

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Национальный исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»

---



Кафедра теплофизики

**ТЕПЛОБМЕН  
В ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ**

**Сборник задач**

Под редакцией профессора В.И. Деева

*Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии»  
в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений*

Москва 2010

УДК 536.2 (076)  
ББК 31.31я7  
Т-15

**Теплообмен в ядерных энергетических установках. Сборник задач:** Учебное пособие / В.В. Архипов, В.И. Деев, А.С. Корсун, Ю.Е. Похвалов; Под ред. проф. В.И. Деева. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 128 с.

Учебное пособие составлено в соответствии с программами обучения студентов по специальности 140305 «Ядерные реакторы и энергетические установки». Содержит задачи, решение которых необходимо для практического усвоения различных курсов теплопередачи, входящих в комплекс дисциплин под общим названием «Теплофизика реакторов, динамика жидкостей и газов».

В основу задачника положено издание, которое вышло в 1992 г. под названием «Задачник по теплообмену в ЯЭУ». Пособие дополнено новыми задачами, а также современными справочными материалами. Ряд задач ориентирован на выполнение численных расчетов с помощью ЭВМ и может быть предложен студентам в качестве домашних заданий. По сравнению с предыдущим изданием все задачи имеют ответы.

Предназначено для студентов старших курсов физико-технического факультета НИЯУ МИФИ. Может также использоваться преподавателями и студентами других учебных заведений, объединенных в НИЯУ МИФИ.

Подготовлено в рамках Программы создания и развития НИЯУ МИФИ.

Рецензент            доц. кафедры оборудования и  
                                 эксплуатации ЯЭУ Обнинского ИАТЭ,  
                                 канд. техн. наук В.И. Слободчук

*ISBN 978-5-7262-1287-6*

© *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2010*

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	4
<b>Список основных обозначений</b> .....	5
<b>Глава 1. Теплопроводность</b> .....	7
Основные уравнения теории теплопроводности .....	7
Задачи .....	12
Процессы стационарной теплопроводности в плоской стенке при отсутствии внутренних источников тепла .....	12
Процессы стационарной теплопроводности в цилиндрической и сферической стенках при отсутствии внутренних источников тепла ....	20
Процессы стационарной теплопроводности в телах с внутренним тепловыделением .....	25
Нестационарные процессы теплопроводности .....	31
Теплопроводность тел с пренебрежимо малым внутренним термическим сопротивлением .....	44
<b>Глава 2. Конвективный и радиационный теплообмен</b> .....	50
Основные дифференциальные уравнения и расчетные соотношения .....	50
Задачи .....	57
Теплообмен при внешнем обтекании тел .....	57
Теплообмен при естественной конвекции .....	60
Теплообмен при течении жидкости в каналах .....	62
Теплообмен при кипении и конденсации .....	66
Теплообмен излучением .....	76
<b>Ответы</b> .....	79
<b>Приложение</b> .....	108
<b>Список рекомендуемой литературы</b> .....	126

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Процессы теплообмена играют исключительно важную роль в ядерных энергетических установках (ЯЭУ). От протекания этих процессов зависит температурный режим работы ядерного реактора и всей технологической схемы установки.

Предлагаемое учебное пособие содержит задачи, которые охватывают все основные разделы курсов по теплообмену в ЯЭУ, читаемых студентам НИЯУ МИФИ. По сравнению с изданием, которое вышло в 1992 г. под названием «Задачник по теплообмену в ЯЭУ», в сборник включено свыше 50-ти новых задач, большая часть которых непосредственно связана с расчетами тепловых процессов в современных ядерных реакторах. Вместе с тем авторы сочли целесообразным оставить в новом издании ряд типовых задач общего прикладного характера. Достаточно простые методы анализа и ясный смысл результатов решения таких задач, как показывает практика, позволяют студентам наиболее четко усвоить основные законы теплопередачи. Некоторые из этих задач заимствованы из других источников, на что указывают ссылки с соответствующим номером в списке литературы.

В начале каждой главы даются теоретические сведения, в которые входят общие уравнения теплопередачи, а также соотношения, которые рекомендуется использовать при проведении инженерных расчетов. Необходимый справочный материал, включающий теплофизические свойства ряда веществ и критические плотности тепловых потоков, содержится в приложении к сборнику. Там же приведены номограммы, с помощью которых можно быстро оценить параметры нестационарных процессов теплопроводности. Таким образом, решение большинства предлагаемых задач не требует привлечения дополнительных источников информации. Список же рекомендуемой литературы только поможет студентам при необходимости углубить свои знания в области изучаемой дисциплины, основная учебная литература в списке выделена жирным шрифтом.

Авторы выражают глубокую благодарность Е.В. Смирновой, В.М. Маркочеву и В.И. Наумову, чьи замечания и пожелания, высказанные во время подготовки рукописи к изданию, несомненно, способствовали ее улучшению.

# СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$   
 $c$  – удельная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$   
 $d$  – диаметр,  $\text{м}$   
 $E$  – излучательная способность тела,  $\text{Вт}/\text{м}^2$   
 $F$  – площадь поверхности,  $\text{м}^2$   
 $g$  – ускорение силы тяжести,  $\text{м}/\text{с}^2$   
 $h$  – высота,  $\text{м}$   
 $I$  – сила тока,  $\text{А}$   
 $i$  – удельная энтальпия,  $\text{Дж}/\text{кг}$   
 $k$  – коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$   
 $l$  – линейный размер,  $\text{м}$   
 $M$  – массовый расход,  $\text{кг}/\text{с}$   
 $p$  – давление,  $\text{Па}$   
 $Q$  – количество тепла,  $\text{Дж}$ , или общий тепловой поток,  $\text{Вт}$   
 $q$  – плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$   
 $q_{\text{кр}}$  – критическая плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$   
 $q_l$  – тепловой поток на единицу длины,  $\text{Вт}/\text{м}$   
 $q_v$  – плотность внутренних источников тепловыделения,  $\text{Вт}/\text{м}^3$   
 $R_l$  – электросопротивление на единицу длины,  $\text{Ом}/\text{м}$   
 $r$  – радиус,  $\text{м}$ , или скрытая теплота парообразования,  $\text{Дж}/\text{кг}$   
 $S$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$   
 $s$  – коэффициент скольжения в двухфазном потоке  
 $T$  – абсолютная температура,  $\text{К}$   
 $t$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$   
 $\Delta U$  – падение напряжения,  $\text{В}$   
 $V$  – объем,  $\text{м}^3$ , или объемный расход,  $\text{м}^3/\text{с}$   
 $w$  – скорость течения,  $\text{м}/\text{с}$   
 $x$  – массовое расходное паросодержание (относительная энтальпия)  
 $x_{\text{гр}}$  – граничное паросодержание  
 $x, y, z$  – координаты,  $\text{м}$   
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$   
 $\beta$  – температурный коэффициент объемного расширения,  $\text{К}^{-1}$   
 $\delta$  – толщина,  $\text{м}$   
 $\varepsilon$  – степень черноты  
 $\Theta$  – безразмерная температура  
 $\theta$  – краевой угол смачивания, град  
 $\vartheta$  – избыточная температура,  $^{\circ}\text{C}$   
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$   
 $\mu$  – динамический коэффициент вязкости,  $\text{Па}\cdot\text{с}$   
 $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$   
 $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления

$\Pi$  – периметр, м  
 $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>  
 $\rho'$  – плотность жидкости на линии насыщения, кг/м<sup>3</sup>  
 $\rho''$  – плотность пара на линии насыщения, кг/м<sup>3</sup>  
 $\rho_s$  – удельное электросопротивление, Ом·мм<sup>2</sup>/м  
 $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м  
 $\sigma_0$  – постоянная Стефана – Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>)  
 $\tau$  – время, с  
 $\varphi, \psi$  – угол  
 $\omega$  – круговая частота, с<sup>-1</sup>

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad \text{– число Био}$$

$$Fo = \frac{a\tau}{l^2} \quad \text{– число Фурье}$$

$$Gr = \frac{g\beta\Delta t l^3}{\nu^2} \quad \text{– число Грасгофа}$$

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad \text{– число Нуссельта}$$

$$Pe = \frac{wl}{a} \quad \text{– число Пекле}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad \text{– число Прандтля}$$

$$Ra = \frac{g\beta\Delta t l^3}{\nu a} \quad \text{– число Релея}$$

$$Re = \frac{wl}{\nu} \quad \text{– число Рейнольдса}$$

$$St = \frac{\alpha}{c\rho w} \quad \text{– число Стантона}$$

# Г Л А В А 1

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

### ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ТЕОРИИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Применение закона сохранения энергии к неоднородно нагретому твердому телу или покоящейся жидкости приводит к следующему дифференциальному уравнению:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\operatorname{div} \vec{q} + q_v, \quad (1.1)$$

где  $t(x, y, z, \tau)$  – температура;  $\vec{q}(x, y, z, \tau)$  – вектор плотности теплового потока;  $q_v(x, y, z, \tau)$  – мощность внутренних источников тепловыделения в теле;  $\rho$  и  $c$  – плотность и удельная теплоемкость тела соответственно.

Для однородных, изотропных и непрозрачных сред поток тепла при неоднородном распределении температуры согласно закону теплопроводности Фурье пропорционален по величине и противоположен по направлению градиенту температуры, т.е.

$$\vec{q} = -\lambda \operatorname{grad} t. \quad (1.2)$$

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  определяется экспериментально и в общем случае зависит от температуры и давления.

Исключая из (1.1) и (1.2) вектор плотности теплового потока, получим дифференциальное уравнение, описывающее распределение температур в неоднородно нагретом теле:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) + q_v, \quad (1.3)$$

называемое *дифференциальным уравнением Фурье*, или *уравнением теплопроводности*.

Развернутая запись уравнений (1.2) и (1.3) в трех основных системах координат имеет вид:

в декартовых прямоугольных координатах  $(x, y, z)$

$$\vec{q} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \vec{i} - \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \vec{j} - \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \vec{k}; \quad (1.2a)$$

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_v; \quad (1.3a)$$

в цилиндрических координатах  $(r, \varphi, z)$

$$\vec{q} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \vec{i}_r - \lambda \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial \varphi} \vec{i}_\varphi - \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \vec{i}_z; \quad (1.2b)$$

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_v; \quad (1.3b)$$

в сферических координатах  $(r, \varphi, \psi)$

$$\vec{q} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \vec{i}_r - \lambda \frac{1}{r \sin \psi} \frac{\partial t}{\partial \varphi} \vec{i}_\varphi - \lambda \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial \psi} \vec{i}_\psi; \quad (1.2b)$$

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \lambda \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \psi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \psi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left( \sin \psi \lambda \frac{\partial t}{\partial \psi} \right) + q_v. \quad (1.3b)$$

Во многих случаях с достаточной для практических расчетов точностью можно пренебречь зависимостью  $\rho$ ,  $c$  и  $\lambda$  от температуры, принять эти величины постоянными и равными их средним значениям в рассматриваемом диапазоне температур. В этих случаях уравнение (1.2) существенно упрощается, так как становится линейным относительно температуры:



$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{\rho c}, \quad (1.4)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ .

Закон теплопроводности Фурье в виде (1.2) не применим к анизотропным телам (кристаллам, слоистым материалам и др.), способность которых проводить тепло зависит от направления. В анизотропных средах тепловой поток связан с полем температуры соотношением:

$$q_i = - \sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} \frac{\partial t}{\partial x_j}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (1.5)$$

где  $q_i$  – проекция вектора плотности теплового потока на ось декартовой прямоугольной системы координат;  $\lambda_{ij}$  – компоненты тензора теплопроводности анизотропной среды:

$$\{\lambda_{ij}\} = \begin{vmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} \end{vmatrix}. \quad (1.6)$$

Подставляя (1.5) в (1.1), получим следующее уравнение, описывающее поле температур в анизотропной среде:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_{ij} \frac{\partial t}{\partial x_j} \right) + q_v. \quad (1.7)$$

Тензор теплопроводности  $\{\lambda_{ij}\}$  является симметричным, и поэтому в системе координат, оси которой параллельны главным осям анизотропии тела, отличными от нуля будут только диагональные компоненты тензора:

$$\{\lambda_{ij}\} = \begin{vmatrix} \lambda_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{33} \end{vmatrix}. \quad (1.8)$$

Уравнения (1.5) и (1.7) при этом упрощаются:

$$\vec{q} = -\lambda_{11} \frac{\partial t}{\partial x_1} \vec{i}_1 - \lambda_{22} \frac{\partial t}{\partial x_2} \vec{i}_2 - \lambda_{33} \frac{\partial t}{\partial x_3} \vec{i}_3; \quad (1.9)$$

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left( \lambda_{11} \frac{\partial t}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \lambda_{22} \frac{\partial t}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \lambda_{33} \frac{\partial t}{\partial x_3} \right) + q_v. \quad (1.10)$$

При решении задач теплопроводности могут использоваться следующие граничные условия:

*граничные условия первого рода* определяют температуру на границах области как функцию координат точек поверхности и времени:

$$t_F = f(\vec{r}_F, \tau); \quad (1.11)$$

*граничные условия второго рода* задают распределение тепловой нагрузки на границах области как функцию координат точек поверхности и времени:

$$q_F = -\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_F = f(\vec{r}_F, \tau); \quad (1.12)$$

*граничные условия третьего рода* задают линейную связь между тепловой нагрузкой поверхности и ее температурой. Так, при омывании тела потоком жидкости с температурой  $t_{ж}$  условие на поверхности тела имеет вид

$$-\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_F = \alpha(t_F - t_{ж}), \quad (1.13)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\alpha = \alpha(\vec{r}_F, \tau)$ .

Нелинейное граничное условие вида

$$-\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_F = C(\vec{r}_F)(t_F - t_{\text{ж}})^n, \quad n \neq 1, \quad (1.14)$$

выполняется при нагревании (охлаждении) тел путем естественной конвекции ( $n \approx 1,25$ ), при кипении жидкости ( $n \approx 3,33$ ) или конденсации пара ( $n \approx 1,25$ ) на поверхности тела.

При теплообмене с поверхности тела путем излучения граничное условие имеет вид:

$$-\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_F = \varepsilon \sigma_0 T_F^4 - q_{\text{погл}}, \quad (1.15)$$

где  $q_{\text{погл}}$  – плотность теплового потока, поглощенного телом.

## ЗАДАЧИ

### Процессы стационарной теплопроводности в плоской стенке при отсутствии внутренних источников тепла

1. Найти стационарное распределение температуры и поток тепла в неограниченной плоской стенке толщиной  $\delta$  при граничных условиях первого рода (рис. 1.1), считая коэффициент теплопроводности стенки  $\lambda = \text{const}$  и плотность внутренних источников тепловыделения в ней  $q_v = 0$ .

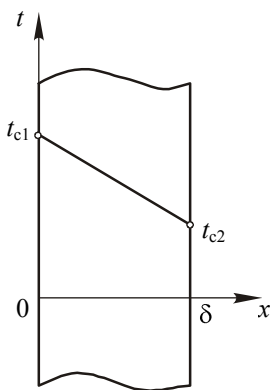


Рис. 1.1

2. Через плоскую стенку толщиной 100 мм проходит поток тепла  $80 \text{ Вт/м}^2$ . Определить падение температуры  $\Delta t$ , а также градиент температуры  $dt/dx$  в этой стенке, если она выполнена: 1) из латуни; 2) из красного кирпича; 3) из пробки [2].

3. Определить необходимую толщину стенки из красного кирпича высотой  $h = 4 \text{ м}$  и длиной  $l = 5 \text{ м}$ , чтобы потери тепла через стенку не превышали  $Q = 2600 \text{ Вт}$ . При этом на поверхностях стенки поддерживаются температуры  $t_{c1} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_{c2} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

4. Поверхность плоского вертикального нагревателя высотой  $0,5 \text{ м}$  и шириной  $0,6 \text{ м}$  покрыта с обеих сторон изоляцией из асбеста. Чему равна толщина слоя изоляции, если при мощности нагревателя  $500 \text{ Вт}$  его температура составляет  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , а температура наружной поверхности изоляции равна  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ?

5. Антикатоде рентгеновской трубки выполнен в виде медного стержня длиной  $300 \text{ мм}$  и диаметром  $15 \text{ мм}$ . Определить разницу температур между горячим и холодным концами стержня, если через боковую поверхность стержня тепло не проходит, а холодный конец омывается проточной водой. Вода нагревается на  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  при расходе  $1 \text{ кг/мин}$  [2].

6. Получить выражение для плотности теплового потока через плоскую стенку, состоящую из трех слоев толщиной  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  с из-

вестными значениями коэффициента теплопроводности  $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3$ . На внешних поверхностях стенки поддерживаются постоянные температуры  $t_1, t_4$ ; тепловой контакт между слоями считать идеальным. Определить перепады температур на каждом слое. Полученные результаты обобщить на случай  $n$ -слойной плоской стенки.

7. На рис. 1.2 представлено распределение температуры в составной плоской стенке из пяти слоев. Указать номер слоя, материал которого имеет: а) наибольший коэффициент теплопроводности; б) наименьший коэффициент теплопроводности.

8. Слой льда на реке толщиной 400 мм покрыт слоем снега толщиной 200 мм. Температуры нижней поверхности льда и верхней поверхности снега равны, соответственно,  $t_{c1} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{c3} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить плотность потока тепла через лед и температуру верхней поверхности льда.

9. Обмуровка печи состоит из слоев шамотного и красного кирпича, между которыми имеется засыпка из диатомита. Толщина шамотного слоя  $\delta_1 = 120 \text{ мм}$ , диатомитовой засыпки  $\delta_2 = 60 \text{ мм}$  и красного кирпича  $\delta_3 = 250 \text{ мм}$ . Какой толщины должен быть слой красного кирпича, если отказаться от засыпки из диатомита, чтобы тепловой поток через обмуровку оставался неизменным [11]?

10. Плоская стенка сушильной камеры площадью  $5 \text{ м}^2$  покрыта тепловой изоляцией. Стенка камеры – стальная толщиной  $\delta_1 = 4 \text{ мм}$ . Слой изоляции выполнен из новоасбозурита ( $\lambda = 0,17 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ) толщиной  $\delta_2 = 50 \text{ мм}$ . Температуры внутренней поверхности стенки камеры  $t_{c1} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$  и внешней поверхности изоляции  $t_{c3} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Вычислить количество тепла, передаваемое через стенку, и температуру на границе стенки и изоляции.

11. Определить плотность потока тепла  $q$  через стенку холодильника, состоящую из наружного слоя красного кирпича и внут-

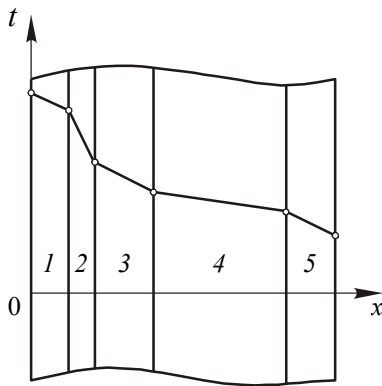


Рис. 1.2

ренного слоя сухой пробки. Толщины слоев, соответственно, равны  $\delta_1 = 250$  мм и  $\delta_2 = 200$  мм. Обе поверхности пробкового слоя покрыты гидроизоляцией, термическим сопротивлением которой можно пренебречь. Температуры наружных поверхностей кирпичного и пробкового слоев равны  $t_{c1} = 25$  °С,  $t_{c3} = -2$  °С соответственно. Определить также температуру  $t_{c2}$  в плоскости касания кирпича и пробки [2].

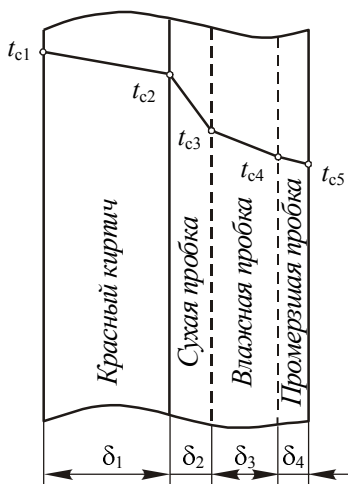


Рис. 1.3

**12.** Решить задачу 11 при условии, что пробковый слой не покрыт гидроизоляцией, вследствие этого пары воды проникают в пробковый слой; здесь они конденсируются, а конденсат замерзает (рис. 1.3). Коэффициент теплопроводности влажной пробки  $\lambda_3 = 0,14$  Вт/(м·К), а промерзшей пробки  $\lambda_4 = 0,35$  Вт/(м·К). Влажность наружного воздуха такова, что образование росы происходит при температуре  $t_{c3} = 10$  °С. Все остальные данные, как и в задаче 11. Определить также толщину  $\delta_3$  зоны конденсации паров воды в слое пробки и толщину  $\delta_4$  зоны промерзания пробки [2].

**13.** В приборе для определения коэффициента теплопроводности твердых материалов методом пластины между плоскими поверхностями нагревателя и холодильника расположена круглая пластина из испытуемого вещества. Диаметр пластины  $d = 120$  мм. Расход тепла через пластину  $Q = 60$  Вт, а температуры горячей и холодной плоскостей тел прибора  $t_{c1} = 180$  °С и  $t_{c2} = 30$  °С. Найти погрешность в определении коэффициента теплопроводности, вызванную термическим сопротивлением воздушных зазоров ( $\delta_2 = 0,1$  мм), которые остались между поверхностями прибора и пластины вследствие плохой их пригонки [2].

*Указание:* передачу тепла излучением через воздушные зазоры не учитывать.

**14.** Определить стационарное поле температуры и поток тепла в плоской стенке толщиной  $\delta$ , которая омывается с двух сторон жидкостью. Заданы коэффициент теплопроводности материала стенки  $\lambda$ , коэффициенты теплоотдачи на поверхностях стенки  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , температуры жидкости  $t_{ж1}$  и  $t_{ж2}$ .

**15.** Определить тепловой поток через  $1 \text{ м}^2$  кирпичной стены помещения толщиной в два кирпича ( $\delta = 510 \text{ мм}$ ) с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Температура воздуха внутри помещения  $t_{ж1} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ; коэффициент теплоотдачи к внутренней поверхности стены  $\alpha_1 = 7,5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ ; температура наружного воздуха  $t_{ж2} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$ ; коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стены, обдуваемой ветром,  $\alpha_2 = 20 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ . Вычислить также температуры поверхностей стены  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$  [11].

**16.** Решить задачу 15 при условии, что стена покрыта снаружи слоем тепловой изоляции толщиной  $50 \text{ мм}$  с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{из} = 0,08 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Сравнить потери тепла через изолированную и неизолированную стены [11].

**17.** Вычислить тепловой поток через  $1 \text{ м}^2$  чистой поверхности нагрева парового котла и температуры на поверхностях стенки, если заданы следующие величины: температура дымовых газов  $t_{ж1} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ; температура кипящей воды  $t_{ж2} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ; коэффициенты теплоотдачи от газов к стенке  $\alpha_1 = 100 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$  и от стенки к кипящей воде  $\alpha_2 = 5000 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ . Коэффициент теплопроводности материала стенки  $\lambda = 50 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , толщина стенки  $\delta = 12 \text{ мм}$  [11].

**18.** Решить задачу 17 при условии, что в процессе эксплуатации поверхность нагрева парового котла со стороны дымовых газов покрылась слоем сажи толщиной  $\delta_c = 1 \text{ мм}$  ( $\lambda_c = 0,08 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) и со стороны воды слоем накипи толщиной  $\delta_n = 2 \text{ мм}$  ( $\lambda_n = 0,8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ). Вычислить тепловой поток через  $1 \text{ м}^2$  загрязненной поверхности нагрева и температуры на поверхностях соответствующих слоев  $t_{c1}$ ,  $t_{c2}$ ,  $t_{c3}$  и  $t_{c4}$ . Сравнить полученные величины с результатами задачи 17 и определить уменьшение тепловой нагрузки [11].

**19.** На рис. 1.4 изображен фрагмент высокотемпературной установки, состоящей из несущей конструкции (металлическая стенка, коэффициент теплопроводности  $\lambda_1 = 35 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) и двух теплоизоляционных блоков с отличающимися друг от друга коэффициентами теплопроводности ( $\lambda_2 = 2,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ,  $\lambda_3 = 1,8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ). Внут-

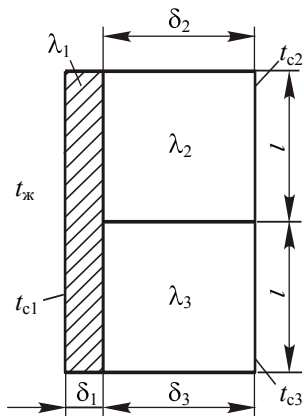


Рис. 1.4

рения поверхность металлической стенки омывается потоком гелия с температурой  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи от гелия к стенке  $\alpha = 200\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Наружные поверхности теплоизоляционных блоков имеют одинаковую температуру  $t_{c2,3} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Геометрические размеры элементов установки: толщина  $\delta_1 = 20\text{ мм}$ ;  $\delta_{2,3} = l = 600\text{ мм}$ . Необходимо: а) составить тепловую цепь, моделирующую процесс переноса тепла в рассматриваемой системе; б) рассчитать входящие в тепловую цепь термические сопротивления; в) определить тепловой

поток, приходящийся на единицу ширины металлической стенки; г) найти температуру поверхности, омываемой гелием,  $t_{c1}$ .

**20.** На стенку падает и поглощается поток лучистой энергии плотностью  $q$ . Определить установившуюся температуру  $t_{c1}$  подогреваемой поверхности стенки, если заданы следующие величины: толщина стенки  $\delta$ , коэффициент теплопроводности материала стенки  $\lambda$ , с обеих сторон стенка омывается потоком газа с температурой  $t_{ж}$ , коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ .

**21.** Найти плотность теплового потока в плоской стенке толщиной  $\delta$ , поверхности которой имеют постоянные температуры  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$  ( $t_{c1} > t_{c2}$ ), если  $q_v = 0$ , а коэффициент теплопроводности материала стенки – произвольная функция температуры  $\lambda = \lambda(t)$ .

**22.** Определить тепловой поток через пластину из графита толщиной  $\delta = 15\text{ мм}$ . Температуры поверхностей пластины равны  $t_{c1} = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $t_{c2} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно.

**23.** Плоскую поверхность необходимо изолировать так, чтобы потери тепла с единицы поверхности в единицу времени не превышали  $450\text{ Вт}/\text{м}^2$ . Температура поверхности под изоляцией  $t_{c1} = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура внешней поверхности изоляции  $t_{c2} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить необходимую толщину изоляции из асбостермита [11].



24. Через плоскую стенку проходит постоянный тепловой поток. Коэффициент теплопроводности материала стенки зависит от температуры. Определить, каким будет профиль температуры (выпуклым или вогнутым), если коэффициент теплопроводности увеличивается с ростом температуры,  $d\lambda/dt > 0$  (уменьшается,  $d\lambda/dt < 0$ ).

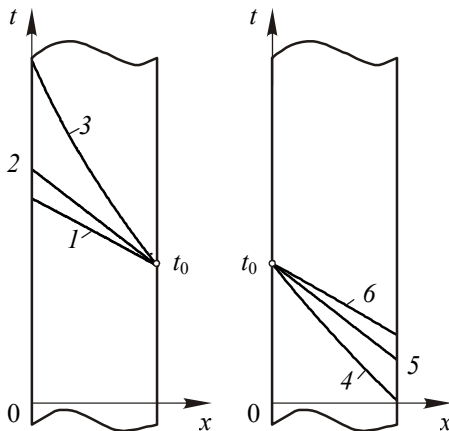


Рис. 1.5

25. На рис. 1.5 показаны распределения температуры по толщине пластины при прохождении через нее постоянного теплового потока для трех различных случаев зависимости коэффициента теплопроводности от температуры: а)  $\lambda(t) = \lambda_0$ ; б)  $\lambda(t) = \lambda_0[1 + \beta(t - t_0)]$ ; в)  $\lambda(t) = \lambda_0[1 - \beta(t - t_0)]$  ( $\lambda_0 = \text{const}$ ,  $\beta > 0$ ). Какому закону зависимости  $\lambda(t)$  соответствует каждая из приведенных на рисунке кривых?

26. Распределения температур по толщине неограниченной пластины при граничных условиях третьего рода и различной зависимости коэффициента теплопроводности от температуры, а именно: а)  $\lambda(t) = \lambda_0$ ; б)  $\lambda(t) = \lambda_0(1 + \beta t)$ ; в)  $\lambda(t) = \lambda_0(1 - \beta t)$  ( $\lambda_0 = \text{const}$ ,  $\beta > 0$ ), имеют вид, показанный на рис. 1.6. Коэффициенты теплоотдачи на левой и правой сторонах пластины различаются, но на каждой из сторон во всех трех рассматриваемых случаях одинаковы. Какому закону зависимости  $\lambda(t)$  соответствует каждая из приведенных на рисунке кривых? В каком случае через пластину передается больше тепла?

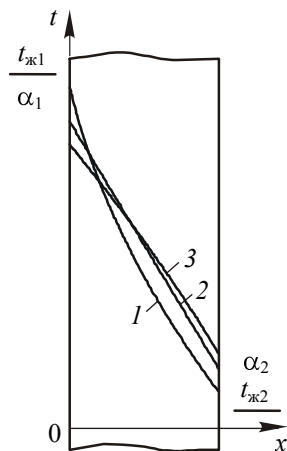


Рис. 1.6

**27.** Найти распределение температуры  $t(x)$  в плоской стенке толщиной  $\delta$ , если на поверхностях стенки заданы граничные условия первого рода  $t(0) = t_{c1}$ ,  $t(\delta) = t_{c2}$ , а коэффициент теплопроводности материала стенки – линейная функция температуры  $\lambda(t) = \lambda_0(1 + \beta t)$ .

**28.** Используя решение задачи 27, рассчитать на ЭВМ значения температур в сечениях  $x = 0,025; 0,05; 0,075; 0,10; 0,125; 0,15; 0,175; 0,20; 0,225$  м плоской стенки, если ее толщина  $\delta = 0,25$  м, температуры поверхностей  $t_{c1} = 1350$  °С и  $t_{c2} = 50$  °С. Расчеты провести для значений  $\beta = 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}$  К<sup>-1</sup>. Построить графики распределения температур по толщине стенки.

**29.** Определить плотность потока тепла и поле температур в плоской теплоизолирующей стенке из совелита толщиной  $\delta = 100$  мм. Температуры поверхностей стенки равны  $t_{c1} = 450$  °С и  $t_{c2} = 50$  °С соответственно.

**30.** В низкотемпературной установке теплоприток к жидкому гелию, находящемуся в криостате, происходит по проводу из меди марки М1 диаметром  $d = 0,1$  мм и длиной  $l = 100$  мм. Рассчитать скорость испарения гелия, если давление в криостате равно атмосферному, температура холодного конца провода равна температуре насыщения гелия (4,2 К), а другой конец провода поддерживается: а) при температуре насыщения водорода (20,4 К); б) при температуре насыщения азота (77,4 К). Принять, что утечки тепла с боковой поверхности провода отсутствуют. Температурную зависимость коэффициента теплопроводности меди М1 в диапазоне температур  $4 \div 80$  К можно описать формулой:

$$\lambda(T) = -200 + 165T - 5,4T^2 + 6,5 \cdot 10^{-2}T^3 - 2,73 \cdot 10^{-4}T^4.$$

**31.** Найти распределение температуры по толщине плоской стенки, если задан поток тепла  $q$  через стенку, а также температура одной ее поверхности (при  $x = 0$   $t = t_{c1}$ ). Коэффициент теплопроводности материала, из которого выполнена стенка, изменяется в зависимости от температуры по уравнению  $\lambda(t) = \lambda_0(1 + \beta t)$ .

**32.** Определить эквивалентный коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{экв}}$  пакета трансформаторной стали, если тепловой поток направлен поперек листов металла и изоляционной бумаги. Листы метал-

ла имеют толщину  $\delta_1 = 0,5$  мм и теплопроводность  $\lambda_1 = 50$  Вт/(м·К), а листы бумаги –  $\delta_2 = 0,05$  мм и  $\lambda_2 = 0,1$  Вт/(м·К) [2].

**33.** Решить задачу 32 для случая, когда тепловой поток направлен вдоль листов металла и изоляционной бумаги.

**34.** Определить поток тепла через единицу поверхности бесконечной пластины толщиной  $\delta$  из слоистого материала (рис. 1.7), на поверхности которой поддерживаются температуры  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$ . Слои расположены под углом  $\alpha$  к плоскости пластины. Коэффициент теплопроводности вдоль слоев  $\lambda_{\eta\eta}$ , поперек слоев  $\lambda_{\xi\xi}$ .

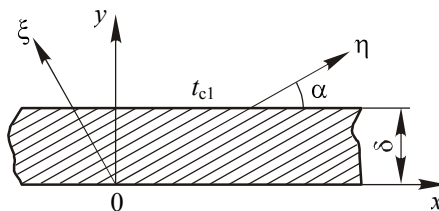


Рис. 1.7

**35.** Для условий задачи 34 определить составляющие теплового потока в направлениях поперек ( $q_y$ ) и вдоль ( $q_x$ ) пластины, а также угол отклонения вектора плотности теплового потока от направления поперек пластины. Заданы следующие параметры: материал пластины – кристаллический кварц (коэффициенты теплопроводности  $\lambda_{\eta\eta} = 1,94$  Вт/(м·К),  $\lambda_{\xi\xi} = 0,72$  Вт/(м·К)); толщина пластины  $\delta = 5$  мм;  $\alpha = 30^\circ$ ; перепад температур на пластине  $\Delta t = t_{c1} - t_{c2} = 100$  °С.

**36.** По пластине из графита толщиной  $\delta = 10$  мм в направлении оси  $x$  (см. рис. 1.7) проходит поток тепла плотностью  $q = 2 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. Боковые поверхности пластины ( $y = 0$  и  $y = \delta$ ) теплоизолированы. Направления главных осей анизотропии материала пластины показаны на рисунке ( $\alpha = 45^\circ$ ), соответствующие коэффициенты теплопроводности равны  $\lambda_{\eta\eta} = 65$  Вт/(м·К),  $\lambda_{\xi\xi} = 40$  Вт/(м·К). Определить перепад температур между боковыми поверхностями пластины. Во сколько раз поперечный градиент температуры меньше продольного?

## Процессы стационарной теплопроводности в цилиндрической и сферической стенках при отсутствии внутренних источников тепла

**37.** Найти стационарное поле температуры  $t(r)$  и поток тепла на единицу длины неограниченной цилиндрической стенки при граничных условиях первого рода, считая коэффициент теплопроводности стенки  $\lambda = \text{const}$  и плотность внутренних источников теплоты в ней  $q_v = 0$ .

**38.** Найти наибольшее отношение наружного диаметра  $d_2$  трубы к внутреннему  $d_1$ , при котором расход тепла через ее стенку еще можно рассчитать с ошибкой до 4 % по приближенной формуле:

$$q_l \approx \pi d_{\text{ср}} \frac{\lambda}{\delta} (t_{\text{с1}} - t_{\text{с2}}),$$

где  $d_{\text{ср}} = 0,5(d_1 + d_2)$ ,  $\delta = 0,5(d_2 - d_1)$  [2].

**39.** Определить наибольшую допустимую силу тока для медного провода диаметром  $d = 2$  мм, покрытого резиновой изоляцией толщиной  $\delta = 1$  мм, если максимальная температура изоляции не должна превышать  $60^\circ\text{C}$ , а температура наружной поверхности изоляции равна  $0^\circ\text{C}$  [2].

**40.** Труба радиусом  $R$  покрыта двумя слоями изоляции одинаковой толщины  $\delta$ . Коэффициенты теплопроводности изоляционных материалов  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , причем  $\lambda_1 > \lambda_2$ .

Как расположить слои, чтобы теплотери были минимальны? Разность температур внутренней и наружной поверхностей изоляций не меняется.

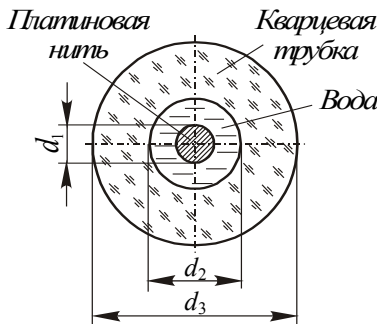


Рис. 1.8

**41.** В прибор для определения коэффициента теплопроводности методом нагретой нити (рис. 1.8) залита вода под давлением 2,4 МПа. Вычислить коэффициент теплопроводности  $\lambda_1$  и среднюю температуру  $t_{\text{ср}}$  воды, находящейся в этом

приборе в кольцевом зазоре между платиновой нитью и стенками кварцевой трубки ( $\lambda_2 = 1,6 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ), используя полученные в результате измерений величины: диаметр нити  $d_1 = 0,1 \text{ мм}$ ; длина нити  $l = 100 \text{ мм}$ ; температура нити  $t_1 = 221 \text{ }^\circ\text{C}$ ; внутренний и наружный диаметры кварцевой трубки  $d_2 = 0,7 \text{ мм}$ ,  $d_3 = 2,7 \text{ мм}$ ; температура внешней поверхности кварцевой трубки  $t_3 = 206 \text{ }^\circ\text{C}$ ; расход тепла через кольцевой слой воды  $Q = 2,5 \text{ Вт}$  [2].

**42.** Для снижения потерь тепла трубопроводы энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР покрыты быстростъемной тепловой изоляцией многоразового использования. Теплоизоляционный слой толщиной  $100 \text{ мм}$  выполнен из базальтовых волокон, его эффективный коэффициент теплопроводности в эксплуатационных условиях равен  $0,032 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Определить потери тепла с одного метра трубопровода диаметром  $110 \text{ мм}$ , если температура изолированной поверхности трубопровода составляет  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , а температура наружной поверхности изоляции равна  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**43.** Трубопровод, по которому отводится перегретый пар из парогенератора плавучей АТЭС, имеет наружный диаметр  $260 \text{ мм}$  и общую длину  $20 \text{ м}$ . Давление в трубопроводе  $3,8 \text{ МПа}$ , температура пара  $290 \text{ }^\circ\text{C}$ , расход пара  $55 \text{ т/ч}$ . Какой толщины должен быть слой тепловой изоляции трубопровода, чтобы снижение температуры пара из-за потерь тепла в окружающую среду не превышало  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ? Эффективный коэффициент теплопроводности изоляции принять равным  $0,05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Температура воздуха в помещении  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Термическими сопротивлениями теплоотдачи и стенки трубопровода пренебречь. Каковы при заданных условиях потери тепла в окружающую среду?

**44.** Получить расчетную формулу для определения коэффициента теплопроводности засыпки методом цилиндрического слоя. Исследуемое вещество помещается между двумя цилиндрическими оболочками длиной  $l$ . В полости внутренней оболочки расположен нагреватель. Наружная оболочка охлаждается потоком жидкости или газа. Для исключения оттоков тепла вдоль оси цилиндров на торцах прибора смонтированы вспомогательные нагреватели. В опыте измеряются мощность основного нагревателя  $Q$ , температура  $t_{c1}$  внешней поверхности внутреннего цилиндра (радиус  $R_1$ )

и температура  $t_{c2}$  внутренней поверхности наружного цилиндра (радиус  $R_2$ ).

**45.** Найти распределение температуры  $t(r)$  и поток тепла  $Q$  для сферической оболочки с радиусами  $r_1 < r_2$ , если на ее поверхностях заданы граничные условия 1-го рода:  $t(r_1) = t_{c1} > t(r_2) = t_{c2}$ . Коэффициент теплопроводности материала оболочки  $\lambda = \text{const}$ .

**46.** Для определения коэффициента теплопроводности сыпучих материалов по методу шарового слоя исследуемое вещество засыпается между двумя сферическими оболочками из меди радиусами  $R_1$  и  $R_2$  ( $R_1 < R_2$ ). Внутри оболочки радиусом  $R_1$  помещается электрический нагреватель, а оболочка радиусом  $R_2$  охлаждается снаружи водой. В опытах измеряются мощность нагревателя  $Q$ , а также температуры оболочек  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$ . Вывести расчетную формулу для определения коэффициента теплопроводности исследуемого вещества.

**47.** Найти стационарное распределение температуры  $t(r)$  и поток тепла на единицу длины неограниченной цилиндрической стенки, если на ее поверхностях ( $r_1, r_2$ ) заданы постоянные температуры ( $t_{c1}, t_{c2}$ ), а коэффициент теплопроводности материала стенки – заданная функция температуры  $\lambda = \lambda(t)$ .

**48.** Определить расход тепла через единицу длины трубы (внутренний диаметр  $d_1 = 30$  мм, наружный диаметр  $d_2 = 60$  мм), если температуры поверхностей трубы равны  $t_{c1} = 1000$  °С,  $t_{c2} = 100$  °С. Стенка трубы изготовлена из графита.

**49.** Решить задачу 47 для случая, когда коэффициент теплопроводности цилиндрической стенки линейно зависит от температуры,  $\lambda(t) = \lambda_0(1 + \beta t)$ .

**50.** Используя выражение для  $t(r)$ , полученное в задаче 49, рассчитать на ЭВМ значения температур в цилиндрической стенке при  $r = 0,025; 0,03; 0,035; 0,04; 0,045; 0,05; 0,055; 0,06; 0,065$  м, если  $r_1 = 0,02$  м,  $r_2 = 0,07$  м;  $t_{c1} = 550$  °С,  $t_{c2} = 50$  °С. Расчеты провести для  $\beta = 10^{-4}; 10^{-3}; 10^{-2}$  К<sup>-1</sup>. Построить графики распределения температур по толщине стенки.

**51.** Решить задачи 49, 50 для сферической стенки.

**52.** Найти стационарное распределение температур в неподвижной среде вокруг шара, поверхность которого поддерживается при температуре  $t_0$ . Температура среды вдали от шара равна  $t_\infty$ .

**53.** Для условий задачи 52 определить плотность потока тепла с поверхности шара, суммарный поток тепла, рассеиваемый шаром в окружающую среду, и коэффициент теплоотдачи на поверхности шара (отношение плотности теплового потока к разности температур поверхности шара и среды вдали от него). Радиус шара равен  $r_0$ , коэффициент теплопроводности среды –  $\lambda$ .

**54.** Определить погрешность измерения температуры твердой поверхности термопарой, обусловленную оттоком тепла от поверхности по термопарным проводам (рис. 1.9). Расчет погрешности провести для следующих условий: диаметр рабочего спая термопары  $d_c = 0,5$  мм, диаметр термопарных проводов  $d_{пр} = 0,2$  мм, длина проводов  $l = 0,2$  м; температура исследуемой поверхности  $t_n = 500$  °С, температура монтажного блока  $t_6 = 20$  °С; коэффициент теплопроводности материала исследуемой поверхности  $\lambda_n = 20$  Вт/(м·К), коэффициент теплопроводности термопарных проводов  $\lambda_{пр} = 20$  Вт/(м·К).

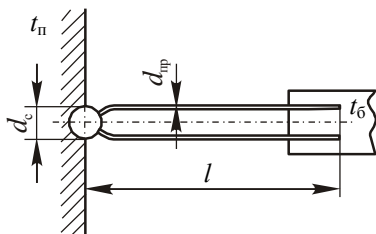


Рис. 1.9

**55.** Найти площадь поверхности нагрева секционного водоводяного подогревателя мощностью  $Q = 1500$  кВт при условии, что средняя температура греющей воды  $t_{ж1} = 115$  °С, а средняя температура нагреваемой воды  $t_{ж2} = 77$  °С. Поверхность нагрева выполнена из латунных трубок внутренним диаметром  $d_1 = 14$  мм и наружным диаметром  $d_2 = 16$  мм. На внутренней поверхности имеется слой накипи толщиной  $\delta_n = 0,2$  мм. Коэффициент теплоотдачи со стороны греющей воды  $\alpha_1 = 10000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), со стороны нагреваемой воды  $\alpha_2 = 4000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) [11].

**56.** Вычислить потерю тепла с 1 м неизолированного трубопровода внутренним диаметром  $d_1 = 150$  мм и наружным диаметром  $d_2 = 165$  мм, проложенного на открытом воздухе, если внутри трубы протекает вода со средней температурой  $t_{ж1} = 90$  °С, а температура окружающего воздуха  $t_{ж2} = -15$  °С. Коэффициент теплопроводности материала трубы  $\lambda = 50$  Вт/(м·К). Коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубы  $\alpha_1 = 1000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и от трубы к

окружающему воздуху  $\alpha_2 = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Определить также температуры на внутренней и внешней поверхностях трубы [11].

**57.** Определить тепловые потери с 1 м трубопровода, рассмотренного в задаче 56, если трубопровод покрыт слоем изоляции толщиной  $\delta_{\text{из}} = 60 \text{ мм}$ . Коэффициент теплопроводности изоляции  $\lambda_{\text{из}} = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к окружающему воздуху  $\alpha_2 = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Все остальные условия остаются такими же, как в задаче 56. Вычислить также температуры на внешней поверхности трубы  $t_{c2}$  и на внешней поверхности изоляции  $t_{c3}$  [11].

**58.** Трубопровод внутренним диаметром  $d_1 = 44 \text{ мм}$  и наружным диаметром  $d_2 = 51 \text{ мм}$ , по которому течет масло, покрыт слоем бетона толщиной  $\delta_2 = 80 \text{ мм}$ . Коэффициент теплопроводности материала трубопровода  $\lambda_1 = 50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Средняя температура масла на рассматриваемом участке трубопровода  $t_{ж1} = 120 \text{ }^\circ\text{С}$ , температура окружающего воздуха  $t_{ж2} = 20 \text{ }^\circ\text{С}$ . Коэффициент теплоотдачи от масла к стенке  $\alpha_1 = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  и от поверхности бетона к воздуху  $\alpha_2 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Определить: а) потери тепла с 1 м оголенного трубопровода и с 1 м трубопровода, покрытого бетоном; б) коэффициент теплопроводности изоляции, чтобы при любой ее толщине тепловые потери с 1 м изолированной трубы были не больше, чем для оголенного трубопровода [11].

**59.** Как изменится максимально допустимый по условиям охлаждения ток в электрическом проводе диаметром 3 мм, если его покрыть изоляцией толщиной 2 мм с коэффициентом теплопроводности  $0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ? Провод охлаждается воздухом с коэффициентом теплоотдачи  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

**60.** Через провод диаметром  $d = 2 \text{ мм}$  пропускают электрический ток. Провод охлаждается потоком воздуха ( $t_{ж} = 20 \text{ }^\circ\text{С}$ ,  $\alpha_1 = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ). Определить: а) мощность, выделяемую в единице длины провода, если температура поверхности провода  $t_c = 90 \text{ }^\circ\text{С}$ ; б) температуру поверхности провода, если его покрыть резиновой изоляцией толщиной  $\delta = 4 \text{ мм}$ , полагая, что тепловыделение в проводе не изменилось, а коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции  $\alpha_2 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .



**61.** По трубе внутренним диаметром  $d_1 = 18$  мм и наружным диаметром  $d_2 = 20$  мм движется сухой насыщенный водяной пар. Для уменьшения тепловых потерь в окружающую среду трубу нужно изолировать. Целесообразно ли для этого использовать асбест, если коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности изоляции к окружающей среде  $\alpha = 8$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) [11]?

**62.** Определить критический диаметр  $d_{2кр}$  сферической оболочки (внутренний радиус  $r_1$ , наружный радиус  $r_2$ ), при котором тепловой поток через оболочку имеет максимальное значение. Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности оболочки равен  $\alpha_2$ , коэффициент теплопроводности материала оболочки  $\lambda$ .

### Процессы стационарной теплопроводности в телах с внутренним тепловыделением

**63.** Найти распределение температуры в тонкой пластине толщиной  $2\delta$ , в которой действуют внутренние источники тепла ( $q_v = \text{const}$ ). Заданы постоянные значения температуры поверхностей пластины: при  $x = -\delta$   $t = t_{c1}$ , при  $x = \delta$   $t = t_{c2}$ .

**64.** Внутри тонкого пластинчатого твэла толщиной  $2\delta = 4$  мм (коэффициент теплопроводности материала твэла  $\lambda = 20$  Вт/(м·К)) действуют внутренние источники тепла ( $q_v = 5 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>3</sup>). Заданы постоянные значения температуры поверхностей пластины  $t(-\delta) = 250$  °С;  $t(\delta) = 200$  °С. Определить координату и величину максимальной температуры.

**65.** Цилиндрический стержень длиной  $l$  и диаметром  $d$  из испытуемого материала нагревается электрическим током. Концы стержня поддерживаются при температуре  $t_0$ . В опыте измеряются ток через стержень  $I$ , разность потенциалов на концах стержня  $\Delta U$  и температура в центре стержня  $t_{ц}$ . Получить формулу для расчета коэффициента теплопроводности материала стержня, предполагая, что охлаждением стержня через его боковую поверхность можно пренебречь (метод Кольрауша).

**66.** В неограниченной пластине толщиной  $2\delta$  с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  действуют внутренние источники тепла мощностью  $q_v$ . Поверхности пластины при  $x = \pm \delta$  охлаждаются жидкостью с температурой  $t_{ж}$ , коэффициент теплоотдачи на поверхно-

стях пластины  $\alpha$ . Используя  $\pi$ -теорему и метод анализа размерностей, найти безразмерные параметры, описывающие распределение избыточной температуры  $t(x) - t_{ж}$  в пластине.

**67.** Решить аналогичные задачи для тепловыделяющих элементов в виде неограниченного цилиндра и шара радиусом  $r_0$ .

**68.** В пластине толщиной  $\delta = 5$  мм действуют равномерно распределенные внутренние источники тепла мощностью  $q_v = 2,7 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>3</sup>. Коэффициент теплопроводности материала пластины  $\lambda = 25$  Вт/(м·К). Коэффициенты теплоотдачи от поверхностей пластины к обтекающей их жидкости  $\alpha_1 = 3000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и  $\alpha_2 = 1500$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), а температуры жидкости, соответственно, равны  $t_{ж1} = 130$  °С и  $t_{ж2} = 140$  °С. Определить координату  $x_0$  и значение максимальной температуры в пластине  $t_0$ , а также температуры поверхностей пластины  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$  [11].

**69.** Плоский твэл (толщина  $2\delta$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda$ ) охлаждается с двух сторон потоком жидкости (температура  $t_{ж}$ , коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ ). Как изменится максимальная температура твэла, если его охлаждать только с одной стороны? В твэле действуют внутренние источники тепла мощностью  $q_v$ .

**70.** Пластина с внутренним тепловыделением толщиной  $0,1$  м с одной стороны теплоизолирована, а с другой омывается жидкостью, имеющей температуру  $t_{ж} = 80$  °С. Коэффициент теплоотдачи от поверхности пластины к жидкости  $\alpha = 20$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), коэффициент теплопроводности материала пластины  $\lambda = 15$  Вт/(м·К). Температура омываемой жидкостью поверхности  $t_{c1}$  не должна превышать  $120$  °С. Определить: а) плотность внутренних источников тепла в пластине  $q_v$ ; б) температуру  $t_{c2}$  теплоизолированной поверхности пластины.

**71.** Найти стационарное распределение температуры по радиусу длинного цилиндрического стержневого твэла с внутренним тепловыделением  $q_v = 5 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>3</sup>, если на поверхности твэла задано граничное условие первого рода  $t(r_0) = t_c$ . Вычислить тепловую нагрузку поверхности твэла  $q_F$  и перепад температуры внутри него  $\Delta t = t_{ц} - t_c$  (разность температур между центром твэла и его поверхностью). Радиус твэла  $r_0 = 6$  мм, коэффициент теплопроводности  $\lambda = 2$  Вт/(м·К).

**72.** В тепловыделяющем элементе ядерного реактора вследствие эффекта самоэкранировки тепловыделение распределено неравномерно по сечению (рис. 1.10). Найти изменение перепада температур  $t_{\text{ц}} - t_{\text{с}}$  плоского твэла при замене реального распределения  $q_v(x)$  постоянным по сечению  $\bar{q}_v$ . Для упрощения принять, что  $q_v(x)$  описывается параболой

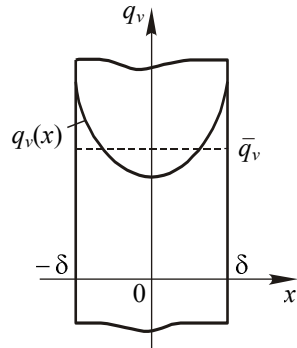


Рис. 1.10

$$q_v(x) = \bar{q}_v \left[ \frac{3-k}{2} + \frac{3}{2}(k-1) \left( \frac{x}{\delta} \right)^2 \right],$$

где  $k$  – параметр, характеризующий неравномерность распределения  $q_v$  и численно равный отношению максимальной плотности тепловыделения к средней по сечению.

**73.** Нихромовый стержень диаметром  $d = 3$  мм, по которому пропускается электрический ток, охлаждается потоком жидкости ( $t_{\text{ж}} = 20$  °С,  $\alpha = 2 \cdot 10^4$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)). Определить максимальную величину тока через стержень, если известно, что температура в его центре не должна превышать 600 °С. Определить температуру поверхности стержня.

**74.** Найти распределение температуры  $t(r)$  в цилиндрической стенке с внутренними источниками тепла ( $q_v = \text{const}$ ), если на ее поверхностях заданы постоянные значения температуры  $t(r_1) = t_{\text{с1}}$ ,  $t(r_2) = t_{\text{с2}}$ .

**75.** Определить координату максимума температуры  $r_{\text{max}}/r_1$  в трубчатом тепловыделяющем элементе, поверхности с радиусами  $r_1$  и  $r_2$  которого имеют одинаковую температуру. Расчет провести для отношения радиусов  $r_2/r_1$ , равного 2 и 10.

**76.** Для условий задачи 75 определить отношение теплового потока с наружной поверхности твэла к тепловому потоку с его внутренней поверхности.

**77.** Найти распределение температуры  $t(r)$  в стенке трубчатого твэла с внутренними источниками тепла, если: а) внутренняя поверхность твэла ( $r = r_1$ ) имеет постоянную температуру  $t_{\text{с1}}$ , а внешняя поверхность ( $r = r_2$ ) теплоизолирована; б) внутренняя поверхность твэла теплоизолирована, а внешняя поверхность ( $r = r_2$ )

имеет постоянную температуру  $t_{c2}$ . Сравнить максимальные перепады температур твэла при внутреннем и наружном его охлаждении, если  $r_1/r_2 = 0,5$ .

**78.** Трубка из нержавеющей стали внутренним диаметром  $d_1 = 7,6$  мм и наружным  $d_2 = 8$  мм нагревается электрическим током путем непосредственного включения ее в электрическую цепь. Все тепло, выделяемое в стенке трубки, отводится через внутреннюю поверхность трубки. Вычислить объемную мощность источников тепла и перепад температур в стенке трубки, если по трубке пропускается ток силой  $I = 250$  А [11].

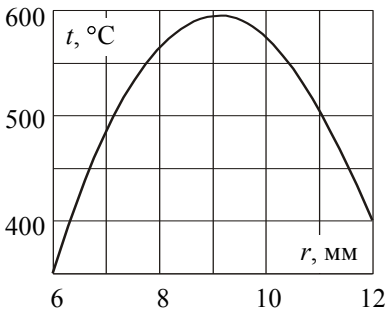


Рис. 1.11

**79.** На графике (рис. 1.11) дано распределение температуры топливной композиции по радиусу кольцевого твэла ( $\lambda = 8$  Вт/(м·К)). Определить плотность внутренних источников тепловыделения  $q_v$ .

**80.** Тепловыделяющий элемент ядерного реактора представляет собой длинный стержень из металлического урана (диаметр уранового блока

$d = 16$  мм, коэффициент теплопроводности  $\lambda = \lambda_0 + \beta t$ ,  $\lambda_0 = 25,5$  Вт/(м·К),  $\beta = 1,56 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К<sup>2</sup>)), покрытый защитной оболочкой из алюминиевого сплава. Толщина оболочки  $\delta_{об} = 1,0$  мм, коэффициент теплопроводности  $\lambda_{об} = 140$  Вт/(м·К). В стержне действуют внутренние источники тепла. Выделенное тепло отводится к потоку воды с температурой  $t_{ж} = 50$  °С. Коэффициент теплоотдачи к воде  $\alpha = 2 \cdot 10^4$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Определить мощность внутренних источников тепла  $q_v$ , при которой максимальная температура твэла не превзойдет величину  $t_{ц} = 500$  °С. Вычислить распределение температур в твэле по его радиусу при найденном значении мощности внутренних источников тепла. Рассчитать новое распределение температур по радиусу твэла, которое установится, если между топливным сердечником и защитной оболочкой появится воздушная прослойка толщиной  $\delta_3 = 0,01$  мм (для коэффициента теплопроводности воздуха принять  $\lambda_в = 5,3 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К);

тепловое излучение в прослойке не учитывать). Построить графики распределения температур по радиусу твэла для обоих случаев.

**81.** Стержневой тепловыделяющий элемент ядерного реактора выполнен из диоксида урана с оболочкой из нержавеющей стали толщиной 0,5 мм. Твэл охлаждается водой, имеющей температуру 240 °С, коэффициент теплоотдачи на поверхности твэла  $\alpha = 2,5 \cdot 10^4$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Найти максимальный диаметр твэла, при котором температура в его центре не будет превышать 2500 °С, если тепловой поток на поверхности твэла достигает значения 1,2·10<sup>6</sup> Вт/м<sup>2</sup>. Проводимость контакта между топливом и оболочкой принять равной  $\alpha_{\text{конт}} = 5 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

**82.** Для определения коэффициента теплоотдачи при кипении в большом объеме может быть использована следующая методика измерений. По горизонтальной трубке из нержавеющей стали (внутренний диаметр  $d_1 = 10$  мм, наружный диаметр  $d_2 = 11$  мм) пропускается ток силой  $I = 258$  А. Трубка помещена в большой объем воды, имеющей температуру насыщения и кипящей на внешней поверхности трубки при нормальном давлении. Температура внутренней адиабатической поверхности трубки ( $t_1 = 112$  °С) измеряется термопарой. Вычислить коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  на охлаждаемой поверхности трубки [2].

**83.** Найти распределение температуры внутри шарового твэла без оболочки с внутренними источниками тепла, если на поверхности шара ( $r = r_0$ ) задана постоянная температура  $t_F$ . Определить перепад температуры внутри твэла (разность температур между центром твэла и его поверхностью).

**84.** Твэл высокотемпературного газового реактора представляет собой шар из делящегося материала, покрытого оболочкой. Определить максимальную температуру твэла и температуру наружной поверхности оболочки при следующих условиях: температура охлаждающего газа  $t_{\text{ж}} = 500$  °С; диаметр топливного сердечника твэла  $d_{\text{т}} = 50$  мм; толщина оболочки  $\delta_{\text{об}} = 5$  мм; теплопроводность тепловыделяющего материала и оболочки  $\lambda_{\text{т}} = 10$  Вт/(м·К),  $\lambda_{\text{об}} = 30$  Вт/(м·К); мощность тепловыделения  $q_v = 3 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>3</sup>; коэффициент теплоотдачи от поверхности твэла к потоку газа  $\alpha = 2 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

**85.** Оценить мощность внутренних источников тепла на Солнце, полагая, что тепловыделение распределено равномерно по объему Солнца. Радиус Солнца  $R = 6,95 \cdot 10^8$  м; температура его поверхности  $T_F = 6000$  К; плотность потока энергии с поверхности  $q_F = 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>. Оценить эффективную теплопроводность вещества Солнца, если известно, что температура в центре  $T_{ц} = 15 \cdot 10^6$  К.

**86.** Найти распределение температуры  $t(x)$  в тонкой пластине с внутренними источниками тепла, удельная мощность которых изменяется с температурой по закону  $q_v = q_{v0}(1 + \beta t)$ . На поверхностях пластины ( $x = \pm \delta$ ) задано постоянное значение температуры  $t_c$ .

**87.** Решить задачу 86 для длинного цилиндрического стержня радиусом  $r_0$  при условии  $t(r_0) = t_c$ .

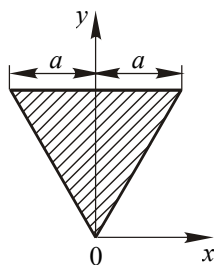


Рис. 1.12

**88.** Найти стационарное поле температуры  $t(x, y)$  и распределение тепловой нагрузки на поверхности длинного прямого стержня с поперечным сечением в виде равностороннего треугольника со стороной  $2a$  (рис. 1.12), в котором действуют внутренние источники тепла мощностью  $q_v$ . Температура поверхности стержня поддерживается постоянной и равна  $t_F$ . Коэффициент теплопроводности материала стержня  $\lambda$ .

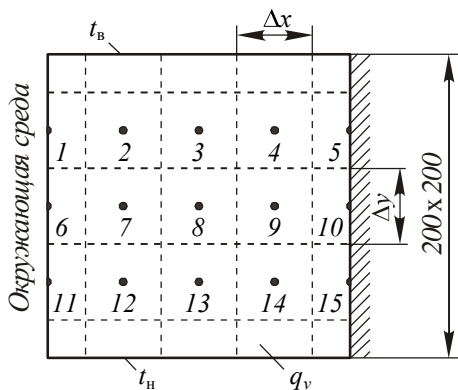


Рис. 1.13

**89.** Найти стационарное распределение температуры в двумерном твердом теле единичной толщины размером  $0,2 \times 0,2$  м<sup>2</sup>, показанном на рис. 1.13. Внутри тела действуют внутренние источники тепла мощностью  $q_v = 10^4$  Вт/м<sup>3</sup>, верхняя и нижняя границы поддерживаются при постоянных температурах ( $t_b = 200^\circ$  С,  $t_n = 100^\circ$  С), на левой границе происходит теплообмен

с окружающей средой ( $t_{\text{ж}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\alpha = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ), правая граница теплоизолирована. Коэффициент теплопроводности тела  $\lambda = 1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Решить задачу методом конечных разностей с помощью ЭВМ. При разбиении рассматриваемой области использовать сетку с квадратными ячейками  $\Delta x = \Delta y = 0,05 \text{ м}$ . Определить значения температур в 15 узлах, показанных на рисунке. Рассчитать тепловые потоки на единицу толщины тела для каждой из границ. Повторить расчеты, используя сетку с ячейками  $\Delta x = \Delta y = 0,025 \text{ м}$ . Сравнить полученные результаты.

### Нестационарные процессы теплопроводности

**90.** Дано полуограниченное тело ( $x \geq 0$ ) с постоянной температурой  $t_0$ . В начальный момент времени температура его поверхности принимает значение  $t_c$  и в дальнейшем не изменяется. Определить нестационарное температурное поле в полупространстве.

*Указание:* задачу решить методом преобразования Лапласа; для нахождения оригинала воспользоваться обратным преобразованием:

$$L^{-1}\left(\frac{1}{s}e^{-k\sqrt{s}}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{k}{2\sqrt{\tau}}\right).$$

**91.** По полученному в задаче 90 аналитическому решению рассчитать на ЭВМ температурное поле в полупространстве  $x > 0$  для моментов времени  $\tau = 5; 100; 500; 1500; 5000 \text{ с}$ . Значения температур найти в сечениях  $x = 0,005; 0,01; 0,02; 0,03; 0,05; 0,09; 0,13; 0,17 \text{ м}$ . Расчеты провести при  $t_0 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_c = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  для двух материалов со значениями коэффициента температуропроводности  $a = 12,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  (сталь) и  $4,87 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  (красный кирпич). Построить графики распределения температур и проанализировать полученные результаты.

**92.** Полубесконечный стержень ( $x \geq 0$ ), теплоизолированный с боковой поверхности, имеет постоянную температуру  $t_0$ . В начальный момент времени торец стержня ( $x = 0$ ) подвергается воздействию теплового потока плотностью  $q_c$ , который затем остается неизменным. Найти нестационарное распределение температуры в стержне.

*Указание:* задачу решить методом преобразования Лапласа; для нахождения оригинала воспользоваться обратным преобразованием:

$$L^{-1}\left(\frac{1}{s\sqrt{s}}e^{-k\sqrt{s}}\right) = 2\sqrt{\frac{\tau}{\pi}}\exp\left(-\frac{k^2}{4\tau}\right) - k\left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{k}{2\sqrt{\tau}}\right)\right].$$

**93.** Используя аналитическое решение, полученное в задаче 92, рассчитать на ЭВМ температурное поле в теплоизолированном с боковой поверхности полубесконечном стержне ( $x > 0$ ), выполненном из стали ( $\lambda = 45$  Вт/(м·К),  $a = 12,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с). Значения  $t_0$  и  $q_c$  принять равными  $0$  °С и  $9 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup> соответственно. Расчеты провести для сечений стержня  $x = 0; 0,005; 0,01; 0,02; 0,03; 0,05; 0,09; 0,13; 0,17$  м и моментов времени  $\tau = 5; 100; 500; 1500; 3000$  с. Повторить эти же расчеты для стержня из стекла ( $\lambda = 0,74$  Вт/(м·К),  $a = 4,42 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с). Построить графики распределения температур и проанализировать результаты расчетов.

**94.** Решить задачу 92 при условии, что в начальный момент времени торец стержня погружен в среду с постоянной температурой  $t_{ж}$ . Коэффициент теплоотдачи от торца стержня к жидкости  $\alpha$ .

*Указание:* задачу решить методом преобразования Лапласа; для нахождения оригинала воспользоваться обратным преобразованием:

$$L^{-1}\left[\frac{1}{s\left(1 + \frac{1}{c}\sqrt{s}\right)}\exp(-k\sqrt{s})\right] = \operatorname{erfc}\left(\frac{k}{2\sqrt{\tau}}\right) - \exp(ck + c^2\tau)\operatorname{erfc}\left(\frac{k}{2\sqrt{\tau}} + c\sqrt{\tau}\right),$$

где  $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z)$ .

**95.** Длинный стальной стержень ( $\lambda = 50$  Вт/(м·К),  $a = 1,37 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с), боковая поверхность которого теплоизолирована, имел постоянную температуру  $t_0 = 100$  °С. В начальный момент времени конец стержня погружается в жидкость с температурой  $t_{ж} = 0$  °С, коэффициент теплоотдачи от торца стержня к жидкости  $\alpha = 750$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Рассчитать на ЭВМ изменение температуры стержня в течение первых трех минут после начала охлаждения. Значения температуры вычислить в сечениях стержня, находящихся на расстояниях  $x = 0; 0,025; 0,05; 0,075; 0,1; 0,125; 0,15; 0,175$ ;



0,20 м от его охлаждаемого торца, с шагом по времени 30 с. При расчетах использовать аналитическое решение, полученное в задаче 94. Проанализировать результаты расчетов.

**96.** Решить задачу 95 на ЭВМ численным методом, используя явную конечно-разностную схему. Сравнить полученные результаты с точным решением (задача 95).

**97.** Решить задачу 95 на ЭВМ численным методом, используя неявную конечно-разностную схему. Сравнить расчетные данные с численным решением, полученным с помощью явной схемы (задача 96), и с точным аналитическим решением (задача 95).

**98.** Два полуограниченных тела с постоянными температурами  $t_{01}$  и  $t_{02}$  в начальный момент времени приводятся в соприкосновение друг с другом (рис. 1.14). Теплофизические свойства тел различны:  $\rho_1, c_1, \lambda_1$  и  $\rho_2, c_2, \lambda_2$ . Определить нестационарное поле температур в телах, а также температуру поверхности контакта и плотность теплового потока через поверхность соприкосновения тел.

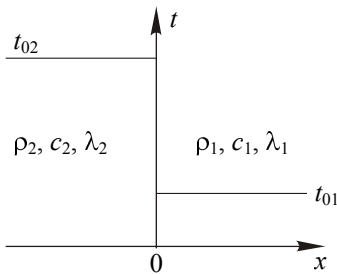


Рис. 1.14

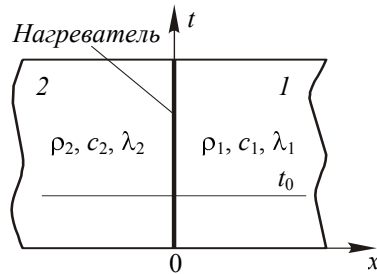


Рис. 1.15

**99.** Тонкий металлический нагреватель зажат между двумя массивными блоками 1 и 2 (рис. 1.15) из электроизоляционных материалов с теплофизическими свойствами  $\lambda_1, c_1, \rho_1, \lambda_2, c_2, \rho_2$ . В начальный момент времени температуры блоков одинаковы и равны  $t_0$ . Считая блоки полубесконечными, найти распределения температур в них в любой момент времени после включения нагревателя, если удельная мощность нагрева равна  $q$ , а теплоемкостью нагревателя можно пренебречь. Определить также зависимость температуры нагревателя от времени и отношение тепловых потоков в каждый из блоков.

**100.** Найти распределение температуры в первом блоке и температуру нагревателя из задачи 99 для случая, когда потоком тепла во второй блок можно пренебречь, а теплоемкость нагревателя необходимо учитывать. Определить зависимость плотности теплового потока на поверхности нагревателя от времени. Рассчитать долю мощности, передаваемую блоку нагревателем в моменты времени 0,01; 1,0 и 100 с после включения последнего, если теплоемкость нагревателя  $c_n$  равна  $370 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , а теплофизические параметры блока характеризуются следующими значениями:  $\rho = 1650 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $c = 1640 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\lambda = 0,456 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

*Указание:* задачу решить методом преобразования Лапласа; для нахождения оригинала воспользоваться обратным преобразованием:

$$L^{-1} \left[ \frac{1}{s\sqrt{s}(\sqrt{s}+b)} e^{-k\sqrt{s}} \right] = \frac{2}{b} \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} e^{-\frac{k^2}{4\tau}} - \frac{1+bk}{b^2} \operatorname{erfc} \left( \frac{k}{2\sqrt{\tau}} \right) + \frac{1}{b^2} e^{bk+b^2\tau} \operatorname{erfc} \left( \frac{k}{2\sqrt{\tau}} + b\sqrt{\tau} \right).$$

**101.** Оценить время остывания земной коры, исходя из следующих предположений: земная кора – полуограниченное твердое тело, которое к началу остывания имело температуру  $t_0 = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ . После начала остывания температура поверхности тела оставалась постоянной и равной  $t_F = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , причем градиент температуры на поверхности в настоящее время равен  $1/30 \text{ К}/\text{м}$  [2].

**102.** На поверхности полуограниченного тела  $x \geq 0$  имеют место гармонические колебания температуры с круговой частотой  $\omega$ :

$$t(0, \tau) = t_\infty + t_0 \cos \omega \tau.$$

Найти нестационарное поле температуры  $t(x, \tau)$  в этом теле, если процесс протекает достаточно длительное время для того, чтобы начальные условия перестали оказывать влияние на поле температуры.

**103.** Тонкая проволока радиусом  $r_0$ , изготовленная из материала с большим коэффициентом теплопроводности и теплоемкостью на единицу объема  $(c\rho)_0$ , находится в тепловом равновесии при тем-

пературе  $t_0$  с окружающей бесконечной средой, имеющей коэффициент теплопроводности  $\lambda$  и объемную теплоемкость  $c_v$ . В начальный момент времени в проволоке начинают действовать внутренние источники тепла мощностью  $q_v$ . Установить безразмерные параметры, определяющие закон изменения температуры проволоки с течением времени  $t(\tau)$ , предполагая, что передача тепла от проволоки к окружающей среде происходит исключительно в результате протекания в последней процесса теплопроводности.

**104.** Для условий, сформулированных в задаче 103, найти аналитическую зависимость, описывающую распределение температуры  $t(r, \tau)$  в бесконечной теплопроводящей среде вокруг цилиндра радиусом  $r_0$ , внутри которого в начальный момент времени начинают действовать источники тепла мощностью  $q_v$ . Определить также зависимости от времени температуры цилиндра и плотности теплового потока на его поверхности.

**105.** В неограниченной пластине толщиной  $2\delta$ , находящейся в неподвижной теплопроводящей среде бесконечной протяженности, в начальный момент времени начинают действовать внутренние источники тепла мощностью  $q_v = \text{const}$ . Найти функцию  $t(x, \tau)$ , описывающую изменение температуры в любой точке среды на расстоянии  $x$  от поверхности пластины со временем, если при  $\tau = 0$  пластина и среда имеют одинаковую температуру  $t_0 = \text{const}$ . Определить также закон изменения со временем плотности теплового потока  $q_F(\tau)$  на поверхности пластины. Заданы коэффициенты теплопроводности и температуропроводности среды  $\lambda$  и  $a$ , теплоемкость пластины в расчете на единицу теплопередающей поверхности  $C_w$ .

**106.** Решить задачу 105 для случая, когда мощность внутренних источников тепла в пластине является произвольной функцией времени  $q_v(\tau)$ .

**107.** Пластинчатый тепловыделяющий элемент толщиной  $2\delta$ , омываемый симметрично с двух сторон ( $x = \pm \delta$ ) жидкостью с температурой  $t_{ж}$ , в исходном состоянии имел постоянную температуру, равную температуре жидкости. В начальный момент времени в рассматриваемом элементе начинают действовать внутренние источники тепла постоянной мощности  $q_v$ . Получить систему безразмерных параметров, описывающих изменение во времени  $\tau$  поля

температур  $t(x, \tau)$  в тепловыделяющем элементе в процессе его нагрева, если известны коэффициенты теплопроводности  $\lambda$  и температуропроводности  $a$  тела, а также коэффициент теплоотдачи на охлаждаемых поверхностях пластины  $\alpha$ .

**108.** Решить аналогичные задачи для тепловыделяющих элементов в виде неограниченного цилиндра и шара радиусом  $r_0$ .

**109.** Определить нестационарное температурное поле  $t(x, \tau)$  в неограниченной плоской пластине толщиной  $2\delta$ . Пластина имела постоянную температуру  $t_0$  и в начальный момент времени была погружена в жидкость с постоянной температурой  $t_{ж}$ , отличной от  $t_0$ . Коэффициенты теплоотдачи на поверхностях пластины  $x = -\delta$  и  $x = \delta$  одинаковы и равны  $\alpha$ .

**110.** Используя полученное в задаче 109 аналитическое решение, рассчитать на ЭВМ изменение относительной избыточной температуры  $\Theta = \frac{t(x, \tau) - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}}$  в середине ( $x = 0$ ) и на поверхности

( $x = \delta$ ) неограниченной пластины в зависимости от числа Фурье  $Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}$ . Расчеты выполнить для значений числа  $Fo = 0,01; 0,05;$

$0,2; 0,5; 1; 2; 3; 6$  при  $Bi = \frac{\alpha\delta}{\lambda} = 1,0$ . Сравнить полученные результатами с имеющимися номограммами (см. рис. П.1 и П.2).

**111.** Для условий задачи 109 рассчитать на ЭВМ зависимость средней по толщине пластины относительной избыточной температуры  $\bar{\Theta} = \frac{\bar{t}(\tau) - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}}$  от числа  $Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}$  при трех значениях числа

$Bi = \frac{\alpha\delta}{\lambda} = 0,1; 2; 100$ . Расчеты выполнить для  $Fo = 0,01; 0,05; 0,2;$

$0,5; 1; 2; 3; 6; 9$ . Определить значения  $Fo$ , при которых для каждого из заданных чисел Био  $\bar{\Theta} = 0,5$ . Для найденных условий рассчитать распределения относительной избыточной температуры

$\Theta = \frac{t(x, \tau) - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}}$  по толщине пластины. Значения  $\Theta$  определить в

сечениях  $x/\delta = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$ . Результаты вычислений

представить в графической форме. Проанализировать полученные результаты.

**112.** Решить задачу 109 для случая, когда температура жидкости изменяется со временем по линейному закону:  $t_{\text{ж}}(\tau) = t_{\text{ж}0} + k\tau$ .

**113.** Неограниченный цилиндр радиусом  $r_0$  имел постоянную температуру  $t_0$ . В начальный момент времени цилиндр помещается в среду с постоянной температурой  $t_{\text{ж}}$ . Найти распределение температуры  $t(r, \tau)$  в цилиндре для любого момента времени. Коэффициент теплоотдачи на поверхности цилиндра постоянен и равен  $\alpha$ .

**114.** Используя аналитическое решение из задачи 113, рассчитать на ЭВМ изменение относительной избыточной температуры

$$\Theta = \frac{t(r, \tau) - t_{\text{ж}}}{t_0 - t_{\text{ж}}}$$
 на оси ( $r = 0$ ) и на поверхности ( $r = r_0$ ) неограничен-

ного цилиндра в зависимости от числа  $Fo = \frac{a\tau}{r_0^2}$ . Расчеты выпол-

нить для значений числа  $Fo = 0,01; 0,05; 0,2; 0,5; 1; 2; 3$  при

$Bi = \frac{\alpha r_0}{\lambda} = 1,0$ . Сравнить полученные результаты с имеющимися номограммами (см. рис. П.3 и П.4).

**115.** Шар радиусом  $r_0$ , имеющий постоянную температуру  $t_0$ , в начальный момент времени помещается в среду с постоянной температурой жидкости  $t_{\text{ж}}$ . Найти распределение температуры  $t(r, \tau)$  в шаре для любого момента времени. Коэффициент теплоотдачи на поверхности шара постоянен и равен  $\alpha$ .

**116.** Решить задачу, аналогичную задаче 114, для шара. При расчетах воспользоваться аналитическим решением, полученным в задаче 115. Сравнить полученные результаты с имеющимися номограммами (см. рис. П.5 и П.6).

**117.** Резиновая пластина толщиной  $2\delta = 20$  мм, нагретая до температуры  $t_0 = 140$  °С, помещена в воздушную среду с температурой  $t_{\text{ж}} = 15$  °С. Определить температуру в середине и на поверхности пластины через  $\tau = 30$  мин после начала охлаждения. Коэффициент теплоотдачи от поверхности пластины к окружающему воздуху  $\alpha = 24$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) [11].

**118.** Длинный брус квадратного поперечного сечения (100x100 мм), нагретый до температуры 400 °С, положили на асбестовый лист для остывания на воздухе, температура которого равна 20 °С. Коэффициент теплоотдачи к воздуху равен 8 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Рассчитать температуру в середине верхней и нижней грани бруса через 2 и 4 ч после начала охлаждения. Охлаждением бруса через асбестовый лист пренебречь. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности материала бруса равны, соответственно,  $\lambda = 0,8$  Вт/(м·К),  $a = 5,55 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с.

**119.** Для охлаждения образца в экспериментальной установке используются пары жидкого азота, вытекающего из сосуда Дьюара при температуре  $t_{ж} = -190$  °С. Образец имеет форму куба с гранью размером 20 мм. Начальная температура образца  $t_0 = 20$  °С. Определить промежуток времени  $\tau$ , по истечении которого максимальная температура в образце будет отличаться на 1 град. от температуры паров азота. Средние значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности материала образца в интервале температур от  $-190$  до  $20$  °С равны  $\lambda = 0,25$  Вт/(м·К),  $a = 2,1 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. Средний по поверхности куба коэффициент теплоотдачи к парам азота  $\alpha = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

**120.** Определить время  $\tau_0$ , необходимое для нагрева длинного стального вала диаметром  $2r_0 = 140$  мм, который имел температуру  $t_0 = 27$  °С, а затем был помещен в печь с температурой  $t_{ж} = 860$  °С. Определить также температуру  $t(0)$  на оси вала в конце нагрева. Нагрев закончить после того, как температура на поверхности вала достигнет величины  $t(r_0) = 850$  °С. Коэффициент теплоотдачи на поверхности вала равен  $\alpha = 160$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) [2].

**121.** Стальная болванка диаметром  $d = 2r_0 = 100$  мм и длиной  $l = 2\delta = 400$  мм, имевшая начальную температуру  $t_0 = 15$  °С, помещена в печь. Определить температуру болванки в четырех точках: 1)  $r = 0, x = 0$ ; 2)  $r = 0, x = \delta$ ; 3)  $r = r_0, x = 0$ ; 4)  $r = r_0, x = \delta$  через 45 мин после начала нагрева, если температура газов в печи  $t_{ж} = 640$  °С, а коэффициент теплоотдачи на поверхности болванки  $\alpha = 140$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) [2].

**122.** Тело шарообразной формы диаметром  $d = 35$  мм погрузили для нагрева в воду, кипящую при атмосферном давлении. Определить время, в течение которого температура в центре тела достиг-

нет значения  $t_{ц} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коэффициент температуропроводности тела  $a = 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ . Перепадом температур между поверхностью тела и жидкостью пренебречь. Начальная температура тела  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**123.** В экспериментальной установке для определения коэффициента температуропроводности твердых тел методом регулярного режима исследуемый материал помещен в цилиндрический калориметр диаметром  $d = 50 \text{ мм}$  и длиной  $l = 75 \text{ мм}$ . После предварительного нагрева калориметр охлаждается в водяном термостате, температура воды в котором поддерживается постоянной  $t_{ж} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  и создаются условия, близкие к  $\alpha \rightarrow \infty$ . Вычислить значение коэффициента температуропроводности испытуемого материала, если в процессе охлаждения после установления регулярного режима температура образца в месте расположения термопары за  $\Delta\tau = 7 \text{ мин}$  уменьшилась с  $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 22 \text{ }^\circ\text{C}$  [11].

**124.** Определить нестационарное поле температуры в неограниченной пластине толщиной  $\delta$ , к одной из поверхностей которой, начиная с момента времени  $\tau = 0$ , подводится поток тепла плотностью  $q$ . Противоположная поверхность пластины поддерживается при температуре  $t_0$ , которую имела пластина до начала процесса нагрева.

**125.** Для условий задачи 124 определить промежуток времени от начала процесса нагрева, по истечении которого перепад температур в пластине будет отличаться не более чем на один процент от установившегося стационарного значения. Расчет провести для теплоизолирующей стенки высокотемпературной установки ( $\delta = 0,5 \text{ м}$ ;  $a = 0,29 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ) и для экспериментального образца для измерения коэффициента теплопроводности того же материала методом плоского слоя ( $\delta = 0,01 \text{ м}$ ).

**126.** Пластинчатый тепловыделяющий элемент ядерного реактора выполнен из дисперсионного топлива с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 12 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Толщина твэла  $2\delta = 6 \text{ мм}$ . В номинальном режиме работы реактора в твэле действуют внутренние источники тепла мощностью  $q_{v,0} = 4 \cdot 10^8 \text{ Вт}/\text{м}^3$ , а обе поверхности твэла симметрично охлаждаются водой, имеющей среднюю температуру  $t_{ж} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи от поверхности твэла к теплоносителю  $\alpha_0 = 30 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . При прекращении циркуляции теплоносителя срабатывает система аварийной защиты реакто-

ра, при этом цепная реакция деления ядерного топлива прекращается, а мощность остаточного тепловыделения изменяется со временем по закону  $q_v = \beta q_{v0} \left( \frac{\tau + \tau_0}{\tau_0} \right)^{-m}$ , где  $\beta = 0,1$ ;  $m = 0,2$ ;  $\tau_0 = 0,1$  с.

Предполагая, что в аварийном режиме коэффициент теплоотдачи равен нулю, определить промежуток времени после прекращения охлаждения, спустя который температура в центре твэла  $t_c$  достигнет  $1000^\circ\text{C}$ . Плотность  $\rho$  и удельную теплоемкость  $c$  топлива принять равными  $8,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и  $0,5 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$  соответственно, влиянием оболочки твэла на рассматриваемый процесс пренебречь.

**127.** Предполагается, что при работе ядерного реактора на номинальной мощности в топливном сердечнике стержневого твэла с тонкой оболочкой установилось распределение температур по радиусу  $t(r)$ , которое имеет вид

$$t(r) = t_{\text{ж}} + \frac{q_v r_0}{2} \left( \frac{1}{k} + \frac{r_0}{2\lambda} \right) - \frac{q_v r^2}{4\lambda},$$

где  $t_{\text{ж}}$  – температура омывающего твэл теплоносителя;  $q_v$  – тепловыделение в единице объема топлива;  $r_0$  – радиус топливного сердечника;  $k$  – коэффициент теплопередачи от топливного сердечника к жидкости, включающий термические сопротивления теплоотдачи, оболочки и контакта оболочки с топливом;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности топлива. Представим себе, что в момент времени  $\tau = 0$  охлаждение твэла полностью прекращается. Найти распределение температур в сердечнике твэла для любого момента времени  $\tau > 0$  (теплоемкостью оболочки пренебречь).

**128.** Используя результаты решения задачи 127, ответить на два вопроса: 1) через какой промежуток времени  $\tau_1$  после прекращения охлаждения максимальная температура сердечника твэла будет отличаться на 1% от его средней температуры; 2) с какой скоростью будет расти средняя температура твэла и спустя какое время  $\tau_2$  сердечник начнет плавиться?

При расчетах рассмотреть два варианта конструкции твэла: а) твэл с керамическим сердечником из диоксида урана; б) твэл



дисперсионного типа с гранулами диоксида урана в циркониевой матрице.

Необходимые для расчета размеры и параметры: радиус сердечника твэла  $r_0 = 3,9$  мм; оболочка изготовлена из циркониевого сплава с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{об} = 18$  Вт/(м·К), толщина оболочки  $\delta_{об} = 0,65$  мм; температура теплоносителя (вода)  $t_{ж} = 260$  °С; коэффициент теплоотдачи на поверхности твэла  $\alpha = 30 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); тепловыделение в сердечнике твэла  $q_v = 6,5 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>3</sup>. В случае керамического твэла коэффициент теплопроводности топлива  $\lambda = 3$  Вт/(м·К), коэффициент температуропроводности  $a = 8,87 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с, контактное термическое сопротивление  $R_k = 10^{-4}$  м<sup>2</sup>·К/Вт, температура плавления  $t_{пл} = 2850$  °С; для дисперсионного твэла  $\lambda = 10$  Вт/(м·К),  $a = 3,58 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $R_k = 0$ ,  $t_{пл} = 1850$  °С.

**129.** После длительной работы ядерного реактора на номинальной мощности по причине резкого ухудшения теплоотдачи от поверхности твэлов производится экстренная остановка реактора для снижения тепловой мощности до уровня остаточного энерговыделения. Предположим, что спад мощности тепловыделения в твэлах при этом происходит по закону

$$q_v(\tau) = q_{v0} \sqrt{0,99 \left[ \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_1}\right) \right]^2 + \left[ 0,1 \left( \frac{\tau + \tau_2}{\tau_2} \right)^{-0,2} \right]^2}, \quad \tau \geq 0,$$

где  $q_{v0}$  – объемная плотность энерговыделения в твэлах в нормальных условиях;  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – постоянные времена, характеризующие скорость снижения мощности в аварийной ситуации. Считая, что коэффициент теплоотдачи на поверхности твэлов в рассматриваемом случае мгновенно уменьшается в несколько раз, найти вид зависимостей, описывающих изменение во времени температуры в топливных сердечниках и оболочках твэлов, а также плотности теплового потока на теплоотдающих поверхностях (с целью упрощения задачи пренебречь кривизной и теплоемкостью оболочек).

**130.** По найденным при решении задачи 129 зависимостям провести расчеты параметров переходного теплового процесса в слу-

чае реактора с керамическими твэлами, охлаждаемыми водой. Для первых 30-ти секунд аварийной ситуации построить графики, показывающие изменение: а) температур в центре и на поверхности топливного сердечника; б) температур наружной и внутренней поверхностей оболочки; в) плотности теплового потока на поверхности твэла. Определить максимальное значение температуры оболочки в ходе аварийного процесса и сравнить его со значением этой же величины во время стационарной работы реактора.

В расчетах использовать следующие исходные данные. Топливный сердечник радиусом  $r_0 = 4$  мм изготовлен из диоксида урана с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 2$  Вт/(м·К), коэффициент температуропроводности топлива  $a = 5,9 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. Оболочка твэла выполнена из циркониевого сплава с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{об} = 18$  Вт/(м·К), толщина оболочки  $\delta_{об} = 0,6$  мм. Термическое сопротивление на границе контакта топлива с оболочкой  $R_{к} = 10^{-4}$  м<sup>2</sup>·К/Вт. Мощность внутренних источников тепловыделения в твэлах в нормальных условиях  $q_{v0} = 5 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>3</sup>, температура охлаждающей воды  $t_{ж} = 260$  °С. Коэффициент теплоотдачи в нормальном режиме  $\alpha_0 = 30 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), в аварийной ситуации  $\alpha = 3 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Постоянные времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  в уравнении спада энерговыделения в твэлах при выключении реактора принять равными 10 и 0,1 с соответственно.

**131.** Скачкообразное изменение реактивности ядерного реактора с водой под давлением вызвало переходной процесс, при котором тепловыделение в твэлах активной зоны изменялось со временем в течение первых 10 с по закону

$$q_v = q_{v0} \left[ 1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_*}} + e^{-\left(\frac{\tau}{\tau_*} - 1\right)^2} + 1 \right],$$

где  $q_{v0}$  – плотность тепловыделения в стационарном режиме работы реактора;  $\tau_*$  – характерное время нестационарного теплового процесса. Вывести формулы и провести расчеты, результаты которых описывают нестационарные температурные поля в твэлах в переходном процессе, если твэлы охлаждаются водой с температурой

$t_{ж} = 260 \text{ }^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи на поверхности оболочек  $\alpha = 30 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Сердечники твэлов радиусом  $r_0 = 4 \text{ мм}$  изготовлены из диоксида урана с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , коэффициент температуропроводности топлива  $a = 5,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ . Оболочки из нержавеющей стали ( $\lambda_{об} = 18 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ) имеют толщину  $\delta_{об} = 0,6 \text{ мм}$ . Контактное термическое сопротивление между сердечником твэла и оболочкой  $R_{к} = 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ . Плотность тепловыделения в сердечниках твэлов в стационарном состоянии  $q_{v0} = 5 \cdot 10^8 \text{ Вт}/\text{м}^3$ . Построить графики, иллюстрирующие изменение во времени: тепловыделения в твэлах; плотности теплового потока на их поверхности; температуры внутренней и наружной поверхностей оболочек; температуры в центре и на поверхности топливного сердечника. При выполнении расчетов принять  $\tau_* = 1 \text{ с}$ , кривизной оболочек и их теплоемкостью пренебречь.

**132.** Определить время образования на поверхности водоема слоя льда толщиной  $h = 0,1 \text{ м}$ , если известно, что температура воздуха  $t_{ж} = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи от поверхности льда к воздуху  $\alpha = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , теплота плавления льда  $r_{пл} = 340 \text{ кДж}/\text{кг}$ . Теплоемкостью воды и льда пренебречь.

**133.** Определить эквивалентный коэффициент теплопередачи через стенки сосуда Дьюара, если известно, что уровень жидкости в сосуде понизился вдвое за время  $\Delta t$ . Рабочая емкость сосуда имеет форму цилиндра радиусом  $R$ . Начальная высота уровня жидкости  $h$ . Заданы температура насыщения  $t_{с}$ , плотность  $\rho$  и скрытая теплота парообразования  $r$  жидкости, а также температура окружающей среды Дьюара  $t_{ж}$ .

**134.** Для нагревания длинного бруса прямоугольного сечения размером  $0,2 \times 0,1 \text{ м}^2$  используется нагреватель, который плотно прижимается к одной из длинных сторон бруса (рис. 1.16). Остальные три стороны окружены воздухом с температурой  $t_{ж} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Первоначально брус имел постоянную температуру, равную температуре окружающей среды. Считая, что температура включенного нагревателя  $t_{н} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$  постоянна, определить промежуток времени, в течение которого должен работать нагреватель, чтобы минимальная температура бруса составила  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коэффициент температуропроводности материала бруса  $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ , коэффициент те-

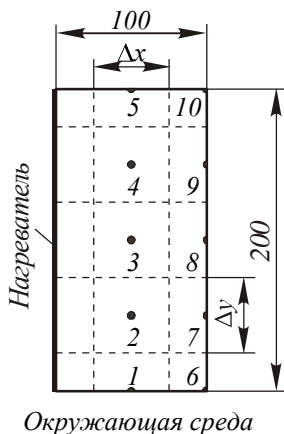


Рис. 1.16

плопроводности  $25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Коэффициент теплоотдачи от всех трех охлаждаемых поверхностей бруса к воздуху одинаков и равен  $75 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

Задачу решить численным методом на ЭВМ, используя неявную форму представления уравнения теплопроводности в конечных разностях. Сечение бруса разбить на квадратные ячейки со стороной  $\Delta x = \Delta y = 0,05 \text{ м}$ . Рассчитать температуры в десяти узлах, показанных на рисунке. Повторить расчеты для более мелкой сетки со стороной  $0,025 \text{ м}$ . Сравнить полученные результаты.

### Теплопроводность тел с пренебрежимо малым внутренним термическим сопротивлением

**135.** Тело объемом  $V$  и поверхностью  $F$ , имеющее начальную температуру  $t_0$ , помещается в среду с постоянной температурой  $t_{\text{ж}}$ . Определить закон охлаждения тела, если его внутреннее термическое сопротивление пренебрежимо мало (число Био для тела много меньше единицы). Коэффициент теплоотдачи от поверхности тела  $\alpha$ , плотность  $\rho$  и теплоемкость  $c$  материала тела известны.

**136.** Решить задачу 135 при условии, что температура жидкости является произвольной функцией времени  $t_{\text{ж}}(\tau)$ .

**137.** Решить задачу 135 при условии, что температура жидкости растет со временем по линейному закону  $t_{\text{ж}}(\tau) = t_{\text{ж}0} + k\tau$ , причем  $t_{\text{ж}0}$  меньше начальной температуры тела ( $t_{\text{ж}0} < t_0$ ). Определить: а) через какое время температура тела станет равной температуре жидкости; б) какая разница установится между температурами тела и жидкости при  $\tau \rightarrow \infty$ . С каким запаздыванием по времени температура тела будет при этом следовать за температурой жидкости?

**138.** Ртутный термометр имел температуру  $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  и был помещен в сосуд с воздухом  $t_{\text{ж}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Через какой интервал времени показания термометра будут отличаться от измеряемой температуры воздуха на 1 %, если: а) воздух неподвижен и коэффициент теп-

лоотдачи на поверхности термометра  $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ; б) воздух движется и  $\alpha = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ? Чувствительный элемент термометра имеет форму шара диаметром  $2r_0 = 6 \text{ мм}$ .

*Указание:* влиянием тонкой оболочки из стекла пренебречь.

**139.** Определить ошибку измерения температуры воздуха термометром, рассмотренным в задаче 138, если температура неподвижного воздуха ( $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ) изменяется со скоростью 200 град. в час.

**140.** Тело объемом  $V$  и поверхностью  $F$  в течение длительного времени омывается потоком жидкости, температура которой периодически изменяется со временем по закону косинуса  $t_{\text{ж}}(\tau) = t_0 + t_{\text{max}} \cos \omega \tau$ . Определить амплитуду колебаний температуры тела и сдвиг по фазе между колебаниями температуры тела и жидкости при  $\tau \rightarrow \infty$ . Плотность тела  $\rho$ , теплоемкость  $c$ , коэффициент теплоотдачи на поверхности тела  $\alpha$ , число Био для тела мало ( $Bi \ll 1$ ).

**141.** Для измерения колебаний температуры жидкости применяется микротермопара с диаметром спая термоэлектродов  $2r_0 = 0,1 \text{ мм}$ . Физические параметры спая:  $\rho = 8600 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $\lambda = 20 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $c = 0,46 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Сигнал термопары записывается на ленте осциллографа. Определить ошибку в измерении амплитуды колебаний температуры жидкости и отставание в показаниях термопары, если записанный сигнал изменяется со временем по закону косинуса с периодом 0,05 с. Коэффициент теплоотдачи на поверхности спая термопары  $\alpha = 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

**142.** Определить коэффициент теплоотдачи от поверхности шара к потоку воздуха. Шар диаметром  $d = 40 \text{ мм}$  выполнен из стали и в период регулярного режима имел темп охлаждения  $m = 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ .

*Указание:* при решении задачи принять число Био для шара много меньше единицы. После определения коэффициента теплоотдачи проверить справедливость принятого допущения.

**143.** Стальной лист толщиной 4 мм, имеющий начальную температуру  $t_0 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ , охлаждается потоком газа с температурой  $t_{\text{ж}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить температуру листа через 5, 10 и 15 мин после начала охлаждения. Коэффициент теплоотдачи к потоку газа  $\alpha = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

**144.** Нагретый лист стали ( $2\delta = 20$  мм,  $t_0 = 500$  °С) помещен в воздушную среду ( $t_{\text{ж}} = 20$  °С,  $\alpha = 35$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)). Определить промежуток времени  $\tau$ , по истечении которого температура листа будет отличаться на  $0,2$  °С от температуры воздуха [2].

**145.** Длинная медная шина размером в поперечном сечении  $10 \times 60$  мм с начальной температурой  $t_0 = 400$  °С охлаждается потоком воздуха с температурой  $t_{\text{ж}} = 20$  °С. Коэффициент теплоотдачи к потоку воздуха  $\alpha = 30$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Определить, через какое время температура шины будет равна  $20,5$  °С.

**146.** По длинному горизонтальному проводу из нихрома диаметром  $d = 1$  мм в течение времени  $\tau_0 = 2$  с пропускается ток силой  $I = 20$  А. Как будет изменяться температура провода во время прохождения тока и после его выключения, если провод находится на открытом воздухе? При расчетах принять температуру воздуха  $t_{\text{в}} = 10$  °С, коэффициент теплоотдачи от поверхности провода к воздуху считать постоянным и равным  $35$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Определить максимальную температуру провода при его нагреве током, а также промежуток времени, через который температура провода понизится до  $20$  °С после выключения тока. Физические параметры провода: плотность  $\rho = 8400$  кг/м<sup>3</sup>, удельная теплоемкость  $c = 430$  Дж/(кг·К), коэффициент теплопроводности  $\lambda = 14$  Вт/(м·К), удельное электрическое сопротивление  $\rho_s = 10^{-6}$  Ом·м.

**147.** Тело произвольной формы, имеющее объем  $V$  и поверхность  $F$ , охлаждается в среде с температурой  $t_{\text{ж}}$ . Начальная температура тела равна  $t_0$ . Плотность и теплоемкость материала тела  $\rho$  и  $c$ . Определить закон изменения температуры тела со временем  $t(\tau)$ , если на поверхности тела выполняется нелинейное условие теплообмена  $\alpha = A(t_F - t_{\text{ж}})^n$  ( $n > 0$ ). Для начального момента времени число Био для тела много меньше единицы.

**148.** Длинный горизонтальный стержень диаметром  $d = 10$  мм, имеющий начальную температуру  $t_0 = 100$  °С, остывает на воздухе, температура которого  $t_{\text{ж}} = 20$  °С. Охлаждение стержня происходит путем естественной конвекции, при этом  $\alpha = 13,3(t_F - t_{\text{ж}})^{1/4}$ . Поперечное число Био для стержня много меньше единицы. Плотность и теплоемкость материала стержня равны, соответственно,

$\rho = 10,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $c = 252 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ . Определить, через какое время температура стержня будет равна  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**149.** Полубесконечный стержень ( $x \geq 0$ ) сечением  $S$  и периметром  $\Pi$  омывается потоком жидкости с температурой  $t_{\text{ж}}$ . Коэффициент теплоотдачи от стержня к жидкости  $\alpha$ . Вывести формулу, описывающую распределение температуры по длине стержня  $t(x)$ , если конец стержня  $x=0$  имеет температуру  $t_0$ . Теплопроводность стержня  $\lambda$ . Поперечное число Био для стержня много меньше единицы.

**150.** От трения в подшипнике, расположенном на конце стального вала диаметром  $d = 60 \text{ мм}$ , выделяется тепло в количестве  $30 \text{ Дж/с}$ . Тепло передается через вал окружающей среде ( $t_{\text{ж}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Чему равна температура конца вала с подшипником, если коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 7 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ ? (Вал рассматривать как полубесконечный стержень.)

**151.** Определить количество тепла, которое рассеивается в окружающую среду полубесконечным стержнем при нелинейном условии теплообмена на его поверхности  $\alpha = A(t_F - t_{\text{ж}})^n$ . Поперечное число Био для стержня мало. Задано:  $t_0$  – температура основания стержня;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала стержня;  $\Pi$  и  $S$  – периметр и площадь поперечного сечения стержня.

**152.** Температура воздуха в резервуаре измеряется ртутным термометром, который помещен в гильзу (рис. 1.17). Гильза выполнена из меди и имеет длину  $l = 150 \text{ мм}$  и толщину стенки  $\delta = 0,5 \text{ мм}$ . Коэффициент теплоотдачи от воздуха к гильзе  $\alpha = 38 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ . Определить ошибку в показаниях термометра  $\delta t$  и истинную температуру воздуха  $t_{\text{ж}}$ , если температура основания гильзы  $t_0 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ , а термометр показывает  $t_l = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить

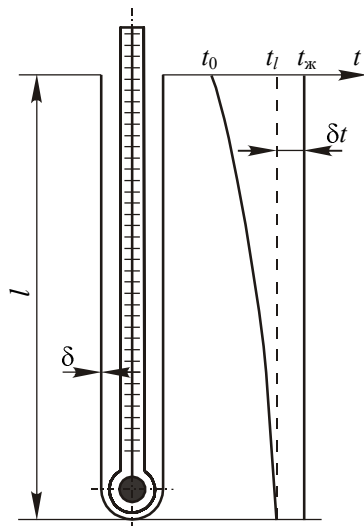


Рис. 1.17

ошибку в показаниях термометра, помещенного в такую же гильзу, но выполненную из нержавеющей стали [2].

**153.** Температура воздуха в резервуаре измеряется посредством двух термометров, помещенных в две одинаковые гильзы. Вследствие различной тепловой изоляции температура стенки резервуара в местах установки гильз различна:  $t_{01} = 80^\circ\text{C}$  и  $t_{02} = 60^\circ\text{C}$ . По той же причине различны и показания термометров:  $t_{11} = 90^\circ\text{C}$  и  $t_{12} = 80^\circ\text{C}$ . Определить истинную температуру воздуха [2].

**154.** В стержне постоянного поперечного сечения действуют внутренние источники тепла ( $q_v = \text{const}$ ). Боковая поверхность стержня охлаждается жидкостью с постоянной температурой  $t_{\text{ж}}$ , а концы стержня  $x = 0$  и  $x = l$  имеют температуры  $t_0$  и  $t_l$ . Найти распределение температуры по длине стержня для случая  $Bi \ll 1$ , если периметр боковой поверхности стержня  $\Pi$ , площадь поперечного сечения  $S$ , коэффициент теплопроводности материала стержня  $\lambda$  и коэффициент теплоотдачи на боковой поверхности  $\alpha$ .

**155.** Прямоугольное ребро из нержавеющей стали (рис. 1.18) установлено вертикально на теплоотдающей стенке, температура которой  $t_0 = 120^\circ\text{C}$ . Ребро имеет толщину  $\delta = 5$  мм, высоту  $h = 250$  мм и длину  $l = 100$  мм. Ребро омывается воздухом с температурой  $t_{\text{ж}} = 20^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи от всех поверхностей ребра к воздуху можно принять одинаковым и равным  $\alpha = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Найти тепловой поток  $Q$ , передаваемый ребром воздуху, и температуру вертикально расположенного торца ребра  $t_l$ . Во сколько раз величина  $Q$  превышает тепловой поток  $Q_0$ , который передавался бы воздуху от поверхности, занятой основанием ребра, если бы ребро на стенке отсутствовало? Как изменятся величины  $Q$  и  $t_l$ , если ребро из нержавеющей стали заменить медным ребром?

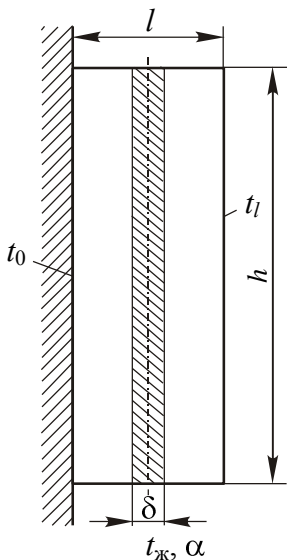


Рис. 1.18



**156.** Для определения плотности потока падающего излучения может быть использована следующая методика измерений. Поток излучения падает на тонкую круглую мембрану с зачерненными поверхностями, изготовленную из металла с высокой теплопроводностью. Мембрана по периметру закреплена в держателе, температура которого поддерживается постоянной. При этом температурное поле мембраны является осесимметричным. Измерение температуры мембраны проводится в двух точках: в центре ( $t_0$ ) и на расстоянии  $R$  от центра ( $t_R$ ). Толщина мембраны  $\delta$  и коэффициент теплопроводности  $\lambda$  материала, из которого она изготовлена, известны. Получить расчетную формулу для определения плотности потока падающего излучения  $q_{\text{п}}$ , предполагая, что весь падающий поток поглощается, а собственное излучение пластины несущественно.

## Г Л А В А 2

# КОНВЕКТИВНЫЙ И РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН

### ОСНОВНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Применение закона сохранения энергии к потоку жидкости приводит к следующему дифференциальному уравнению для поля температур:

$$c_p \rho \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} + \vec{w} \text{grad} t \right) = \text{div}(\lambda \text{grad} t) + q_v + \frac{\partial p}{\partial \tau} + \vec{w} \text{grad} p + \mu \Phi + \Phi_p, \quad (2.1)$$

где  $t(x, y, z, \tau)$  – температура;  $\vec{w}(x, y, z, \tau)$  – скорость;  $p(x, y, z, \tau)$  – давление;  $q_v(x, y, z, \tau)$  – мощность внутренних источников тепловыделения;  $\mu \Phi$  – член, учитывающий тепловыделение в потоке жидкости за счет работы против сил вязкого трения;  $\Phi_p$  – член, учитывающий перенос тепла излучением.

Диссипативная функция  $\Phi$  определяется полем скорости:

$$\Phi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \left( \frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right)^2 - \frac{2}{3} \left( \sum_{i=1}^3 \frac{\partial w_i}{\partial x_i} \right)^2. \quad (2.2)$$

При отсутствии радиационного переноса и в случае умеренных скоростей течения жидкости, когда можно пренебречь изменением давления и диссипативным теплом, уравнение (2.1) упрощается:

$$c_p \rho \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} + \vec{w} \text{grad} t \right) = \text{div}(\lambda \text{grad} t) + q_v. \quad (2.3)$$

Уравнение (2.3) имеет вид:  
в декартовых прямоугольных координатах

$$c_{p\rho}\left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z}\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z}\right) + q_v; \quad (2.4)$$

в цилиндрических координатах

$$c_{p\rho}\left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_r \frac{\partial t}{\partial r} + w_\varphi \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial \varphi} + w_z \frac{\partial t}{\partial z}\right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda \frac{\partial t}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \varphi}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z}\right) + q_v. \quad (2.5)$$

Ниже приводятся некоторые соотношения для расчета конвективного и радиационного теплообмена применительно к задачам, предлагаемым в настоящем сборнике. Они получены как в результате теоретического рассмотрения процессов, так и экспериментальным путем.

При продольном обтекании пластины потоком жидкости с постоянными физическими свойствами теплоотдача может быть рассчитана по формулам:

при условии  $t_c = \text{const}$

$$\text{Nu}_x = 0,332\text{Re}_x^{0,5} \text{Pr}^{1/3}; \quad (2.6)$$

при условии  $q_c = \text{const}$

$$\text{Nu}_x = 0,46\text{Re}_x^{0,5} \text{Pr}^{1/3}. \quad (2.7)$$

Эти соотношения описывают локальную теплоотдачу при ламинарном обтекании пластины ( $\text{Re} < 5 \cdot 10^5$ ) теплоносителями с числами Прандтля  $\text{Pr} = 0,5 \div 15$ . В качестве характерного размера ис-

пользуется расстояние от передней кромки пластины. Для расчета средней теплоотдачи при турбулентном течении жидкости вдоль пластины можно использовать зависимость

$$\overline{Nu}_l = 0,036 Re_l^{0,8} Pr^{0,4}. \quad (2.8)$$

При поперечном обтекании цилиндра потоком жидкости теплоотдача описывается соотношением

$$Nu = C Re^n Pr^m \varepsilon_t \varepsilon_\psi. \quad (2.9)$$

Здесь в качестве определяющего размера используется диаметр цилиндра, физические свойства выбираются при температуре набегающего потока. Поправка, учитывающая изменение физических свойств жидкости, равна  $\varepsilon_t = (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25}$  при нагревании жидкости и  $\varepsilon_t = (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,2}$  при охлаждении. Поправка  $\varepsilon_\psi$  учитывает влияние угла атаки  $\psi$  на теплоотдачу и равна  $\varepsilon_\psi = 1 - 0,54 \cos^2 \psi$ , если  $\psi > 30^\circ$ . Значения коэффициента  $C$  и показателей степени  $n$  и  $m$  в зависимости от числа Рейнольдса приводятся в табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2.1

Re	C	n	m
$10^0 - 4 \cdot 10^1$	0,76	0,4	0,37
$4 \cdot 10^1 - 10^3$	0,52	0,5	0,37
$10^3 - 2 \cdot 10^5$	0,26	0,6	0,37
$2 \cdot 10^5 - 10^7$	0,023	0,8	0,40

При естественной конвекции жидкостей с числами Прандтля  $Pr = 0,5 \div 200$  теплоотдача рассчитывается по формуле

$$Nu = C(GrPr)^n. \quad (2.10)$$

Определяющим размером для горизонтального цилиндра является диаметр, для вертикальных цилиндра и плиты – их высота. Физические свойства жидкости выбираются при средней температуре

$\bar{t} = 0,5(t_c + t_{ж})$ . Значения коэффициентов  $C$  и  $n$  в формуле (2.10) приведены в табл. 2.2.

Т а б л и ц а 2.2

GrPr	$C$	$n$
$10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
$2 \cdot 10^7 - 10^{13}$	0,135	0,333

Тепловой поток через узкие прослойки жидкости или газа с учетом естественной конвекции рассчитывается по формуле

$$q = \lambda_{\text{экв}} \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta}, \quad (2.11)$$

где эквивалентный коэффициент теплопроводности жидкости в прослойке

$$\lambda_{\text{экв}} = \lambda_{ж} \quad \text{при } GrPr < 10^3,$$

$$\lambda_{\text{экв}} = 0,18(GrPr)^{0,25} \lambda_{ж} \quad \text{при } GrPr > 10^3.$$

Физические свойства жидкости определяются при средней температуре  $\bar{t} = 0,5(t_{c1} + t_{c2})$ . Характерным размером является ширина прослойки  $\delta$ .

Для расчета локальной теплоотдачи от стенки трубы к гидродинамически стабилизированному ламинарному потоку жидкости ( $Re < 2300$ ) с постоянными физическими свойствами можно использовать следующие соотношения:

при  $t_c = \text{const}$

$$Pe^{-1}(x/d) < 0,01, \quad Nu = 1,03 \left( Pe \frac{d}{x} \right)^{1/3}; \quad (2.12)$$

$$Pe^{-1}(x/d) \rightarrow \infty, \quad Nu = 3,66; \quad (2.13)$$

при  $q_c = \text{const}$

$$\text{Pe}^{-1}(x/d) < 0,037, \quad \text{Nu} = 1,31 \left( \text{Pe} \frac{d}{x} \right)^{1/3} \left( 1 + 2 \frac{1}{\text{Pe} d} \right); \quad (2.14)$$

$$\text{Pe}^{-1}(x/d) > 0,037, \quad \text{Nu} = 4,36. \quad (2.15)$$

Теплоотдача при турбулентном течении жидкости в трубах рассчитывается по формуле

$$\text{Nu} = \frac{\frac{\xi}{8} \text{RePr}}{1 + \frac{900}{\text{Re}} + 127 \sqrt{\frac{\xi}{8}} (\text{Pr}^{2/3} - 1)}, \quad (2.16)$$

$$\xi = (1,82 \lg \text{Re} - 1,64)^{-2};$$

$$\text{Pr} = 0,5 \div 5 \cdot 10^5, \quad \text{Re} = 4 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^6.$$

Для газов и неметаллических жидкостей с умеренными числами Прандтля теплоотдача может быть также определена по формуле

$$\text{Nu} = 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4}. \quad (2.17)$$

Для жидких металлов ( $\text{Pr} = 0,004 \div 0,04$ )

$$\text{Nu} = 5 + 0,025 \text{Pe}^{0,8}. \quad (2.18)$$

При кипении воды в большом объеме коэффициент теплоотдачи рассчитывается по эмпирической зависимости

$$\alpha = 4,32(p^{0,14} + 1,28 \cdot 10^{-2} p^2) q^{0,7}, \quad (2.19)$$

где  $p$  – давление, МПа.

В условиях вынужденного движения теплоотдача при кипении определяется по интерполяционной формуле:

$$\alpha = \sqrt{\alpha_0^2 + \alpha_{00}^2}, \quad (2.20)$$

где  $\alpha_0$  рассчитывается по соотношениям для теплоотдачи при вынужденной конвекции, а  $\alpha_{00}$  – по соотношениям для кипения в большом объеме.

Величина критической плотности теплового потока при кипении жидкости в большом объеме вычисляется по формуле:

$$q_{кр} = kr\sqrt{\rho''^4 \sqrt{g(\rho' - \rho'')}}\sigma, \quad (2.21)$$

где  $k \approx 0,14$ .

Расчет теплоотдачи при пленочной конденсации насыщенного пара проводится по соотношениям:

в случае конденсации на поверхности горизонтальной трубы

$$\overline{Nu}_d = 0,724\sqrt{KArd Pr}, \quad Ar_d = \frac{gd^3}{\nu^2} \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'}\right), \quad K = \frac{r}{c_p \Delta t}; \quad (2.22)$$

в случае конденсации на вертикальной поверхности

$$\overline{Nu}_l = 1,154\sqrt{KArl Pr}, \quad Ar_l = \frac{gl^3}{\nu^2} \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'}\right). \quad (2.23)$$

Поток излучения с единицы поверхности абсолютно черного тела определяется законом Стефана – Больцмана

$$q = \sigma_0 T^4, \quad (2.24)$$

где  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Для серых тел

$$q = \varepsilon \sigma_0 T^4, \quad (2.25)$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты тела.

Лучистый теплообмен между двумя параллельными серыми поверхностями с температурами  $T_1$  и  $T_2$  рассчитывается по формуле:

$$q = \varepsilon_{12} \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4), \quad (2.26)$$

где  $\varepsilon_{12} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}$  – приведенная степень черноты.

При передаче тепла излучением от невогнутого тела, имеющего температуру  $T_1$ , в окружающую среду с температурой  $T_2$

$$Q = \varepsilon_1 \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4) F_1. \quad (2.27)$$



## ЗАДАЧИ

### Теплообмен при внешнем обтекании тел

**157.** Используя метод пограничного слоя конечной толщины, получить выражение для локальной и средней теплоотдачи пластины, имеющей постоянную температуру ( $t_F = \text{const}$ ), при обтекании ее продольным потоком жидкости. Принять, что пограничный слой на пластине является ламинарным, физические свойства жидкости не зависят от температуры, число Прандтля жидкости  $\text{Pr} \geq 1$ . Полученный результат сравнить с точным решением  $\text{Nu}_x = 0,332\text{Re}_x^{0,5} \text{Pr}^{1/3}$ .

**158.** Рассмотреть случай продольного обтекания пластины, имеющей постоянную температуру ( $t_F = \text{const}$ ), ламинарным потоком жидкометаллического теплоносителя ( $\text{Pr} \ll 1$ ). Пренебрегая изменением скорости жидкости в пределах теплового пограничного слоя и используя метод преобразования Лапласа при интегрировании дифференциального уравнения переноса энергии, получить выражения для локального и среднего коэффициентов теплоотдачи.

*Указание:* при решении задачи воспользоваться обратным преобразованием:

$$L^{-1}\left(\frac{1}{s}e^{-k\sqrt{s}}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{k}{2\sqrt{x}}\right).$$

**159.** Решить задачу 157 для случая, когда на поверхности пластины задан постоянный тепловой поток. Сравнить величины коэффициентов теплоотдачи при условиях  $t_F = \text{const}$  и  $q_F = \text{const}$ .

**160.** Решить задачу 158 для случая, когда на поверхности пластины задано условие  $q_F = \text{const}$ .

*Указание:* при решении задачи воспользоваться обратным преобразованием:

$$L^{-1}\left(\frac{1}{s\sqrt{s}}e^{-k\sqrt{s}}\right) = 2\sqrt{\frac{x}{\pi}}\exp\left(-\frac{k^2}{4x}\right) - k\left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{k}{2\sqrt{x}}\right)\right].$$

**161.** Определить средний коэффициент теплоотдачи и поток тепла с плоской поверхности длиной 3 м и шириной 1 м, которая

омывается продольным потоком воздуха со скоростью  $w_0 = 1,5$  м/с. Температура поверхности поддерживается постоянной и равной  $t_F = 40$  °С, температура набегающего потока воздуха  $t_{ж} = 20$  °С.

**162.** Нихромовая лента с размерами в поперечном сечении  $10 \times 0,1$  мм<sup>2</sup>, по которой пропускается электрический ток силой  $I = 50$  А, омывается поперечным потоком воды вдоль широкой грани. Скорость и температура набегающего потока воды  $w = 2$  м/с,  $t_{ж} = 20$  °С. Определить максимальную и среднюю температуру ленты.

**163.** Плоская крыша теплицы имеет длину 60 м и ширину 12 м. Крыша обдувается ветром в продольном направлении со скоростью 10 м/с. Температура воздуха 10 °С, температура поверхности крыши 13 °С. Определить средний коэффициент теплоотдачи к воздуху и теплопотери через крышу теплицы.

**164.** Как изменится средний коэффициент теплоотдачи и теплопотери для условий задачи 163, если ветер обдувает крышу в поперечном направлении?

**165.** Коэффициент трения при обтекании плоской обогреваемой поверхности турбулентным потоком воздуха со скоростью 20 м/с и температурой 20 °С составляет 0,003. Используя соотношение гидротепловой аналогии, определить средний коэффициент теплоотдачи от поверхности.

**166.** Участок паропровода длиной 50 м, проложенный на открытом воздухе, обдувается ветром под углом 45° к оси трубы. Определить потери тепла в окружающую среду, если температура набегающего потока воздуха равна – 10 °С, скорость ветра – 2 м/с, диаметр паропровода – 0,6 м, температура наружной поверхности изоляции – 0°С.

**167.** Ртутный термометр, предназначенный для измерения температуры потока воздуха, который движется в трубопроводе со скоростью  $w = 10$  м/с, заключен в гильзу из нержавеющей стали. Гильза наружным диаметром 10 мм с толщиной стенки 1 мм расположена внутри трубопровода перпендикулярно направлению потока, глубина погружения гильзы в поток  $l = 60$  мм. Оценить поправку, которую необходимо внести в показания термометра  $t_t = 100$  °С вследствие отвода тепла по гильзе, если ее температура в месте, где она проходит через стенку трубопровода,  $t_0 = 30$  °С.

*Указание:* при расчете поправки к показаниям термометра воспользоваться соотношением, полученным при решении задачи 152.

**168.** Платиновая нить термоанемометра длиной  $l = 5$  мм и диаметром  $d = 0,01$  мм омывается поперечным потоком воздуха. По нити протекает электрический ток  $I = 59$  мА, падение напряжения на проволочке  $\Delta U = 0,432$  В. Удельное электросопротивление платины  $\rho_s = 0,1[1 + 3,8 \cdot 10^{-3}(t - 20)]$  Ом·мм<sup>2</sup>/м. Температура воздуха  $t_{\text{ж}} = 20$  °С. Определить скорость воздуха, омывающего нить.

**169.** Форма воздушного шара, заполненного горячим воздухом, близка к сферической и его диаметр составляет 18 м. Общий вес гондолы, газовой горелки, полезного груза и материала воздушного шара 1050 Н. Определить мощность газовой горелки, необходимую для снабжения шара горячим воздухом. Предположить, что воздушный шар летает на высоте, где температура равна 18 °С, а относительная скорость ветра 0,1 м/с. Термическим сопротивлением оболочки шара можно пренебречь [12].

**170.** Сферическая капля воды диаметром 4 мм свободно падает в сухом неподвижном воздухе. Определить температуру, которую будет иметь капля в процессе ее испарения, если скорость установившегося движения капли равна 10 м/с, а температура воздуха 30 °С. Рассчитать поток тепла от воздуха к капле и скорость ее испарения.

**171.** Определить средний коэффициент теплоотдачи при поперечном обтекании воздухом восьмирядного трубного пучка с коридорным расположением труб наружным диаметром  $d = 40$  мм и относительными шагами  $x_1/d = 1,8$ ;  $x_2/d = 2,3$  (рис. 2.1). Средняя скорость воздуха в наиболее узком проходном сечении пучка  $w = 10$  м/с, средняя температура потока  $t_{\text{ж}} = 300$  °С.

*Указание:* при решении задачи воспользоваться рекомендациями [6].

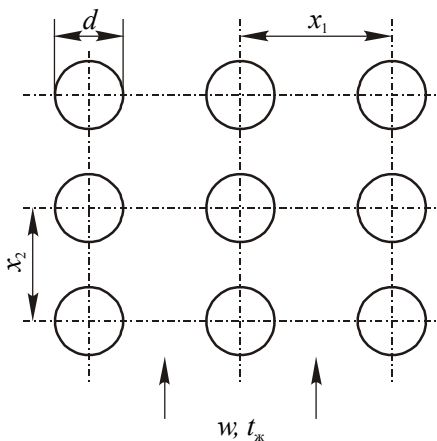


Рис. 2.1

**172.** Найти средний коэффициент теплоотдачи и поток тепла, передаваемый в испарителе третьего контура АЭС с реактором на быстрых нейтронах. Испаритель имеет поверхность нагрева  $60 \text{ м}^2$  и представляет собой пучок труб наружным диаметром  $25,4 \text{ мм}$ , омываемых в поперечном направлении потоком натрия. Скорость набегающего потока  $3 \text{ м/с}$ , средняя температура натрия  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , средний температурный напор между натрием и поверхностью нагрева испарителя  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

*Указание:* при решении задачи воспользоваться рекомендациями [10].

### Теплообмен при естественной конвекции

**173.** На основе решения интегральных уравнений пограничного слоя конечной толщины получить выражение для локального коэффициента теплоотдачи при ламинарной естественной конвекции жидкости на вертикальной пластине, имеющей постоянную температуру (граничное условие  $t_F = \text{const}$ ).

*Указание:* при решении задачи профили скорости и избыточной температуры в пограничном слое толщиной  $\delta$  аппроксимировать следующими функциями:

$$w_x = w_1 \frac{y}{\delta} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^2, \quad \vartheta = \vartheta_F \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^2.$$

**174.** Решить аналогичную задачу для случая, когда на поверхности пластины задано постоянное значение плотности теплового потока (условие  $q_F = \text{const}$ ).

*Указание:* при решении задачи профили скорости и избыточной температуры в пограничном слое толщиной  $\delta$  аппроксимировать следующими функциями:

$$w_x = w_1 \frac{y}{\delta} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^2, \quad \vartheta = \frac{q_F \delta}{2\lambda} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^2.$$

**175.** По горизонтальному нихромовому проводу диаметром  $d = 1 \text{ мм}$  пропускается электрический ток силой  $I = 2 \text{ А}$ . Провод охлаждается путем естественной конвекции в воздухе, температура которого  $t_{\text{ж}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить температуру поверхности провода.

**176.** Для отопления помещения предполагается использовать горизонтальный паропровод диаметром  $60 \text{ мм}$ . Какой длины дол-

жен быть паропровод, если температура воздуха в помещении должна поддерживаться равной  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а потери тепла составляют  $1\text{ кДж/с}$ ? Температуру наружной поверхности паропровода принять равной  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**177.** На вертикальный металлический лист высотой  $h = 1\text{ м}$  падает солнечное излучение. Плотность поглощаемого потока энергии составляет  $200\text{ Вт/м}^2$ . Лист охлаждается с обеих сторон свободным потоком воздуха с температурой  $t_{\text{ж}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить температуру листа. Охлаждением листа за счет лучеиспускания пренебречь.

**178.** Корпус теплообменника представляет собой горизонтальный цилиндрический сосуд длиной  $15\text{ м}$  и диаметром  $4\text{ м}$ . Температура поверхности корпуса равна  $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить потери тепла теплообменником за счет естественной конвекции, если температура окружающего воздуха составляет  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**179.** Определить плотность потока тепла через газовую прослойку шириной  $20\text{ мм}$  между двумя параллельными пластинами, расположенными вертикально. Температуры поверхностей пластин  $150$  и  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Расчет провести для воздуха и гелия.

**180.** Блок электронного прибора отделен от кожуха воздушной прослойкой шириной  $25\text{ мм}$ . Тепловой поток с поверхности блока вследствие тепловыделения в нем составляет  $50\text{ Вт/м}^2$ . Кожух поддерживается при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить температуру поверхности электронного блока.

**181.** При какой толщине водяной прослойки между поверхностями с температурами  $t_1 = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $t_2 = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$  можно пренебречь влиянием естественной конвекции на передачу тепла от теплой поверхности к холодной? Коэффициент объемного расширения воды  $\beta = 0,7 \cdot 10^{-4}\text{ К}^{-1}$ .

**182.** Определить поток тепла через единицу поверхности оконной рамы с одним стеклом. Толщина стекла  $\delta_{\text{ст}} = 4\text{ мм}$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{ст}} = 0,75\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Температура воздуха внутри помещения плюс  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , снаружи – минус  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Коэффициенты теплоотдачи на поверхности стекла с внутренней и наружной стороны рамы, соответственно,  $5$  и  $10\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ . Каким будет поток тепла через раму с двойным остеклением при ширине зазора между стеклами  $\delta = 60\text{ мм}$ ?

## Теплообмен при течении жидкости в каналах

**183.** Известно, что при вынужденной конвекции в канале теплоносителя с постоянными физическими свойствами средний по длине канала коэффициент теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  от стенки канала к жидкости зависит от диаметра канала  $d$  и его длины  $l$ , скорости движения жидкости  $w$ , плотности  $\rho$  и удельной теплоемкости жидкости при постоянном давлении  $c_p$ , значений коэффициентов теплопроводности  $\lambda$  и динамической вязкости  $\mu$ . Используя метод анализа размерностей физических величин и  $\pi$ -теорему, определить безразмерные критерии и записать уравнение подобия для рассматриваемого процесса теплообмена.

**184.** Найти распределение температур в потоке жидкости и коэффициент теплоотдачи на участке стабилизированного теплообмена при ламинарном течении в круглой трубе радиусом  $r_0$ , на стенке которой выполняется условие  $q_F = \text{const}$ .

**185.** Найти распределение температур в потоке жидкости и коэффициент теплоотдачи на участке стабилизированного теплообмена при ламинарном течении в плоской щели, на стенках которой выполняется условие  $q_F = \text{const}$ .

**186.** Через длинную трубу радиусом  $r_0$  протекает жидкость, в которой действуют равномерно распределенные внутренние источники тепла мощностью  $q_v$ . Определить установившееся распределение температур в потоке жидкости, если внутренняя поверхность трубы поддерживается при постоянной температуре  $t_c$ . Режим течения – ламинарный.

**187.** Определить установившееся распределение температур по сечению плоской щели при ламинарном течении в ней очень вязкой жидкости. Температура стенок щели поддерживается постоянной. Физические свойства жидкости не зависят от температуры.

**188.** Через трубку диаметром  $d = 10$  мм и длиной  $l = 1$  м, обогреваемую пропусканием по ней электрического тока, прокачивается газ со скоростью  $w_0 = 4$  м/с. Определить мощность, выделяемую в трубке, если газ подогревается на  $50$  °С. Каким образом изменяются по длине трубки температура жидкости и температура стенки при равномерном теплоподводе? Физические свойства газа считать

не зависящими от температуры и равными:  $\nu = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\rho = 1,0 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $c_p = 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\lambda = 0,03 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

**189.** Определить температуру теплоносителя на выходе из трубы, температура которой поддерживается постоянной и равной  $t_c = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ . На вход поступает жидкость с температурой  $t_{\text{вх}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Течение жидкости гидродинамически стабилизировано, режим течения – ламинарный,  $\text{Re} = 2000$ . Безразмерная длина канала (отношение длины канала к его внутреннему диаметру)  $l/d = 100$ . Расчет провести для теплоносителей с числами Прандтля: а)  $\text{Pr} = 5,0$ ; б)  $\text{Pr} = 0,02$ . Теплофизические свойства теплоносителей считать не зависящими от температуры.

**190.** Через обогреваемый канал длиной  $l$  и диаметром  $d_r$  прокачивается теплоноситель с числом Прандтля  $\text{Pr}$  со скоростью, соответствующей числу Рейнольдса  $\text{Re}$ . Теплоподвод к жидкости осуществляется равномерно по длине канала. Определить максимальный подогрев теплоносителя, если предельно допустимая температура поверхности стенки трубы  $t_c^{\text{доп}}$ . Температура теплоносителя на входе  $t_{\text{вх}}$ .

**191.** Определить подогрев жидкости в круглой трубе для условий задачи 190, если  $l/d = 100$ ,  $t_{\text{вх}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_c^{\text{доп}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{Pr} = 1,0$ . Расчет провести для двух случаев: а)  $\text{Re} = 2 \cdot 10^3$ ; б)  $\text{Re} = 10^5$ .

**192.** Сравнить коэффициенты теплоотдачи при турбулентном течении в круглой трубе гелия и воздуха при атмосферном давлении и температуре  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Рассмотреть три случая: а) объемные расходы гелия и воздуха через трубу одинаковы; б) массовые расходы одинаковы; в) одинаковы затраты мощности на прокачивание газов через трубу.

**193.** В качестве теплоносителей ядерных реакторов используются вода, натрий, гелий. Сравнить значения коэффициентов теплоотдачи при турбулентном течении этих теплоносителей в круглой трубе диаметром 12 мм при числах Рейнольдса  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$ . Температуру теплоносителя во всех случаях принять равной  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ , давление для натрия 0,5 МПа, для воды и гелия 15 МПа.

**194.** Вода со средней температурой  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  движется в трубе с внутренним диаметром 14 мм. Определить коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к воде, если расход воды  $0,1 \text{ кг}/\text{с}$ .

**195.** Какую величину будет иметь коэффициент теплоотдачи в условиях задачи 194, если воду заменить водяным паром при давлении 3,5 МПа?

**196.** По трубке диаметром 20 мм и длиной 1 м течет трансформаторное масло со скоростью 3 м/с. Средняя температура масла 60 °С. Определить коэффициент теплоотдачи и подогрев масла, если средняя температура внутренней поверхности трубки 100 °С.

**197.** Активная зона ядерного реактора типа ВВЭР состоит из шестигранных кассет, в которых находятся стержневые тепловыделяющие элементы, расположенные по сторонам правильного шестиугольника. Диаметр твэлов  $d = 9,1$  мм, шаг между ними  $s = 12,75$  мм. Предполагается, что энерговыделение по длине сборки высотой  $H = 3,5$  м изменяется по косинусоидальному закону. При этом зависимость плотности теплового потока на поверхности твэлов от координаты  $z$  можно описать уравнением

$$q(z) = q_0 \cos\left(\frac{\pi z}{H}\right),$$

где  $q_0$  – максимальное значение плотности теплового потока при  $z = 0$  на расстоянии  $H/2$  от входа в сборку (для упрощения записи выражений эффективной добавкой за счет отражателя нейтронов пренебрегается). Найти функции, описывающие распределение по высоте сборки температур теплоносителя и поверхности твэлов. Определить положение и значение максимума температуры поверхности твэлов. В расчетах использовать следующие исходные данные: давление и средняя температура воды в реакторе 16 МПа и 306 °С соответственно; скорость воды 5,5 м/с; температура воды на входе в сборку 290 °С; максимальный тепловой поток  $1,1 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. Расчет коэффициента теплоотдачи от поверхности твэла к теплоносителю выполнить по формуле

$$\text{Nu} = A \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4},$$



где  $A = 0,0165 + 0,02(1 - 0,91x^{-2})x^{0,15}$ ;  $x = s/d$  – относительный шаг решетки стержней; характерный размер – эквивалентный диаметр ячейки  $d_{яч} = d(2\sqrt{3}x^2/\pi - 1)$ .

**198.** Стержневой твэл ядерного реактора типа ВВЭР с керамическим топливом в виде таблеток из диоксида урана имеет оболочку толщиной 0,65 мм из сплава Zr + 1% Nb. Между топливным сердечником и оболочкой имеется технологический зазор, заполненный гелием. Для условий задачи 197 найти функцию, описывающую распределение по высоте тепловыделяющей сборки температуры в центре твэла, определить координату и значение максимальной температуры. Среднеинтегральный коэффициент теплопроводности топлива  $\lambda_t = 2,5$  Вт/(м·К), коэффициент теплопроводности материала оболочки  $\lambda_{об} = 18$  Вт/(м·К), тепловая проводимость зазора между топливом и оболочкой  $\alpha_z = 5 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

**199.** Для условий, сформулированных в задачах 197 и 198, и используя результаты их решения, определить координату и значение максимальной температуры в центре цилиндрического дисперсионного твэла. Принять, что коэффициент теплопроводности топливной композиции, состоящей из частиц диоксида урана, находящихся в матрице из сплава циркония, равен 12 Вт/(м·К), а контактное термическое сопротивление между топливом и оболочкой отсутствует. Сравнить перепады температур между центром твэла и теплоносителем в случае твэлов с керамическим и дисперсионным топливом.

**200.** Определить коэффициент теплоотдачи и температурный напор “стенка – жидкость” при движении натрия в длинной круглой трубе, равномерно обогреваемой тепловым потоком  $2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. Внутренний диаметр трубы 18 мм. Скорость натрия 8 м/с, температура 300 °С.

**201.** При движении жидкого натрия в трубке с внутренним диаметром 12 мм его температура понижается от 550 до 350 °С. Расход натрия 0,5 кг/с. Определить длину трубки, если разность температур натрия и стенки по длине трубки не меняется и равна 10 °С.

**202.** Для охлаждения активных зон перспективных ядерных реакторов на быстрых нейтронах предусматривается использовать натрий или свинец. Сравнить коэффициенты теплоотдачи и перепады давления вследствие трения при турбулентном течении на-

трия и свинца в обогреваемой горизонтальной круглой трубе внутренним диаметром  $d = 20$  мм и длиной  $l = 3$  м при условии одинаковых затрат мощности на прокачку теплоносителя через трубу  $N = 40$  Вт при температуре  $450$  °С. КПД насоса принять равным  $0,7$ . В расчетах коэффициентов теплоотдачи использовать установленные в экспериментах зависимости

$$Nu = a + bPe^{0,8},$$

где для натрия  $a = 5$ ,  $b = 0,025$ ; для свинца  $a = 6,2$ ,  $b = 0,013$ .

### Теплообмен при кипении и конденсации

**203.** Считая, что кипение происходит на центрах парообразования размером  $R = 2$  мкм, сравнить перегревы поверхности относительно температуры насыщения для воды и этилового спирта при атмосферном давлении.

**204.** Вскипание воды в сосуде при давлении  $0,1$  МПа произошло при температуре стенки  $116$  °С. При каких перегревах стенки относительно температуры насыщения закипит вода, если давление увеличить до  $10$  МПа, уменьшить до  $0,05$  МПа?

**205.** В асимптотической стадии роста парового пузыря в объеме перегретой жидкости, когда объем пузыря достаточно велик и пузырь растет сравнительно медленно, можно пренебречь влиянием сил поверхностного натяжения на границе пузыря с жидкостью, а также инерционными эффектами. В этом случае температура поверхности раздела фаз близка к температуре насыщения при заданном давлении, а скорость роста пузыря практически целиком определяется скоростью передачи тепла теплопроводностью через тонкий слой перегретой жидкости на поверхности пузыря. Полагая, что можно пренебречь кривизной межфазной поверхности, принять толщину пограничного слоя равной  $\sqrt{a_{ж}\tau}$ , а разность температур на границах этого слоя  $t_{ж} - t_{с}$ . Вывести формулу для расчета скорости роста парового пузыря в объеме перегретой жидкости.

**206.** Оценить отрывной диаметр  $D_0$  пузыря пара при кипении воды в условиях большого объема при атмосферном давлении. Для оценки использовать известную формулу Фритца:

$$D_0 = 0,02\theta \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho' - \rho'')g}}.$$

Краевой угол смачивания водой поверхности нагрева  $\theta = 50^\circ$ .

**207.** Согласно модели Лабунцова – Ягова зависимость радиуса парового пузыря, растущего на поверхности нагрева, от времени имеет вид

$$R = (0,3\text{Ja} + \sqrt{0,09\text{Ja}^2 + 12\text{Ja}})\sqrt{a\tau},$$

где  $\text{Ja} = \frac{c_p \rho' \Delta t}{r \rho''}$  – число Якова.

Вычислить время роста парового пузыря на теплоотдающей стенке при кипении на ней воды под атмосферным давлением. Пузырь отрывается от стенки при достижении размера, который можно определить по формуле Фритца. Перегрев стенки  $\Delta t$  относительно температуры насыщения составляет  $10^\circ\text{C}$ . Краевой угол смачивания водой поверхности нагрева принять равным  $40^\circ$ .

**208.** Рассчитать модуль роста паровых пузырей  $R/\sqrt{a\tau}$  при кипении на поверхности теплоотдающей стенки воды в большом объеме. Плотность теплового потока на поверхности стенки  $q = 10^5 \text{ Вт/м}^2$ . Расчеты провести для давлений  $p = 0,1$  и  $8,6 \text{ МПа}$  по формуле Лабунцова – Ягова.

**209.** Согласно экспериментальным данным отрывной диаметр паровых пузырей при кипении воды в большом объеме в среднем приблизительно равен  $2 \text{ мм}$  при давлении  $0,1 \text{ МПа}$  и  $0,15 \text{ мм}$  при давлении  $8,6 \text{ МПа}$ . Используя результаты решения задачи 208, оценить время роста парового пузыря при указанных давлениях и тепловой нагрузке на теплоотдающей поверхности  $10^5 \text{ Вт/м}^2$ .

**210.** Определить коэффициент теплоотдачи и температуру наружной поверхности трубки испарителя при кипении на ней воды под давлением  $4 \text{ МПа}$ . Тепловая нагрузка поверхности нагрева  $4 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ .

**211.** Определить тепловую нагрузку поверхности нагрева при пузырьковом кипении в большом объеме воды под давлением 3 МПа, если температура поверхности нагрева  $t_F = 245$  °С.

**212.** Из-за образования накипи на теплоотдающей поверхности температура стенки кипятильника при тепловом потоке  $q_F = 2 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> повысилась до 134 °С. Определить термическое сопротивление слоя накипи и оценить его толщину, если коэффициент теплопроводности накипи  $\lambda_n = 1,0$  Вт/(м·К). Вода кипит при атмосферном давлении.

**213.** При длительном кипячении воды в условиях атмосферного давления на поверхности нагрева образовалась накипь. Оценить толщину слоя накипи, если при неизменной тепловой нагрузке температура поверхности повысилась со 110 до 130 °С. Коэффициент теплопроводности накипи принять равным 1 Вт/(м·К).

**214.** Определить тепловой поток через стенку из нержавеющей стали толщиной  $\delta = 1,5$  мм, если одна из поверхностей стенки имеет температуру 125 °С, а на другой кипит вода под давлением 0,1 МПа.

**215.** Определить тепловой поток с погонного метра трубки парогенератора наружным диаметром  $d = 16$  мм с толщиной стенки  $\delta = 1,4$  мм, выполненной из нержавеющей стали. Внутренняя поверхность трубки омывается теплоносителем с температурой  $t_{ж} = 278$  °С, коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 2 \cdot 10^4$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). На наружной поверхности трубки кипит вода под давлением 4,3 МПа.

**216.** Определить поверхность нагрева парогенератора производительностью 230 т водяного пара в час при давлении 3,2 МПа. Предполагаемый перегрев теплоотдающей поверхности относительно температуры насыщения составляет 10 °С.

**217.** Рассчитать величину критического теплового потока при кипении воды в большом объеме для давлений 0,2; 1,0; 6,4; 8,6; 14,6; 18,7 МПа. Построить график зависимости критического теплового потока от давления.

**218.** Сравнить величины критических тепловых потоков при кипении воды, азота и гелия в большом объеме. Расчеты выполнить для давления  $p = 0,1$  МПа.

**219.** Оценить максимальный перегрев стенки при пузырьковом режиме кипения воды в большом объеме для давлений 0,1; 1,0 и 10,0 МПа.

**220.** На вход парогенерирующего канала подается недогретая до температуры насыщения вода (относительная энтальпия  $x_{вх} < 0$ ). Найти относительную энтальпию воды  $x_{и.п.}$ , при которой начинается интенсивное парообразование в двух случаях: при давлении 7 и 16 МПа. В каком из этих случаев больше расстояние от входа в канал до сечения с  $x_{и.п.}$ , как будут отличаться недогревы жидкости до температуры насыщения в данном сечении? Равномерная тепловая нагрузка на стенке канала  $q = 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, массовая скорость воды в канале  $\rho w = 10^3$  кг/(м<sup>2</sup>·с), энтальпия жидкости на входе в канал для обоих случаев одинакова.

*Указание:* относительная энтальпия начала интенсивного парообразования воды может быть оценена по эмпирической формуле:

$$x_{и.п.} \cong -\frac{c_p \vartheta}{r} = -145 \frac{q}{r \rho w},$$

где  $\vartheta = t_s - t_{ж}$  – недогрев воды до температуры насыщения.

**221.** В равномерно обогреваемом канале, на поверхности которого задана тепловая нагрузка  $q = 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, движется недогретая до температуры насыщения вода при давлении 7 МПа, коэффициент конвективной теплоотдачи от стенки канала к воде  $\alpha_{конв} = 10^4$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). При этих параметрах уже принципиально возможно образование небольшого количества первых пузырьков пара, что принято рассматривать как начало кипения. До какого значения надо уменьшить недогрев воды  $\vartheta$ , чтобы в канале началась интенсивная генерация пара? По экспериментальным данным существует связь между относительными энтальпиями потока воды при возникновении кипения и начале интенсивного парообразования, а именно  $x_{н.к} = 3x_{и.п.}$ . Какова в рассматриваемых условиях массовая скорость  $\rho w$  воды в канале?

**222.** Для двухфазного потока найти связь между массовым  $x = M''/(M' + M'')$  и объемным  $\beta = V''/(V' + V'')$  расходными паросодержаниями, где  $M'$  и  $M''$  – массовые, а  $V'$  и  $V''$  – объемные расходы жидкости и пара.

**223.** Выразить истинное объемное паросодержание двухфазного потока  $\varphi \equiv S''/(S' + S'')$  в первом случае через объемное расходное паросодержание, а во втором – через массовое расходное паросодержание. Коэффициент скольжения  $s = w''/w'$ , определяющий отношение средних скоростей пара  $w''$  и жидкости  $w'$  через занимаемые ими сечения канала  $S''$  и  $S'$ , считать заданным.

**224.** В парогенерирующем канале кипит недогретая до температуры насыщения вода (давление 1 МПа, недогрев  $\vartheta = t_s - t_{ж} = 100$  °С). Интенсивность теплоотдачи однофазной конвекцией (без учета влияния кипения)  $\alpha_{\text{конв}} = 10^4$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Сравнить вклады в общий теплоперенос однофазной конвекции и кипения в трех случаях: 1)  $q = 1,05 \cdot 10^6$  МВт/м<sup>2</sup>; 2)  $q = 1,2 \cdot 10^6$  МВт/м<sup>2</sup>; 3)  $q = 2 \cdot 10^6$  МВт/м<sup>2</sup>.

*Указание:* для оценки вкладов использовать формулу:

$$\frac{t_c - t_s}{\Delta t_{\text{конв}}} = \frac{1}{[1 + (\Delta t_{\text{конв}} / \Delta t_{\text{б.о}})^{3/2}]^{2/3}},$$

где  $\Delta t_{\text{конв}} = t_c^{\text{конв}} - t_s \equiv \Delta q / \alpha_{\text{конв}}$ ;  $\Delta t_{\text{б.о}} = t_c^{\text{б.о}} - t_s$  рассчитывается по формуле (2.19) с заменой  $q$  на  $\Delta q \equiv q - q_{\text{н.к}} = q - \alpha_{\text{конв}}(t_s - t_{ж})$ .

**225.** Найти разность температуры стенки трубы и температуры насыщения (давление и тепловая нагрузка заданы) при кипении в трубе движущейся воды. Соответствующая разность при кипении в большом объеме равна  $\Delta t_{00}$ , а при несущественном вкладе в теплообмен парообразования –  $\Delta t_0$  (последняя величина рассчитывается по формулам для однофазного конвективного теплообмена).

**226.** Определить коэффициент теплоотдачи при вынужденном движении кипящей воды в равномерно обогреваемой трубе внутренним диаметром  $d = 16$  мм при следующих условиях: скорость циркуляции двухфазной смеси  $w_0 = 3,0$  м/с, давление  $p = 0,2$  МПа, тепловая нагрузка поверхности  $q_F = 6 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>.

**227.** Как изменится коэффициент теплоотдачи для условий задачи 226, если скорость циркуляции смеси уменьшить до  $w_0 = 0,5$  м/с, увеличить до  $6,5$  м/с?

**228.** Для условий задачи 226 рассчитать коэффициент теплоотдачи к потоку кипящей воды при тепловой нагрузке поверхности

$q_F = 1,2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> для трех значений скорости циркуляции  $w_0 = 0,5; 3,0$  и  $6,5$  м/с. Остальные величины оставить без изменения.

**229.** В прямоточных парогенераторах ЯЭУ при дисперсно-кольцевом течении пароводяного потока в области докризисных режимов теплообмена коэффициент теплоотдачи от стенки парогенерирующих труб увеличивается с ростом скорости движения двухфазной смеси ( $w_{см} = w_0[1 + x(\rho'/\rho'' - 1)]$ , где  $w_0 = \rho w/\rho'$  – скорость циркуляции;  $x$  – массовое расходное паросодержание). Для того, чтобы учесть этот эффект, можно воспользоваться формулой:

$$\frac{\alpha_{дф,x}}{\alpha_{дф,0}} = \sqrt{1 + 7 \cdot 10^{-9} \left( \frac{\rho' w_{см} r}{q} \right)^{3/2} \left( \frac{\alpha_{00}}{\alpha_0} \right)^2},$$

где  $\alpha_{дф,0}$  рассчитывается по интерполяционному соотношению для двухфазного потока низкого паросодержания  $\alpha_{дф,0} = \sqrt{\alpha_0^2 + \alpha_{00}^2}$  (формула (2.20)), а  $\alpha_0$  и  $\alpha_{00}$  – по формулам, соответственно, для однофазного потока (по скорости циркуляции) и для жидкости, кипящей в большом объеме. Оценить указанный эффект, рассмотрев случай течения пароводяной смеси в круглой трубе, если заданы следующие параметры: внутренний диаметр парогенерирующей трубы  $d = 12$  мм; давление  $p = 5$  МПа; массовая скорость потока  $\rho w = 1000$  кг/(м<sup>2</sup>·с); плотность теплового потока на стенке трубы  $q = 100$  кВт/м<sup>2</sup>; средняя величина массового расходного паросодержания  $x = 0,5$ .

**230.** Активная зона корпусного ядерного реактора с кипящей водой (реактор типа ВВРК) состоит из шестигранных кассет, в которых находятся пучки тепловыделяющих стержней наружным диаметром  $d = 9,1$  мм, образующие правильную треугольную решетку с шагом  $s_{реш} = 13$  мм. Вынужденное течение воды, кипящей на поверхности твэлов высотой  $H = 3,5$  м, осуществляется в ячейках между твэлами с температурой воды на входе  $t_{ж,вх} = 275$  °С при давлении  $p = 7$  МПа. Рассмотреть отдельную ячейку, расход воды в которой  $G_{яч} = 0,15$  кг/с, а плотность теплового потока на поверхности твэлов по высоте  $z$  изменяется по закону

$$q(z) = q_0 \sum_{n=0}^4 a_n \left( \frac{z}{H} \right)^n,$$

где  $q_0 = 0,6 \text{ МВт/м}^2$ ;  $a_0 = 0,597$ ;  $a_1 = 3,553$ ;  $a_2 = -9,742$ ;  $a_3 = 8,566$ ;  $a_4 = -2,826$ .

Рассчитать распределения по высоте ячейки: плотности теплового потока  $q$ , температуры  $t_{ж}$  и относительной энтальпии теплоносителя  $x$  (массового расходного паросодержания), объемного расходного паросодержания  $\beta$ , плотности и скорости двухфазной смеси, температуры поверхности твэлов. Имея в виду, что в выходном участке канала двухфазный поток практически является равновесным, определить коэффициент скольжения  $s$  по формуле для адиабатного течения в вертикальных пучках стержней

$$s = 1 + 2,27 \left( 1 - \frac{p}{p_{кр}} \right)^2 \left( \frac{\rho'}{\rho w} \right)^{0,7}.$$

Вычислить истинное паросодержание потока, а также истинные значения скоростей воды и пара на выходе из рассматриваемой ячейки.

*Указание:* при расчете коэффициента теплоотдачи к двухфазному потоку использовать формулу, представленную в задаче 229.

**231.** Определить критический тепловой поток применительно к условиям работы ядерного реактора ВВЭР-1000, используя следующие данные: давление воды в реакторе  $p = 16 \text{ МПа}$ , массовая скорость  $\rho w = 3000 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ , относительная энтальпия  $x = -0,2$ . Расчет  $q_{кр}$  выполнить по формуле Безрукова:

$$q_{кр} = 0,795(1-x)^n (\rho w)^m (1-0,0185p),$$

где  $m = 0,311(1-x) - 0,127$ ;  $n = 0,105p - 0,5$ ;  $p$  в МПа,  $q_{кр}$  в МВт/м<sup>2</sup>.

**232.** Используя таблицы критических тепловых нагрузок для круглой трубы диаметром 8 мм (см. табл. П.15), сравнить значения  $q_{кр}$  при давлении 7 МПа и массовых скоростях парожидкостной смеси 500 и 3000 кг/(м<sup>2</sup>·с) в случае кипения недогретой воды ( $x = -0,1$ ) и при паросодержании в потоке ( $x = 0,1$ ). Чем вызван



разный характер изменения  $q_{кр}$  с массовой скоростью при  $x = -0,1$  и  $x = 0,1$ ?

**233.** На выходе парогенерирующего канала внутренним диаметром 8 мм пароводяная смесь должна иметь паросодержание  $x = 0,2$ . Определить оптимальные значения давления  $p$  и массовой скорости  $\rho w$ , при которых можно будет обеспечить максимальный запас до наступления кризиса теплоотдачи. Какова величина удельной критической тепловой нагрузки в выбранном режиме?

*Указание:* для решения задачи воспользоваться табл. П.15.

**234.** В равномерно обогреваемый парогенерирующий канал внутренним диаметром 14 мм и длиной 2,5 м подается вода под давлением 14 МПа. Скорость воды на входе в канал 2,7 м/с, температура 290 °С. Определить критическую мощность канала.

*Указание:* для решения задачи воспользоваться табл. П.15.

**235.** Вода в состоянии насыщения при давлении 10 МПа подается со скоростью 3 м/с на вход равномерно обогреваемой круглой трубы диаметром 12 мм и длиной 2,2 м. Какова минимальная мощность тепловыделения, при которой возникает кризис теплоотдачи?

*Указание:* для решения задачи воспользоваться табл. П.15 и П.16.

**236.** В наиболее нагруженной тепловыделяющей сборке кассетного типа судовой ЯЭУ вода, охлаждающая стержневые твэлы диаметром  $d = 6,8$  мм, движется с массовой скоростью  $\rho w = 3000$  кг/(м<sup>2</sup>·с). Давление воды  $p = 12$  МПа. В сборке высотой  $H = 1,3$  м стержни размещены по сторонам правильного шестиугольника с шагом  $s = 9,6$  мм. Предполагается, что кризис теплоотдачи может возникнуть на расстоянии от входа в сборку  $L \geq 0,5H$  в сечении, где относительная энтальпия теплоносителя достигнет значения  $x = -0,1$ . Рассчитать критический тепловой поток с использованием табличного метода, разработанного ФЭИ [13]:

$$q_{кр} = q_{кр.таб} K_1 K_2 K_3,$$

где  $q_{кр.таб}(p, \rho w, x)$  – табличное значение критического теплового потока, МВт/м<sup>2</sup>, для базовой сборки с параметрами:  $s/d = 1,4$ ; тепловой диаметр ячейки  $d_t = d[1,103(s/d)^2 - 1] = 9,36$  мм;  $L/d_t > 300$ ;  $K_1, K_2, K_3$  – поправки, соответственно, на тепловой диаметр ячейки, относительный шаг расположения стержней и на влияние входных

условий сборки; а именно:  $K_1 = (d_t/9,36)^{-1/3}$ , где  $d_t$  в мм;  $K_2 = 0,2 + 0,57(s/d)$  при  $s/d = 1,1 \div 1,52$ ;  $K_3 = 1,0 + 0,6 \exp(-0,01L/d_t)$ .

*Указание:* для решения задачи воспользоваться табл. П.17.

**237.** В закризисной зоне прямооточных парогенераторов пароводяная смесь высокого паросодержания имеет дисперсную структуру, где мелкие капли жидкости с температурой, близкой к температуре насыщения, движутся в потоке перегретого пара. Эта зона характеризуется сравнительно низкими коэффициентами теплоотдачи от греющей стенки и может занимать заметную часть общей длины парогенерирующего канала. Для расчета коэффициента теплоотдачи внутри круглых труб и кольцевых каналов, работающих в закризисной области режимных параметров, можно использовать формулу

$$Nu'' = 0,023 \{ Re'' Pr_c'' [x + (\rho''/\rho')(1-x)] \}^{0,8} Y,$$

где  $Nu'' = \alpha d/\lambda''$ ;  $Re'' = (\rho w)d/\mu''$ ;  $Pr_c''$  – число Прандтля для пара при температуре стенки;  $Y = 1 - 0,1[(\rho'/\rho'' - 1)(1-x)]^{0,4}$ ;  $x$  – расходное массовое паросодержание. Рассчитать длину трубы, необходимую для получения из пароводяной смеси сухого насыщенного пара в закризисной зоне парогенератора, если известны следующие данные. Поверхность нагрева прямооточного парогенератора ЯЭУ состоит из отдельных секций, каждая из которых содержит десять параллельно включенных трубок внутренним диаметром  $d_{вн} = 8$  мм. Трубки с толщиной стенки  $\delta = 1$  мм изготовлены из титанового сплава с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_c = 13$  Вт/(м·К). Давление внутри трубок 4 МПа, общий массовый расход нагреваемой среды в секции 0,4 кг/с. Граничное паросодержание, при котором происходит ухудшение теплоотдачи (начало закризисной зоны),  $x_{гп} = 0,85$ . Коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности трубок  $\alpha_1 = 15 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), средняя температура греющей воды  $t_1 = 315$  °С. Определить также средние по длине рассматриваемого участка температуры наружной и внутренней поверхностей трубок.

**238.** В прямооточном парогенераторе используются трубные каналы внутренним диаметром 8 мм. Нужно ли при тепловом расчете разбивать участок канала, в котором паросодержание  $x$  изменяется

от 0 до 1, по длине на отдельные зоны с разной интенсивностью теплоотдачи? Рассмотреть два случая: 1) давление  $p = 5$  МПа, массовая скорость  $\rho w = 350$  кг/(м<sup>2</sup>·с); 2)  $p = 16$  МПа,  $\rho w = 500$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

**239.** Какая максимальная массовая скорость пара возможна в трубе прямоточного парогенератора при давлении 2 МПа, если на выходе пар должен иметь относительную энтальпию  $x = 1,0$ ?

*Указание:* скорость звука в насыщенном паре принять равной 400 м/с.

**240.** Пар конденсируется на наружной поверхности горизонтальной трубки длиной  $l = 1$  м и диаметром  $d = 20$  мм. Как изменится средний коэффициент теплоотдачи, если трубку расположить вертикально? При каком отношении длины к диаметру средние коэффициенты теплоотдачи при горизонтальном и вертикальном расположении трубки будут одинаковыми?

**241.** На поверхности горизонтальной трубки наружным диаметром  $d = 28$  мм конденсируется сухой насыщенный водяной пар при давлении 2,9 кПа. Температура поверхности трубки равна 10 °С. Определить средний по периметру трубки коэффициент теплоотдачи и количество пара, конденсирующегося за 1 ч на одном погонном метре трубки.

**242.** Для условий задачи 241 оценить среднюю толщину пленки конденсата на поверхности трубы.

**243.** На вертикальной трубке водоподогревателя конденсируется пар. Для улучшения теплоотдачи по высоте этой трубки на равных расстояниях друг от друга установлены конденсатоотводные диски. Определить зависимость среднего коэффициента теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  от числа дисков  $n$  [2].

**244.** Определить количество водяного пара, конденсирующегося за час на одном квадратном метре потолка конденсатора. Пар находится при атмосферном давлении, температура поверхности потолка равна 90 °С.

*Указание:* для расчета коэффициента теплоотдачи на нижней поверхности горизонтальной плиты воспользоваться соотношением [14]:

$$\frac{\alpha}{\lambda} \left[ \frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')} \right]^{1/2} = 0,15 \left\{ \frac{\nu}{a} \frac{g}{v^2} \left[ \frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')} \right]^{3/2} \left( 1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right) \frac{r}{c_p \Delta T} \right\}^{1/4}.$$

## Теплообмен излучением

**245.** Согласно известному закону Планка плотность потока энергии монохроматического излучения абсолютно черного тела определяется выражением:

$$E_{0\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1},$$

где  $C_1 = 3,7418 \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup> и  $C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$  м·К. Исходя из этого закона найти связь между температурой  $T$ , максимумом излучательной способности абсолютно черного тела и длиной волны излучения, при которой этот максимум наблюдается (закон Вина).

**246.** На основании закона Планка о распределении энергии излучения абсолютно черного тела по длинам волн при различных температурах вывести закон Стефана – Больцмана, связывающий плотность потока интегрального излучения этого же тела с температурой.

**247.** Во сколько раз уменьшится лучистый тепловой поток между параллельными пластинами со степенью черноты поверхностей  $\varepsilon = 0,8$ , если между ними поместить экран со степенью черноты  $\varepsilon_3 = 0,2$ ?

**248.** Получить выражение для результирующего лучистого потока между двумя параллельными пластинами, имеющими температуры  $T_1$  и  $T_2$ , если между ними расположено  $n$  экранов. Степени черноты поверхностей пластин  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , все экраны имеют одинаковую степень черноты  $\varepsilon_3$ .

**249.** Термос объемом  $V = 1$  л заполнен водой, имеющей температуру  $t_0 = 90$  °С. Внутренние поверхности вакуумной полости посеребрены и имеют степень черноты  $\varepsilon = 0,1$ . Эффективная площадь поверхности термоса  $F = 0,06$  м<sup>2</sup>. Определить, через какое время температура воды в термосе понизится на 35 °С, полагая, что теплообмен обусловлен только излучением через вакуумную полость, а температура наружной поверхности термоса постоянна и равна  $t_c = 20$  °С.

**250.** Вывести расчетную формулу для определения лучистого теплообмена между двумя серыми телами 1 и 2. Тело 1, поверхность которого  $F_1$  не имеет вогнутостей, помещено в замкнутую полость, образованную телом 2 с поверхностью  $F_2$ . Температуры и степени черноты поверхностей тел равны, соответственно,  $T_1, \varepsilon_1$  и  $T_2, \varepsilon_2$ .

**251.** Сосуд транспортный гелиевый емкостью 10 л (СТГ-10) состоит из внутреннего сосуда, в котором находится жидкий гелий, азотного экрана и кожуха. Внутренний сосуд, имеющий форму сферы диаметром 270 мм, отделен от стенки азотной камеры вакуумной прослойкой шириной 12 мм. Обращенные к прослойке поверхности гелиевого сосуда и азотной камеры посеребрены и имеют степени черноты  $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2 \approx 0,01$ . Оценить объем жидкого гелия, испаряющегося из сосуда за сутки, полагая, что теплоприток обусловлен только лучистым теплообменом через вакуумную прослойку. Температуры поверхностей прослойки принять равными температурам насыщения азота и гелия при атмосферном давлении.

**252.** Определить среднее значение и амплитуду колебаний температуры нити накаливания электрической лампы, исходя из следующих данных: электрическая мощность лампы  $N_0 = 60$  Вт; напряжение в сети переменного тока  $U = 220$  В при частоте 50 Гц; нить накаливания диаметром  $d = 0,025$  мм и длиной  $l = 1200$  мм свернута в двойную спираль так, что эффективная поверхность излучения составляет  $F = 50$  мм<sup>2</sup>. Степень черноты поверхности излучения  $\varepsilon = 0,35$ . Нить выполнена из материала, который в рабочем диапазоне температур имеет плотность  $\rho = 19300$  кг/м<sup>3</sup>, удельную теплоемкость  $c = 164$  Дж/(кг·К) и коэффициент теплопроводности  $\lambda = 90$  Вт/(м·К).

**253.** Через горизонтальный провод диаметром  $d = 0,5$  мм электронагревательного прибора пропускается электрический ток силой  $I = 5$  А. Провод охлаждается путем излучения и естественной конвекции в воздухе, температура которого вдали от провода  $t_{\text{ж}} = 20$  °С. Удельное электросопротивление материала провода  $\rho_s = 1,1$  Ом·мм<sup>2</sup>/м, степень черноты поверхности  $\varepsilon = 0,7$ . Определить температуру поверхности провода.

**254.** Оценить минимальную площадь холодильника-излучателя космической ЯЭУ мощностью 50 кВт. Максимальная температура рабочего тела преобразователя ЯЭУ равна 870 К. Степень черноты поверхности излучателя  $\varepsilon = 0,9$ . Для КПД установки использовать соотношение для цикла Карно, полагая, что минимальная температура рабочего тела равна температуре холодильника-излучателя.

## ОТВЕТЫ

1.  $t(x) = t_{c1} - (t_{c1} - t_{c2}) \frac{x}{\delta}$ ;  $q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2})$ .

2. 1) 0,094 °C; 0,94 °C/м; 2) 10,4 °C; 104 °C/м; 3) 160 °C; 1600 °C/м.

3. 0,24 м. 4. 12,5 мм. 5. 924 °C.

6.  $q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}}$ ,  $t_1 - t_2 = q \frac{\delta_1}{\lambda_1}$ ,  $t_2 - t_3 = q \frac{\delta_2}{\lambda_2}$ ,  $t_3 - t_4 = q \frac{\delta_3}{\lambda_3}$ ;

в случае  $n$  слоев  $q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}$ ,  $t_i - t_{i+1} = q \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ ,

где  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  — номер слоя. 7. а) 4; б) 2. 8. 16,2 Вт/м<sup>2</sup>; -2,9 °C.

9. 760 мм. 10. 3,4 кВт; 250 °C. 11. 6,2 Вт/м<sup>2</sup>; 23 °C.

12.  $q = 13,2$  Вт/м<sup>2</sup>;  $t_{c2} = 20,7$  °C;  $\delta_3 = 0,106$  м;  $\delta_4 = 0,053$  м.

13.  $\frac{\lambda_{\text{ист}} - \lambda}{\lambda_{\text{ист}}} = \frac{4Q\delta_2 \left( \frac{1}{\lambda_{\text{в1}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{в2}}} \right)}{\pi d^2 (t_{c1} - t_{c2})} = 0,22$ .

14.  $t(x) = t_{\text{ж1}} - \frac{(t_{\text{ж1}} - t_{\text{ж2}}) \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{x}{\lambda} \right)}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$ ;  $q = \frac{t_{\text{ж1}} - t_{\text{ж2}}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$ .

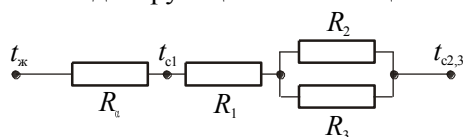
15.  $q = 58,5$  Вт/м<sup>2</sup>;  $t_{c1} = 10,2$  °C;  $t_{c2} = -27,1$  °C.

16.  $q = 33,2$  Вт/м<sup>2</sup>;  $t_{c1} = 13,6$  °C;  $t_{c2} = -28,3$  °C;  $q_{\text{неиз}}/q_{\text{из}} = 1,76$ .

17.  $q = 76,6 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>;  $t_{c1} = 233,7$  °C;  $t_{c2} = 215,3$  °C.

18.  $q = 31,4 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>;  $t_{c1} = 685,5$  °C;  $t_{c2} = 292,5$  °C;  $t_{c3} = 284,9$  °C;  $t_{c4} = 206,3$  °C;  $q_{\text{чист}}/q_{\text{загряз}} = 2,4$ .

19. Моделирующая тепловая цепь:



$R_\alpha = 4,17 \cdot 10^{-3}$  м·К/Вт;

$R_1 = 4,76 \cdot 10^{-4}$  м·К/Вт;

$R_2 = 0,50$  м·К/Вт;

$R_3 = 0,56$  м·К/Вт;

$Q = 2,1 \cdot 10^3$  Вт/м;  $t_{c1} = 591$  °C.

20.  $t_{c1} = t_{ж} + \frac{q}{\alpha} \cdot \frac{1 + Bi}{2 + Bi}$ ;  $Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda}$ .

21.  $q = \frac{\lambda_{cp}}{\delta} (t_{c1} - t_{c2})$ , где  $\lambda_{cp} = \frac{1}{t_{c1} - t_{c2}} \int_{t_{c2}}^{t_{c1}} \lambda(t) dt$ . 22.  $5,45 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.

23. 129 мм. 24. Профиль температуры выпуклый, если  $d\lambda/dt > 0$ ; вогнутый, если  $d\lambda/dt < 0$ ; прямая линия, если  $d\lambda/dt = 0$ .

25. Случаю а) соответствуют кривые 2 и 5; случаю б) – кривые 1 и 6; случаю в) – кривые 3 и 4.

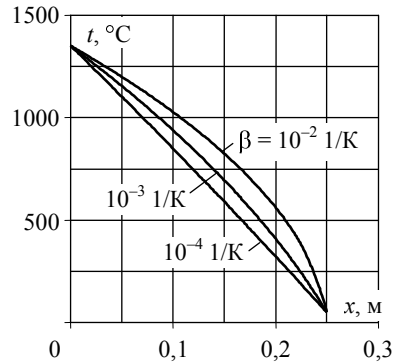
26. Случаю а) соответствует кривая 2; случаю б) – кривая 3; случаю в) – кривая 1; в случае б) через пластину передается наибольшее количество тепла.

$$27. t(x) = \sqrt{\left(\frac{1}{\beta} + t_{c1}\right)^2 - \frac{2\lambda_{cp}}{\lambda_0\beta} (t_{c1} - t_{c2}) \frac{x}{\delta} - \frac{1}{\beta}},$$

где  $\lambda_{cp} = \lambda_0 \left(1 + \beta \frac{t_{c1} + t_{c2}}{2}\right)$ .

28. Значения температур  $t$ , °С, в сечениях  $x$  плоской стенки:

$x$ , м	$\beta$ , 1/К		
	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$
0	1350	1350	1350
0,025	1227	1254	1276
0,050	1102	1154	1199
0,075	976	1049	1116
0,100	849	938	1027
0,125	720	820	931
0,150	589	694	824
0,175	457	558	704
0,200	323	409	562
0,225	187	243	380
0,250	50	50	50



29.  $q = 447$  Вт/м<sup>2</sup>;  $t(x) = (\sqrt{22071 - 10285x} - 10,356) \cdot 10^2$ :

$x$ , м	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
$t$ , °С	450	415	379	342	304	265	225	184	141	96	50

30. а)  $45 \text{ см}^3$  в сутки; б)  $198 \text{ см}^3$  в сутки.



$$31. t(x) = \frac{1}{\beta} \left[ \sqrt{\left( \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \right)^2 - \frac{2\beta qx}{\lambda_0}} - 1 \right], \text{ где } \lambda_1 = \lambda_0(1 + \beta t_1).$$

$$32. 1,08 \text{ Вт/(м·К)}. \quad 33. 45,5 \text{ Вт/(м·К)}.$$

$$34. q_y = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta} (\lambda_{\eta\eta} \sin^2 \alpha + \lambda_{\xi\xi} \cos^2 \alpha).$$

$$35. q_y = 20,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2; \quad q_x = 10,6 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2; \quad \varphi = 27,3^\circ.$$

36.  $9,6^\circ\text{C}$ ; поперечный градиент температуры меньше продольного в 4,2 раза.

$$37. t(r) = t_{c1} - \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \ln \frac{r}{r_1} = t_{c2} + \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \ln \frac{r_2}{r}; \quad q_l = 2\pi \lambda \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\ln \frac{r_2}{r_1}},$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – соответственно, внутренний и наружный радиусы цилиндрической стенки.

$$38. d_2/d_1 \leq 2. \quad 39. 127 \text{ А}.$$

40. Ближе к стенке трубы следует расположить слой изоляции с меньшим значением коэффициента теплопроводности.

$$41. \lambda_1 = 0,665 \text{ Вт/(м·К)}; \quad t_{cp} \cong 215^\circ\text{C}. \quad 42. q_l = 51,4 \text{ Вт/м}.$$

$$43. \delta_{из} = 60 \text{ мм}; \quad Q = 4,37 \text{ кВт}.$$

$$44. \lambda = \frac{Q \ln \frac{R_2}{R_1}}{2\pi l (t_{c1} - t_{c2})}.$$

$$45. t(r) = t_{c1} - \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r} \right); \quad Q = 4\pi \lambda \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}.$$

$$46. \lambda = \frac{Q(R_2 - R_1)}{4\pi(t_{c1} - t_{c2})R_1R_2}.$$

$$47. \int_{t_{c2}}^t \lambda(t) dt = \lambda_{cp}(t_{c1} - t_{c2}) \frac{\ln \frac{r_2}{r}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}; \quad q_l = \frac{2\pi \lambda_{cp}(t_{c1} - t_{c2})}{\ln \frac{r_2}{r_1}},$$

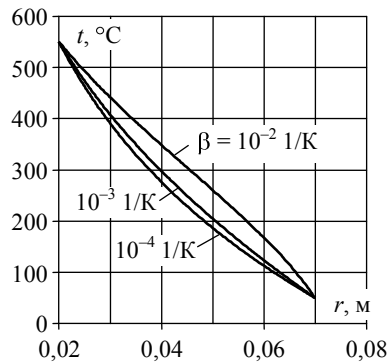
где  $\lambda_{cp} = \frac{1}{t_{c1} - t_{c2}} \int_{t_{c2}}^{t_{c1}} \lambda(t) dt$ . **48.**  $7,4 \cdot 10^5$  Вт/м.

$$49. t(r) = \sqrt{\left(\frac{1}{\beta} + t_{c1}\right)^2 - \frac{2\lambda_{cp}}{\beta\lambda_0}(t_{c1} - t_{c2}) \frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} - \frac{1}{\beta}}; \quad q_l = \frac{2\pi\lambda_{cp}(t_{c1} - t_{c2})}{\ln \frac{r_2}{r_1}},$$

где  $\lambda_{cp} = \lambda_0 \left(1 + \beta \frac{t_{c1} + t_{c2}}{2}\right)$ .

**50.** Значения температур  $t(r)$ , °С, в цилиндрической стенке:

$r, \text{ м}$	$\beta, 1/\text{К}$		
	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$
0,020	550	550	550
0,025	463	473	493
0,030	391	408	441
0,035	330	350	394
0,040	276	297	349
0,045	229	249	304
0,050	187	205	260
0,055	148	163	215
0,060	113	124	168
0,065	80	86	115
0,070	50	50	50

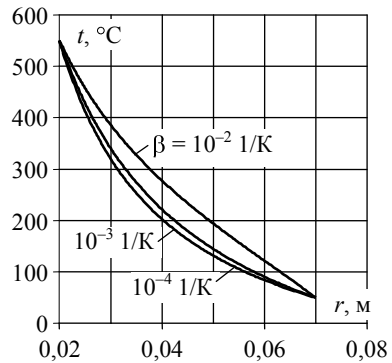


$$51. t(r) = \sqrt{\left(\frac{1}{\beta} + t_{c1}\right)^2 - \frac{2\lambda_{cp}}{\beta\lambda_0}(t_{c1} - t_{c2}) \frac{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r}}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} - \frac{1}{\beta}};$$

$$Q = \frac{4\pi\lambda_{cp}(t_{c1} - t_{c2})}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}, \quad \text{где } \lambda_{cp} = \lambda_0 \left(1 + \beta \frac{t_{c1} + t_{c2}}{2}\right).$$

Значения температур  $t(r)$ , °С, в сферической стенке:

$r$ , м	$\beta$ , 1/К		
	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$
0,020	550	550	550
0,025	412	428	457
0,030	320	340	386
0,035	253	274	327
0,040	203	222	277
0,045	163	180	234
0,050	132	145	194
0,055	106	115	157
0,060	84	90	122
0,065	66	69	87
0,070	50	50	50



52.  $t(r) = t_{\infty} + (t_0 - t_{\infty}) \frac{r_0}{r}$ , где  $r_0$  – радиус шара.

53.  $q_F = \frac{\lambda(t_0 - t_{\infty})}{r_0}$ ;  $Q = 4\pi\lambda r_0(t_0 - t_{\infty})$ ;  $\alpha = \frac{\lambda}{r_0}$ . 54. 0,1 °С.

55. 18 м<sup>2</sup>. 56.  $q_l = 643$  Вт/м;  $t_{c1} = 88,6$  °С;  $t_{c2} = 88,4$  °С.

57.  $q_l = 145$  Вт/м;  $t_{c2} = 89,6$  °С;  $t_{c3} = 5,3$  °С.

58. а) Для оголенного трубопровода  $q_l = 143$  Вт/м; для трубопровода, покрытого бетоном,  $q_l = 250$  Вт/м; б)  $\lambda_{\text{из}} \leq 0,255$  Вт/(м·К).

59. Максимально допустимый ток увеличится.

60. а)  $q_l = 8,8$  Вт/м; б)  $t_{c2} = 62,1$  °С.

61. Нецелесообразно, так как  $d_{\text{кр}} > d_2$ . 62.  $d_{2, \text{кр}} = 4\lambda/\alpha_2$ .

63.  $t(x) = \frac{t_{c1} + t_{c2}}{2} - \frac{t_{c1} - t_{c2}}{2} \frac{x}{\delta} + \frac{q_v \delta^2}{2\lambda} \left( 1 - \frac{x^2}{\delta^2} \right)$ .

64.  $x_{\text{max}} = -0,5$  мм;  $t_{\text{max}} = 278$  °С. 65.  $\lambda = \frac{I\Delta U l}{2\pi d^2(t_{\text{II}} - t_0)}$ .

66.  $\Theta = \frac{t(x) - t_{\text{ж}}}{q_v \delta^2}$ ;  $X = \frac{x}{\delta}$ ;  $\text{Bi} = \frac{\alpha \delta}{\lambda}$ .

$$67. \Theta = \frac{t(r) - t_{\text{ж}}}{\frac{q_v r_0^2}{\lambda}}; \quad R = \frac{r}{r_0}; \quad \text{Bi} = \frac{\alpha r_0}{\lambda}.$$

$$68. x_0 = 3,5 \text{ мм}; \quad t_0 = 168,2 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_{c1} = 161,5 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_{c2} = 166,9 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$69. \text{ При двустороннем охлаждении ТВЭЛА } t_{\text{max}} = t_{\text{ж}} + q_v \delta \left( \frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{2\lambda} \right),$$

$$\text{при охлаждении ТВЭЛА с одной стороны } t_{\text{max}} = t_{\text{ж}} + 2q_v \delta \left( \frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda} \right).$$

$$70. \text{ а) } q_v = 8 \cdot 10^3 \text{ Вт/М}^3; \quad \text{б) } t_{c2} = 122,7 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$71. t(r) = t_c + \frac{q_v r_0^2}{4\lambda} \left( 1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right); \quad q_F = \frac{q_v r_0}{2} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Вт/М}^2;$$

$$\Delta t = t_{\text{ц}} - t_c = \frac{q_v r_0^2}{4\lambda} = 2250 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$72. t_{\text{ц}} - t_c = \frac{\bar{q}_v \delta^2}{2\lambda} \frac{5-k}{4} \quad \text{в отличие от } t_{\text{ц}} - t_c = \frac{\bar{q}_v \delta^2}{2\lambda} \quad \text{при равномерном тепловыделении.} \quad 73. I_{\text{max}} = 665 \text{ А}; \quad t_c = 351 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$74. \frac{t_{c1} - t(r)}{t_{c1} - t_{c2}} = \frac{q_v r_1^2}{4\lambda(t_{c1} - t_{c2})} \left( \frac{r^2}{r_1^2} - 1 \right) + \left[ 1 - \frac{q_v r_1^2}{4\lambda(t_{c1} - t_{c2})} \left( \frac{r_2^2}{r_1^2} - 1 \right) \right] \frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}.$$

$$75. \frac{r_{\text{max}}}{r_1} = \sqrt{\frac{\left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2 - 1}{2 \ln \frac{r_2}{r_1}}};$$

$$\text{при } r_2/r_1 = 2 \quad r_{\text{max}}/r_1 = 1,47; \quad \text{при } r_2/r_1 = 10 \quad r_{\text{max}}/r_1 = 4,64.$$

$$76. \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\left( \frac{r_2}{r_1} \right)^2 - \left( \frac{r_{\text{max}}}{r_1} \right)^2}{\left( \frac{r_{\text{max}}}{r_1} \right)^2 - 1};$$

$$\text{при } r_2/r_1 = 2 \quad Q_2/Q_1 = 1,58; \quad \text{при } r_2/r_1 = 10 \quad Q_2/Q_1 = 3,83.$$

$$77. \text{ а) } t(r) = t_{c1} + \frac{q_v}{4\lambda} \left( r_1^2 - r^2 + 2r_2^2 \ln \frac{r}{r_1} \right);$$

$$\text{ б) } t(r) = t_{c2} + \frac{q_v}{4\lambda} \left( r_2^2 - r^2 + 2r_1^2 \ln \frac{r_2}{r} \right);$$

при  $r_1/r_2 = 0,5$  перепад температуры в твэле при внутреннем охлаждении в 1,58 раза больше, чем при наружном охлаждении.

78.  $q_v = 2,21 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^3$ ;  $\Delta t = 2,8 \text{ }^\circ\text{C}$ . 79.  $q_v \cong 3,7 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^3$ .

80.  $q_v = 6,21 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^3$ ; без воздушной прослойки между топливным сердечником и защитной оболочкой

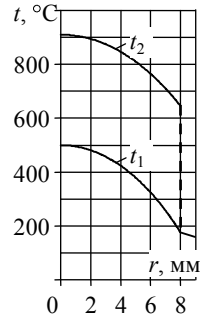
$$t_1(r) = \sqrt{4,557 \cdot 10^6 - 1,99 \cdot 10^{10} r^2} - 1,635 \cdot 10^3, \text{ }^\circ\text{C};$$

при наличии воздушной прослойки

$$t_2(r) = \sqrt{6,475 \cdot 10^6 - 1,99 \cdot 10^{10} r^2} - 1,635 \cdot 10^3, \text{ }^\circ\text{C},$$

где  $r$ , м – текущий радиус.

Результаты расчета температур в твэле:



$r$ , мм	0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
$t_1, \text{ }^\circ\text{C} (\delta_3 = 0)$	500	495	481	457	424	380	325	258	177	160
$t_2, \text{ }^\circ\text{C} (\delta_3 = 0,01 \text{ мм})$	910	906	894	874	846	810	765	710	646	160

81. 12,8 мм. 82.  $9,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ .

$$83. t(r) = t_F + \frac{q_v r_0^2}{6\lambda} \left( 1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right); \quad \Delta t = t_{ц} - t_F = \frac{q_v r_0^2}{6\lambda}.$$

84.  $t_{ц} = 934 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{об,н} = 587 \text{ }^\circ\text{C}$ .

85.  $q_v = 0,432 \text{ Вт/м}^3$ ;  $\lambda_{эф} = 2,3 \cdot 10^9 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ .

$$86. t(x) = \frac{1}{\beta} \left[ \frac{q_{vc}}{q_{v0}} \frac{\cos \left( \sqrt{\frac{q_{v0} \beta}{\lambda}} x \right)}{\cos \left( \sqrt{\frac{q_{v0} \beta}{\lambda}} \delta \right)} - 1 \right], \text{ где } q_{vc} = q_{v0} (1 + \beta t_c), \beta > 0;$$

в случае  $\beta < 0$   $t(x) = \frac{1}{\beta} \left[ \frac{q_{vc}}{q_{v0}} \frac{\operatorname{ch} \left( \sqrt{\frac{q_{v0}|\beta|}{\lambda}} x \right)}{\operatorname{ch} \left( \sqrt{\frac{q_{v0}|\beta|}{\lambda}} \delta \right)} - 1 \right]$ .

87.  $t(r) = \frac{1}{\beta} \left[ \frac{q_{vc}}{q_{v0}} \frac{J_0 \left( \sqrt{\frac{q_{v0}\beta}{\lambda}} r \right)}{J_0 \left( \sqrt{\frac{q_{v0}\beta}{\lambda}} r_0 \right)} - 1 \right]$ , где  $q_{vc} = q_{v0}(1 + \beta t_c)$ ,  $\beta > 0$ ;

в случае  $\beta < 0$   $t(r) = \frac{1}{\beta} \left[ \frac{q_{vc}}{q_{v0}} \frac{I_0 \left( \sqrt{\frac{q_{v0}|\beta|}{\lambda}} r \right)}{I_0 \left( \sqrt{\frac{q_{v0}|\beta|}{\lambda}} r_0 \right)} - 1 \right]$ .

88.  $t(x, y) = t_F + \frac{q_v}{4\sqrt{3}a\lambda} (y - \sqrt{3}x)(y + \sqrt{3}x)(\sqrt{3}a - y)$ ;

$t_{\max} = t \left( 0, \frac{2\sqrt{3}}{3} a \right) = t_F + \frac{q_v a^2}{9\lambda}$ ;  $q_F = \frac{\sqrt{3}}{4} q_v a \left( 1 - \frac{x^2}{a^2} \right)$ .

89. Результаты расчета температур  $t$ , °C, в двумерном теле (в таблицах жирным шрифтом указан номер узла):

$\Delta x = \Delta y = 0,05$  м

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
98,1	163,2	189,6	200,2	203,1
<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
81,2	140,1	169,9	183,3	187,0
<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
77,6	121,1	141,7	150,9	153,4

$\Delta x = \Delta y = 0,025$  м

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
92,6	162,9	190,4	201,0	203,9
<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
80,2	139,6	170,5	184,1	187,9
<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
77,6	121,0	142,2	151,5	154,0

Результаты расчета тепловых потоков  $Q$ , Вт/м, на границах тела и невязка теплового баланса  $\Delta Q/Q_v$ :

$$\Delta x = \Delta y = 0,05 \text{ м}$$

Верхняя граница, $Q_v$	284
Нижняя граница, $Q_n$	-67
Левая граница, $Q_l$	-517

$$\Delta x = \Delta y = 0,025 \text{ м}$$

Верхняя граница, $Q_v$	200
Нижняя граница, $Q_n$	-110
Левая граница, $Q_l$	-442

$$\Delta Q/Q_v = 0,25$$

$$\Delta Q/Q_v = 0,12$$

(отрицательная величина  $Q$  означает, что тепловой поток отводится от тела).

$$90. t(x, \tau) = t_c + (t_0 - t_c) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right).$$

91. Значения температур  $t(x, \tau)$ , °С, в полуограниченном теле  $x > 0$  в различные моменты времени  $\tau$ :  
материал – сталь ( $a = 12,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ )

$\tau, \text{ с}$	$x, \text{ м}$							
	0,005	0,01	0,02	0,03	0,05	0,09	0,13	0,17
5	69,1	126	185	199	200	200	200	200
100	15,9	31,7	62,2	90,3	137	186	198	200
500	7,13	14,3	28,4	42,3	69,1	116	151	174
1500	4,12	8,24	16,5	24,6	40,7	71,6	99,6	124
5000	2,26	4,51	9,02	13,5	22,5	40,2	57,4	73,9

материал – красный кирпич ( $a = 4,87 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ )

$\tau, \text{ с}$	$x, \text{ м}$							
	0,005	0,01	0,02	0,03	0,05	0,09	0,13	0,17
5	195	200	200	200	200	200	200	200
100	77,5	138	191	200	200	200	200	200
500	35,8	69,9	127	165	195	200	200	200
1500	20,8	41,3	79,8	113	162	196	200	200
5000	11,4	22,8	45,1	66,5	105	161	188	197

$$92. t(x, \tau) = t_0 + \frac{q_c}{\lambda} \left\{ \frac{2\sqrt{a\tau}}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right) - x \left[ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) \right] \right\}.$$

**93.** Значения температур  $t(x, \tau)$ , °С, в полубесконечном стержне  $x > 0$  в различные моменты времени  $\tau$ :  
материал – сталь ( $\lambda = 45 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ,  $a = 12,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ )

$\tau, \text{ с}$	$x, \text{ м}$								
	0	0,005	0,01	0,02	0,03	0,05	0,09	0,13	0,17
5	1,78	0,96	0,45	0,07	0,01	0	0	0	0
100	7,98	7,02	6,14	4,61	3,37	1,67	0,29	0,03	0
500	17,8	16,9	15,9	14,1	12,5	9,6	5,33	2,71	1,25
1500	30,9	29,9	28,9	27,1	25,3	21,9	16,2	11,6	8,1
3000	43,7	42,7	41,7	39,8	38	34,4	28	22,5	17,9

материал – стекло ( $\lambda = 0,74 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ,  $a = 4,42 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ )

$\tau, \text{ с}$	$x, \text{ м}$								
	0	0,005	0,01	0,02	0,03	0,05	0,09	0,13	0,17
5	20,4	0,15	0	0	0	0	0	0	0
100	91,2	43	16,9	1,37	0,04	0	0	0	0
500	204	149	105	46,7	17,7	1,49	0	0	0
1500	353	296	245	162	102	34,5	1,94	0,04	0
3000	500	441	388	294	217	110	20,4	2,33	0,16

$$94. t(x, \tau) = t_0 - (t_0 - t_{\text{ж}}) \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right) - \exp \left( \frac{\alpha x}{\lambda} + \frac{\alpha^2}{\lambda^2} a\tau \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a\tau} \right) \right].$$

**95.** Значения температур  $t(x, \tau)$ , °С, в стержне в различные моменты времени  $\tau$  (аналитическое решение):

$\tau, \text{ с}$	$x, \text{ м}$								
	0	0,025	0,05	0,075	0,10	0,125	0,15	0,175	0,20
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100
30	73,2	92,5	98,8	99,9	100	100	100	100	100
60	65,3	84,9	94,9	98,7	99,8	100	100	100	100
90	60,2	79,2	90,9	96,7	99,0	99,8	100	100	100
120	56,4	74,8	87,2	94,4	97,9	99,3	99,8	100	100
150	53,4	71,1	83,9	92,0	96,4	98,6	99,5	99,9	100
180	50,9	68,0	80,9	89,6	94,9	97,7	99,1	99,7	99,9



**96.** Значения температур  $t(x, \tau)$ , °С, в стержне в различные моменты времени  $\tau$  (явная конечно-разностная схема, расчетный шаг по координате 0,025 м, по времени 15 с):

$\tau, \text{с}$	$x, \text{м}$								
	0	0,025	0,05	0,075	0,10	0,125	0,15	0,175	0,20
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100
30	73,0	91,9	100	100	100	100	100	100	100
60	64,6	84,4	95,3	99,1	100	100	100	100	100
90	59,5	78,7	90,9	97,0	99,3	99,9	100	100	100
120	55,8	74,3	87,0	94,5	98,1	99,5	99,9	100	100
150	52,8	70,6	83,6	92,0	96,6	98,8	99,6	99,9	100
180	50,3	67,6	80,7	89,6	95,0	97,9	99,2	99,8	99,9

**97.** Значения температур  $t(x, \tau)$ , °С, в стержне в различные моменты времени  $\tau$  (неявная конечно-разностная схема, расчетный шаг по координате 0,025 м, по времени 15 с):

$\tau, \text{с}$	$x, \text{м}$								
	0	0,025	0,05	0,075	0,10	0,125	0,15	0,175	0,20
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100
30	77,5	93,4	98,3	99,6	99,9	100	100	100	100
60	67,5	86,4	95,0	98,3	99,5	99,8	100	100	100
90	61,6	80,6	91,3	96,5	98,7	99,5	99,8	99,9	100
120	57,4	75,9	87,8	94,3	97,6	99,0	99,6	99,9	100
150	54,1	72,1	84,5	92,1	96,3	98,3	99,3	99,7	99,9
180	51,5	68,9	81,6	89,9	94,8	97,5	98,9	99,5	99,8

$$98. \quad t_1(x, \tau) = t_{01} + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} (t_{02} - t_{01}) \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{a_1\tau}} \right);$$

$$t_2(x, \tau) = t_{02} - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} (t_{02} - t_{01}) \operatorname{erfc} \left( \frac{|x|}{2\sqrt{a_2\tau}} \right);$$

$$t_{1,2}(0, \tau) = t_{01} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} + t_{02} \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}; \quad q(0, \tau) = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \frac{(t_{02} - t_{01})}{\sqrt{\pi \tau}},$$

$$\text{где } \varepsilon = \sqrt{\lambda c \rho}.$$

$$99. \quad t_1(x, \tau) = t_0 + \frac{q}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \left[ 2\sqrt{\frac{\tau}{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a_1\tau}\right) - \frac{x}{\sqrt{a_1}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_1\tau}}\right) \right];$$

$$t_2(x, \tau) = t_0 + \frac{q}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \left[ 2\sqrt{\frac{\tau}{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a_2\tau}\right) + \frac{x}{\sqrt{a_2}} \operatorname{erfc}\left(\frac{|x|}{2\sqrt{a_2\tau}}\right) \right];$$

$$t_{1,2}(0, \tau) = t_0 + \frac{2q\sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}; \quad \frac{q_1}{q_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}, \quad \text{где } \varepsilon = \sqrt{\lambda c\rho}.$$

$$100. \quad t(x, \tau) = t_0 + \frac{q}{\lambda} \left\{ 2\sqrt{\frac{a\tau}{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right) - \frac{c_H}{c\rho} \left[ \left(1 + \frac{c\rho x}{c_H}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) - \exp\left(\frac{c\rho x}{c_H} + \frac{c^2\rho^2}{c_H^2} a\tau\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \frac{c\rho}{c_H} \sqrt{a\tau}\right) \right] \right\};$$

$$t(0, \tau) = t_0 + \frac{q}{\lambda} \left\{ 2\sqrt{\frac{a\tau}{\pi}} - \frac{c_H}{c\rho} \left[ 1 - \exp\left(\frac{c^2\rho^2}{c_H^2} a\tau\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{c\rho}{c_H} \sqrt{a\tau}\right) \right] \right\};$$

$$q_1(\tau) = q \left[ 1 - \exp\left(\frac{c^2\rho^2}{c_H^2} a\tau\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{c\rho}{c_H} \sqrt{a\tau}\right) \right].$$

Результаты расчета доли мощности  $q_1/q$ , передаваемой первому блоку нагревателем в различные моменты времени  $\tau$ :

$\tau, \text{с}$	0,01	1,0	100
$q_1/q$	0,266	0,821	0,981

101.  $6,2 \cdot 10^6$  лет.

$$102. \quad t(x, \tau) = t_\infty + t_0 \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} x\right) \cos\left(\omega\tau - \sqrt{\frac{\omega}{2a}} x\right),$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности тела.

$$103. \quad \Theta = \frac{t(\tau) - t_0}{q_v r_0^2}; \quad \text{Fo} = \frac{a\tau}{r_0^2}; \quad K_{c\rho} = \frac{(c\rho)_0}{c\rho}, \quad \text{где } a = \frac{\lambda}{c\rho}.$$

$$104. \Theta(R, Fo) = \frac{2}{\pi K_{cp}} \int_0^{\infty} \left(1 - e^{-\mu^2 Fo}\right) \frac{J_0(\mu R) \zeta(\mu) - Y_0(\mu R) \xi(\mu)}{\mu^2 [\xi^2(\mu) + \zeta^2(\mu)]} d\mu;$$

$$\Theta_0(Fo) = \frac{8}{(\pi K_{cp})^2} \int_0^{\infty} \frac{\left(1 - e^{-\mu^2 Fo}\right) d\mu}{\mu^3 [\xi^2(\mu) + \zeta^2(\mu)]};$$

$$Q(Fo) = \frac{4}{\pi K_{cp}} \int_0^{\infty} \left(1 - e^{-\mu^2 Fo}\right) \frac{J_1(\mu) \zeta(\mu) - Y_1(\mu) \xi(\mu)}{\mu [\xi^2(\mu) + \zeta^2(\mu)]} d\mu,$$

$$\text{где } \Theta(R, Fo) = \frac{t(r, \tau) - t_0}{\frac{q_v r_0^2}{\lambda}}; \quad \Theta_0(Fo) = \frac{t(r_0, \tau) - t_0}{\frac{q_v r_0^2}{\lambda}}; \quad Q(Fo) = \frac{q(r_0, \tau)}{\frac{q_v r_0}{2}};$$

$$R = \frac{r}{r_0}; \quad Fo = \frac{a\tau}{r_0^2}; \quad K_{cp} = \frac{(cp)_0}{cp}; \quad a = \frac{\lambda}{cp};$$

$$\xi(\mu) = \mu J_0(\mu) - \frac{2}{K_{cp}} J_1(\mu); \quad \zeta(\mu) = \mu Y_0(\mu) - \frac{2}{K_{cp}} Y_1(\mu).$$

$$105. t(x, \tau) = t_0 + \frac{q_v \delta}{C_w b^2} \left[ \frac{2}{\sqrt{\pi}} b \sqrt{\tau} \exp\left(-\frac{x^2}{4a\tau}\right) - \left(1 + \frac{bx}{\sqrt{a}}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) + \exp\left(b^2 \tau + \frac{bx}{\sqrt{a}}\right) \operatorname{erfc}\left(b\sqrt{\tau} + \frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) \right];$$

$$q_F(\tau) = q_v \delta [1 - \exp(b^2 \tau) \operatorname{erfc}(b\sqrt{\tau})], \quad \text{где } b = \frac{\lambda}{C_w \sqrt{a}}.$$

106.

$$t(x, \tau) = t_0 + \frac{\delta}{C_w} \exp\left(\frac{bx}{\sqrt{a}}\right) \int_0^{\tau} q_v(\tau - \theta) \exp(b^2 \theta) \operatorname{erfc}\left(b\sqrt{\theta} + \frac{x}{2\sqrt{a\theta}}\right) d\theta;$$

$$q_F(\tau) = b \delta \int_0^{\tau} q_v(\tau - \theta) \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi \theta}} - b \exp(b^2 \theta) \operatorname{erfc}(b\sqrt{\theta}) \right] d\theta,$$

$$\text{где } b = \frac{\lambda}{C_w \sqrt{a}}.$$

$$107. \Theta = \frac{t(x, \tau) - t_{ж}}{q_v \delta^2}; \quad X = \frac{x}{\delta}; \quad Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda}; \quad Fo = \frac{\alpha \tau}{\delta^2}.$$

$$108. \Theta = \frac{t(r, \tau) - t_{ж}}{q_v r_0^2}; \quad R = \frac{r}{r_0}; \quad Bi = \frac{\alpha r_0}{\lambda}; \quad Fo = \frac{\alpha \tau}{r_0^2}.$$

$$109. \frac{t(x, \tau) - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\mu_n \frac{x}{\delta}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha \tau}{\delta^2}\right),$$

где  $A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}$ ;  $\mu_n$  – корни характеристического урав-

нения  $\frac{\mu}{Bi} = \text{ctg} \mu$ ;  $Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda}$ . Результаты расчетов  $\Theta = \frac{t(x, \tau) - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}}$

для  $x/\delta = 1$  и  $x/\delta = 0$  приведены на рис. П.1 и П.2.

110. Результаты расчета относительной избыточной температуры

$\Theta = \frac{t(x, \tau) - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}}$  в середине ( $x = 0$ ) и на поверхности ( $x = \delta$ ) неограни-

ченной пластины для различных значений  $Fo = \alpha \tau / \delta^2$  в случае  $Bi = \alpha \delta / \lambda = 1, 0$ :

x	Fo							
	0,01	0,05	0,2	0,5	1	2	3	6
0	0,9999	0,9998	0,9507	0,7726	0,5339	0,2547	0,1215	0,0139
$\delta$	0,8964	0,7905	0,6435	0,5046	0,3482	0,1661	0,0793	0,0086

111. Зависимость средней по толщине пластины относительной

избыточной температуры  $\bar{\Theta} = \frac{\bar{t}(\tau) - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}}$  от  $Fo = \alpha \tau / \delta^2$  и  $Bi = \alpha \delta / \lambda$

имеет вид  $\bar{\Theta} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp(-\mu_n^2 Fo)$ , где  $B_n = \frac{2Bi^2}{\mu_n^2 (Bi^2 + Bi + \mu_n^2)}$ , а  $\mu_n$  –

корни характеристического уравнения  $\mu/Bi = \text{ctg} \mu$ .

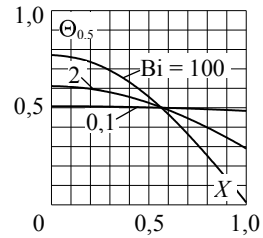
Результаты расчета  $\bar{\Theta}$  для различных значений Fo и Bi:

Bi	Fo								
	0,01	0,05	0,2	0,5	1	2	3	6	9
0,1	0,999	0,995	0,981	0,953	0,908	0,824	0,748	0,560	0,419
2	0,983	0,926	0,766	0,540	0,302	0,095	0,030	0,001	0,000
100	0,897	0,758	0,506	0,244	0,073	0,007	0,001	0,000	0,000

Значения чисел Фурье  $Fo_{0,5}$ , для которых  $\bar{\Theta} = 0,5$ :  $Fo_{0,5} = 7,162$ ;  $0,566$ ;  $0,205$  при  $Bi = 0,1$ ;  $2$  и  $100$  соответственно.

Результаты расчета распределения  $\Theta_{0,5} = \Theta(X, Fo_{0,5}, Bi)$  по толщине пластины при указанных значениях  $Fo_{0,5}$ :

Bi	$X = x/\delta$					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,1	0,508	0,507	0,504	0,499	0,492	0,484
2	0,611	0,597	0,556	0,488	0,398	0,290
100	0,771	0,736	0,632	0,467	0,253	0,012



$$112. \quad t(x, \tau) = t_{ж0} + k\tau - \frac{k\delta^2}{2a} \left[ \frac{2}{Bi} + \left( 1 - \frac{x^2}{\delta^2} \right) \right] + \\ + \sum_{n=1}^{\infty} \left( t_0 - t_{ж0} + \frac{k\delta^2}{a} \frac{1}{\mu_n^2} \right) A_n \cos\left( \mu_n \frac{x}{\delta} \right) \exp(-\mu_n^2 Fo),$$

где  $Bi = \frac{\alpha\delta}{\lambda}$ ;  $Fo = \frac{\alpha\tau}{\delta^2}$ ;  $A_n = \frac{2\sin\mu_n}{\mu_n + \sin\mu_n \cos\mu_n}$ ;  $\mu_n$  – корни характеристического уравнения

$$\frac{\mu}{Bi} = \text{ctg}\mu.$$

$$113. \quad \frac{t(r, \tau) - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0\left( \mu_n \frac{r}{r_0} \right) \exp\left( -\mu_n^2 \frac{\alpha\tau}{r_0^2} \right),$$

где  $A_n = \frac{2J_1(\mu_n)}{\mu_n [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]}$ ;  $\mu_n$  – корни характеристического уравнения

$$\frac{\mu}{Bi} = \frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)}; \quad Bi = \frac{\alpha r_0}{\lambda}.$$

Результаты расчетов  $\Theta = \frac{t(r, \tau) - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}}$  для  $r/r_0 = 1$  и  $r/r_0 = 0$  приведены на рис. П.3 и П.4.

**114.** Результаты расчета относительной избыточной температуры  $\Theta = \frac{t(r, \tau) - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}}$  на оси ( $r = 0$ ) и на поверхности ( $r = r_0$ ) неограниченного цилиндра для различных значений  $Fo = \alpha\tau/r_0^2$  в случае  $Bi = \alpha r_0/\lambda = 1,0$ :

R	Fo						
	0,01	0,05	0,2	0,5	1	2	3
0	0,9995	0,9989	0,8702	0,5486	0,2494	0,0515	0,0106
1	0,8917	0,7696	0,5702	0,3528	0,1603	0,0331	0,0068

$$115. \frac{t(r, \tau) - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{r_0}{r} \sin\left(\mu_n \frac{r}{r_0}\right) \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha\tau}{r_0^2}\right),$$

где  $A_n = \frac{2(\sin\mu_n - \mu_n \cos\mu_n)}{\mu_n(\mu_n - \sin\mu_n \cos\mu_n)}$ ;  $\mu_n$  – корни характеристического уравнения  $\operatorname{tg}\mu = \frac{\mu}{1 - Bi}$ ;  $Bi = \frac{\alpha r_0}{\lambda}$ .

Результаты расчетов  $\Theta = \frac{t(r, \tau) - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}}$  для  $r/r_0 = 1$  и  $r/r_0 = 0$  приведены на рис. П.5 и П.6.

**116.** Результаты расчета относительной избыточной температуры  $\Theta = \frac{t(r, \tau) - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}}$  в центре ( $r = 0$ ) и на поверхности ( $r = r_0$ ) шара для различных значений  $Fo = \alpha\tau/r_0^2$  в случае  $Bi = \alpha r_0/\lambda = 1,0$ :

R	Fo						
	0,01	0,05	0,2	0,5	1	2	3
0	0,9999	0,9968	0,7723	0,3708	0,1080	0,0092	0,0008
1	0,8871	0,7475	0,4959	0,2360	0,0687	0,0058	0,0005

117.  $t(0) = 39\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $t(\delta) = 29\text{ }^{\circ}\text{C}$  (результаты получены с использованием рис. П.1 и П.2).

118. Через 2 ч после начала охлаждения температура в середине верхней грани бруса  $138\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в середине нижней грани  $195\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; через 4 ч, соответственно,  $62$  и  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  (результаты получены с использованием рис. П.1 и П.2).

119. 41 мин (результат получен с использованием рис. П.2).

120.  $\tau_0 = 1\text{ ч } 30\text{ мин}$ ;  $t(0) = 849\text{ }^{\circ}\text{C}$  (результаты получены с использованием рис. П.3 и П.4).

121. 1)  $631\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2)  $633\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3)  $632\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 4)  $634\text{ }^{\circ}\text{C}$  (результаты получены с использованием рис. П.3 и П.4).

122. 3,6 мин (результат получен с использованием рис. П.6).

123.  $3,48 \cdot 10^{-7}\text{ м}^2/\text{с}$ .

$$124. \Theta = 1 - X - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n} \cos(\mu_n X) \exp(-\mu_n^2 \text{Fo}),$$

$$\text{где } \Theta = \frac{t - t_0}{q\delta/\lambda}; \quad X = \frac{x}{\delta}; \quad \text{Fo} = \frac{a\tau}{\delta^2}; \quad \mu_n = \frac{\pi}{2}(2n - 1).$$

125. 17,8 сут для теплоизолирующей стенки высокотемпературной установки; 10,2 мин для экспериментального образца.

126. 4,1 мин.

$$127. \Theta = \frac{1}{8} + \frac{1}{2\text{Bi}} + \text{Fo} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_n R)}{\mu_n^2 J_0(\mu_n)} \exp(-\mu_n^2 \text{Fo}),$$

$$\text{где } \Theta = \frac{t(r, \tau) - t_{\text{ж}}}{q_v r_0^2 / \lambda}; \quad R = \frac{r}{r_0}; \quad \text{Bi} = \frac{kr_0}{\lambda}; \quad \text{Fo} = \frac{a\tau}{r_0^2}; \quad \mu_n - \text{корни уравнения } J_1(\mu_n) = 0.$$

128. Для керамического твэла  $\tau_1 = 4,1\text{ с}$ , скорость роста средней температуры  $192\text{ град./с}$ ,  $\tau_2 = 10,2\text{ с}$ . Для дисперсионного твэла  $\tau_1 = 0,9\text{ с}$ , скорость роста средней температуры  $233\text{ град./с}$ ,  $\tau_2 = 5,9\text{ с}$ .

$$129. \Theta = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\text{Bi}_0} - \frac{1}{\text{Bi}} \right) + \frac{1}{\mu_n^2} + \int_0^{\text{Fo}} \frac{q_v(\text{Fo})}{q_{v0}} \exp(\mu_n^2 \text{Fo}) d\text{Fo} \right] A_n J_0(\mu_n R) \exp(-\mu_n^2 \text{Fo});$$

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\text{Bi}_0} - \frac{1}{\text{Bi}} \right) + \frac{1}{\mu_n^2} + \int_0^{\text{Fo}} \frac{q_v(\text{Fo})}{q_{v0}} \exp(\mu_n^2 \text{Fo}) d\text{Fo} \right] A_n J_1(\mu_n R) \exp(-\mu_n^2 \text{Fo}),$$

где  $\Theta = \frac{t(r, \tau) - t_{\text{ж}}}{q_{v0} r_0^2 / \lambda}$ ;  $Q = \frac{q(\tau)}{q_{v0} r_0}$ ;  $R = \frac{r}{r_0}$ ;  $\text{Bi}_0 = \frac{k_0 r_0}{\lambda}$ ;  $\text{Bi} = \frac{k r_0}{\lambda}$ ;

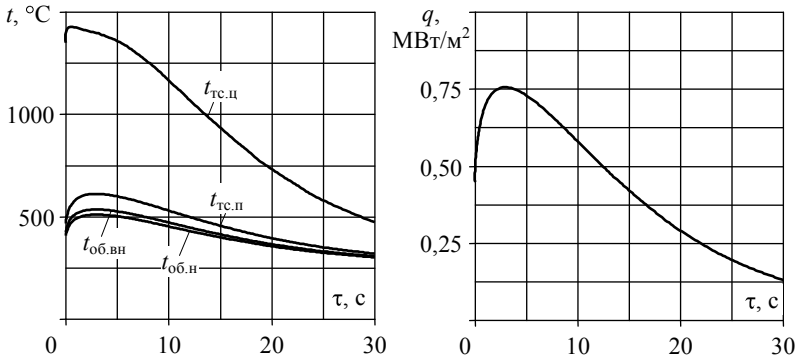
$\text{Fo} = \frac{\alpha \tau}{r_0^2}$ ;  $A_n = \frac{2 J_1(\mu_n)}{\mu_n [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]}$ ;  $\mu_n$  – корни уравнения

$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = \frac{\mu}{\text{Bi}}$ ;  $r_0$  – радиус топливного сердечника;  $t_{\text{ж}}$  – температура

охлаждающей жидкости;  $k_0$  и  $k$  – коэффициенты теплопередачи, учитывающие термические сопротивления теплоотдачи, оболочки и контакта оболочки с топливом в нормальном и аварийном состояниях;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности топлива. Температура наружной поверхности оболочки твэла  $t_{\text{об.н}}(\tau) = t_{\text{ж}} + q(\tau) / \alpha$ , температура внутренней поверхности оболочки  $t_{\text{об.вн}}(\tau) = t_{\text{ж}} + q(\tau) (1 / \alpha + \delta_{\text{об}} / \lambda_{\text{об}})$ , где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на поверхности оболочки в аварийном состоянии;  $\delta_{\text{об}}$  и  $\lambda_{\text{об}}$  – соответственно, толщина и коэффициент теплопроводности оболочки.



**130.** Результаты расчета параметров переходного теплового процесса в твэлах ядерного реактора:



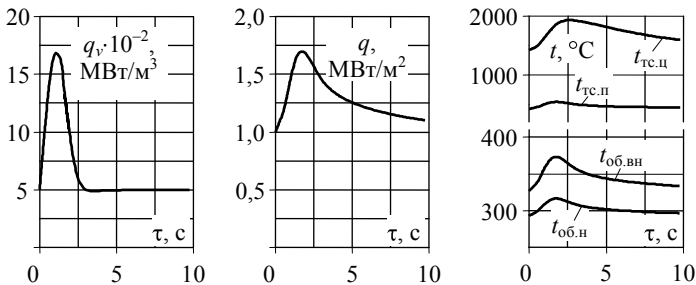
В переходном процессе максимальная температура оболочек твэлов не превышает 538 °С; в стационарном режиме работы реактора эта же величина равна 326,7 °С.

$$131. \Theta = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{\mu_n^2} + \int_0^{Fo} \frac{q_v(Fo)}{q_{v0}} \exp(\mu_n^2 Fo) dFo \right] A_n J_0(\mu_n R) \exp(-\mu_n^2 Fo);$$

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{\mu_n} + \int_0^{Fo} \frac{q_v(Fo)}{q_{v0}} \exp(\mu_n^2 Fo) dFo \right] A_n \mu_n J_1(\mu_n) \exp(-\mu_n^2 Fo),$$

где величины обозначены теми же символами, что и в задаче 129.

Изменение тепловых характеристик твэлов ядерного реактора в течение первых 10 с после скачкообразного изменения реактивности:



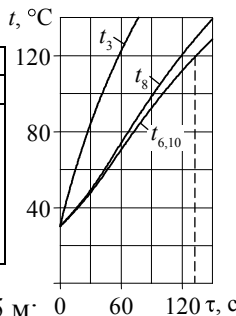
Максимальные значения характеристик в переходном процессе:  $q_v = 1680 \text{ МВт/м}^3$ ;  $q = 1,7 \text{ МВт/м}^2$ ;  $t_{\text{тс.п}} = 1927 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{тс.п}} = 543 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{об.вн}} = 373 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{об.н}} = 317 \text{ }^\circ\text{C}$ . Соответственно, те же величины в стационарном состоянии:  $500 \text{ МВт/м}^3$ ;  $1,0 \text{ МВт/м}^2$ ;  $1427 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $427 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $327 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $293 \text{ }^\circ\text{C}$ .

132. 32 ч.

$$133. k = \frac{r\rho R}{2(t_{\text{ж}} - t_{\text{с}})\Delta\tau} \ln\left(\frac{2h + R}{h + R}\right).$$

134.  $\approx 130$  с. Результаты численного определения температуры бруса  $t$ ,  $^\circ\text{C}$ , в узлах расчетной сетки со стороной  $\Delta x = \Delta y = 0,05$  м при шаге по времени  $\Delta\tau = 30$  с:

$\tau$ , с	№ узла					
	1 и 5	2 и 4	3	6 и 10	7 и 9	8
30	81,8	83,9	84,1	47,8	49,0	49,1
60	117,3	121,7	122,4	70,4	73,4	73,9
90	143,0	149,6	150,8	92,5	97,4	98,5
120	162,4	170,8	172,5	112,0	118,9	120,5
150	177,3	187,3	189,4	128,7	137,3	139,4



Аналогичные результаты в случае  $\Delta x = \Delta y = 0,025$  м:

$\tau$ , с	№ узла					
	1 и 5	2 и 4	3	6 и 10	7 и 9	8
60	111,1	116,9	117,7	64,1	67,2	67,9
120	158,6	169,0	171,0	107,0	114,6	116,4

135.  $t(\tau) = t_{\text{ж}} + (t_0 - t_{\text{ж}})\exp(-m\tau)$ , где  $m = \alpha F / (c\rho V)$ .

136.  $t(\tau) = \exp(-m\tau) \left[ t_0 + m \int_0^\tau t_{\text{ж}}(\tau)\exp(m\tau) d\tau \right]$ , где  $m = \alpha F / (c\rho V)$ .

137. а)  $\tau = \frac{1}{m} \ln \left[ 1 + \frac{m}{k} (t_0 - t_{\text{ж}0}) \right]$ ; б)  $\Delta t = \frac{k}{m}$ ;  $\Delta\tau = \frac{1}{m}$ ,

где  $m = \alpha F / (c\rho V)$ .

138. а) 14,4 мин; б) 2,9 мин. 139.  $10,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**140.** Амплитуда колебаний температуры тела

$$\delta t = t_{\max} \left[ 1 + \left( \frac{\omega \rho c V}{\alpha F} \right)^2 \right]^{-0,5};$$

колебания температуры тела отстают по фазе от колебаний температуры жидкости на величину

$$\Delta \varphi = \operatorname{arctg} \left( \frac{\omega \rho c V}{\alpha F} \right).$$

**141.** Ошибка в измерении амплитуды колебаний температуры жидкости 23 %; отставание в показаниях термопары  $39^{\circ}49'$  ( $0,22\pi$ ), что эквивалентно  $\Delta \tau = 0,0055$  с.

**142.**  $18,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

**143.** Температура листа: через 5 мин  $99,7^{\circ}\text{C}$ ; через 10 мин  $55,3^{\circ}\text{C}$ ; через 15 мин  $35,6^{\circ}\text{C}$ .

**144.** 2,3 ч. **145.** Через 0,88 ч.

$$\mathbf{146.} \quad t(\tau) = t_{\text{в}} + \frac{16I^2 \rho_{\text{э}}}{\pi^2 d^4 c \rho m} (1 - e^{-m\tau}) \quad \text{при } 0 \leq \tau \leq \tau_0;$$

$$t(\tau) = t_{\text{в}} + \frac{16I^2 \rho_{\text{э}}}{\pi^2 d^4 c \rho m} (e^{m\tau_0} - 1) e^{-m\tau} \quad \text{при } \tau_0 \leq \tau < \infty,$$

где  $m = 4\alpha/(c\rho d)$ ;  $t_{\max} = 355^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta \tau = 1,5$  мин.

$$\mathbf{147.} \quad t(\tau) = t_{\text{ж}} + (t_0 - t_{\text{ж}}) \left[ 1 + \frac{A(t_0 - t_{\text{ж}})^n F n}{c \rho V} \tau \right]^{-\frac{1}{n}}.$$

**148.** Через 10,8 мин.

$$\mathbf{149.} \quad t(x) = t_{\text{ж}} + (t_0 - t_{\text{ж}}) \exp(-mx), \quad \text{где } m = \sqrt{\frac{\alpha \Pi}{\lambda S}}.$$

$$\mathbf{150.} \quad 90,9^{\circ}\text{C}. \quad \mathbf{151.} \quad Q = \sqrt{\frac{2\lambda S \Pi A}{2+n}} (t_0 - t_{\text{ж}})^{2+n}.$$

**152.** В случае медной гильзы ошибка в показаниях термометра  $\delta t = 12,6^{\circ}\text{C}$ ; истинная температура воздуха  $t_{\text{ж}} = 132,6^{\circ}\text{C}$ . В случае гильзы из нержавеющей стали ошибка пренебрежимо мала.

**153.**  $100^{\circ}\text{C}$ .

$$154. t(x) = t_{\text{ж}} + (t_l - t_{\text{ж}}) \frac{\text{sh}mx}{\text{sh}ml} + (t_0 - t_{\text{ж}}) \frac{\text{sh}m(l-x)}{\text{sh}ml} + \frac{q_v}{m^2 \lambda} \left[ 1 - \frac{\text{sh}mx}{\text{sh}ml} - \frac{\text{sh}m(l-x)}{\text{sh}ml} \right], \text{ где } m = \sqrt{\frac{\alpha \Pi}{\lambda S}}.$$

155. Для ребра из нержавеющей стали  $Q = 29,6$  Вт,  $t_l = 57,6$  °С; наличие ребра на теплоотдающей стенке увеличивает поток тепла к воздуху в отношении  $Q/Q_0 = 23,7$ . Для медного ребра  $Q = 50,4$  Вт,  $t_l = 114,6$  °С,  $Q/Q_0 = 40,3$ .

$$156. q_{\text{п}} = \frac{4\lambda\delta}{R^2} (t_0 - t_R).$$

157.  $\text{Nu}_x = 0,323 \text{Re}_x^{1/2} \text{Pr}^{1/3}$ . Распределение скоростей и температур по толщине пограничного слоя аппроксимировалось параболой третьего порядка. Для пластины длиной  $l$  средняя теплоотдача  $\bar{\alpha} = 2\alpha_l$ , где  $\alpha_l$  – значение локального коэффициента теплоотдачи при  $x = l$ .

$$158. \text{Nu}_x = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \text{Pe}_x^{0,5}; \quad \overline{\text{Nu}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \text{Pe}_l^{0,5},$$

$$\text{где } \text{Nu}_x = \frac{\alpha_x x}{\lambda}, \quad \text{Pe}_x = \frac{w_{\infty} x}{a}; \quad \overline{\text{Nu}} = \frac{\bar{\alpha} l}{\lambda}, \quad \text{Pe}_l = \frac{w_{\infty} l}{a}.$$

159.  $\text{Nu}_x = 0,417 \text{Re}_x^{1/2} \text{Pr}^{1/3}$ . Распределение скоростей и температур по толщине пограничного слоя аппроксимировалось параболой третьего порядка. Для пластины длиной  $l$  средняя теплоотдача  $\bar{\alpha} = 1,5\alpha_l$ , где  $\alpha_l$  – значение локального коэффициента теплоотдачи при  $x = l$ .

$$160. \text{Nu}_x = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \text{Pe}_x^{0,5}; \quad \overline{\text{Nu}} = \frac{3\sqrt{\pi}}{4} \text{Pe}_l^{0,5}.$$

$$161. \bar{\alpha} = 2,79 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \quad Q = 167 \text{ Вт}.$$

$$162. t_F^{\text{max}} = 37,1 \text{ °С}; \quad \bar{t}_F = 31,4 \text{ °С}.$$

$$163. \bar{\alpha} = 16,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \quad Q = 35,9 \text{ кВт}.$$

$$164. \bar{\alpha} = 22,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \quad Q = 49,5 \text{ кВт}. \quad 165. \bar{\alpha} = 44,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

$$166. 6,07 \text{ кВт}. \quad 167. \delta t = t_{\text{ж}} - t_l = 0,6 \text{ °С}. \quad 168. 13,1 \text{ м/с}.$$

$$169. 4,75 \text{ кВт}. \quad 170. t_{\text{к}} = 10,6 \text{ °С}; \quad Q = 0,234 \text{ Вт}; \quad M = 9,5 \cdot 10^{-5} \text{ г/с}.$$

**171.** 76 Вт/(м<sup>2</sup>·К). **172.**  $\bar{\alpha} = 1,92 \cdot 10^5$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $Q = 115$  МВт.

$$\mathbf{173.} \quad w_1 = 5,17v \left(0,952 + \frac{v}{a}\right)^{-1/2} \left(\frac{g\beta\vartheta_F}{v^2}\right)^{1/2} x^{1/2};$$

$$\delta = 3,93 \left(\frac{v}{a}\right)^{-1/2} \left(0,952 + \frac{v}{a}\right)^{1/4} \left(\frac{g\beta\vartheta_F}{v^2}\right)^{-1/4} x^{1/4};$$

$$\text{Nu}_x = 0,508 \left(\frac{\text{Pr}^2}{0,952 + \text{Pr}}\right)^{1/4} \text{Gr}_x^{1/4},$$

где  $\text{Nu}_x = \frac{\alpha_x x}{\lambda}$ ,  $\text{Gr}_x = \frac{g\beta\vartheta_F x^3}{v^2}$ ,  $\text{Pr} = \frac{v}{a}$ .

$$\mathbf{174.} \quad w_1 = 5,7v \left(\frac{v}{a}\right)^{-1/5} \left(0,8 + \frac{v}{a}\right)^{-2/5} \left(\frac{g\beta q_F}{v^2 \lambda}\right)^{2/5} x^{3/5};$$

$$\delta = 3,25 \left(\frac{v}{a}\right)^{-2/5} \left(0,8 + \frac{v}{a}\right)^{1/5} \left(\frac{g\beta q_F}{v^2 \lambda}\right)^{-1/5} x^{1/5};$$

$$\text{Nu}_x = 0,616 \left(\frac{\text{Pr}^2}{0,8 + \text{Pr}}\right)^{1/5} \text{Gr}_{qx}^{1/5},$$

где  $\text{Nu}_x = \frac{\alpha_x x}{\lambda}$ ,  $\text{Gr}_{qx} = \frac{g\beta q_F x^4}{v^2 \lambda}$ ,  $\text{Pr} = \frac{v}{a}$ .

**175.** 53 °С. **176.** 8 м. **177.** 42 °С. **178.** 0,316 МВт.

**179.** Для воздуха  $q = 371$  Вт/м<sup>2</sup>, для гелия  $q = 893$  Вт/м<sup>2</sup>.

**180.** 40 °С. **181.**  $\delta < 3,2$  мм.

**182.** Для оконной рамы с одним стеклом  $q = 131$  Вт/м<sup>2</sup>, для рамы с двойным остеклением  $q = 52$  Вт/м<sup>2</sup>.

$$\mathbf{183.} \quad \bar{\text{Nu}} = f\left(\text{Re}, \text{Pr}, \frac{l}{d}\right), \quad \text{где} \quad \bar{\text{Nu}} = \frac{\bar{\alpha} d}{\lambda}, \quad \text{Re} = \frac{\rho w d}{\mu}, \quad \text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda}.$$

$$184. t(x, r) = \bar{t}(x) + \frac{q_F r_0}{\lambda} \left[ \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 - \frac{1}{4} \left( \frac{r}{r_0} \right)^4 - \frac{7}{24} \right]; \quad \text{Nu} = \frac{\alpha \cdot 2r_0}{\lambda} = 4,36,$$

где  $\bar{t}(x)$  – среднекалориметрическая температура жидкости в сечении  $x$ ,

$$\bar{t}(x) = t_{\text{вх}} + \frac{2q_F x}{\rho c_p w_0 r_0}.$$

$$185. t(x, y) = \bar{t}(x) + \frac{q_F \delta}{\lambda} \left[ \frac{3}{4} \left( \frac{y}{\delta} \right)^2 - \frac{1}{8} \left( \frac{y}{\delta} \right)^4 - \frac{39}{280} \right];$$

$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot 4\delta}{\lambda} = 8,235$ , где  $\bar{t}(x)$  – среднекалориметрическая температура жидкости в сечении  $x$ ,

$$\bar{t}(x) = t_{\text{вх}} + \frac{q_F x}{\rho c_p w_0 \delta}.$$

$$186. t(r) = t_c + \frac{q_v r_0^2}{4\lambda} \left( 1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right). \quad 187. t(y) = t_c + \frac{3}{4} \frac{\mu w_0^2}{\lambda} \left( 1 - \frac{y^4}{\delta^4} \right).$$

188.  $Q = 15,7$  Вт.

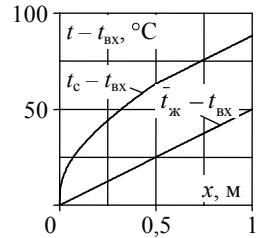
Среднекалориметрическая температура жидкости (газа)  $\bar{t}_{\text{ж}}$  увеличивается по длине трубки по линейному закону, температура стенки  $t_c$  превышает  $\bar{t}_{\text{ж}}$  на величину  $\frac{\rho c_p w_0 d \Delta t}{4\alpha l}$ , где  $\Delta t$  – подогрев жидкости в трубке, а локальный коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  рассчитывается по формулам (2.14) и (2.15).

189. а)  $33,3$  °C; б)  $100$  °C.

$$190. \Delta t_{\text{max}} = (t_c^{\text{доп}} - t_{\text{вх}}) \frac{4 \frac{l}{d_{\Gamma}} \text{St}}{1 + 4 \frac{l}{d_{\Gamma}} \text{St}}, \quad \text{где } \text{St} = f\left(\text{Re}, \text{Pr}, \frac{l}{d_{\Gamma}}\right).$$

191. а)  $37,3$  °C; б)  $38,3$  °C.

192. а)  $\alpha_{\text{He}}/\alpha_{\text{в}} = 1,14$ ; б)  $\alpha_{\text{He}}/\alpha_{\text{в}} = 5,41$ ; в)  $\alpha_{\text{He}}/\alpha_{\text{в}} = 1,73$ .



**193.** Результаты расчета коэффициентов теплоотдачи:

Теплоноситель	$\alpha$ , кВт/(м <sup>2</sup> ·К)		
	Re = 10 <sup>4</sup>	Re = 10 <sup>5</sup>	Re = 10 <sup>6</sup>
Вода	1,62	10,2	64,5
Натрий	35,8	57,5	195
Гелий	0,63	3,99	25,2

**194.**  $8,22 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). **195.**  $3,26 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

**196.**  $\alpha = 1,2 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\Delta t = 1,9$  °С.

**197.**  $t_{ж}(z) = t_{вх} + \frac{\Delta t}{2} \left[ 1 + \sin\left(\frac{\pi z}{H}\right) \right]$ ;  $t_c(z) = t_{ж}(z) + \frac{q(z)}{\alpha}$ ,

где  $\Delta t = \frac{2dHq_0}{G_{яч}c_p} = 42$  °С и  $G_{яч} = \rho w S_{яч} = 0,298$  кг/с – соответственно,

подогрев и массовый расход теплоносителя в ячейке с проходным сечением  $S_{яч} = \frac{\pi d^2}{4} \left( \frac{2\sqrt{3}}{\pi} x^2 - 1 \right) = 75,7$  мм<sup>2</sup>; коэффициент те-

плоотдачи на поверхности твэлов  $\alpha = 48,2$  кВт/(м<sup>2</sup>·К); максимум температуры поверхности твэлов находится на расстоянии 2,58 м от входа в сборку, значение максимальной температуры 342 °С.

**198.**  $t_{ц}(z) = t_{ж}(z) + q(z)R$ , где полное термическое сопротивление

$R = \frac{d}{4\lambda_T} + \frac{1}{\alpha_3} + \frac{\delta_{об}}{\lambda_{об}} + \frac{1}{\alpha}$ ; максимум температуры центра твэла на-

ходится на расстоянии 1,77 м от входа в сборку, максимальное значение температуры 1595 °С.

**199.** Максимум температуры центра дисперсионного твэла находится на расстоянии 1,84 м от входа в сборку, максимальное значение температуры 583 °С; перепад температур между центром керамического твэла и теплоносителем в 4,7 раза больше, чем в случае дисперсионного твэла.

**200.**  $\alpha = 70,6 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\Delta t = 28,3$  °С. **201.** 5,2 м.

**202.** Для натрия  $\alpha_1 = 47,5$  кВт/(м<sup>2</sup>·К),  $\Delta p_1 = 18,9$  кПа; для свинца  $\alpha_2 = 13,0$  кВт/(м<sup>2</sup>·К),  $\Delta p_2 = 45,3$  кПа,  $\alpha_1/\alpha_2 = 3,64$ ,  $\Delta p_1/\Delta p_2 = 0,42$ .

**203.** Для воды  $\Delta t = 16,3$  °С, для этилового спирта  $\Delta t = 4,3$  °С.

204. 0,093 °C при давлении 10 МПа; 30,6 °C при давлении 0,05 МПа.

205. 
$$\frac{dR}{d\tau} = \frac{\lambda_{ж}(t_{ж} - t_{с})}{r\rho''\sqrt{a_{ж}\tau}}$$
 206. 2,5 мм. 207. 6,6 мс.

208. 30,2 при  $p = 0,1$  МПа и 1,6 при  $p = 8,6$  МПа.

209. 6,5 мс при  $p = 0,1$  МПа и 65 мс при  $p = 8,6$  МПа.

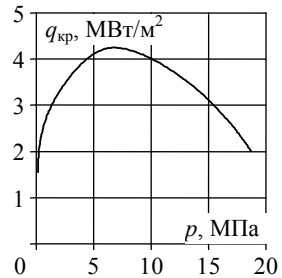
210.  $\alpha = 5,1 \cdot 10^4$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_c = 258$  °C. 211.  $9,72 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>.

212.  $R_n = 1,1 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>·К/Вт;  $\delta_n \approx 0,1$  мм. 213. 0,2 мм.

214.  $1,5 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. 215.  $6,24 \cdot 10^3$  Вт/м. 216. 164 м<sup>2</sup>.

217. Результаты расчета критического теплового потока  $q_{кр}$ :

$p$ , МПа	$t_s$ , °C	$q_{кр}$ , МВт/м <sup>2</sup>
0,2	120	1,55
1,0	180	2,80
6,4	280	4,24
8,6	300	4,16
14,6	340	3,21
18,7	360	2,01



218. Для воды  $q_{кр} = 1,18 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>; для азота и гелия  $1,73 \cdot 10^5$  и  $6,7 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup> соответственно.

219. Для давлений 0,1; 1,0 и 10 МПа максимальный перегрев стенки при пузырьковом режиме кипения воды в большом объеме равен 21,2; 19,7 и 8,3 °C соответственно.

220. При давлении 7 МПа в сечении канала, где начинается интенсивное парообразование,  $x_{н.п} = -0,096$ ;  $\vartheta = 26,9$  °C; это сечение более удалено от входа в канал и наблюдается при большем недогреве воды, чем при давлении 16 МПа, в последнем случае  $x_{н.п} = -0,156$ ;  $\vartheta = 15,3$  °C.

221. Необходимо уменьшить недогрев воды до 33,3 °C;  $\rho_w = 870$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

222. 
$$x = \frac{1}{1 + \frac{1 - \beta}{\beta} \frac{\rho'}{\rho''}}; \quad \beta = \frac{1}{1 + \frac{1 - x}{x} \frac{\rho''}{\rho'}}$$

где  $\rho'$  и  $\rho''$  – плотности жидкости и пара.



$$223. \varphi = \frac{1}{1 + \frac{1-\beta}{\beta} \cdot s}; \quad \varphi = \frac{1}{1 + \frac{1-x}{x} \cdot \frac{\rho''}{\rho'} \cdot s}.$$

224. 1)  $\Delta t_{\text{конв}} < \Delta t_{6,0}$  (преобладает конвективная теплоотдача однофазной жидкости); 2)  $\Delta t_{\text{конв}} \sim \Delta t_{6,0}$  (вклады обоих механизмов теплоотдачи сопоставимы); 3)  $\Delta t_{\text{конв}} > \Delta t_{6,0}$  (превалирует теплоотдача кипением).

$$225. t_c - t_s = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\Delta t_0^2} + \frac{1}{\Delta t_{00}^2}}}. \quad 226. 42,8 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

227.  $\alpha = 38,5 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  при  $w_0 = 0,5 \text{ м}/\text{с}$ ;  $\alpha = 52,4 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  при  $w_0 = 6,5 \text{ м}/\text{с}$ .

228.  $\alpha = 62,3 \cdot 10^3$ ;  $65,0 \cdot 10^3$ ;  $71,7 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  при  $w_0 = 0,5$ ;  $3,0$  и  $6,5 \text{ м}/\text{с}$  соответственно.

229.  $\alpha_{\text{дф},x} = 32,3 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,  $\alpha_{\text{дф},x}/\alpha_{\text{дф},0} = 1,3$ .

230. Распределение искомых параметров по высоте межтвэльной ячейки активной зоны реактора ВВРК:

$z/H$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$q$ , кВт/м <sup>2</sup>	358,2	589,2	561,2	423,4	259,7	88,8
$t_{\text{ж}}$ , °С	275	285,8	285,8	285,8	285,8	285,8
$x$	-0,038	0,007	0,059	0,103	0,133	0,149
$\beta$	-	0,121	0,559	0,699	0,757	0,780
$\rho_{\text{см}}$ , кг/м <sup>3</sup>	-	654,8	346,3	247,9	207,3	191,3
$w_{\text{см}}$ , м/с	-	2,82	5,33	7,44	8,90	9,65
$t_c$ , °С	291,1	292,1	292,0	291,4	290,4	288,4

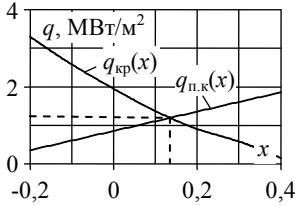
Максимум температуры поверхности твэлов находится на расстоянии 0,91 м от входа в ячейку, максимальное значение температуры 292,1 °С; коэффициент скольжения  $s = 1,56$ ; истинное паросодержание потока на выходе ячейки  $\varphi = 0,695$ , истинная скорость воды  $w' = 6,95 \text{ м}/\text{с}$ , пара  $w'' = 10,8 \text{ м}/\text{с}$ .

231. 4,98 МВт.

232. Отличие вызвано разной структурой парожидкостного потока при  $x = -0,1$  и  $x = 0,1$ .

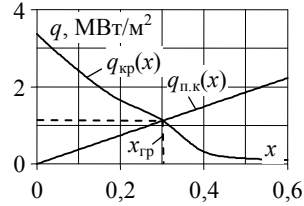
233.  $p = 3 \text{ МПа}$ ;  $\rho w = 1000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $q_{\text{кр}} = 5420 \text{ кВт}/\text{м}^2$ .

234.



$$q_{кр} = 1,2 \text{ МВт/м}^2; x_{кр} = 0,13; \\ N_{кр} = 132 \text{ кВт.}$$

235.



$$q_{кр} = 1,1 \text{ МВт/м}^2; x_{кр} = 0,30; \\ N_{кр} = 93 \text{ кВт.}$$

236.  $q_{кр.таб} = 3,517 \text{ МВт}$ ,  $q_{кр} \geq 4,15 \text{ МВт}$ .

237.  $l = 2,52 \text{ м}$ ,  $t_{с.н} = 306,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{с.вн} = 295,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

238. Во втором случае обязательно, так как граничное паросодержание  $x_{гр}^0 = 0,5 \div 0,6$  и зона ухудшенного теплообмена занимает значительную долю от общей длины канала.

239.  $\rho w_{\max} = 4012 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ . 240.  $\bar{\alpha}_B / \bar{\alpha}_T = 0,6$ ;  $l/d \cong 6,5$ .

241.  $\bar{\alpha} = 8 \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ ;  $G = 13,6 \text{ кг/(м} \cdot \text{ч)}$ . 242.  $\approx 80 \text{ мкм}$ .

243.  $\bar{\alpha}_n = \bar{\alpha}_0 \sqrt[4]{n+1}$ . 244.  $74 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}$ .

245.  $(\lambda T)_{\max} = C_2/4,965 = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ ;  
 $(E_{0\lambda})_{\max} = 1,287 \cdot 10^{-5} T^6, \text{ Вт/м}^3$ .

246.  $E_0 = \sigma_0 T^4$ ,  $\sigma_0 = \frac{C_1}{15} \left( \frac{\pi}{C_2} \right)^4 = 5,668 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ,

где  $C_1 = 3,7418 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$ ,  $C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$  – постоянные в законе Планка.

247. В семь раз. 248.  $q = \frac{\sigma_0(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 + n \left( \frac{2}{\epsilon_3} - 1 \right)}$ .

249. Через 1,4 сут.

**250.**  $Q_{1 \rightarrow 2} = \varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0 F_1 (T_1^4 - T_2^4)$ , где  $\sigma_0 = 5,668 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}.$$

**251.**  $85 \text{ см}^3$  жидкого гелия в сутки. **252.**  $\bar{T} = 2785 \text{ К}$ ;  $\delta T = 51,2 \text{ К}$ .

**253.**  $645 \text{ }^\circ\text{С}$ . **254.**  $16,2 \text{ м}^2$ .

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Т а б л и ц а П.1

### Коэффициенты теплопроводности некоторых материалов

Наименование материала	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$
Асбест листовой	30	0,116
Бетон	20	1,28
Бумага обыкновенная	20	0,14
Вата минеральная	50	0,05
Диатомит	0	0,091
Диоксид урана, спеченный стехиометрического состава	1800	2,0
Кварц кристаллический:		
поперек оси	0	0,72
вдоль оси	0	1,94
Кирпич красный	0	0,77
Кирпич шамотный	0	0,84
Латунь	0	85,5
Лед	0	2,2
Медь	0	384
Накипь котельная	100	0,13 – 3,14
Пробковые плиты сухие	80	0,05
Резина обыкновенная	0 – 100	0,16
Ртуть	27	8,0
Сажа ламповая	40	0,1
Снег	0	0,46
Стекло кварцевое	200	1,6
Стекло обыкновенное	20	0,74

Т а б л и ц а П.2

### Коэффициенты теплопроводности $\lambda$ некоторых сплавов в зависимости от температуры, Вт/(м·К)

Сплав	$t, ^\circ\text{C}$					
	0	100	200	300	400	500
Сталь Ст. 45	48,4	47,2	45,2	42,4	39,7	37,0
Нержавеющая сталь X18H9T	14,0	16,0	17,5	18,7	20,2	21,8
Нихром	12,2	13,7	15,4	16,2	19,0	20,8
Латунь Л-68	105	108	110	113	116	119

Т а б л и ц а П.3

**Температурная зависимость коэффициента теплопроводности  
изоляционных и других материалов**

Наименование материала	$\lambda$ , Вт/(м·К)	Предельная температура применения $t$ , °С
Асботермит	$0,109 + 0,000145t$	500 – 550
Графит	$500/[1 + 0,006(t + 273)]$	1700
Новоасбозурит	$0,144 + 0,00014t$	250
Совелит	$0,0901 + 0,000087t$	400 – 450

Т а б л и ц а П.4

**Коэффициенты температуропроводности  $a$  некоторых материалов**

Наименование материала	$t$ , °С	$a \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
Асбест листовой	30	0,198
Грунт, песок, суглинки, гравий и т.п. под открытым небом	0	1,46
Резина	0	0,0985
Ртуть	0	4,25
Сталь	20	12,5

Т а б л и ц а П.5

**Плотность  $\rho$  и удельная теплоемкость  $c_p$  некоторых материалов**

Наименование материала	$t$ , °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)
Латунь	0	8600	0,378
Лед	0	920	2,26
Медь	0	8800	0,381
Сталь	20	7900	0,462

Т а б л и ц а П.6

**Удельное электросопротивление металлов и сплавов  
при комнатной температуре**

Наименование материала	$\rho_z$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м
Алюминий	0,028
Медь	0,017
Нержавеющая сталь	0,85
Нихром	1,0

Т а б л и ц а П.7

**Физические свойства сухого воздуха при атмосферном давлении**

$t$ , °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	10,04	0,728
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	11,61	0,716
0	1,293	1,005	2,44	18,8	13,28	0,707
20	1,205	1,005	2,59	21,4	15,06	0,703
40	1,128	1,005	2,76	24,3	16,96	0,699
60	1,060	1,005	2,90	27,2	18,97	0,696
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,09	0,692
100	0,946	1,009	3,21	33,6	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	96,89	0,699
800	0,329	1,156	7,18	188,8	134,8	0,713
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	177,1	0,719
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	233,7	0,724

Т а б л и ц а П.8

**Физические свойства гелия [26]**

$p$ , МПа	$t$ , °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	Pr
0,1013	0	0,1787	5,193	0,145	18,70	0,667
	200	0,1034	5,193	0,212	27,32	0,668
	400	0,07280	5,193	0,272	34,90	0,667
	600	0,05602	5,193	0,327	41,88	0,666
	800	0,04554	5,193	0,378	48,54	0,666
7,093	0	12,06	5,197	0,149	19,01	0,661
	200	7,097	5,191	0,214	27,42	0,664
	400	5,031	5,190	0,273	35,00	0,665
	600	3,885	5,190	0,328	41,98	0,665
	800	3,165	5,191	0,379	48,54	0,665

$p$ , МПа	$t$ , °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	Pr
15,20	0	24,86	5,201	0,153	19,31	0,653
	200	14,88	5,188	0,217	27,62	0,659
	400	10,62	5,187	0,275	35,13	0,662
	600	8,238	5,187	0,329	42,08	0,663
	800	6,727	5,188	0,380	48,64	0,664

Таблица П.9

## Физические свойства водяного пара на линии насыщения

$t$ , °С	$p \cdot 10^{-5}$ , Па	$\rho''$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$r$ , кДж/кг	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
0,01	0,0061	0,0049	1,861	2500	1,697	1888	1,00
10	0,0123	0,0094	1,869	2477	1,770	1011	1,00
20	0,0234	0,0173	1,877	2453	1,824	563,7	1,00
30	0,0424	0,0304	1,885	2430	1,883	328,9	1,00
40	0,0738	0,0512	1,895	2406	1,953	200,7	1,00
60	0,199	0,130	1,923	2358	2,122	83,88	0,99
80	0,474	0,293	1,967	2308	2,309	39,63	0,99
100	1,013	0,598	2,135	2257	2,372	20,02	1,08
120	1,98	1,121	2,206	2203	2,593	11,46	1,09
140	3,61	1,966	2,315	2145	2,791	6,89	1,12
160	6,18	3,258	2,479	2083	3,012	4,39	1,18
180	10,03	5,157	2,709	2015	3,268	2,93	1,25
200	15,55	7,862	3,023	1941	3,547	2,03	1,36
220	23,20	11,62	3,408	1858	3,896	1,45	1,47
240	33,48	16,76	3,881	1766	4,290	1,06	1,61
260	46,94	23,72	4,467	1661	4,800	0,794	1,75
280	64,19	33,19	5,234	1543	5,490	0,600	1,90
300	85,92	46,21	6,280	1404	6,270	0,461	2,13
320	112,90	64,72	8,206	1238	7,510	0,353	2,50
340	146,08	92,76	12,35	1027	9,300	0,272	3,35
360	186,74	144,0	23,03	720	12,79	0,202	5,23

Т а б л и ц а П.10

**Физические свойства воды на линии насыщения**

$t$ , °C	$p \cdot 10^{-5}$ , Па	$\rho'$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\sigma \cdot 10^4$ , Н/м	Pr
0,01	0,0061	999,8	4,216	56,4	1,794	756,1	13,41
10	0,0123	999,6	4,189	57,8	1,306	741,4	9,47
20	0,0234	998,2	4,183	59,6	1,003	726,7	7,03
30	0,0424	995,6	4,181	61,5	0,802	712,0	5,42
40	0,0738	992,2	4,181	63,2	0,659	696,3	4,32
60	0,199	983,2	4,186	65,7	0,475	661,9	2,98
80	0,474	971,8	4,199	67,0	0,365	625,7	2,22
100	1,013	958,4	4,220	68,3	0,295	588,6	1,75
120	1,98	943,1	4,250	68,6	0,252	548,4	1,47
140	3,61	926,1	4,287	68,5	0,217	507,2	1,26
160	6,18	907,4	4,346	68,3	0,191	466,0	1,10
180	10,03	886,9	4,417	67,4	0,173	422,8	1,00
200	15,55	863,0	4,505	66,3	0,158	376,7	0,93
220	23,20	840,3	4,614	64,5	0,148	331,6	0,89
240	33,48	813,6	4,756	62,8	0,141	285,5	0,87
260	46,94	784,0	4,949	60,5	0,135	237,4	0,87
280	64,19	750,7	5,230	57,4	0,131	191,3	0,90
300	85,92	712,5	5,736	54,0	0,128	144,2	0,97
320	112,90	667,1	6,574	50,6	0,128	98,1	1,11
340	146,08	610,1	8,165	45,7	0,127	56,7	1,39
360	186,74	528,0	13,984	39,5	0,126	20,2	2,35

Т а б л и ц а П.11

**Теплофизические свойства натрия [10]**

$t$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^7$ , м <sup>2</sup> /с	$\nu \cdot 10^7$ , м <sup>2</sup> /с	Pr · 10 <sup>3</sup>	$\sigma \cdot 10^3$ , Н/м
100	926,5	1,383	85,75	672,0	7,217	10,738	197
150	915,1	1,360	83,32	671,3	5,820	8,669	192
200	903,7	1,339	80,89	669,2	4,920	7,352	187
250	892,1	1,320	78,47	665,8	4,302	6,462	182
300	880,5	1,304	76,04	661,1	3,857	5,835	177
350	868,8	1,290	73,62	654,9	3,525	5,382	172
400	857,0	1,278	71,19	647,5	3,269	5,048	167
450	845,1	1,269	68,77	638,7	3,068	4,803	162
500	833,1	1,262	66,34	628,6	2,906	4,624	157
550	821,0	1,257	63,91	617,1	2,775	4,497	152
600	808,9	1,254	61,49	604,2	2,668	4,414	147
650	796,6	1,254	59,06	590,1	2,578	4,369	142
700	784,3	1,256	56,63	574,5	2,504	4,357	137



Т а б л и ц а П.12

**Теплофизические свойства свинца [9]**

$t$ , °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\nu \cdot 10^8$ , м <sup>2</sup> /с	$\text{Pr} \cdot 10^2$	$\sigma \cdot 10^3$ , Н/м
350	10650	0,1473	16,04	10,23	23,03	2,25	444,5
400	10580	0,1473	16,58	10,64	20,99	1,97	441,3
450	10520	0,1473	17,12	11,05	19,19	1,74	438,1
500	10460	0,1473	17,66	11,46	17,63	1,54	434,9
550	10400	0,1473	18,20	11,89	16,29	1,37	431,7
600	10340	0,1473	18,74	12,31	15,19	1,23	428,5
650	10270	0,1473	19,28	12,74	14,33	1,12	425,3
700	10210	0,1473	19,82	13,18	13,69	1,04	422,1

Т а б л и ц а П.13

**Физические свойства некоторых криогенных и органических жидкостей при атмосферном давлении на линии насыщения**

Жидкость	$T$ , К	$\rho'$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho''$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	$r$ , кДж/кг	$\sigma \cdot 10^4$ , Н/м
Гелий	4,2	125,4	16,49	1,96	20,55	1,022
Водород	20,4	70,65	1,38	27,5	445	19,0
Азот	77,4	808,5	4,63	13,4	199	88,5
Этиловый спирт	351,4	737	1,655	15,9	824	168

Т а б л и ц а П.14

**Физические свойства трансформаторного масла в зависимости от температуры**

$t$ , °С	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^4$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\text{Pr} \cdot 10^3$
0	892,5	1,549	0,1123	629,8	70,5	866
20	880,3	1,666	0,1106	198,2	22,5	298
40	868,2	1,788	0,1090	89,4	10,3	146
60	856,0	1,905	0,1072	49,5	5,78	87,8
80	843,9	2,026	0,1056	30,8	3,66	59,3
100	831,8	2,144	0,1038	21,3	2,56	43,9

Т а б л и ц а П.15  
Критическая плотность теплового потока  $q_{кр}$  (МВт/м<sup>2</sup>) при кипении воды в круглой трубе диаметром 8 мм [27]

$p$ , МПа	$\rho_w$ , кг/(м <sup>3</sup> ·с)	$x$														
		-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9		
2	100	8,77	7,82	7,04	6,21	5,56	4,76	3,66	3,07	2,80	2,49	2,31	2,00	1,72	1,12	0,59
	500	11,5	9,69	8,43	7,53	6,61	6,08	5,28	4,58	4,20	3,93	3,70	3,36	1,90	1,11	0,61
	1000	16,0	13,2	10,6	7,98	6,69	6,19	5,42	5,08	4,96	4,20	2,75	1,26	0,60	0,36	0,17
	1500	18,9	15,5	12,2	9,42	7,67	6,66	5,46	4,87	4,52	2,93	0,90	0,51	0,29	0,16	0,10
	2000	21,1	17,3	13,6	10,5	8,98	7,26	5,41	4,60	3,82	1,36	0,68	0,42	0,20	0,10	0,06
	3000	25,2	20,5	15,8	11,6	8,79	7,11	5,17	4,48	2,57	1,02	0,59	0,33	0,17	0,06	0,03
	4000	28,3	22,8	16,9	10,8	8,75	7,10	4,95	3,87	2,37	1,32	1,00	0,61	0,32	0,10	0,04
	5000	30,6	24,8	18,2	11,8	9,04	7,20	4,79	3,61	2,39	1,55	1,13	0,71	0,38	0,13	0,06
	6000	33,1	26,8	20,0	13,6	9,32	6,99	4,80	3,48	2,39	1,74	1,29	0,85	0,45	0,18	0,08
	7000	35,1	28,4	21,6	14,6	10,0	6,99	4,93	3,34	2,51	1,94	1,46	1,01	0,55	0,23	0,11
	8000	36,7	29,6	22,6	16,4	10,9	7,07	5,17	3,40	2,70	2,08	1,60	1,13	0,63	0,26	0,12
	3	100	8,51	7,60	6,83	6,32	5,81	5,12	3,92	3,42	3,17	2,95	2,77	2,48	2,06	1,26
500		10,7	9,15	8,02	7,43	7,07	6,65	5,96	5,06	4,43	4,15	3,74	3,59	2,65	1,60	0,96
1000		14,6	12,1	9,84	7,93	7,28	6,78	6,18	5,42	4,93	4,46	3,58	2,41	1,15	0,60	0,27
1500		17,0	14,0	11,4	9,13	8,12	7,19	6,03	5,17	4,70	3,62	2,76	0,76	0,66	0,26	0,14
2000		19,0	15,6	12,6	10,1	8,63	7,37	5,72	4,74	3,78	2,61	0,94	0,50	0,28	0,12	0,08
3000		22,7	18,6	14,6	11,2	8,67	6,86	5,19	4,36	3,15	1,19	0,58	0,35	0,18	0,06	0,03
4000		25,5	20,6	15,5	10,5	8,43	6,51	4,88	3,90	2,48	1,34	1,00	0,63	0,33	0,11	0,04
5000		27,5	22,3	16,4	11,6	8,77	6,60	4,58	3,62	2,31	1,50	1,14	0,72	0,38	0,13	0,05
6000		29,8	24,0	18,0	13,2	9,22	6,70	4,44	3,54	2,33	1,72	1,28	0,84	0,43	0,17	0,08
7000		31,5	25,5	19,5	14,2	10,0	6,76	4,61	3,40	2,54	1,94	1,46	1,00	0,53	0,22	0,10
8000		33,4	26,9	20,7	15,3	11,0	6,94	4,90	3,43	2,80	2,11	1,60	1,13	0,61	0,25	0,12

$P_s$ , МПа	$\rho_{w,}$ кг/(м <sup>2</sup> ·с)	x														
		-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
5	100	7,62	6,92	6,39	6,04	5,70	5,19	4,00	3,52	3,24	3,05	2,84	2,58	2,20	1,46	0,75
	500	9,23	7,89	7,22	6,84	6,66	6,46	5,59	4,87	4,34	3,88	3,52	3,09	2,49	1,88	1,10
	1000	12,2	10,2	8,47	7,45	6,99	6,57	5,73	4,80	4,19	3,50	2,97	2,48	1,68	0,69	0,38
	1500	14,0	11,7	9,62	8,12	7,30	6,47	5,38	4,44	3,80	2,94	2,29	0,91	0,59	0,39	0,20
	2000	15,6	12,9	10,4	8,53	7,41	6,11	4,84	3,91	3,26	2,41	1,18	0,64	0,35	0,19	0,13
	3000	18,8	15,4	12,2	9,23	7,46	5,43	4,27	3,48	2,58	1,43	0,53	0,41	0,18	0,07	0,04
	4000	20,9	17,2	13,6	9,99	7,66	4,78	3,58	3,14	2,27	1,19	0,92	0,59	0,32	0,11	0,04
	5000	22,9	18,8	14,5	10,9	8,18	5,03	3,49	3,02	2,02	1,33	1,11	0,70	0,36	0,12	0,05
	6000	24,4	20,1	16,0	12,2	8,92	5,43	3,51	3,08	2,06	1,60	1,24	0,79	0,41	0,15	0,07
	7000	25,9	21,3	16,9	13,2	9,91	5,78	3,55	3,18	2,43	1,89	1,40	0,93	0,48	0,20	0,09
8000	27,3	22,4	17,9	13,9	10,9	6,22	4,01	3,36	2,82	2,07	1,53	1,05	0,54	0,23	0,11	
7	100	6,91	6,30	5,87	5,58	5,26	4,85	3,78	3,29	3,03	2,85	2,49	2,12	1,67	1,21	0,77
	500	7,84	6,90	6,44	6,19	5,93	5,67	4,92	4,20	3,81	3,46	2,91	2,48	1,99	1,55	0,87
	1000	10,2	8,77	7,39	6,53	6,28	5,86	4,92	3,94	3,45	2,88	2,43	2,09	0,77	0,51	0,34
	1500	11,9	10,1	8,46	7,26	6,65	5,73	4,56	3,61	2,99	2,49	1,59	0,60	0,37	0,32	0,19
	2000	13,3	11,2	9,17	7,56	6,77	5,33	4,02	3,17	2,57	1,92	0,79	0,48	0,27	0,20	0,13
	3000	15,9	13,2	10,5	8,26	6,78	4,76	3,37	2,64	2,11	0,95	0,43	0,31	0,16	0,08	0,04
	4000	17,8	14,8	11,9	9,28	7,12	4,23	2,86	2,36	1,71	0,96	0,68	0,44	0,26	0,10	0,04
	5000	19,4	16,1	12,9	10,1	7,42	4,35	2,61	2,25	1,62	1,05	0,85	0,53	0,28	0,11	0,05
	6000	20,7	17,3	14,0	11,4	8,66	4,76	2,73	2,35	1,70	1,34	1,02	0,64	0,33	0,13	0,06
	7000	21,9	18,4	15,0	12,3	9,46	4,95	2,87	2,50	2,09	1,62	1,18	0,77	0,40	0,17	0,08
8000	23,1	19,3	15,8	12,9	10,1	5,16	3,22	3,06	2,61	1,89	1,35	0,90	0,46	0,19	0,09	

$P_2$ , МПа	$\rho_{\text{ж}}$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	x														
		-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
10	100	5,71	5,42	5,08	4,81	4,51	4,16	3,26	2,83	2,51	2,06	1,62	1,29	1,00	0,67	0,47
	500	6,42	5,77	5,44	5,06	4,84	4,58	3,92	3,21	2,80	2,39	1,83	1,53	1,20	0,81	0,43
	1000	8,16	7,09	6,13	5,48	4,99	4,44	3,79	2,89	2,28	1,78	1,18	0,36	0,16	0,11	0,11
	1500	9,44	8,19	7,05	6,23	5,22	4,31	3,45	2,53	1,87	1,20	0,30	0,18	0,08	0,06	0,05
	2000	10,5	8,95	7,66	6,48	5,40	4,13	2,96	2,02	1,39	0,39	0,13	0,07	0,05	0,05	0,05
	3000	12,4	10,6	8,79	7,20	5,79	3,89	2,43	1,58	1,00	0,40	0,23	0,18	0,10	0,05	0,03
	4000	13,9	11,8	9,76	8,08	6,16	3,81	2,08	1,52	1,15	0,69	0,45	0,30	0,15	0,08	0,04
	5000	15,1	12,8	10,6	8,88	6,80	3,93	2,08	1,61	1,31	0,83	0,58	0,40	0,20	0,09	0,04
	6000	16,2	13,8	11,6	9,80	7,61	4,23	2,19	1,87	1,54	1,11	0,82	0,53	0,27	0,11	0,05
	7000	17,1	14,6	12,3	10,3	8,05	4,40	2,34	2,10	1,85	1,39	1,00	0,66	0,34	0,15	0,07
8000	18,1	15,4	13,0	10,7	8,47	4,63	3,06	2,80	2,35	1,67	1,17	0,78	0,40	0,17	0,08	
12	100	5,02	4,81	4,54	4,29	3,98	3,65	2,88	2,50	2,07	1,62	1,29	0,98	0,77	0,45	0,30
	500	5,65	5,19	4,87	4,45	4,13	3,82	3,24	2,72	2,31	1,88	1,47	1,01	0,42	0,30	0,21
	1000	7,03	6,27	5,50	4,70	4,10	3,45	2,88	2,29	1,64	1,07	0,31	0,21	0,12	0,08	0,08
	1500	8,21	7,11	6,22	5,24	4,27	3,41	2,53	1,72	1,10	0,38	0,21	0,11	0,04	0,04	0,04
	2000	8,96	7,71	6,60	5,47	4,42	3,38	2,30	1,41	0,91	0,12	0,08	0,07	0,05	0,04	0,03
	3000	10,4	9,13	7,66	6,41	4,92	3,36	1,99	1,10	0,69	0,30	0,20	0,15	0,08	0,05	0,03
	4000	11,3	9,88	8,45	7,03	5,23	3,33	1,90	1,24	0,92	0,59	0,36	0,25	0,13	0,07	0,04
	5000	12,1	10,9	9,12	7,58	5,90	3,48	2,01	1,43	1,15	0,73	0,47	0,34	0,18	0,08	0,04
	6000	13,2	11,6	9,78	8,05	6,23	3,89	2,23	1,78	1,47	1,07	0,72	0,48	0,25	0,11	0,05
	7000	14,6	12,5	10,5	8,53	6,61	4,01	2,43	2,09	1,73	1,34	0,95	0,62	0,33	0,14	0,07
8000	15,4	13,3	11,4	8,90	6,90	4,22	2,83	2,53	2,17	1,61	1,14	0,75	0,38	0,16	0,08	

$P_2$ , МПа	$\rho_{\text{ж}}$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)	x														
		-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
14	100	4,24	4,06	3,90	3,72	3,50	3,21	2,59	1,96	1,58	1,26	1,02	0,81	0,60	0,34	0,20
	500	4,68	4,40	4,18	3,88	3,55	3,25	2,64	2,09	1,56	1,27	1,02	0,32	0,30	0,19	0,12
	1000	6,00	5,59	4,98	4,09	3,38	2,69	2,05	1,47	1,02	0,75	0,30	0,22	0,10	0,07	0,05
	1500	6,79	6,15	5,19	4,36	3,41	2,58	1,81	1,20	0,77	0,20	0,14	0,12	0,05	0,04	0,03
	2000	7,19	6,47	5,39	4,50	3,63	2,69	1,75	1,12	0,60	0,18	0,11	0,09	0,06	0,04	0,03
	3000	7,82	7,03	6,14	5,39	4,24	2,89	1,83	1,08	0,60	0,28	0,20	0,15	0,08	0,05	0,03
	4000	8,33	7,46	6,49	5,71	4,50	2,99	2,03	1,31	0,85	0,59	0,37	0,25	0,13	0,07	0,03
	5000	8,98	7,65	6,59	5,73	4,91	3,21	2,16	1,51	1,06	0,75	0,47	0,33	0,17	0,08	0,04
	6000	9,83	8,17	6,74	5,86	4,96	3,46	2,58	1,99	1,42	1,08	0,71	0,47	0,24	0,10	0,05
	7000	11,4	9,45	7,17	6,01	4,99	3,61	2,68	2,26	1,75	1,34	0,92	0,60	0,32	0,14	0,06
8000	12,9	10,6	8,11	6,23	5,21	3,81	2,81	2,34	2,03	1,57	1,12	0,73	0,38	0,16	0,08	
16	100	3,43	3,31	3,15	3,00	2,80	2,55	2,10	1,59	1,25	1,02	0,85	0,62	0,42	0,24	0,17
	500	3,76	3,55	3,39	3,15	2,82	2,53	2,18	1,60	1,26	0,93	0,60	0,39	0,29	0,13	0,09
	1000	4,79	4,47	4,00	3,46	2,76	2,20	1,63	1,04	0,81	0,53	0,33	0,19	0,09	0,06	0,05
	1500	5,41	4,73	4,17	3,66	2,94	2,11	1,51	1,01	0,67	0,36	0,17	0,13	0,07	0,05	0,03
	2000	5,81	5,02	4,35	3,78	3,07	2,25	1,62	1,12	0,72	0,24	0,17	0,13	0,08	0,05	0,03
	3000	6,86	5,97	5,43	4,89	3,75	2,61	1,86	1,27	0,82	0,48	0,30	0,22	0,11	0,06	0,03
	4000	7,57	6,69	5,88	5,30	4,14	2,76	2,16	1,56	1,03	0,71	0,45	0,30	0,14	0,06	0,03
	5000	8,25	7,18	6,18	5,53	4,56	3,02	2,29	1,78	1,22	0,89	0,57	0,38	0,18	0,07	0,03
	6000	9,06	7,71	6,38	5,61	4,62	3,38	2,80	2,19	1,60	1,18	0,76	0,49	0,25	0,10	0,05
	7000	9,83	8,57	6,87	5,88	4,68	3,51	2,89	2,30	1,80	1,38	0,93	0,61	0,31	0,14	0,06
8000	10,6	9,24	7,42	6,07	4,74	3,66	2,93	2,36	1,94	1,54	1,10	0,72	0,37	0,16	0,07	

Т а б л и ц а П.16  
**Граничные паросодержания  $x_{гр}$  при кипении воды в круглой трубе диаметром 8 мм [20]**

$\rho_w,$ кг/(м <sup>2</sup> ·с)	$p, \text{ МПа}$									
	3	5	7	10	12	14	16			
350	–	0,93–0,97	0,93–0,97	0,80–0,98	0,77–0,89	0,60–0,80	0,60–0,66			
500	–	0,87–0,95	0,87–0,97	0,76–0,86	0,62–0,65	0,52–0,66	0,52–0,60			
750	0,70–0,81	0,75–0,84	0,78–0,83	0,62–0,70	0,54–0,61	0,45–0,56	0,33–0,54			
1000	0,64–0,70	0,65–0,76	0,62–0,74	0,52–0,60	0,45–0,52	0,40–0,47	0,30–0,42			
1500	0,54	0,50–0,59	0,50–0,56	0,39–0,44	0,33–0,39	0,28–0,38	–			
2000	0,47	0,42–0,50	0,39–0,46	0,32–0,40	0,27–0,35	0,33	–			
2500	0,42	0,36–0,45	0,34–0,43	0,28–0,35	0,23–0,37	–	–			
3000	0,38	0,32–0,42	0,33–0,41	0,25–0,35	–	–	–			
4000	0,33	0,30	–	–	–	–	–			
5000	0,29	0,26	–	–	–	–	–			

Критический тепловой поток  $q_{кр}$  (МВт/м<sup>2</sup>) при кипении воды в сборках твэлов с треугольной упаковки (тепловой диаметр  $d_t = 9,36$  мм; относительный шаг решетки  $s/d_t = 1,4$ ;  $L/d_t > 300$ ) [13]

$P$ , МПа	$\rho_w$ , кг/(м <sup>3</sup> ·с)	x														
		-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
12	500	3,51	3,22	3,01	2,79	2,55	2,21	1,95	1,69	1,48	1,13	0,83	0,61	0,46	0,40	0,30
	1000	4,46	4,09	3,69	3,24	2,74	2,30	1,93	1,55	1,15	0,77	0,52	0,37	0,26	0,22	0,18
	2000	6,79	5,49	5,21	4,20	3,22	2,44	1,89	1,35	0,86	0,49	0,31	0,23	0,16	0,13	0,12
	3000	8,39	7,12	6,15	4,91	3,52	2,57	1,86	1,28	0,79	0,46	0,31	0,22	0,15	0,12	0,10
	4000	8,74	7,45	6,52	5,22	3,64	2,51	1,75	1,22	0,80	0,51	0,36	0,25	0,16	0,12	0,09
5000	7,69	6,96	6,32	5,28	3,21	1,97	1,23	1,11	0,84	0,48	0,39	0,30	0,17	0,12	0,08	
14	500	3,44	3,24	3,07	2,84	2,54	2,22	1,85	1,60	1,27	0,98	0,69	0,50	0,37	0,32	0,26
	1000	4,19	3,96	3,61	3,08	2,54	2,09	1,70	1,34	0,97	0,63	0,42	0,30	0,21	0,18	0,17
	2000	6,45	5,60	4,80	3,83	2,90	2,30	1,77	1,26	0,80	0,44	0,29	0,20	0,15	0,13	0,12
	3000	7,55	6,33	5,45	4,25	3,17	2,41	1,83	1,26	0,79	0,48	0,31	0,22	0,15	0,12	0,10
	4000	7,08	6,13	5,39	4,36	3,19	2,39	1,76	1,23	0,82	0,54	0,37	0,25	0,16	0,12	0,09
5000	5,34	4,78	4,52	4,04	2,68	2,03	1,41	1,05	0,79	0,57	0,36	0,26	0,15	0,11	0,08	
16	500	3,18	2,87	2,71	2,53	2,26	1,95	1,69	1,40	1,13	0,85	0,60	0,43	0,33	0,30	0,26
	1000	3,65	3,35	3,05	2,67	2,15	1,76	1,44	1,11	0,83	0,55	0,36	0,25	0,19	0,17	0,16
	2000	5,02	4,58	4,02	3,22	2,53	2,04	1,64	1,21	0,79	0,46	0,27	0,19	0,14	0,12	0,11
	3000	6,02	5,14	4,45	3,54	2,74	2,21	1,75	1,28	0,86	0,52	0,35	0,23	0,15	0,12	0,11
	4000	5,84	4,90	4,32	3,56	2,71	2,20	1,74	1,30	0,89	0,62	0,42	0,28	0,17	0,12	0,09
5000	4,47	3,81	3,72	3,42	2,20	1,91	1,50	1,16	0,86	0,63	0,41	0,26	0,13	0,10	0,07	

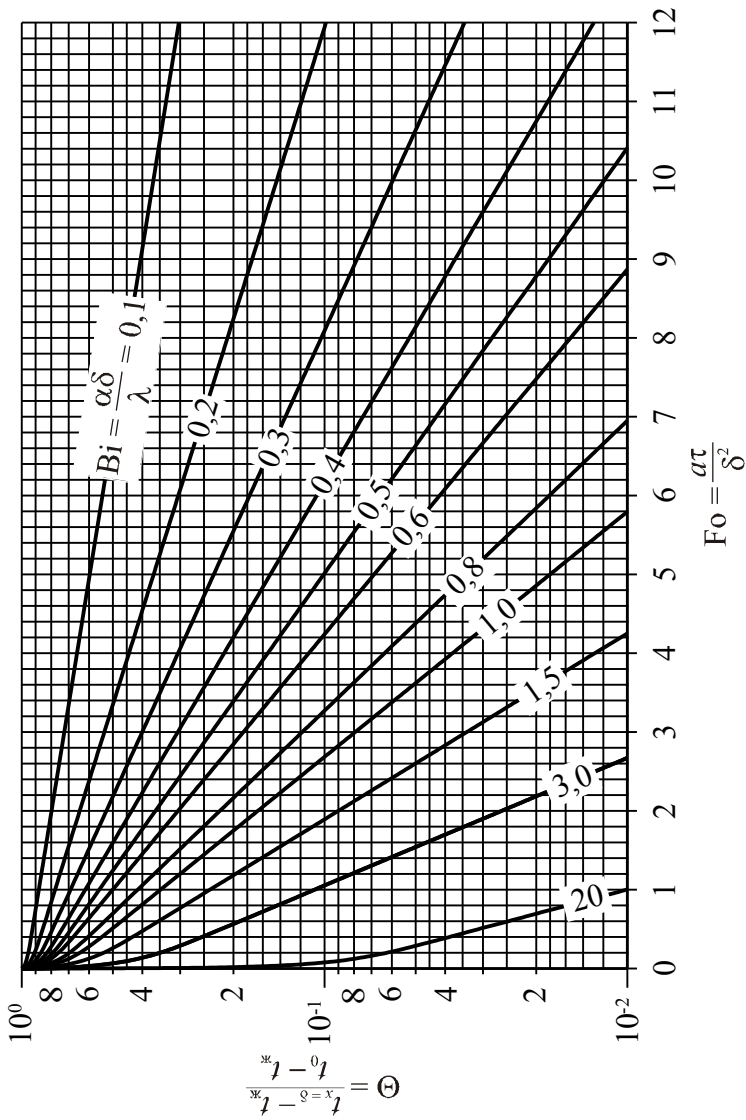


Рис. П.1.1. Номограмма для определения относительной избыточной температуры на поверхности неограниченной пластины



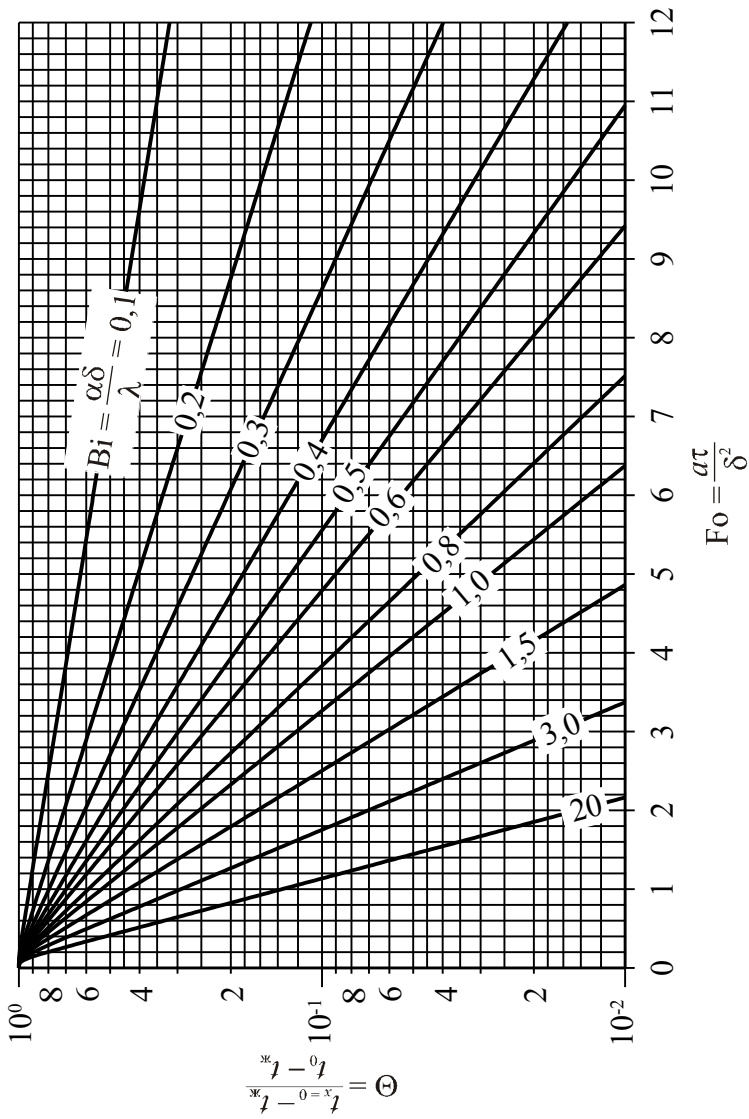


Рис. П.2. Номограмма для определения относительной избыточной температуры в середине неограниченной пластины

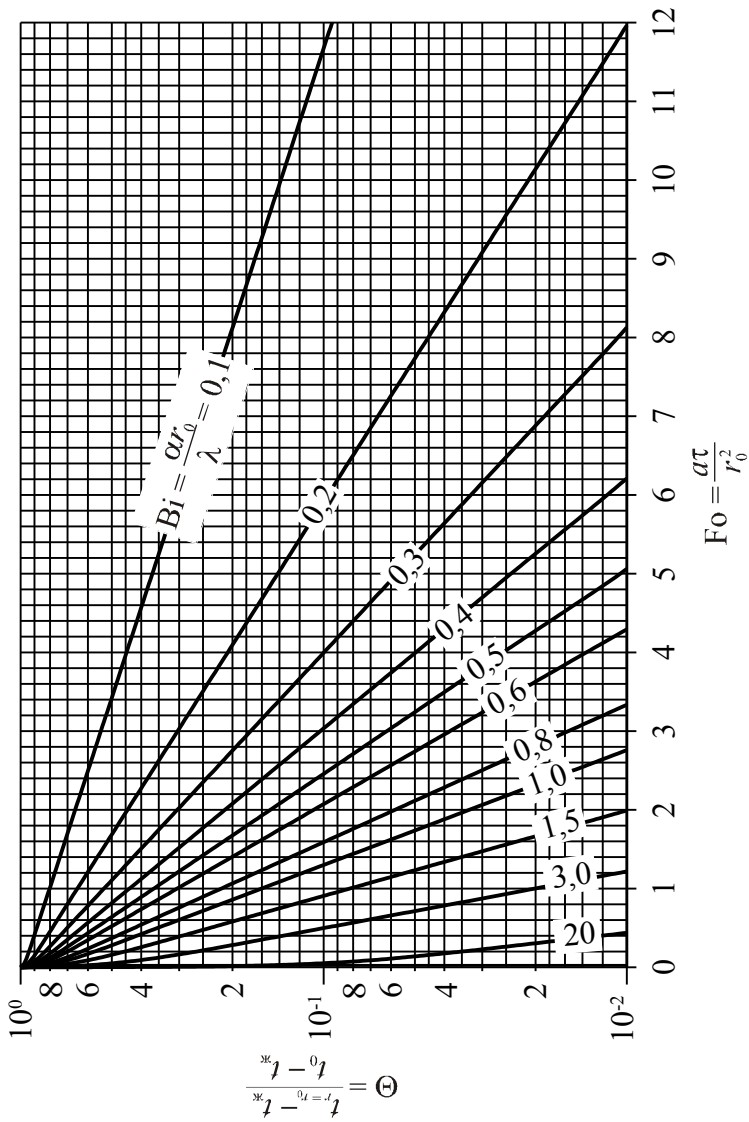


Рис. П.3. Номограмма для определения относительной избыточной температуры на поверхности неограниченного цилиндра

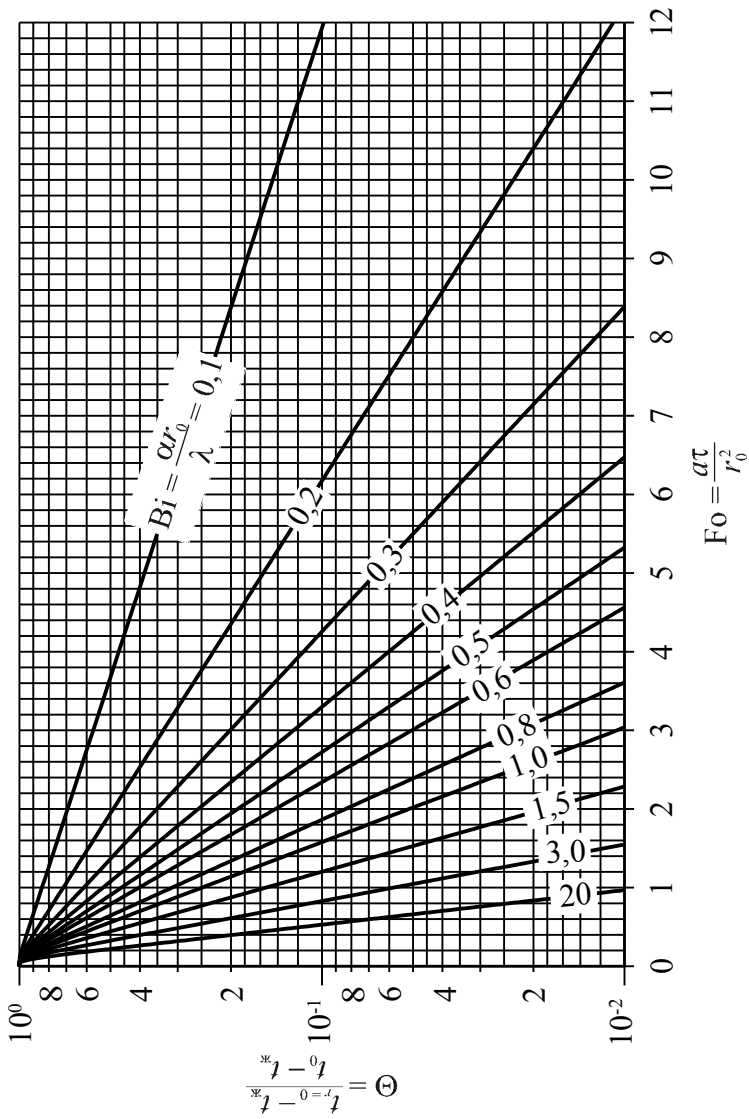


Рис. П.4. Номограмма для определения относительной избыточной температуры на оси неограниченного цилиндра

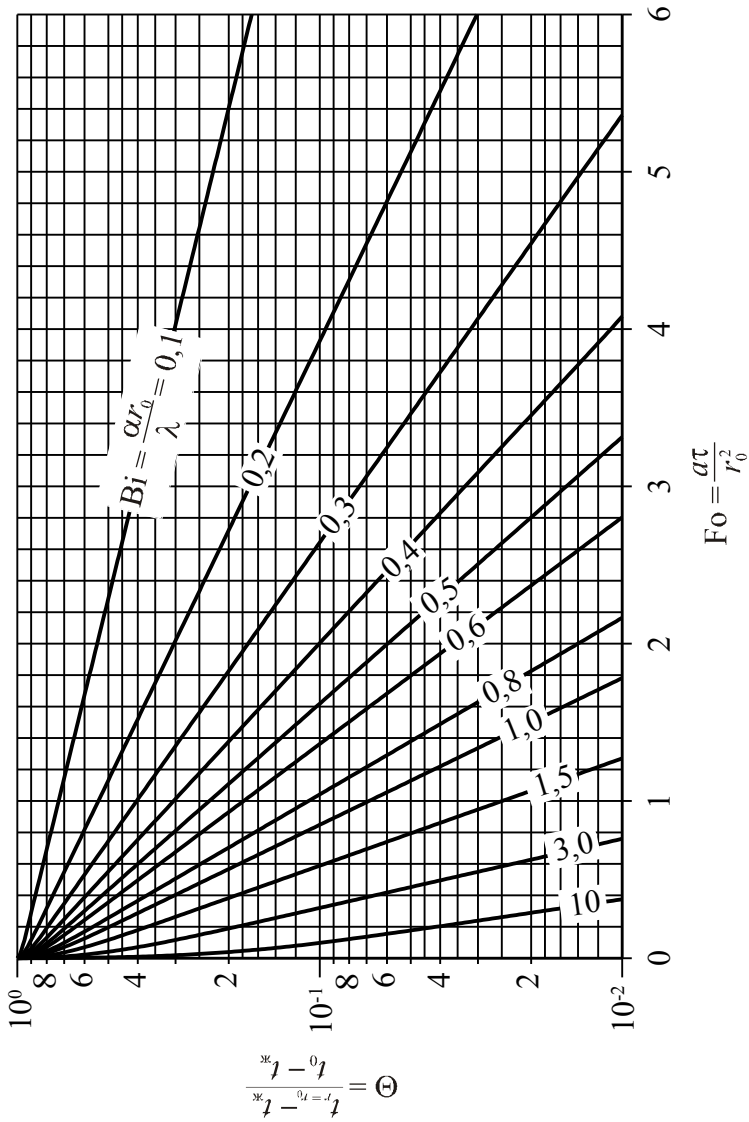


Рис. П.5. Номограмма для определения относительной избыточной температуры на поверхности шара

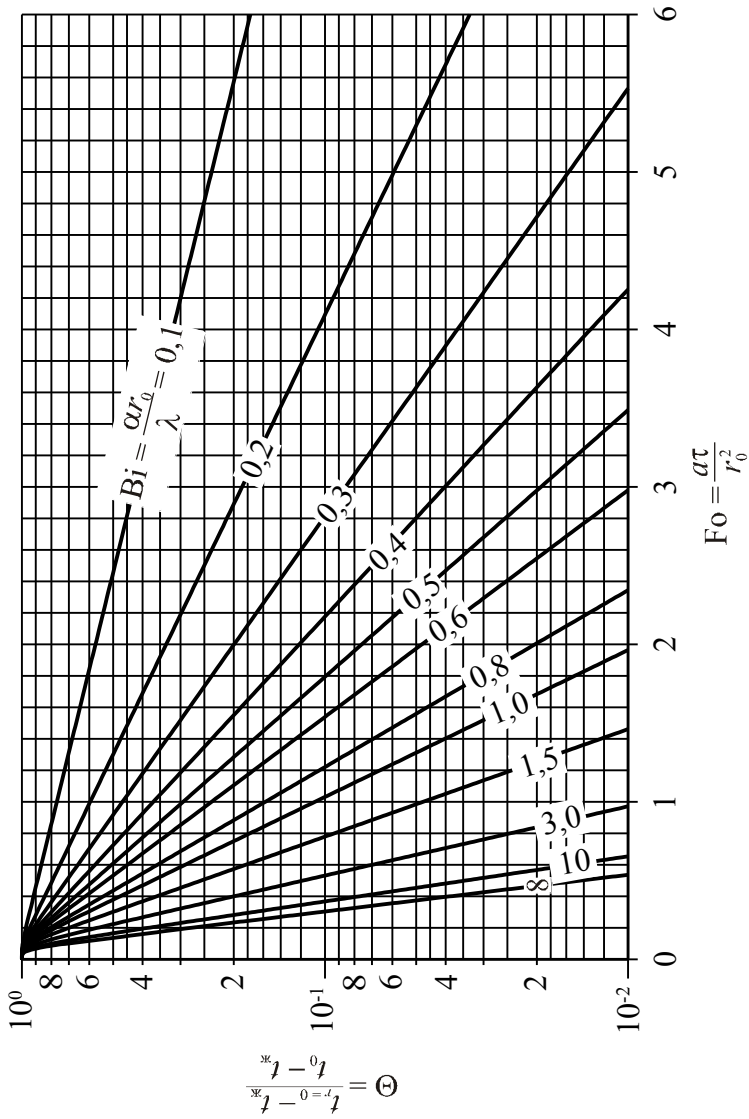


Рис. П.6. Номограмма для определения относительной избыточной температуры в центре шара

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веркин Б.И., Кириченко Ю.А., Русанов К.В. Теплообмен при кипении криогенных жидкостей. – Киев: Наукова думка, 1987. – 264 с.
2. Воскресенский К.Д. Сборник расчетов и задач по теплопередаче. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 168 с.
3. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета) / В.И. Субботин, М.Х. Ибрагимов, П.А. Ушаков и др. – М.: Атомиздат, 1975. – 408 с.
4. **Деев В.И. Теплопередача в ЯЭУ: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2004. – 188 с.**
5. Деев В.И., Меринов И.Г. Решение задач теплообмена на ЭВМ: Пособие к лабораторному практикуму по курсу «Теория тепломассопереноса». – М.: МИФИ, 2000. – 68 с.
6. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. – М.: Наука, 1982. – 472 с.
7. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 376 с.
8. **Кириллов П.Л., Богословская Г.П. Тепломассообмен в ядерных энергетических установках: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: ИздАт, 2008. – 256 с.**
9. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Учебное справочное пособие для студентов / Под общ. ред. П.Л. Кириллова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ИздАт, 2007. – 200 с.
10. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / Под общ. ред. П.Л. Кириллова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.
11. Краснощекоев Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. – М.: Энергия, 1980. – 288 с.
12. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
13. Критические тепловые потоки в условиях неравномерного энерговыделения в сборках твэлов в треугольной упаковке / В.П. Бобков, А.Д. Ефанов, И.П. Смогалева, Р.С. Пометько // Сб. трудов 4-й Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2005. Секция 2, доклад № 8. – 13 с.
14. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
15. Лыков А.В. Теория теплопроводности: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

16. Маслов Ю.А., Меринов И.Г., Рябов Н.О. Моделирование теплогидравлических процессов в реакторных установках и элементах теплообменного оборудования ЯЭУ: Лабораторный практикум. – М.: МИФИ, 2008. – 156 с.
17. Новиков И.И., Воскресенский К.Д. Прикладная термодинамика и теплопередача. – 2-е изд. – М.: Атомиздат, 1977. – 352 с.
18. Похвалов Ю.Е., Деев В.И., Корсун А.С. Расходные и истинные характеристики паро-, газожидкостных потоков в каналах: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 1990. – 20 с.
19. Похвалов Ю.Е., Деев В.И., Корсун А.С. Истинное равновесное паро-, газосодержание при течении в канале: Учебное пособие. – М.: МИФИ, 1991. – 44 с.
20. Рекомендации по расчету кризиса теплоотдачи при кипении воды в равномерно обогреваемых круглых трубах. Научный совет по комплексной проблеме «Теплофизика». Препринт 1–57. – М.: КМС ОКБ ИВТАН, 1980. – 67 с.
21. Решение задач теплопроводности на ЭВМ: Пособие к лабораторному практикуму по курсу «Основы тепломассопереноса» / В.И. Деев, К.В. Куценко, А.А. Лаврухин, А.П. Никулин. – М.: МИФИ, 1999. – 64 с.
22. Справочник по физико-техническим основам криогеники / М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович, А.Б. Фрадков; Под ред. М.П. Малкова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.
23. Теория тепломассообмена: Учебник для вузов / С.И. Исаев, И.А. Кожин, В.И. Кофанов и др.; Под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Высшая школа, 1989. – 495 с.
- 24. Теплообмен в ядерных энергетических установках: Учебное пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. / Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалев, С.Л. Соловьев. – М.: МЭИ, 2003. – 548 с.**
25. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.
26. McCarty R.D. Thermophysical properties of helium-4 from 2 to 1500 K with pressures to 1000 atmospheres. NBS Technical Note 631, 1972. – 155 p.
27. The 2006 CHF look-up table / D.C. Groeneveld, J.Q. Shan, A.Z. Vasić et al // Nuclear Engineering and Design. 2007. Vol. 237. No. 15–17. P. 1909–1922.

**ТЕПЛООБМЕН  
В ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ**

**Сборник задач**

Под редакцией профессора В.И. Деева

Редактор М.В. Макарова

Подписано в печать 10.12.2009 Формат 60x84 1/16

Печ.л. 9,0. Уч.-изд.л. 9,0. Тираж 100 экз.

Изд. № 1/1/28. Заказ № 9

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».  
115409, г. Москва, Каширское ш., 31*

*ООО «Полиграфический комплекс «Курчатовский».  
144000, Московская область, г. Электросталь, ул. Красная, д. 42*