверхности рассматриваемой стенки пропорционален разности температуры $\Theta(\rho, 0 + 0, Fo)$ стенки на этой поверхности и среднеинтегральной по толщине покрытия температуре $\langle \Theta(\rho, Fo) \rangle$.

Неизвестный параметр μ найден из условия стремления к нулю при $Fo \rightarrow \infty$ модуля разности интегральных величин тепловых потерь в покрытии, определяемых с использованием «точной» модели и уточненной модели «сосредоточенная емкость». Установлено, что, как для экранированного полупространства, так и для экранированной стенки конечной толщины, значение этого параметра $\mu = 2$.

Результаты проведенных исследований указывают на значительные преимущества разработанной уточненной модели «сосредоточенная емкость» по сравнению с «точной» моделью.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОODY И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Плоская изотропная стенка, одна из поверхностей которой (незащищенная) охлаждается внешней средой, а другая (защищенная или незащищенная) – находится под воздействием внешнего осесимметричного теплового потока (концентрированного кругового или кольцевого, пространственно-распределенного с интенсивностью гауссовского типа), является одним из основных элементов рассматриваемых систем. По результатам проведенных исследований могут быть сделаны следующие выводы.

1. Вне зависимости от типа теплового потока, действующего на одну из незащищенных поверхностей рассматриваемой стенки, существует ее оптимальная толщина, минимизирующая установившуюся температуру наиболее нагретой точки этой стенки, что позволяет ограничиться далее анализом воздействия пространственно-распределенного теплового потока с интенсивностью гауссовского типа.

2. Реализация условий, полученных при выполнении диссертационной работы, гарантирует существование оптимальной толщины экранированной стенки.

3. Увеличение интенсивности теплоотдачи с незащищенной стороны стенки с теплозащитным покрытием приводит к монотонному убыванию (вплоть до нуля) ее оптимальной толщины, а уменьшение дисперсии действующего теплового потока – к возрастанию этой оптимальной толщины.

4. Разработанная математическая модель и полученные аналитические представления решения задачи об определении температурного поля в системе «стенка – термоактивная прокладка – теплозащитное покрытие» позволяют обосновать возможность управляемого воздействия на температурное поле рассматриваемой системы и проводить параметрический анализ процесса его формирования.

5. Предложенная и идентифицированная уточненная модель «сосредоточенная емкость» адекватно описывает процесс формирования температурного поля в экранированной стенке и позволяет эффективно решать соответствующие практически важные задачи.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. Аттетков А.В., Волков И.К., Тверская Е.С. Оптимальная толщина охлаждаемой стенки с покрытием, подверженной локальному импульсно-периодическому нагреву // Инженерно-физический журнал. – 2001. – Т. 74, №6. – С. 82-87.

2. Аттетков А.В., Волков И.К., Тверская Е.С. Термоактивная прокладка как средство управляемого воздействия на температурное поле конструкции // Известия РАН. Энергетика. – 2002. – №4. – С. 131-141.

3. Аттетков А.В., Волков И.К., Тверская Е.С. Математическое моделирование процесса теплопереноса в экранированной стенке при осесимметричном тепловом воздействии // Известия РАН. Энергетика. – 2003. – №5. – С. 75-88.

4. Аттетков А.В., Волков И.К., Тверская Е.С. Особенности формирования стационарного температурного поля в охлаждаемой стенке при импульсно-периодическом воздействии осесимметричных концентрированных и пространственно-распределенных тепловых потоков // Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений: Тез. докл. международной научно-технической конф. – Жуковский, 2004. – С. 93-94.

5. Тверская Е.С. Условия существования оптимальной толщины экранированной стенки, подверженной локальному импульсно-периодическому нагреву // Тепломассообмен ММФ-2004: Труды V Минского научного форума. – Минск, 2004. – Т.3. Теплопроводность и задачи оптимизации теплообмена. – С. 282-284.

6. Тверская Е.С. Уточнение модели «сосредоточенная емкость» для процесса формирования температурного поля в экранированной стенке при осесимметричном тепловом воздействии // Математика, компьютер, образование: Тез. докл. 11-ой международной конф. – Дубна, 2004. – С. 159.

7. Аттетков А.В., Тверская Е.С. Особенности формирования стационарного температурного поля в охлаждаемой стенке при ее импульсно-периодическом нагреве через круговую область // Современные естественно-научные и гуманитарные проблемы: Сборник трудов. – М.: Логос, 2005. – С. 413-423.

8. Аттетков А.В., Волков И.К., Тверская Е.С. Математическое моделирование процесса управляемого воздействия на температурное поле экранированного полупространства // Необратимые процессы в природе и технике: Тез. докл. Всероссийской конф. – М., 2005. – С. 148-150.