



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**БАШКИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра теплоэнергетики и физики

## **МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ**

для практических занятий по дисциплине

Б1.В.04 Основы теории теплообмена

Направление подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Профиль  
Электроснабжение

Уфа 2021

УДК 621.4  
ББК 31.3

Методическое пособие разработано  
канд. техн. наук, доцентом Инсафуддиновым С.З., канд. техн. наук, доцентом  
Харисовым Д.Д.

Рекомендовано к печати кафедрой теплоэнергетики и физики (протокол № 8/1 от  
«25» марта 2021 г.) и методической комиссией энергетического факультета (про-  
токол № 7/3 от «25» марта 2021 г.)

## Оглавление

Условные обозначения	4
1 Теплопроводность при стационарном режиме	5
1.1 Теплопроводность плоской стенки	5
1.2 Теплопроводность цилиндрической стенки	6
1.3 Теплопроводность шаровой стенки	6
1.4 Теплопроводность тел с внутренним источником теплоты	7
1.5 Примеры решения задач	8
1.5.1 Плоская стенка	8
1.5.2 Цилиндрические и шаровые стенки	10
2 Конвективный теплообмен	13
2.1 Общие сведения	13
2.2 Числа подобия	14
2.3 Свободная (естественная) конвекция	14
2.3.1 Примеры решения задач	15
2.4 Вынужденная конвекция	17
2.5 Конвективный теплообмен через зернистый слой	22
2.6 Теплоотдача суспензий	23
2.7 Теплообмен изменением агрегатного состояния	25
2.7.1 теплообмен при кипении	25
2.7.2 Теплообмен при конденсации	28
3 Расчет теплообмена излучением	35
4 Расчет теплообмена конвекцией и излучением	36
Приложения	38
Библиографический список	55

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$a$	- температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$ ;
$\alpha$	- коэффициент теплообмена (теплоотдачи), $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;
$\beta$	- коэффициент объемного расширения, $\text{К}^{-1}$ , коэффициент массоотдачи, $\text{м}/\text{с}$ ; коэффициент оребрения;
$c$	- массовая удельная теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;
$C_0$	- излучательная способность абсолютно черного тела, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;
$d$	- диаметр труб, м; влагосодержание воздуха, $\text{кг пара}/\text{кг сухого воздуха}$ ;
$D$	- диаметр ребра, масса пара, $\text{кг}/\text{с}$ ; коэффициент молекулярной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$ ;
$h, H$	- удельная энтальпия, $\text{кДж}/\text{кг}$ ; энтальпия, $\text{кДж}$ ; высота, м;
$g$	- ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$ ;
$r$	- удельная теплота парообразования, $\text{кДж}/\text{кг}$ ;
$\rho$	- плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$ ;
$p$	- давление, $\text{Па}$ ;
$I$	- сила тока, $\text{А}$ ;
$K$	- коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;
$K_l$	- линейный коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;
$K_{ш}$	- коэффициент теплопередачи шаровой стенки, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;
$l$	- длина, м; определяющий размер, м;
$L$	- длина, м; расход воздуха, $\text{кг}/\text{с}$ ( $\text{Нм}/\text{с}$ );
$m$	- масса, $\text{кг}$ ;
$m_t$	- массовый расход, $\text{кг}/\text{с}$ ( $\text{кг}/\text{ч}$ );
$V$	- объем, $\text{м}^3$ ;
$v$	- удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$ ;
$V_t$	- объемный расход, $\text{м}^3/\text{с}$ ( $\text{м}^3/\text{ч}$ );
$Q$	- теплота, $\text{Дж}$ ;
$q$	- удельная теплота, $\text{Дж}/\text{кг}$ ; поверхностная плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;
$q_l$	- линейная плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}$ ;
$q_{кр}$	- критическая плотность теплового потока, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;
$q_p$	- поверхностная плотность теплового потока ребристой стенки, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;
$\Phi$	- тепловой поток, $\text{Вт}$ ;
$Q_0$	- холодопроизводительность, $\text{Вт}$ ;
$q_0$	- удельная холодопроизводительность, $\text{Вт}/\text{кг}$ ;
$R$	- термическое сопротивление, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ ; радиус, м;
$R_l$	- линейное термическое сопротивление $(\text{м} \cdot \text{К})/\text{Вт}$ ;
$S$	- шаг труб, колбас и т.д., м;
$S_p$	- шаг ребер, м;
$t$ и $T$	- температура по шкале Цельсия, $^{\circ}\text{C}$ ; абсолютная температура, $\text{К}$ ;
$t_n$	- температура насыщения, $^{\circ}\text{C}$ ;
$t_p$	- температура точки росы, $^{\circ}\text{C}$ ;
$\delta$	- толщина, м;
$\omega$	- скорость движения, $\text{м}/\text{с}$ ;
$f$	- площадь поперечного сечения, $\text{м}^2$ ; площадь живого сечения, $\text{м}^2$ ;
$A_l$	- площадь поверхности теплообмена, $\text{м}^2$ ;
$\varepsilon$	- степень черноты, поправочный коэффициент;
$\theta$	- температурный напор, безразмерная избыточная температура;
$\lambda$	- теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;
$\gamma$	- кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$ ;
$\xi$	- концентрация, %; коэффициент влаговыделения;
$\zeta$	- поверхностное натяжение, $\text{Н}/\text{м}$ ; коэффициент испарения, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;
$\tau$	- время, с;
$\varphi$	- относительная влажность, %; степень оребрения;
$\mu$	- динамическая вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$ .

## 1 ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Теплопроводность – это процесс распространения теплоты за счет непосредственного соприкосновения микрочастиц тела (молекул, атомов, свободных электронов) за счет перемещения из области высокой температуры в область низкой температуры. Теплопроводность наблюдается в твердых, жидких и газообразных телах.

Основным законом теплопроводности является закон Фурье

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad} t; \quad (1.1)$$

$$\lambda = -\frac{\vec{q}}{\text{grad} t} = \frac{\Phi \cdot \Delta n}{A \tau \Delta t}, \quad (1.2)$$

где  $\Delta t$  – разность температур, °C;

$\Delta n$  – расстояние по нормали, м.

$$\lambda = \lambda_0 (1 + \epsilon(t - t_0)), \quad (1.3)$$

где  $\lambda_0$  – теплопроводность при температуре  $t_0$ , Вт/(м·K);

$\epsilon$  – постоянная, определяемая опытным путем.

$t$  – температура при определяемой  $\lambda$ , °C;

### 1.1 Теплопроводность плоской стенки

Для однородной плоской стенки поверхностная плотность теплового потока  $q_l$  (Вт/м²) определяется

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2), \quad (1.4)$$

где  $\frac{\lambda}{\delta}$  – тепловая проводимость стенки, Вт/(м²·K);

$\frac{\delta}{\lambda} = R_\lambda$  – внутреннее термическое сопротивление стенки, (м²·K)/Вт.

Температура для любой точки стенки определяется

$$t_x = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{\delta} \cdot x \quad (1.5)$$

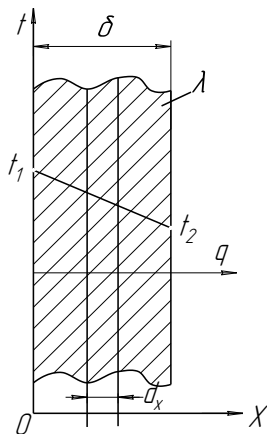


Рисунок 1.1 Схема теплового потока через однородную плоскую стенку

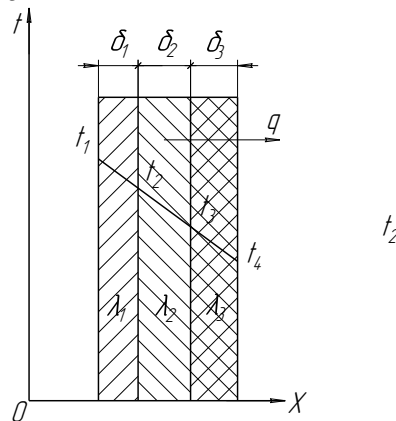


Рисунок 1.2 Схема теплового потока через многослойную стенку

Если зависимость теплопроводности от температуры носит линейный характер, то

$$q = -\lambda(t) \frac{dt}{dx} = -\lambda_0 (1 + \epsilon t) \frac{dt}{dx}; \quad (1.6)$$

$$q = \frac{\lambda_0}{\delta} (1 + \epsilon \frac{t_1 - t_2}{2}) (t_1 - t_2). \quad (1.7)$$

Если учесть зависимость  $\lambda$  от  $t$ , то

$$t_x = -\frac{1}{\epsilon} \sqrt{\left(\frac{1}{\epsilon} + t_1\right)^2 - \frac{2qx}{\epsilon \lambda_0}} \quad (1.8)$$

В общем случае 
$$t_x = t_1 - \frac{qx}{\lambda} \quad (1.9)$$

Поверхностная плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>, через многослойную плоскую стенку (рисунок 2)

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n (\delta_i / \lambda_i)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n R_{\lambda_i}} (t_1 - t_{n+1}) \quad (1.10)$$

Иногда для сокращения выкладки многослойную стенку рассчитывают как однородную толщиной  $\Delta$ . При этом в расчет вводится так называемая эквивалентная теплопроводность  $\lambda_{\text{экв}}$ .

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \dots + \delta_n}{\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3 + \dots + \delta_n / \lambda_n} \quad (1.11)$$

## 1.2 Теплопроводность цилиндрической стенки

Поверхностная плотность теплового потока через однослойную цилиндрическую стенку

$$q = \frac{2\pi\lambda l}{\ln(d_2 / d_1)} (t_1 - t_2) \quad (1.12)$$

Количество теплоты, проходящее через цилиндрическую стенку, может быть отнесено к единице длины  $l$ , либо к единице внутренней  $A_1$  или внешней  $A_2$  поверхности

$$q_l = \frac{\Phi}{l} = \frac{\pi(t_1 - t_2)}{(1/2\lambda)\ln(d_2 / d_1)} = \frac{2\pi\lambda(t_1 - t_2)}{\ln(d_2 / d_1)}; \quad (1.13)$$

$$q_{A_1} = \frac{\Phi}{A_1} = \frac{\Phi}{\pi d_1 l} = \frac{2\lambda(t_1 - t_2)}{d_1 \ln d_2 / d_1}; \quad (1.14)$$

$$q_{A_2} = \frac{\Phi}{A_2} = \frac{\Phi}{\pi d_2 l} = \frac{2\lambda(t_1 - t_2)}{d_2 \ln d_2 / d_1}; \quad (1.15)$$

$$t_x = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{\ln d_2 / d_1} \ln \frac{dx}{d_1}. \quad (1.16)$$

С учетом зависимости теплопроводности от температуры

$$t_x = -\frac{1}{\epsilon} + \sqrt{\left(\frac{1}{\epsilon} + t_1\right)^2 - \frac{\Phi}{\epsilon\pi\lambda_0 l} \ln \frac{dx}{d_1}}. \quad (1.17)$$

Линейная плотность теплового потока для многослойной стенки

$$q_l = \frac{\pi(t_1 - t_{n+1})}{\sum_{i=1}^n 1/\alpha\lambda_i \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}. \quad (1.18)$$

## 1.3 Теплопроводность шаровой стенки

Тепловой поток через однородную шаровую стенку определяется по формуле

$$\Phi = \frac{4\pi\lambda(t_1 - t_2)}{1/r_1 - 1/r_2} = \frac{2\pi\lambda(t_1 - t_2)}{1/d_1 - 1/d_2} = \pi\lambda(t_1 - t_2) \frac{d_1 d_2}{\delta}, \quad (1.19)$$

где  $\delta = (d_1 - d_2)/2$  – толщина стенки, м.

$$t_x = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{1/d_1 - 1/d_2} \left( \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_x} \right). \quad (1.20)$$

С учетом зависимости теплопроводности  $\lambda$  от температуры

$$t_x = -\frac{1}{\epsilon} + \sqrt{\left(\frac{1}{\epsilon} + t_1\right)^2 - \frac{\Phi}{\pi\lambda_0 \epsilon} \left( \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_x} \right)} \quad (1.21)$$

Расчет теплопроводности тел неправильной формы можно определить по формуле

$$\Phi = \frac{\lambda}{\delta} A_x \Delta t, \quad (1.22)$$

где  $A_x$  – расчетная поверхность тела, м<sup>2</sup>.

#### 1.4 Теплопроводность тел с внутренним источником теплоты

Для однородной плоской стенки с внутренним источником теплоты поверхностная плотность теплового потока  $q_x$ , Вт/м<sup>2</sup>.

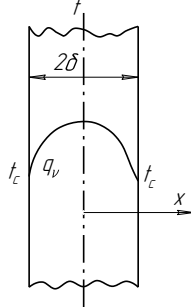


Рисунок 1.3 Плоская стенка с внутренним источником теплоты

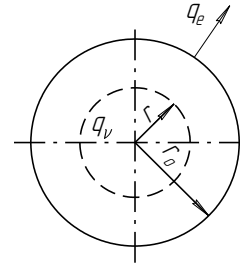


Рисунок 1.4 Круглый стержень с внутренним источником теплоты

$$q_x = q_v \cdot x = -\lambda \frac{dt}{dx}. \quad (1.23)$$

Температура

$$t_x = t_c + \frac{q_v \delta^2}{2\lambda} \left( 1 - \left( \frac{x}{\delta} \right)^2 \right). \quad (1.24)$$

С учетом зависимости теплопроводности  $\lambda$  от температуры

$$t_x = -\frac{1}{\epsilon} \sqrt{\left( t_o + \frac{1}{\epsilon} \right)^2 - \frac{q_v x^2}{\lambda_o \epsilon}}. \quad (1.25)$$

Для круглого стержня с внутренним источником теплоты (рисунок 1.4) поверхностная плотность теплового потока  $q_r$  изменяется пропорционально радиусу  $r$ :

$$q_r = \frac{1}{2} r q_v = -\lambda \frac{dt}{dr}. \quad (1.26)$$

Температура

$$t_x = t_o - \frac{q_v \cdot r_o^2}{4\lambda} \left( 1 - \left( \frac{r}{r_o} \right)^2 \right), \quad (1.27)$$

где  $t_o$  – температура при  $r=0$ .

Перепад температуры по радиусу стержня:

$$t_o - t_c = \frac{q_v r^2}{4\lambda} = \frac{q_e}{4\pi\lambda}, \quad (1.28)$$

где  $q_e = q_v \pi r_o^2$ .

С учетом зависимости теплопроводности  $\lambda$  от температуры

$$t_x = -\frac{1}{\epsilon} \sqrt{\left( 1/\epsilon + t_o \right)^2 - \frac{q_v r^2}{2\epsilon\lambda_o}}. \quad (1.29)$$

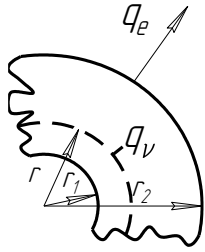


Рисунок 1.5 Цилиндрическая стенка с внутренним источником теплоты

Для цилиндрической стенки с внутренним источником теплоты линейная плотность теплового потока  $q_e$  и температура  $t_x$  зависят от способа отвода теплоты.

а) Теплота отводится через внешнюю поверхность цилиндра.

$$q_e = -2\pi r \lambda \frac{dt}{dr} = q_v \pi (r^2 - r_1^2). \quad (1.30)$$

Температура

$$t_x = t_1 - \frac{q_v r_1^2}{4\lambda} \left( \left( \frac{r}{r_1} \right)^2 - 2 \ln \frac{r}{r_1} - 1 \right). \quad (1.31)$$

При  $r=r_2$

$$t_1 - t_2 = \frac{q_e}{4\pi\lambda} \left( 1 - \frac{2r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right). \quad (1.32)$$

С учетом зависимости теплопроводности  $\lambda$  от температуры

$$t_x = -\frac{1}{\epsilon} \sqrt{\left( \frac{1}{\epsilon} + t_1 \right)^2 - \frac{q_v \cdot r^2}{2\epsilon\lambda_o} \left( \left( \frac{r}{r_1} \right)^2 - 2 \ln \frac{r}{r_1} - 1 \right)}. \quad (1.33)$$

б) теплота отводится через внутреннюю поверхность цилиндра

$$t_x = t_2 - \frac{q_v \cdot r_2^2}{4\lambda} \left( \left( \frac{r}{r_2} \right)^2 - 2 \ln \frac{r}{r_2} - 1 \right); \quad (1.34)$$

$$t_2 - t_1 = \frac{q_e}{4\pi\lambda} \left( \frac{2r_2^2}{r_1^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} - 1 \right). \quad (1.35)$$

С учетом зависимости теплопроводности  $\lambda$  от температуры

$$t_x = -\frac{1}{\epsilon} + \sqrt{\left( \frac{1}{\epsilon} + t_2 \right)^2 - \frac{q_v r_2^2}{2\epsilon \cdot \lambda_o} \left( 2 \ln \frac{r_2}{r_1} + \left( \frac{r}{r_2} \right)^2 \right)} - 1. \quad (1.36)$$

## 1.5 Примеры решения задач

### 1.5.1 Плоская стенка

**Пример 1.1** Стенка из красного кирпича длиной 15 м, высотой 3,5 м и толщиной 0,63 м имеет теплопроводность 0,81 Вт/(м·К). Температура на внутренней поверхности стенки 18°C, а на наружной - 30°C.

Определить поверхностную плотность теплового потока, тепловой поток, а также потери теплоты через стенку в течение суток.

**Решение.** Поверхностная плотность теплового потока

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) = \frac{0,81}{0,63} (18 - (-30)) = 61,71 \text{ Вт/м}^2.$$

Тепловой поток

$$\Phi = q \cdot A = 61,71 \cdot 15 \cdot 3,5 = 3240 \text{ Вт}$$

Потери теплоты через стенку в течении суток.

$$Q = \Phi \cdot \tau = 3240 \cdot 24 \cdot 3600 = 279,936 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 279,936 \text{ МДж}$$

### Пример 1.2

Плоская стенка топки выполнена из шамотного кирпича толщиной 250 мм. Температура внутренней поверхности стенки  $t_1=1350^\circ\text{C}$ , наружной  $t_2=50^\circ\text{C}$ . Теплопроводность шамотного кирпича зависит от температуры и определяется зависимостью  $\lambda=\lambda_o(1+\epsilon t)=0,838(1+7 \cdot 10^{-4}t)$ . Построить график распределения температуры в стенке при  $x=0,50; 100; 150; 200$  и 250 мм.



*Решение.* В случае линейной зависимости теплопроводности от температуры поверхностная плотность теплового потока

$$q = \frac{\lambda_{cp}}{\delta} (t_1 - t_2),$$

$$\text{где } \lambda_{cp} = \lambda_o (1 + \epsilon \frac{t_1 - t_2}{2}) = 0,838(1 + 7 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5(1350 + 50)) = 1,249 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

$$\text{Тогда } q = \frac{1,249}{0,250} (1350 - 50) = 6492,8 \text{ Вт/м}^2.$$

Температура на любом расстоянии  $x$  от поверхности стенки определяем по формуле

$$t_x = \sqrt{\left(\frac{1}{\epsilon} + t_1\right)^2 - \frac{2qx}{\lambda_o \epsilon} - \frac{1}{\epsilon}} = \sqrt{\left(\frac{1}{7 \cdot 10^{-4}} + 1350\right)^2 - \frac{2 \cdot 6492,8 \cdot x}{0,838 \cdot 7 \cdot 10^{-4}} - \frac{1}{7 \cdot 10^{-4}}}$$

$$= \sqrt{7,717284 - 22,137061 \cdot x - 1,43 \cdot 10^3}$$

$x, \text{ мм}$	0	50	100	150	200	250
$t, ^\circ\text{C}$	1350	1141	916	667	384	50

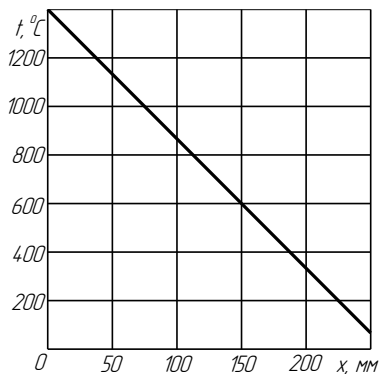


Рисунок 1.6

*Пример 1.3* Поверхность теплообменного аппарата  $12,0 \text{ м}^2$ ; стенка состоит из нержавеющей стали  $\lambda_{н.с.} = 15,1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ;  $\delta_{н.с.} = 8 \text{ мм}$ ; слоя стеклянной ваты  $\lambda_{с.в.} = 0,037 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ;  $\delta_{с.в.} = 60 \text{ мм}$ ; деревянной обшивки из сосновых досок  $\lambda_{с.д.} = 0,107 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ;  $\delta_d = 20 \text{ мм}$  и слоя масляной краски  $\lambda_{к.} = 0,29 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ;  $\delta_k = 1 \text{ мм}$ .

Температура внутренней поверхности аппарата  $t_I = 180^\circ\text{C}$ , наружной поверхности изоляции  $t_{III} = 82^\circ\text{C}$ .

Определить эквивалентную теплопроводность многослойной стенки, тепловой поток через стенку и температуру на наружной поверхности обшивки.

*Решение.* Эквивалентная теплопроводность многослойной стенки

$$\lambda_{экв} = \frac{\delta_{н.с.} + \delta_{с.в.} + \delta_d + \delta_k}{\delta_{н.с.} / \lambda_{н.с.} + \delta_{с.в.} / \lambda_{с.в.} + \delta_d / \lambda_d + \delta_k / \lambda_k} = \frac{0,008 + 0,06 + 0,02 + 0,001}{\frac{0,008}{15,1} + \frac{0,06}{0,037} + \frac{0,02}{0,107} + \frac{0,001}{0,29}}$$

$$= \frac{0,089}{1,81} = 0,0492 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

$$q = \frac{\lambda_{н.с.}}{\delta_{н.с.}} (t_I - t_{II}) = \frac{\lambda_{с.в.}}{\delta_{с.в.}} (t_{II} - t_{III}) \text{ из данного уравнения находим}$$

$$t_{II} = \frac{(\lambda_{н.с.} / \delta_{н.с.}) t_I + (\lambda_{с.в.} / \delta_{с.в.}) t_{III}}{\lambda_{н.с.} / \delta_{н.с.} + \lambda_{с.в.} / \delta_{с.в.}} = \frac{(15,1 / 0,008) \cdot 180 + (0,037 / 0,06) \cdot 82}{15,1 / 0,008 + 0,037 / 0,06} = 179,96^\circ\text{C}.$$

$$q = \frac{\lambda_{н.с.}}{\delta_{н.с.}} (t_I - t_{II}) = \frac{15,1}{0,008} (180 - 179,968) = 60,4 \text{ Вт/м}^2.$$

$$q = A \cdot q = 12 \cdot 60,4 = 724,8 \text{ Вт}.$$

Определяем температуру наружной поверхности обшивки

$$q = \frac{\lambda_d}{\delta_d} (t_{III} - t_w) \quad t_{III} = t_w - \frac{q \cdot \delta_d}{\lambda_d} = 82 - \frac{60,4 \cdot 0,02}{0,107} = 70,71^\circ\text{C}$$

Определяем температуру на поверхности краски

$$t_V = t_{IV} - \frac{q \cdot \delta_k}{\lambda_k} = 70,71 - \frac{60,4 \cdot 0,001}{0,29} = 70,5^\circ\text{C}.$$

Определяем тепловой поток через эквивалентную теплопроводность  $\lambda_{экв}$ .

$$Q = A \cdot \frac{\lambda_{экв}}{\Delta} (t_I - t_V) = \frac{0,0492}{0,089} (180 - 70,5) \cdot 12 = 726,39 \text{ Вт}$$

## ЗАДАЧИ

**1.1** Определить теплопроводность материала стенки, если при толщине ее  $\delta=61$  см и разности температур на поверхностях  $\Delta t=50^\circ\text{C}$  поверхностная плотность теплового потока  $q=67$  Вт/м<sup>2</sup>.

**1.2** В сушильную камеру со стенками толщиной 250 мм из строительного кирпича  $\lambda_{с.к.}=0,77$  Вт/(м·К) с горячим воздухом подводится тепловой поток 650 кВт; 95% этого количества теплоты используется при сушке и затем отводится с рециркулирующим воздухом, а остальное теряется через стенки камеры поверхностью 210 м<sup>2</sup>. Температура наружной поверхности камеры 35°C.

Определить температуру на внутренней поверхности сушильной камеры.

**1.3** Холодильная камера отделена от цеха стенкой из строительного кирпича толщиной 50 см.  $\lambda_{с.к.}=0,81$  Вт/(м·К), покрытой со стороны цеха штукатуркой  $\lambda_{шт.}=0,78$  Вт/(м·К), а со стороны камеры – шлаковой ватой  $\lambda_{ш.в.}=0,07$  Вт/(м·К) и такой же штукатуркой. Толщина каждого слоя штукатурки  $\delta_{шт.}=0,020$  м. Температура воздуха в цехе 20°C при относительной влажности  $\varphi=70\%$ . Через стенку проникает тепловой поток 476,8 КДж на 1 м<sup>2</sup> за 8 часов.

Определить минимальную толщину слоя шлаковой ваты, при которой выпадение влаги на поверхность стенки со стороны цеха будет исключено.

**1.4** Для уменьшения тепловых потерь стеной здания и повышения температуры внутренней поверхности кирпичной стены во избежание сырости в помещении применена изоляция слоем пенопласта толщиной 50 мм в вариантах.

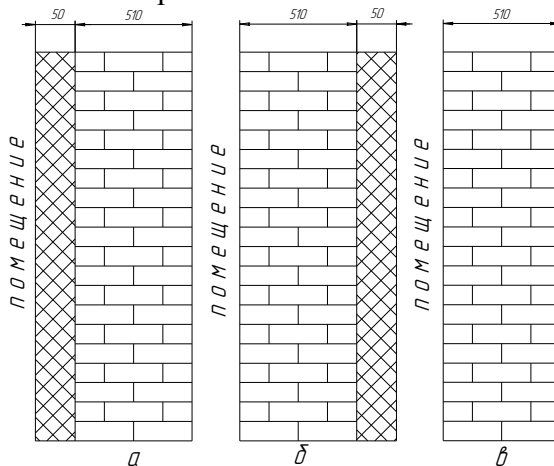


Рисунок 1.7 Варианты применения изоляции стены здания слоем пенопласта.

Определить процент сэкономленной теплоты по сравнению с вариантом в; температуру кирпичной стены со стороны помещения в случае а, и кирпичной стены со стороны наружной поверхности в случае а и б. теплопроводность кирпичной кладки  $\lambda_{кир}=0,81$  Вт/(м·К), пенопласта  $\lambda_{пн}=0,06$  Вт/(м·К). Температура внутренней стенки 18,5°C, наружной стенки -7°C.

### 1.5.2 Цилиндрические и шаровые стенки

**Пример 1.4** Стальной змеевик ( $\lambda_{ст}=50$  Вт/(м·К), теплообменного аппарата, изготовленный из трубы диаметром 45/40 мм и длиной 6,7 м требуется заменить латунным змеевиком диаметром 38/39 мм ( $\lambda_{лат}=85,5$  Вт/(м·К)). Разность температур на поверхностях стального змеевика  $\Delta t_{ст}=0,21^\circ\text{C}$ , латунного  $\Delta t_{лат}=0,1^\circ\text{C}$ . Какова должна быть длина латунного змеевика, чтобы общее количество передаваемой теплоты после замены змеевика осталось прежним?

**Решение.** Определим линейный тепловой поток  $\Phi_e$  по формуле:

$$\Phi_e = \frac{2\pi \cdot \lambda_{ст} (t_1 - t_2)}{\ln \frac{d_{2ст}}{d_{1ст}}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 6,7 \cdot 0,21}{\ln(45/40)} = \frac{441,8}{1,178} = 375 \text{ Вт.}$$

Длина латунной трубки равно:

$$l_{лат} = \frac{\Phi_e \cdot \ln(d_{2лат}/d_{1лат})}{2\pi \cdot \lambda_{лат} \cdot \Delta t_{лат}} = \frac{375 \cdot \ln(38/37)}{2 \cdot 3,14 \cdot 85,5 \cdot 0,1} = \frac{529}{53,69} = 9,85 \text{ м}$$

**Пример 1.5** Паропровод диаметром 180/170 мм ( $\lambda_{cm}=50\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ) покрыта изоляцией толщиной 50 мм из минеральной ваты с теплопроводностью  $\lambda_{mv}=0,07\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Определить потери теплоты с 1 погонного метра паропровода и температуру наружной поверхности трубы, если температура на внутренней поверхности трубы  $175^\circ\text{C}$ , наружной поверхности изоляции  $50^\circ\text{C}$ .

**Решение.** Линейная плотность теплового потока

$$q_l = \frac{2\pi(t_1 - t_{n.н.})}{\sum \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_i}{d_{i+1}}} = \frac{3,14 \cdot 2(175 - 50)}{\frac{1}{50} \ln \frac{180}{170} + \frac{1}{0,07} \ln \frac{280}{180}} = \frac{6,28 \cdot 125}{1,143 \cdot 10^{-3} + 6,312} = 124,34 \text{ Вт/м.}$$

Температуру наружной поверхности стальной трубы определяем из равенства

$$q = \frac{2\pi(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda_{cm}} \ln \frac{d_2}{d_1}}; \quad t_2 = t_1 - \frac{q \left( \frac{1}{\lambda_{cm}} \ln \frac{d_2}{d_1} \right)}{2\pi} = 175 - \frac{124,34 \frac{1}{50} \ln \frac{180}{170}}{2 \cdot 3,14} = 175 - 0,0226 = 174,977^\circ\text{C}.$$

**Пример 1.6** Для определения теплопроводности материала шаровым методом испытуемый материал закладывается в зазор между двумя концентрично расположенными тонкими шаровыми стенками из теплопроводного материала. Внутренняя стенка обогревается изнутри электроспиралью, поверхность наружной стенки охлаждается воздухом.

Рассчитать теплопроводность мяса, если наружный диаметр внутренней шаровой стенки  $d_1=80$  мм, внутренний диаметр наружной стенки 150 мм. Температура на наружной поверхности внутренней стенки  $t_1=85^\circ\text{C}$ , на внутренней поверхности наружной стенки  $t_2=33^\circ\text{C}$ . Сила тока в обогревателе 1,05 А при напряжении 24В.

**Решение.** Определяем общее количество выделяемой теплоты электронагревателем за единицу времени  $\Phi$ , Вт

$$\Phi = J \cdot U = 1,05 \cdot 24 = 25,2 \text{ Вт}$$

Исходя из уравнения теплового потока для шаровой стенки

$$\Phi = \frac{4\pi\lambda_m(t_1 - t_2)}{(1/r_1 - 1/r_2)} \text{ находим теплопроводность мяса } \lambda_m.$$

$$\lambda_m = \frac{\Phi(1/r_1 - 1/r_2)}{4\pi(t_1 - t_2)} = \frac{25,2(1/0,04 - 1/0,025)}{4 \cdot 3,14(85 - 33)} = 0,45 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$$

**Пример 1.7** Электрический нагреватель выполнен из нихромовой проволоки диаметром  $d=1,0$  мм и длиной  $l=5$  мм. Нагреватель передает теплоту окружающей среды с температурой  $20^\circ\text{C}$ . Вычислить тепловой поток с 1 погонного метра нагревателя, а также температуры на поверхности и оси проволоки, если сила тока, проходящего через нагреватель 6,0 а, удельные электрические сопротивления нихрома  $\rho=1,1 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ , теплопроводность нихрома  $\lambda=17,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , коэффициент теплоотдачи от поверхности нагревателя к воздуху окружающей среды  $\alpha=10,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

**Решение.** Определим электрическое сопротивление нагревателя

$$R = \frac{\rho \cdot l}{\pi r^2} = \frac{1,1 \cdot 10^5}{3,14 \cdot 0,5^2} = 7,0 \text{ Ом.}$$

Тепловой поток, выделяемый нагревателем,

$$\Phi = J^2 \cdot R = 6^2 \cdot 7 = 252 \text{ Вт.}$$

Линейная плотность теплового потока проволоки

$$q_l = \Phi / l = 252 / 10 = 25,1 \text{ Вт/м.}$$

Из условия теплоотдачи по закону Ньютона-Рихмана определяем температуру на поверхности проволоки

$$t_c = t_{жс} + \frac{q_l}{\pi d \cdot \alpha} = 20 + \frac{25,2}{3,14 \cdot 10^{-3} \cdot 10,5} = 784,33^\circ\text{C}.$$

Из условия теплопроводности при наличии внутренних источников теплоты по формуле (1,25) определяем температуру на оси проволоки

$$t_o = t_e + \frac{q_v \cdot r^2}{4\lambda} = t_e + \frac{q_e}{4\pi\lambda} = 784,33 + \frac{25,2}{4 \cdot 3,14 \cdot 17,5} = 784,44 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

### ЗАДАЧИ

**1.7** Стальной паропровод диаметром 108/89 мм ( $\lambda_l=50 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) имеет трех слойную изоляцию. Толщина первого слоя  $\delta_2=25 \text{ мм}$  ( $\lambda_2=0,06 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ), второго -  $\delta_3=35 \text{ мм}$  ( $\lambda_3=0,07 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) и третьего -  $\delta_4=4 \text{ мм}$  ( $\lambda_4=0,116 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ).

Температура на внутренней поверхности трубы  $180^\circ\text{C}$ , на наружной поверхности третьего слоя  $t_s=50^\circ\text{C}$ . Определить линейную плотность теплового потока и температуры на поверхностях стенки и слоя изоляции.

**1.6** Змеевик испарителя холодильной машины изготовлен из труб нержавеющей стали диаметром 40/34 мм ( $\lambda_{н.с.}=20,9 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ). Змеевик погружен в раствор Na Cl концентрацией 18,8% по массе соли к массе раствора.

Внутри змеевика испаряется холодильный агент, охлаждающий внутреннюю поверхность трубы до  $-15,8^\circ\text{C}$ . Линейная плотность теплового потока от раствора к холодильному агенту составляет  $207 \text{ Вт/м}$ .

Будет ли испаритель при данном режиме охлаждения и концентрации раствора работать нормально или раствор будет замерзать на наружной поверхности труб.

**1.7** Электронагреватель электрокотла для получения пара выполнен в виде нихромовой спирали на фарфоровом стержне, помещенный внутри фарфоровой трубки диаметром 50/44 мм длиной 1 м ( $\lambda_\phi=1,04 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) имеет мощность 3,5 кВт. Разность между температурами наружной поверхности трубы и кипящей воды  $7,6^\circ\text{C}$ . Рассчитать температуру на внутренней поверхности трубы электронагревателя при давлении в котле 700 кПа.

**1.8** Рассчитать плотность теплового потока на  $1 \text{ м}^2$  поверхности стальных труб ( $\lambda_{ст.}=50 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) различных диаметров: 6/2; 10/6; 20/16; 30/26 мм, при условии, что температура поверхностей всех труб одинаковая и составляет  $0,2^\circ\text{C}$ .

Расчет произвести по формуле для плоской стенки  $q_{пл}$  и полученный результат сравнить с соответствующей величиной  $q_{ср}$ , полученный для цилиндрической стенки.

**1.9** По плексигласовому трубопроводу диаметром 50/44 мм ( $\lambda_{плкс.}=0,184 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) течет пастеризованное молоко. Температура внутренней поверхности трубы  $t^I=80^\circ\text{C}$ . Температура молока понижается в среднем на  $1^\circ\text{C}$  на каждые 10 м длины при скорости движения  $\omega=0,4 \text{ м/с}$ . Удельная теплоемкость молока  $3893 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ , плотность  $\rho_m=1030 \text{ кг/м}^3$ . Определить температуру наружной поверхности трубы.

**1.10** Определить эквивалентную теплопроводность трехслойной цилиндрической стенки, который состоит из стальной трубы диаметром 50/40 ( $\lambda_{ст.}=45,3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ), покрытой слоем изоляции толщиной 20 мм ( $\lambda_{из.}=0,128 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ), затем слоем минеральной ваты толщиной 50 мм ( $\lambda_{мин.в.}=0,07 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ).

**1.11** Стальной трубопровод диаметром 60/50 мм ( $\lambda_{ст.}=45,4 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) холодильной установки имеет двухслойную изоляцию: слой минеральной ваты толщиной 20 мм ( $\lambda_{мин.в.}=0,041 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) и слой минеральной ваты  $\delta_{м.в.}=25 \text{ мм}$  ( $\lambda_{м.в.}=0,07 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ). Определить относительное значение в процентах каждого из изоляционных слоев и стенки трубы в общем изолирующем эффекте конструкции.

**1.12** Химический реактор, имеющий шаровую форму с наружным диаметром 950 мм имеет стенку толщиной 50 мм. Стена состоит из кварцевого стекла и нержавеющей стали с эквивалентной теплопроводностью  $\lambda=1,52 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Вследствие выделения теплоты при экзотермической реакции температура внутренней поверхности стенки стала  $210^\circ\text{C}$ , наружной -  $80^\circ\text{C}$ .

Определить удельную тепловую нагрузку наружной и внутренней поверхности реактора.

**1.13** Определить тепловые потери через стенку вращающегося шарообразного варочного котла, внутренний диаметр которого  $d_l=1,2 \text{ м}$ , а общая толщина стенки котла и слоя изоляции

$\delta=80$  мм. Температура внутренней поверхности  $150^{\circ}\text{C}$ , а внешней  $-40^{\circ}\text{C}$ , эквивалентная теплопроводность  $\lambda_{\text{экв.}}=0,1\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

**1.14** По нихромовому стержню диаметром 6 мм и длиной 500 мм проходит электрический ток. Разность потенциалов на кольцах стержня  $U=15$  В.

На поверхности стержня кипит вода под давлением  $p=0,5$  МПа.

Определить объемную производительность  $q_v$   $\text{Вт}/\text{м}^3$  внутренних источников теплоты, поверхностную плотность теплового потока  $q$   $\text{Вт}/\text{м}^2$ , линейную плотность теплового потока  $q_e$   $\text{Вт}/\text{м}$  и температуры на поверхности и оси стержня, если коэффициент теплообмена стержня и кипящей воды  $\alpha=45000\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , удельное сопротивление стержня  $\rho=1,17$  ( $\text{Ом}\cdot\text{мм}^2$ )/м.

**1.15** Допустимая нагрузка для алюминиевых шин прямоугольного сечения  $40\times 4$  мм, установленных на ребро, не должна превышать 520 А. Максимальная температура шины при температуре окружающего воздуха  $t_{\text{ж}}=25^{\circ}\text{C}$  должна быть не более  $t_o=70^{\circ}\text{C}$ .

Определить температуру поверхности шины и коэффициент теплообмена  $\alpha$  с её поверхности, чтобы температура шины не превышала  $70^{\circ}\text{C}$ .

Теплопроводность шины  $\lambda=202\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , удельное электрическое сопротивление алюминия  $\rho=0,295$  ( $\text{Ом}\cdot\text{мм}^2$ )/м.

*Пример 1.8* Трубка из нержавеющей стали обогревается электрическим током путем непосредственного включения в электрическую цепь. Длина трубки  $l=450$  мм, наружной диаметр 2,4 мм, внутренний 12 мм.

Определить перепад температур в стенке трубки и силу тока  $J$ , пропускаемого по трубке, если отводимый тепловой поток от внешней поверхности трубки  $\Phi=15$  кВт.

$\rho=0,85$  ( $\text{Ом}\cdot\text{мм}^2$ )/м;  $\lambda=18,6\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

*Решение.* Определяем электрическое сопротивление на единицу длины трубы

$$R_e = \frac{\rho}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} = \frac{0,85}{3,14(6,2^2 - 6^2)} = 0,111\text{Ом}/\text{м}$$

$$\text{Тогда } q_e = \frac{\Phi}{l} = \frac{15 \cdot 10^3}{0,45} = 33333,3\text{Вт}/\text{м}$$

$$q_e = J^2 \cdot R_e \text{ отсюда } J = \sqrt{\frac{q_e}{R_e}} = \sqrt{\frac{33333,3}{0,111}} = 548\text{А}$$

Перепад температур 1 стенки трубы

$$t_{c_2} - t_{c_1} = \frac{q_e r_2^2}{4\pi\lambda(r_2^2 - r_1^2)} \left( 2\ln \frac{r_2}{r_1} + \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 - 1 \right) =$$

$$\frac{33333,3 \cdot 0,0062^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 18,6(0,0062^2 - 0,0060^2)} \left( 2\ln \frac{6,2}{6,0} + \left( \frac{6,0}{6,2} \right)^2 - 1 \right) = 3,6^{\circ}\text{C}$$

*Пример 1.9* Трубка из нержавеющей стали с внутренним диаметром 10 мм и наружным диаметром 10,8 мм обогревается электрическим током путем непосредственного включения в цепь. Вся теплота отводится через внутреннюю поверхность трубки.

Вычислить объемную производительность источников теплоты  $q_v$  и перепад температур в стенке трубки, если по трубке течет ток силой 50 А  $\rho=0,65$  ( $\text{Ом}\cdot\text{мм}^2$ )/м;  $\lambda=16,6\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

## 2 КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

### 2.1 Общие сведения

Тепловой поток при конвективном теплообмене определяется по формуле:

$$\Phi = \alpha_k A \Delta t, \quad (2.1)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент теплообмена (теплоотдачи) конвекций, ( $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ).

Расчет коэффициента теплообмен выполняется в такой последовательности:

- по условиям развития конвекции выбирается зависимость между числами подобия (эта зависимость обобщает эксперименты, выполненные на моделях);
- рассчитываются числа подобия;

- рассчитывается коэффициент теплообмена (теплоотдачи), исходя из значения числа Нуссельта.

## 2.2 Числа подобия

Число подобия естественного (свободного) движения жидкости – число Грасгофа,

$Gr = \beta g \cdot \Delta t \cdot l^3 / \gamma^2$ , определяет подъемную силу.

Число подобия вынужденного движения жидкости – число Рейнольдса,  $Re = \omega \cdot l / \gamma$ , определяет режим движения теплоносителя.

Число Прандтля,  $Pr = \nu / a$ , число подобия физических свойств теплоносителя.

Число Нуссельта,  $Nu = \alpha \cdot l / \lambda$ , определяет интенсивность теплоотдачи, где  $l$  – размер, определяющий характер развития конвекции, м.

За этот размер принимают:

- для труб – диаметр,  $d$ ;

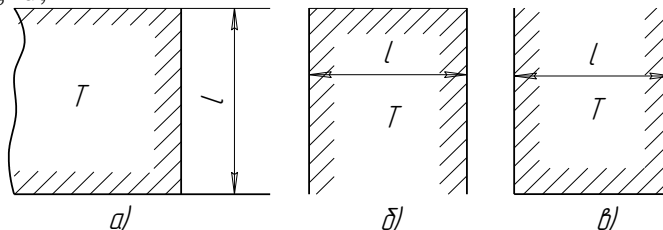


Рисунок 2.1 Схемы развития конвекции у поверхностей:  
а – вертикальный; б – верхний горизонтальный; в) нижний горизонтальный

- для замкнутых прослоек – зазор  $\delta$ ;

- для плоскостей (плит) – высота (рисунок 1а) или минимальный размер в плане (рисунок 1 б и в).

- для каналов – эквивалентный диаметр,  $d_{э\kappa\text{в}} = 4A/\Pi$ ,

где  $A$  – площадь живого сечения потока,  $\text{м}^2$ ;

$\Pi$  – полный (смоченный) периметр: независимо от того, какая часть этого периметра учитывается в теплообмене, м.

## 2.3 Свободная (естественная) конвекция

Расчет коэффициента теплообмена при свободном движении теплоносителя в большом объеме обычно ведут по критериальному уравнению вида

$$Nu = C(Gr_{жс} Pr_{жс})^m (Pr_{жс} / Pr_c)^{0,25} \quad (2.2)$$

где  $C$  и  $m$  – коэффициенты, зависящие от условий теплообмена.

Для газов можно считать  $Pr = \text{const}$ , а  $(Pr_{жс} / Pr_c) = 1$ , и поэтому все приведенные формулы упрощаются.

При вычислении чисел подобия физические параметры  $\gamma$ ,  $\lambda$ ,  $\alpha$  выбираются по средней температуре теплоносителя в объеме и у стенки:

$$t_{cp} = 0,5(t_{жс} + t_c).$$

Коэффициент объемного расширения газа  $\beta$  определяется по формуле  $\beta = \frac{1}{T_{оп}}$  или выбираются по приложениям для данного теплоносителя.

Среднее значение коэффициента теплообмена при естественной конвекции вертикальной поверхности можно получить из формулы (2.3)

$$\alpha_k = 1,66^3 \sqrt{\Delta t}, \quad (2.3)$$

где  $\Delta t = t_{жс} - t_c$  – перепад температур между температурой воздуха помещения и температурой поверхности стенки,  $^{\circ}\text{C}$ .

Для определения среднего значения  $\alpha_k$  при горизонтальном расположении поверхности, если греющая поверхность расположена внизу (рисунок 1 б) или холодная поверхность – сверху, можно пользоваться формулой

$$\alpha_k = 2,16^3 \sqrt{\Delta t}. \quad (2.4)$$

Таблица 2.1 Значения коэффициентов  $C$  и  $m$ 

Условия теплообмена	$C$	$m$	Определяющий размер
Вертикальные поверхности (трубы, пластины) $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^9$ (ламинарный режим)	0,76	0,25	длина трубы, высота пластины
$Gr \cdot Pr > 10^9$ (турбулентный режим)	0,15	0,33	длина трубы, высота пластины
Горизонтальная труба $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^8$	0,50	0,25	диаметр трубы
Для тел любой формы $0 = (Gr \cdot Pr)_{cp} < 10^{-3}$	0,50	0	Для труб и шара диаметр, а для плит - высота
$10^{-3} < (Gr \cdot Pr)_{cp} < 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125	
$5 \cdot 10^2 < (Gr \cdot Pr)_{cp} < 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25	
$2 \cdot 10^7 < (Gr \cdot Pr)_{cp} < 5 \cdot 10^{13}$	0,135	0,33	
Горизонтальная пластина при ламинарном режиме движения			короткая сторона пла- стины
охлаждение сверху	0,54	0,25	
охлаждение снизу	0,27	0,25	

Если греющая поверхность расположена вверх (рисунок 1 в) или холодная поверхность – вниз

$$\alpha_k = 1,16 \sqrt[3]{\Delta t}. \quad (2.5)$$

Расчет теплообмена в ограниченном объеме ведут по уравнениям теплопроводности, применяя эквивалентную теплопроводность

$$\lambda_{эkv} = \lambda \cdot \varepsilon_k, \quad (2.6)$$

где  $\varepsilon_k$  – коэффициент конвекции, который определяется в зависимости от произведения  $Gr \cdot Pr$

$$\begin{aligned} Gr \cdot Pr < 10^3 & \quad \varepsilon_k = 1; \\ 10^3 < Gr \cdot Pr < 10^6 & \quad \varepsilon_k = 0,105 (Gr \cdot Pr)^{0,3}; \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$10^6 < Gr \cdot Pr < 10^{10} \quad \varepsilon_k = 0,40 (Gr \cdot Pr)^{0,2}. \quad (2.8)$$

В приложенных расчетах вместо (2.7) и (2.8) для всей области значений аргументов  $Gr \cdot Pr > 10^3$  можно применить зависимость

$$\varepsilon_k = 0,18 (Gr \cdot Pr)^{0,25}, \quad (2.9)$$

### 2.3.1 Примеры решения задач

**Пример 2.1** Температура поверхностей вертикальной стенки высотой 3 м равна  $10^\circ\text{C}$ . Температура воздуха в помещении  $20^\circ\text{C}$ . Определить коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке.

**Решение.** Определяем значение критериев  $Gr$  и  $Pr$

$$Gr = \beta g l^3 \Delta t / \gamma^2; \quad Pr = \gamma / \alpha.$$

По таблице А1 приложения А по средней температуре  $t_{cp} = 0,5(t_c + t_g) = 15^\circ\text{C}$  определяем параметры воздуха  $\gamma$ ,  $\lambda$  и  $Pr$ .

$$\gamma_{жс} = 14,61 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad Pr_{жс} = 0,705; \quad \lambda_{жс} = 2,56 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

$$Gr = \frac{9,18 \cdot 3^3 \cdot 10}{288(14,61 \cdot 10^{-6})^2} = 4,31 \cdot 10^{10};$$

$$Gr \cdot Pr = 4,31 \cdot 10^{10} \cdot 0,705 = 3,03 \cdot 10^{10}$$

Режим движения воздуха турбулентный, так как  $Gr \cdot Pr > 10^9$ .

По формуле (2.2) подставляя вместо  $C$  и  $m$  их значения при вертикальной поверхности находим число Нуссельта

$$Nu = 0,15 (Gr \cdot Pr)^{0,33} (Pr_{жс}/Pr_c)^{0,25} = 0,15 (3,03 \cdot 10^{10})^{0,33} \cdot 1 = 431,48;$$

$$\alpha_{\kappa} = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{жс}}}{h} = \frac{431,48 \cdot 2,56 \cdot 10^{-2}}{3} = 3,68 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

По приближенной формуле (2.3) для вертикальной поверхности

$$\alpha_{\kappa} = 1,66 \sqrt[3]{\Delta t} = 1,66 \sqrt[3]{10} = 3,57 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

**Пример 2.2.** Определить теплопотери через окно с двойным остеклением размерами  $1,2 \times 1,4 \text{ м}^2$ , если расстояние между стеклами 120 мм, температура поверхности стекол  $18^\circ\text{C}$  и  $-15^\circ\text{C}$ .

**Решение.** Вычисляем эквивалентный коэффициент теплопроводности по формуле

$$\lambda_{\text{экв}} = \lambda \cdot \varepsilon_{\kappa},$$

где  $\lambda$  - действительный коэффициент теплопроводности воздуха, определяется по средней температуре воздуха по таблице А1 приложения А;

$\varepsilon_{\kappa}$  - коэффициент конвекции, являющийся функцией  $Gr \cdot Pr$ , который может приближенно вычислен по формуле  $\varepsilon_{\kappa} = 0,18(Gr \cdot Pr)^{0,25}$ .

За определяющий размер принимаем расстояние между стеклами  $\delta$ , за расчетную разность температур  $\Delta t = t_{c_1} - t_{c_2}$ , за определяющую температуру  $t_{\text{онр}} = 0,5(t_{c_1} - t_{c_2})$ ;  $t_{\text{онр}} = 0,5(18 - 15) = 1,5^\circ\text{C}$ . По таблице А1 приложения А определяем параметры воздуха

$$\gamma_{\text{жс}} = 13,41 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \lambda_{\text{жс}} = 24,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$Pr = 0,71;$$

$$\beta = \frac{1}{T_{\text{онр}}} = \frac{1}{274,5} \text{ К}^{-1}.$$

Вычисляем произведение

$$(Gr \cdot Pr) = \frac{9,81 \cdot 33 \cdot 0,12^3}{274,5(13,41 \cdot 10^{-6})^2} 0,71 = 8,046 \cdot 10^6.$$

Коэффициент конвекции  $\varepsilon_{\kappa} = 0,18(8,046 \cdot 10^6)^{0,25} = 9,58$

Тогда

$$\lambda_{\text{экв}} = 9,58 \cdot 24,6 \cdot 10^{-3} = 2,36 \cdot 10^{-1} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Теплопотери через окно с двойным остеклением будут равны

$$\Phi = \frac{\lambda_{\text{экв}}}{\delta} (t_{c_1} - t_{c_2}) A = \frac{2,36 \cdot 10^{-1}}{0,12} (18 + 15) 1,68 = 109 \text{ Вт}$$

**Пример 2.3** Определить силу тока для нихромовой проволоки диаметром 1,0 мм из условия, что ее температура не будет превышать  $300^\circ\text{C}$ . сопротивление 1 погонного метра проволоки при температуре  $300^\circ\text{C}$   $R = 6,0 \text{ Ом}$ , температура окружающей среды  $t_{\text{м}} = 20^\circ\text{C}$ .

Расчет произвести для двух случаев.

- проволока находится в спокойном воздухе;
- проволока находится в спокойной воде под давлением при температуре насыщения выше  $300^\circ\text{C}$ .

**Решение.** По закону Ньютона-Рихмана определим мощность теплового потока от проволоки к окружающей среде

$$q_l = \pi d_n \alpha (t_c - t_{\text{жс}}).$$

Для определения  $\alpha$  находим число Грасгофа и число Нуссельта:

а) окружающая среда воздух.

По таблице А1 приложения А находим физические параметры воздуха при  $t_{\text{онр}} = 0,5(300 + 20) = 160^\circ\text{C}$ .

$$\lambda_{\text{жс}} = 3,64 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; \gamma_{\text{жс}} = 30,09 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; Pr_{\text{жс}} = 0,682.$$

Число Грасгофа

$$Gr = \beta \frac{g \cdot l^3 \cdot \Delta t}{\gamma^2} = \frac{9,81 \cdot (0,001)^3 (300 - 20)}{(160 + 273) \cdot (30,9 \cdot 10^{-6})^2} = 6,64$$



$$Gr \cdot Pr = 6,64 \cdot 0,682 = 4,53.$$

По таблице 2.1 при произведении  $Gr \cdot Pr = 4,778$

$C = 7,18$ ;  $m = 0,125$ , тогда по формуле (2.2)

$$Nu = 1,18 (Gr \cdot Pr)^{0,125} = 1,18 \cdot 4,53^{0,125} = 1,435.$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = \frac{1,435 \cdot 3,64 \cdot 10^{-2}}{0,1 \cdot 10^{-2}} = 52,2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

$$q_l = \pi d_n \cdot \alpha (t_c - t_{жс}) = 3,14 \cdot 0,001 \cdot 52,2 (300 - 20) = 45,89 \text{ Вт/ч}$$

$$q_e = J^2 R \quad J = \sqrt{\frac{q_e}{R}} = \sqrt{\frac{45,89}{6,0}} = 2,25 \text{ А}$$

**Пример 2.4** В баке с раствором хлористого кальция размещен горизонтальный охлаждающий змеевик из труб, наружный диаметр которых 57 мм. Плотность раствора хлористого кальция при температуре  $15^\circ\text{C}$   $\rho_{жс} = 1220 \text{ кг/м}^3$ . Температура замерзания раствора  $t_3 = -25,7^\circ\text{C}$ , средняя температура наружной поверхности трубы  $t_{cm} = -20^\circ\text{C}$ , температура раствора вдали от поверхности трубы  $t_{жс} = -10^\circ\text{C}$ .

Определить коэффициент теплообмена  $\alpha$  от раствора к поверхности трубы при свободном движении жидкости.

**Решение.** Теплоотдачу при свободном движении около горизонтальной трубы (змеевика) определяем по уравнению

$$Nu = 0,5 (Gr \cdot Pr)^{0,25}.$$

Определяющим размером является наружный диаметр трубы, в качестве определяющей температуры принимаем среднюю температуру

$$t_{cp} = \frac{t_c + t_{жс}}{2} = \frac{-20 - 10}{2} = -15^\circ\text{C}.$$

Данная формула справедлива  $1 \cdot 10^3 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 10^5$ .

Определяем теплофизические свойства хлористого кальция при  $\rho = 1220 \text{ кг/м}^3$  и  $t_3 = -25,7^\circ\text{C}$

$$\lambda_{-20} = 0,523 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

$$\lambda_{-15} = 0,518 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

$$\lambda_{-10} = 0,511 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

$$\gamma_{-10} = 4,87 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \gamma_{-15} = 6,20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \gamma_{-20} = 7,77 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$Pr_{-10} = 33; \quad Pr_{-15} = 42,5; \quad Pr_{-20} = 53,80;$$

$$\beta_{-10} = 3,5 \cdot 10^{-4}; \quad \beta_{-20} = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}; \quad \beta_{-15} = 3,4 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$$

Определяем критерии подобия, характеризующие процесс теплообмена:

$$Gr_{жс.d} = \frac{q \cdot \alpha^3 \Delta t \cdot \beta_{жс}}{\gamma_{жс}^2} = \frac{9,81 \cdot 0,057^3 \cdot (-10) \cdot 3,4 \cdot 10^4}{(6,20 \cdot 10^{-6})^2} = 1,607 \cdot 10^5$$

$$Ra = (Gr \cdot Pr_{жс}) = (1,607 \cdot 10^5 \cdot 42,5) = 6829750 = 6,83 \cdot 10^6.$$

$$Nu_{жс.d} = 0,5 (6,83 \cdot 10^6)^{0,25} = 25,56$$

$$\text{Коэффициент теплообмена } \alpha = \frac{Nu_{жс.d} \cdot \lambda_{жс}}{d_y} = \frac{25,56 \cdot 0,518}{0,057} = 232,29 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

## 2.4 Вынужденная конвекция

При вынужденной конвекции между числами подобия существует зависимость

$$Nu = c Re^n \cdot Pr^m (Pr_m / Pr_c)^{0,25}. \quad (2.10)$$

где коэффициенты  $c$  и  $n$  принимаем по таблице 2.2 в зависимости от вида движения теплоносителя.

При ламинарном обтекании клинообразного тела  $Re < 10^5$  с углом раствора  $\pi$  в число Нуссельта определяется по формуле

$$Nu = 1,12 \frac{(6 + 0,2)^{0,1}}{(2 - 6)^{0,5}} Pr^m Re^{0,5} \quad m = 1/3 + 0,067 B - 0,026 B^2. \quad (2.11)$$

При турбулентном обтекании -  $Re < 10^5$

$$Nu = 0,061 \frac{(\epsilon + 0,2)^{0,1}}{(2 - \epsilon)^{0,5}} Pr^m Re^{0,8} \quad m = 1/3 + 0,067 \ln - 0,026 \ln^2. \quad (2.12)$$

Таблица 2.2 Значения коэффициентов  $c$ ,  $n$ , и  $m$  в уравнении 2.10

Вид движения теплоносителя	$c$	$n$	$m$	Определяющий размер
1	2	3	4	5
Ламинарное вдоль горизонтальной плиты, $Re < 5 \cdot 10^5$	0,664	0,5	0,33	ширина пластины вдоль потока
Турбулентное вдоль горизонтальной плиты, $Re > 5 \cdot 10^5$	0,037	0,8	0,43	
Ламинарное в трубе, $Re < 2300$	0,15	0,33	0,43	внутренний диаметр трубы, $d_{вн}$
Турбулентное в трубе, $Re = 10^4 \dots 5 \cdot 10^6$	0,021	0,8	0,43	
Переходное в трубе, $Re = 2300 \dots 10^4$	0,008	0,9	0,43	
Ламинарное поперек цилиндра $10^{-3} < Re < 10^3$ $Re = 5 \dots 80$ $Re = 80 \dots 10^3$	0,5	0,5	0,38	наружный диаметр цилиндра, $d_n$
	0,92	0,4	0,40	
	0,73	0,46	0,40	
1	2	3	4	5
Турбулентное поперек цилиндра $10^3 < Re < 10^9$ $Re = 5 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^4$ $Re > 5 \cdot 10^4$	0,25	0,6	0,38	
	0,22	0,6	0,4	
	0,026	0,80	0,4	
Поперечное обтекание коридорных пучков труб $Re < 10^3$ $Re = 10^3 \dots 10^5$	0,56	0,65	0,33	наружный диаметр цилиндра, $d_n$
	0,23	0,65	0,33	
Поперечное обтекание шахматных пучков труб $Re < 10^3$ $Re = 10^3 \dots 10^5$	0,56	0,65	0,33	наружный диаметр цилиндра, $d_n$
	0,41	0,60	0,33	

При любых режимах движения теплоносителя число Нуссельта при обтекании шара определяется

$$Nu = 2 + 0,03 Pr^{0,33} \cdot Re^{0,54} + 0,35 Pr^{0,35} \cdot Re^{0,58} \quad (2.13)$$

В данном уравнении в качестве характерного размера принимается диаметр шара.

Значение числа Нуссельта также можно определить по уравнению Кримера-Лооса:

$$Nu = 2 + Pr^{0,33} (0,4 \cdot Re^{0,5} + 0,06 Re^{0,67}); \quad (2.14)$$

или по формуле Ранца-Маршалла:

$$Nu = 2 + 0,6 Pr^{0,33} Re^{0,5} \quad (2.15)$$

К рассчитанному по (2.10) числу Нуссельта необходимо ввести поправки на изменение среднего коэффициента теплообмена по длине трубы  $\epsilon_e$ , на изгиб  $\epsilon_{изг}$ , изменение теплоотдачи начальных рядов труб (цилиндра) при поперечном обтекании  $\epsilon_i$ , поправочный коэффициент  $\epsilon_\psi$ , учитывающий угол атаки (т.е. угол между осью цилиндра и вектором скорости среды), поправочный коэффициент  $\epsilon_s$ , учитывающий влияние относительного шага  $\epsilon_s$ .

Скорость потока, входящая в критерий  $Re$  определяется в самом узком сечении пучка как отношение объемного расхода жидкости  $V$  (м<sup>3</sup>/с) к площади  $S$  (м<sup>2</sup>) самого узкого сечения.

$$\alpha = \alpha_{рас} \cdot \epsilon_e \cdot \epsilon_{изг} \cdot \epsilon_i \cdot \epsilon_\psi \cdot \epsilon_s. \quad (2.16)$$

Поправка на изгиб труб (повороты, змеевики) рассчитывается по формуле

$$\epsilon_{изг} = 1 + 1,77 d/R, \quad (2.17)$$

где  $d$  – диаметр трубы, м;  $R$  – радиус змеевика, м.

Поправка на изменение среднего коэффициента теплоотдачи по длине трубы, канала при  $l/d < 50$  в зависимости от режима движения принимается по таблице 2.3

Таблица 2.3 Поправочный коэффициент  $\varepsilon_l$ 

Режима движения	Отношение $l/d$							
	1	2	5	10	15	20	30	40
Ламинарный	1,90	1,70	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02
Турбулентный $Re=10^4$	1,65	1,50	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,40	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02
$5 \cdot 10^4$	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02
$10 \cdot 10^4$	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02
$100 \cdot 10^4$	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01

Таблица 2.4 Поправочный коэффициент  $\varepsilon_\psi$  для пучков труб, расположенных под углом  $\psi$  к потоку жидкости

$\psi$ , град.	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
$\varepsilon_\psi$	1	1	0,98	0,94	0,88	0,78	0,67	0,52	0,42	0,40

Поправка на изменение теплоотдачи в начальных рядах пучка труб принимается для:

первого ряда

$$\varepsilon_i=0,6;$$

второго ряда коридорного пучка

$$\varepsilon_i=0,9;$$

второго ряда шахматного пучка

$$\varepsilon_i=0,7;$$

третьего и последующего рядов

$$\varepsilon_i=1,0.$$

Поправочный коэффициент  $\varepsilon_s$ , учитывающий влияние относительных шагов  $S_1/d$  и  $S_2/d$

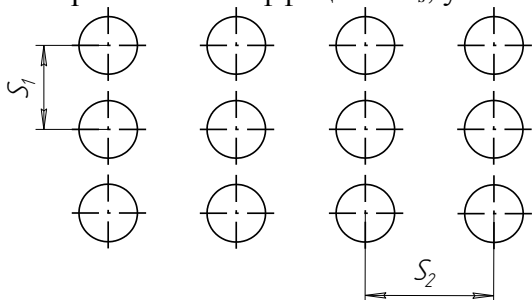


Рисунок 3

Схема коридорного расположения

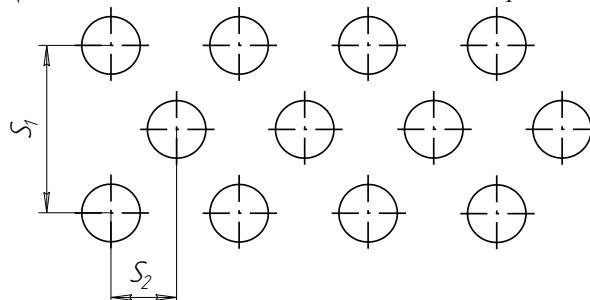


Рисунок 4

Схема шахматного расположения

Для коридорного пучка:

$$\varepsilon_s=(S_2/d)^{0,15}$$

Для шахматного пучка

$$\text{при } S_1/S_2 < 2 \quad \varepsilon_s=(S_1/S_2)^{1/6}; \quad \text{при } S_1/S_2 \geq 2 \quad \varepsilon_s=1,12.$$

Среднее значение коэффициента теплоотдачи для всего пучка труб определяется по формуле

$$\alpha_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}, \quad (2.18)$$

где  $\alpha_i$  – средний коэффициент теплоотдачи  $i$ -го ряда;

$A_i$  – суммарная поверхность теплообмена трубок  $i$ -го ряда;

$n$  – число рядов в пучке.

Среднее значение коэффициента теплоотдачи в кольцевых каналах можно определить по уравнению

$$Nu=0,017Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25} (d_2/d_1)^{0,18}, \quad (2.19)$$

где  $d_1$  – внутренний диаметр кольцевого канала;

$d_2$  – внешний диаметр.

Формула (2.19) справедлива при  $d_2/d_1=1,2 \dots 14$ .

$l/d=50 \dots 460$  и  $Pr=0,7 \dots 100$ .

Расчет теплоотдачи в пучках труб с круглыми и квадратными ребрами, обтекаемых поперечным потоком газа может быть произведен по следующим уравнениям в области значений

$$3 \cdot 10^3 < Re < 25 \cdot 10^3 \text{ и } 3 \leq d/\delta \leq 4,8, \quad Nu = c Re^m (d/\delta)^{-0,54} (h/\delta)^{-0,14}, \quad (2.20)$$

где  $\delta$  – шаг ребр,  $h=0,5(D-d)$ , где  $D$  – диаметр или сторона ребра,  $d$  – наружный диаметр трубы.  $c=0,104$  для коридорных пучков труб с круглыми ребрами, для квадратных ребер  $c=0,096$  и  $m=0,72$  для обоих случаев. Для шахматных пучков с круглыми ребрами  $c=0,223$ ; с квадратными ребрами  $c=0,205$ ; в обоих случаях  $m=0,65$ .

При продольном обтекании пластины воздухом расчетная формула (2.10) упрощается и принимает вид:

- при ламинарном режиме

$$Nu = 0,57 Re^{0,5}; \quad (2.21)$$

- при турбулентном режиме

$$Nu = 0,32 Re^{0,8}; \quad (2.22)$$

$$\alpha_{рас} = 5,9 \omega^{0,8} l^{-0,2}. \quad (2.23)$$

Для воздуха при вынужденном поперечном обтекании трубы можно применить формулу

$$\alpha_{рас} = 11,6 \sqrt{\omega}. \quad (2.24)$$

Для поверхностей нагретой воды

$$\alpha_{рас} = 5,7 + 4,1 \omega, \quad (2.25)$$

где  $\omega$  – скорость движения теплоносителя, м/с;

$l$  – определяющий размер, м.

Коэффициент теплоотдачи от горизонтальной трубы к воздуху при соответственной конвекции можно определить по формуле

$$\alpha_{рас} = 1,16 \sqrt{(t_{н.н.} - t_o) / d_2}. \quad (2.26)$$

Для условий вынужденной конвекции, обусловленной ветром

$$\alpha_{рас} = 4,65 \omega^{0,7} / d^{0,3}. \quad (2.27)$$

где  $t_{н.н.}$  – температура наружной поверхности, °C;

$t_o$  – температура окружающей среды, °C;

$d_2$  – наружный диаметр трубы, изоляции, м.

**Пример 2.5** Через трубу диаметром 50 мм длиной 3 м изогнутой в виде змеевика диаметром 600 мм протекает горячая вода с температурой 50°C со скоростью  $\omega=0,8$  м/с. Определить коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  от стенки к воде, если температура стенки  $t_c=70^\circ\text{C}$ .

**Решение.** Определяем параметры воды при  $t_{жс}=50^\circ\text{C}$  и  $t_c=70^\circ\text{C}$  по таблице А5 приложения А.

при  $t_{жс}=50^\circ\text{C}$   $\lambda_{жс}=0,648$  Вт/(м·К);  $\gamma_{жс}=5,56 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с;  $Pr_{жс}=3,54$ .

при  $t_c=70^\circ\text{C}$   $\lambda_{жс}=0,668$  Вт/(м·К);  $\gamma_{жс}=4,15 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с;  $Pr_c=2,55$ .

Рассчитываем число Рейнольдса и число Нуссельта:

$$Re = \omega d / \gamma_{жс} = 0,8 \cdot 0,05 / 5,56 \cdot 10^{-7} = 7,2 \cdot 10^4;$$

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr_{жс}^{0,43} (Pr_{жс}/Pr_c)^{0,25} = 0,021 (7,2 \cdot 10^4)^{0,8} \cdot 3,54^{0,43} \cdot (3,54/2,55)^{0,25} = 303.$$

Вводим поправки  $\varepsilon_e$  и  $\varepsilon_{изг}$

$$l/d = 3/0,05 = 60 > 50$$

$$\varepsilon_e = 1;$$

$$\varepsilon_{изг} = 1 + 1,77 d/R = 1 + 1,77 \cdot 50/300 = 1,295.$$

Тогда

$$\alpha_{рас} = \frac{Nu \cdot \lambda_{жс}}{d} \cdot \varepsilon_e \cdot \varepsilon_{изг} = \frac{303 \cdot 0,648}{0,05} \cdot 1,295 = 5085 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

**Пример 2.6** Определить средний коэффициент теплоотдачи в воздухоподогревателе с поперечным восьмирядным коридорным расположением труб к потоку воздуха. Диаметр труб  $d=16$  мм;  $S_1=1,5d$ ;  $S_2=2,0d$ .

Средняя скорость воздуха в узком сечении 10 м/с, температура на входе 20°C, на выходе 60°C.

**Решение.** По средней температуре воздуха  $t_{cp}=0,5(t'_g + t''_g)=0,5(20+60)=40^\circ\text{C}$  из таблицы А1 приложения А находим физические параметры воздуха:  $\lambda=27,6 \cdot 10^{-3}$  Вт/(м·К);  $\nu=16,96 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с и число Прандтля  $Pr=0,70$ .

$$\text{Рассчитываем число Рейнольдса } Re = \frac{\omega d}{\gamma} = \frac{10 \cdot 0,016}{16,96 \cdot 10^{-6}} = 9434.$$

Пользуясь формулой (2.10) из таблицы 2.2 для поперечного пучка труб при  $Re=10^3 \dots 10^5$  выбираем коэффициенты  $c=0,26$ ;  $n=0,65$  и  $m=0,33$ .

$$Nu=0,26 \cdot Re^{0,65} \cdot Pr^{0,33} (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25} \cdot \varepsilon_s,$$

где для воздуха  $Pr_{ж}/Pr_c=1$ ;  $\varepsilon_s=(S_2/d)^{-0,15}=(2d/d)^{-0,15}=0,901$ ;

$$Nu=0,26(9434)^{0,65} \cdot 0,70^{0,33} \cdot 0,901=79,82.$$

$$\text{Откуда } \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = \frac{79,82 \cdot 27,6 \cdot 10^{-3}}{16 \cdot 10^{-3}} = 137,2 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Средний коэффициент теплоотдачи с учетом теплообмена в первом, втором и третьем рядах труб

$$\alpha_{нуч} = \alpha \frac{\varepsilon_{i1} + \varepsilon_{i2} + \varepsilon_{i3\dots6}}{n} = 137,2 \frac{(0,6 + 0,9 + 6)}{8} = 128,6 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

*Пример 2.7* Рассчитать коэффициент теплообмена при замораживании пельменей посредством обдувания их воздухом с температурой  $t_{хл}=-30^\circ\text{C}$  и скоростью  $w=2,5$  м/с. Пельмень радиусом  $R=0,02$  м обдувается сверху.

*Решение.* Поскольку поток воздуха перпендикулярен поверхности пельмени, то используем формулу (2.12) с  $\nu=1$ . В качестве характерного размера берем радиус пельмени.

Параметры воздуха при  $t=-30^\circ$  берем из приложения А таблица А1.

Определяем число Рейнольдса  $\gamma=10,8 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с

$$\lambda=2,2 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

$$Pr=0,723.$$

$$Re = \frac{\omega \cdot d_{\circ}}{\gamma} = \frac{2,5 \cdot 0,02}{10,8 \cdot 10^{-6}} = 4629$$

Число Нуссельта

$$Nu=0,061 Pr^{0,374} \cdot Re^{0,8}=0,061 \cdot (0,723)^{0,374} \cdot (4,629 \cdot 10^3)^{0,8}=46,24$$

Коэффициент теплообмена

$$\alpha = \frac{\lambda_{воз} \cdot Nu}{R} = \frac{2,2 \cdot 10^{-2} \cdot 46,24}{0,02} = 50,86 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

*Пример 2.8* В односекционном трубчатом пастеризаторе молоко движется по трубам со скоростью  $w=1,1$  м/с. Диаметр труб 35/32 мм, а общая их длина 18 м. Средняя температура молока  $41^\circ\text{C}$ , а поверхности стенок  $65^\circ\text{C}$ . Рассчитать тепловой поток воспринимаемый молоком.

*Решение.* По приложению А таблица А17 определяем теплофизические свойства молока при  $t_{жс}=41^\circ\text{C}$ .  $\lambda_{жс}=0,565$  Вт/(м·К);  $\gamma_{жс}=0,922 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $Pr_{жс}=7,57$ .

При  $t_{ст}=65^\circ\text{C}$   $Pr_{ст}=4,36$ .

Определяем критерий Рейнольдса, характеризующий процесс

$$Re = \frac{\omega \cdot d_{вн}}{\gamma_{жс}} = \frac{1,1 \cdot 0,32}{0,922 \cdot 10^{-6}} = 38178$$

Для турбулентного движения в трубе при  $Re=10^4 \dots 5 \cdot 10^6$   $c=0,21$ ,  $n=0,8$  и  $m=0,43$  и уравнение (2.10) примет вид

$$Nu_{жс}=0,21 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_{жс}^{0,43} (Pr_{жс}/Pr_{ст})^{0,25} \cdot \varepsilon_e=0,21 \cdot (38178)^{0,8} \cdot 7,57^{0,49} (7,57/4,36)^{0,25}=266,42$$

$$\text{При } l/d_{вн}=18/0,032=562>50 \quad \varepsilon_e=1$$

$$\text{Коэффициент теплообмена } \alpha = \frac{Nu_{жс} \cdot \lambda_{жс}}{d_{вн}} = \frac{266,42 \cdot 0,565}{0,032} = 4703,9 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Определяем  $\Phi$  (кВт), воспринимаемый молоком

$$\Phi=\alpha \cdot \pi \cdot d_n \cdot l(t_{ст}-t_{жс})=4703,9 \cdot 3,14 \cdot 0,035 \cdot 18(65-41)=223,3 \text{ кВт}$$

*Пример 2.9* Алюминиевый электропровод, диаметром 6 мм охлаждается поперечным потоком воздуха при давлении  $p=1,01 \cdot 10^5$  Па. Вдали от провода температура и скорость движения воздуха соответственно  $t_{жс}=20^\circ\text{C}$ ;  $w=1,2$  м/с. Удельное электрическое сопротивление провода  $\rho=2,86 \cdot 10^{-8}$  Ом·м м<sup>2</sup>/м.

Найти температуру поверхности провода, если поверхностная плотность теплового потока  $q=2,7 \text{ кВт/м}^2$ , а также силу тока в электропроводе, при котором будет обеспечена заданная поверхностная плотность теплового потока.

*Решение.* Определяем теплофизические свойства воздуха при заданной температуре  $20^\circ\text{C}$  по приложению А таблица А1  $\lambda_{жс}=2,59 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $\gamma_{жс}=15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $Pr_{жс}=0,703$ .

Для вынужденного движения при  $w=1,2 \text{ м/с}$  находим критерий Рейнольдсона

$$Re = \frac{\omega \cdot d_n}{\gamma} = \frac{1,2 \cdot 0,006}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 478,08$$

При  $Re=478,08$  коэффициент  $c=0,79$ ;  $n=0,46$  и  $m=0,40$  и уравнение (2.10) примет вид

$$Nu_{жс}=0,79 Re^{0,46} \cdot Pr_{жс}^{0,40} = 0,79 \cdot (478,08)^{0,46} \cdot (0,703)^{0,40} = 11,72$$

$$\text{Коэффициент теплообмена } \alpha = \frac{Nu_{жс} \cdot \lambda_{жс}}{d_{вн}} = \frac{11,72 \cdot 2,59 \cdot 10^{-2}}{0,006} = 50,6 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$$

Температура на поверхности провода

$$t_{см}=t_{жс}+q/\alpha=20+2,7 \cdot 10^3/50,6=73,36^\circ\text{C}$$

Из уравнения энергетического баланса

$$\alpha \pi d l (t_{см}-t_{жс})=J^2 R, \text{ определяем силу тока } J$$

$$\text{где } R = \frac{\rho \cdot l}{\pi d^2 / 4} = \frac{4 \rho \cdot l}{\pi d^2}; J^2 = \frac{\alpha \cdot \pi \cdot d \cdot l (t_{см}-t_{жс})}{R} = \frac{\alpha \cdot \pi^2 \cdot d^3 \cdot \Delta t}{4 \rho};$$

$$J = \pi d \sqrt{\frac{\alpha d \Delta t}{4 \rho}} = \pi \cdot 6 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{50,6 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 53,36}{4 \cdot 2,86 \cdot 10^{-8}}} = 224,19 \text{ А}$$

## 2.5 Конвективный теплообмен через зернистый слой

При расчете коэффициента теплообмена через зернистый слой применяется уравнение В.Н. Тимофеева при  $20 < Re_{жс} < 200$

$$Nu_{жс}=0,124 Re_{жс} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \quad (2.28)$$

при  $Re_{жс} > 200$

$$Nu_{жс}=0,711 Re_{жс}^{0,67} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \quad (2.29)$$

Или же уравнения при  $20 < Re_{жс} < 200$

$$Nu_{жс}=0,106 Re_{жс} \quad (2.30)$$

при  $Re_{жс} > 200$

$$Nu_{жс}=0,61 Re_{жс} \quad (2.31)$$

*Пример 2.10* Слой яблок охлаждается потоком воздуха. Средний размер яблок  $d=45 \text{ мм}$ . Температура воздуха, входящего в слой  $t_{жс}^I=0^\circ\text{C}$ , выходящего из него -  $t_{жс}^{II}=20^\circ\text{C}$ . Скорость фильтрации  $w=0,6 \text{ м/с}$ .

Определить коэффициент теплообмена  $\alpha$  от поверхности яблок к воздуху.

*Решение.* По приложению А таблица А1 определяем теплофизические параметры воздуха при средней температуре  $t_{жс} = (t_{жс}^I + t_{жс}^{II}) / 2 = (0+20)/2 = 10^\circ\text{C}$ .

$$\lambda_{жс}=2,51 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$
;  $\gamma_{жс}=14,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $Pr_{жс}=0,705$ .

$$\text{Критерий Рейнольдса } Re = \frac{\omega \cdot d}{\gamma} = \frac{0,6 \cdot 0,042}{14,16 \cdot 10^{-6}} = 1779.$$

$$\text{по (2.31) } Nu_{жс}=0,61 Re^{0,67}=0,61 \cdot (1779)^{0,67}=91,82$$

$$\alpha = \frac{Nu_{жс} \cdot \lambda_{жс}}{d} = \frac{91,82 \cdot 2,51 \cdot 10^{-2}}{0,042} = 54,9 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

*Пример 2.11* Слой гравия охлаждается водой. Средний размер частиц  $d=27 \text{ мм}$ . Температура воды входящей в слой гравия  $5^\circ\text{C}$ , а выходящий из него  $t_{жс}^{II}=20^\circ\text{C}$ . Поверхностная плотность теплового потока  $q=2000 \text{ Вт/м}^2$ . Средняя температура поверхности частиц  $25^\circ\text{C}$ . Определить скорость фильтрации.

*Решение.* По средней температуре воды  $t_{жс} = (t_{жс}^I + t_{жс}^{II}) / 2 = (5+20)/2 = 12,5^\circ\text{C}$  по приложению А таблица А5 определяем теплофизические свойства воды  $\lambda_{жс}=57,95 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;  $\gamma_{жс}=1,246 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $Pr_{жс}=9,05$  при  $t_{сг}=25^\circ\text{C}$   $Pr_c=6,22$ .

$$q = \alpha(t_c - t_{жс}); \quad \alpha = \frac{q}{t_c - t_{жс}} = \frac{20000}{25 - 12,5} = 1600 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

$$\text{Число Нуссельта } Nu_{жс} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda_{жс}} = \frac{1600 \cdot 0,027}{57,95 \cdot 10^{-2}} = 74,55.$$

Предполагая, что  $Re_{жс} > 200$  по (2.29) находим число Нуссельта  $Nu_{жс} = 0,711 Re_{жс}^{0,67} \cdot Pr^{0,43}$ .  
Число Рейнольдса

$$Re_{жс}^{0,67} = \frac{Nu_{жс}}{0,711 \cdot Pr^{0,43}} = \frac{74,55}{0,711 \cdot 9,05^{0,43}} = 40,66.$$

$$Re = 40,66^{1/0,67} = 252,19; \quad w = \frac{Re \cdot \gamma}{d} = \frac{252,19 \cdot 1,246 \cdot 10^{-6}}{0,027} = 0,016 \text{ м/с}.$$

Задача. Слой зерна после сушки охлаждается воздухом, средней размер зерна  $d = 8$  мм. Температура воздуха входящего в слой зерна  $5^\circ\text{C}$ , выходящего из него  $20^\circ\text{C}$ . Скорость фильтрации  $0,5$  м/с. Определить коэффициент теплоотдачи от зерна к воздуху.

## 2.6 Теплоотдача суспензий

Во многих отраслях промышленности и сельского хозяйства приходится нагревать или охлаждать жидкостные суспензии мелкодисперсного порошка твердого тела в жидкости.

Согласно экспериментам проводимым в МВТУ им. Н.Э. Баумана Кафановым В.И. критерияльное уравнение теплообмена при течении жидкостных суспензий в трубах имеет вид

$$Nu_c = 0,026 Re_c^{0,8} Pr_c^{0,4} \left( \frac{r}{1-r} \right)^{0,015} \left( \frac{\rho_{жс}}{\rho_m} \right)^{0,12} \left( \frac{c_{p_{жс}}}{c_{p_m}} \right)^{0,15} \left( \frac{d_{mp}}{d_r} \right)^{0,02}, \quad (2,32)$$

где  $Nu_c$  – критерий Нуссельта суспензии;

$Re_c$  – критерий Рейнольдса суспензии;

$Pr_c$  – критерий Прандтля суспензии;

$r$  – объемная доля порошка твердого тела в суспензии

$\rho_{жс}$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\rho_m$  – плотность твердого тела,  $\text{кг/м}^3$ ;

$c_{p_{жс}}$  и  $c_{p_m}$  – теплоемкости жидкости и твердого тела,  $\text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;

$d_{mp}$  и  $d_r$  – диаметр трубы и средней диаметр частиц порошка твердого тела.

В качестве определяющей температуры принимают среднюю температуру среды  $t_{cp} = (t_1 + t_2)/2$ , где  $t_1$  – температура среды на входе в теплообменник, а  $t_2$  – на выходе из него,  $^\circ\text{C}$ .

Коэффициент гидравлического сопротивления  $\xi$  определяют по формуле:

$$\xi = \frac{0,36}{Re^{0,25}}. \quad (2,33)$$

Теплопроводность суспензии  $\lambda_c$  определяют по формуле Максвелла

$$\lambda_c = \left( \frac{2\lambda_{жс} + \lambda_m - 2r(\lambda_{жс} - \lambda_m)}{2\lambda_{жс} + \lambda_m + r(\lambda_{жс} - \lambda_m)} \right), \quad (2,34)$$

где  $\lambda_{жс}$  – теплопроводность жидкости,  $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;

$\lambda_m$  – теплопроводность твердого тела,  $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

Динамическая вязкость суспензии  $\mu_c$  определяют по формуле Вэнда

$$\mu_c = \mu_{жс}(1 + 2,5r + 7,17r^2 + 16,2r^3), \quad (2,35)$$

где  $\mu_{жс}$  – динамическая вязкость жидкости,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ .

Выше перечисленными зависимостями можно пользоваться до 25% концентрации по объему.

**Пример 2.12** По трубопроводу диаметром 50 мм и длиной 4 м протекает суспензия порошка меди в воде со скоростью  $w = 1$  м/с. Объемная концентрация меди 10%, средний диаметр частиц порошка  $100 \cdot 10^{-6}$  м. Определить количество теплоты передаваемой суспензии за 1 час, если температура жидкости  $50^\circ\text{C}$ , а температура стенки  $70^\circ\text{C}$ , а также коэффициент теплообмена  $\alpha$ .

*Решение.* Подсчитываем отдельные множители, входящие в управление (2.32). Теплофизические параметры берем из приложения А таблица А5 и таблица Б1 приложения Б.

$$\rho_c = \rho_m r + \rho_{ж}(i+r) = 8930 \cdot 0,1 + 988,1(1+0,1) = 1769,29 \text{ кг/м}^3$$

По формуле (2.35) определяем динамическую вязкость суспензии

$$\mu_c = \mu_{ж}(1+2,5r+7,17r^2+16,2r^3) = 543,4 \cdot 10^{-6}(1+2,5 \cdot 0,1+7,17 \cdot (0,1)^2+16,2(0,1)^3) = 735 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2 = 735 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

По формуле (2.34) находим  $\lambda_c$  суспензии

$$\lambda_c = \lambda_{ж} \left( \frac{2\lambda_{ж} + \lambda_m - 2r(\lambda_{ж} - \lambda_m)}{2\lambda_{ж} + \lambda_m + r(\lambda_{ж} - \lambda_m)} \right) = 0,640 \left( \frac{2 \cdot 0,640 + 390 - 2 \cdot 0,1(0,640 - 390)}{2 \cdot 0,640 + 390 + 0,1(0,640 - 390)} \right) =$$

$$= 0,640 \frac{308,6}{423,61} = 0,466 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

$$\text{По формуле } c_{p_c} = g_m \cdot c_{p_m} + g_{ж} c_{p_{ж}} = \frac{r_m \cdot \rho_m}{\rho_{см}} \cdot c_{p_m} + \frac{r_{ж} \cdot \rho_{ж}}{\rho_c} \cdot c_{p_{ж}} = \frac{0,1 \cdot 8930}{1769,29} \cdot 0,381 +$$

$$+ \frac{0,9 \cdot 988,1}{1769,29} \cdot 4,19 = 0,189 + 2,106 = 2,295 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

вычисляем теплоемкость суспензии.

$$\text{Находим число Рейнольдса } Re_c = \frac{w \cdot d}{\gamma_c} = \frac{w \cdot d \rho_c}{\mu_c} = \frac{1,0 \cdot 0,05 \cdot 1769,29}{735 \cdot 10^{-6}} = 120360.$$

$$\text{Число Прандтля } Pr_c = \frac{\gamma_c}{a_c} = \frac{\rho_c c_{p_c} \mu_c}{\lambda_c \cdot \rho_c} = \frac{c_{p_c} \cdot \mu_c}{\lambda_c} = \frac{2,295 \cdot 10^3 \cdot 735 \cdot 10^{-6}}{0,466} = 3,87$$

Число Нуссельта

$$Nu_c = 0,026(120360)^{0,8} \cdot (3,87)^{0,4} \left( \frac{0,1}{0,9} \right)^{0,015} \left( \frac{988,1}{8930} \right)^{0,12} \left( \frac{4,19}{0,388} \right)^{0,15} \left( \frac{5,0}{0,1} \right)^{0,02} =$$

$$= 0,026 \cdot 11598 \cdot 1,718 \cdot 0,967 \cdot 0,769 \cdot 1,433 \cdot 1,132 = 624,92.$$

Находим коэффициент теплообмена  $\alpha_c$

$$\alpha_c = \frac{Nu_c \cdot \lambda_c}{d_{mp}} = \frac{624,92 \cdot 0,466}{0,05} = 5824,3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

По закону Ньютона-Рихмана

$$\Phi = \alpha_c \cdot A(t_c - t_{ж}) = 5824,3 \cdot 14 \cdot 0,05 \cdot 4 \cdot 20 = 73149 \text{ Вт}$$

## 2.7 Теплообмен при изменении агрегатного состояния

### 2.7.1 Теплообмен при кипении

Для воды при кипении под атмосферным давлением наблюдается два критических режима. Первый – начало перехода от пузырькового к пленочному режиму кипения. Параметры этого режима  $\Delta t_{кр1} = 25^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_{кр1} = 46500 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ ;  $q_{кр1} = 1,16 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ .

Второй – конец перехода к пленочному кипению. Параметры этого режима  $\Delta t_{кр2} = 150\text{K}$ ;  $\alpha_{кр2} < \alpha_{кр1}$ ;  $q_{кр2} < q_{кр1}$ .

При пузырьковом кипении жидкости в большом объеме коэффициент теплообмена рассчитывают по формуле

При  $Re_a \geq 10^{-2}$

$$Nu_{\kappa} = 0,125 Re^{0,125} \cdot Pr^{1/3}. \quad (2.36)$$

При  $Re_a \leq 10^{-2}$

$$Nu_{\kappa} = 0,0625 Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33}, \quad (2.37)$$

$$\text{где } Re_{\kappa} = \frac{q l_{\kappa}}{r \rho'' \nu}; \quad Pr = \frac{\gamma}{a}; \quad l_{\kappa} = \frac{c_p \rho' \sigma T_{\kappa}}{(r \rho'')^2},$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$r$  – теплота парообразования,  $\text{кДж/кг}$ ;

$c_p$  – удельная массовая теплоемкость жидкости,  $\text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ ;



$a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с;

$\lambda$  – теплопроводность жидкости, Вт/(м·К);

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м, при температуре насыщения  $t_n$ ;

$\rho'$  и  $\rho''$  – плотности жидкости и пара при температуре насыщения,  $t_n$ ;

$T_n$  – температура насыщения, К;

$l_k$  – определяющий размер, м.

Формулы (2.36) и (2.37) можно применить при  $0,86 \leq \text{Pr}_k \leq 7,6$ ;  $10^{-5} \leq \text{Re}_k \leq 10^4$  и давлении  $0,045 \leq p \leq 175$  бар.

$q$  – поверхностная плотность теплового потока при кипении, Вт/м<sup>2</sup>.

Если число Нуссельта  $Nu_k$  является функцией температурного напора при пузырьковом кипении в большом объеме при  $0,86 \leq \text{Pr} \leq 7,5$ ;  $10^{-5} \leq \text{Re}_k \leq 10^4$ , давлении  $0,045 \leq p \leq 175$  бар и  $0,05 \leq \frac{\lambda \Delta t}{r \cdot \rho'' \cdot \gamma} \text{Pr}^{0,33} \leq 200$  можно применить формулы:

при  $\frac{\lambda \Delta t}{r \cdot \rho'' \cdot \gamma} \text{Pr}^{0,33} > 1,6$

$$Nu_k = 2,63 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\lambda \Delta t}{r \cdot \rho'' \cdot \gamma} \right)^{1,86} \text{Pr}^{0,952}; \quad (2.38)$$

при  $\frac{\lambda \Delta t}{r \cdot \rho'' \cdot \gamma} \text{Pr}^{0,33} \leq 1,6$

$$Nu_k = 3,91 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\lambda \Delta t}{r \cdot \rho'' \cdot \gamma} \right) \text{Pr}^{0,67}; \quad (2.39)$$

При вынужденном движении кипящей жидкости в трубах, когда она нагрета до температуры насыщения, коэффициент теплообмена рассчитывают по следующим формулам:

$$\text{при } \alpha_k / \alpha_w \leq 0,5 \quad \alpha = \alpha_w; \quad (2.40)$$

$$\text{при } \alpha_k / \alpha_w \geq 2 \quad \alpha = \alpha_k; \quad (2.41)$$

$$\text{при } 0,5 \leq \alpha_k / \alpha_w \leq 2 \quad \frac{\alpha}{\alpha_w} = \frac{4\alpha_w + \alpha_k}{5\alpha_w - \alpha_k}, \quad (2.42)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплообмена при вынужденном движении кипящей жидкости в трубах, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\alpha_k$  – коэффициент теплообмена при развитом пузырьковом кипении в большом объеме, определяемый формулами (2.36), (2.37), (2.38) и (2.39);

$\alpha_w$  – коэффициент теплообмена при турбулентном движении однофазной жидкости в трубах, определяемым по формуле

$$Nu_{жс} = 0,21 \text{Re}_{жс}^{0,8} \text{Pr}_{жс}^{0,43} \left( \frac{\text{Pr}_{жс}}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_e.$$

Формулы (2.40), (2.41) и (2.42) справедливы для воды при давлении от  $1 \cdot 10^5$  до  $86 \cdot 10^5$  Па, скоростях движения теплоносителя от 0,2 до 6,7 м/с и объемном паросодержании до 70%.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  для хладонов в трубах определяют по формулам:

$$\alpha = 58,8 \frac{q^{0,6} \cdot m_t^{0,2}}{d^{0,6}} f(p); \quad (2.43)$$

$$\alpha = 2,652 \cdot 10^4 \frac{\Delta t^{1,5} m_t^{0,5}}{d^{1,5}} (f(p))^{2,5}. \quad (2.44)$$

Значение функции  $f(p)$  приведено в таблице (2.5)

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  при кипении аммиака в трубах определяют по формулам

$$\alpha = (27,3 + 0,04 t_n) q^{0,45} d^{0,24}; \quad (2.45)$$

$$\alpha = (27,3 + 0,04 t_n)^{1,818} \Delta t^{0,818} d^{0,436} \quad (2.46)$$

Формулы (2.45) и (2.46) справедливы при  $t_n = -30 \dots 0^\circ \text{C}$  и  $q = 1000 \dots 14000$  Вт/м<sup>2</sup>.

Таблица 2.5 Значение функции  $f(p)$ 

$T, K$	$f(p) \cdot 10^{-2}, Дж^{0,4}/кг^{0,2} \cdot м^{0,2} \cdot с^{0,2} \cdot К$				
	R11	R12	R22	R113	R142
243	0,57	1,46	1,64	-	1,0
263	0,82	1,80	2,02	-	1,26
283	1,04	2,12	2,54	0,69	1,55
303	1,36	2,54	3,01	0,88	1,94

Коэффициент теплоотдачи в трубах с накатными ребрами (высота ребер 1,5...2 мм, шаг 0,8...2 мм) определяют по формуле

$$\alpha = \alpha_{эм} \varepsilon_{np}, \quad (2.47)$$

где  $\varepsilon_{np}$  – поправка, учитывающая влияние на теплообмен числа  $n$  рядов труб по высоте пучка;

$\alpha_{эм}$  – средний коэффициент теплоотдачи эталонного (шестирядного) пучка.

При  $q=0,5...9$  кВт/м<sup>2</sup> и  $t_0=-30...+20^\circ C$  для шестирядного пучка

$$\alpha_{эм}=335 \Delta t (\rho_n \cdot 10^{-5})^{0,5}; \text{ для R12} \quad (2.48)$$

$$\alpha_{эм}=568 \Delta t^{0,82} (\rho_n \cdot 10^{-5})^{0,45}; \text{ для R22} \quad (2.49)$$

где  $\rho_n$  – давление насыщения, Па.

Для расчета коэффициента теплоотдачи при пленочном кипении на поверхности применяются формулы

$$\alpha = c^{3,125} \Delta t^{2,088} (\rho \cdot 10^{-5})^{2,282}; \quad (2.50)$$

$$\alpha = c q^{0,68} (\rho \cdot 10^{-5})^{0,73}; \quad (2.51)$$

$$\alpha = \left( 46,25 + \frac{371,25}{d} \right) \left( \frac{r'}{\Delta t} \right)^{0,25}, \quad (2.52)$$

где  $r' = \frac{(r + 0,36 c_p \Delta t)^2}{2}$ . Здесь  $c_p$  – удельная массовая теплоемкость хладагента, кДж/(кг·К);  $d$  –

диаметр цилиндра, м. Значения коэффициента  $c$  приведены в таблице 2.4, функции  $f(p)$  в таблице 2.5.

Таблица 2.4 Значения коэффициента  $c$  в уравнении (2.50)

Холодильный агент	$t_n, ^\circ C$				
	-40	-30	-20	-10	0
R12	-	8,1	6,7	5,7	5,0
R22	8,6	7,2	5,9	5,1	4,7

**Пример 2.13** Определить поверхностную плотность теплового потока поверхности нагрева паронагревателя при пузырьковом кипении воды в большом объеме, если вода находится под давлением 0,62 МПа, а температура поверхности нагрева  $t_c=175^\circ C$ .

**Решение.** По приложению А таблица А4 при давлении  $p=0,62$  МПа находим  $t_n=160^\circ C$ ,  $Pr_{жс}=1,1$ ,  $\lambda_{жс}=0,683$  Вт/(м·К),  $r=2082,6$  кДж/кг,  $\gamma_{жс}=0,191 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $\rho''=3,25$  кг/м<sup>3</sup>

$$\frac{\lambda \cdot \Delta t}{r \cdot \rho'' \cdot \gamma} = \frac{0,683 \cdot (175 - 160) \cdot 10^{-3}}{2082,6 \cdot 3,258 \cdot 0,191 \cdot 10^{-6}} = 7,905$$

и  $\frac{\lambda \cdot \Delta t}{r \cdot \rho' \cdot \gamma} \cdot Pr^{0,33} = 7,9(1,1)^{0,33} = 8,157$ , то число Нуссельта определяем по формуле (2.38)

$$Nu_k = 2,63 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\lambda \cdot \Delta t}{r \cdot \rho'' \cdot \gamma} \right)^{1,86} \cdot Pr^{0,952} = 2,63 \cdot 10^{-3} (7,905)^{1,86} \cdot (1,1)^{0,952} = 0,1347.$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l_k} = \frac{0,134 \cdot 0,683}{1,73 \cdot 10^{-6}} = 52800$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

$$l_k = \frac{c_p \cdot \rho' \cdot \sigma \cdot T_n}{(r \cdot \rho'')^2} = \frac{4,19 \cdot 907,4 \cdot 466 \cdot 10^{-7} \cdot 433}{(2082,6 \cdot 3,258)^2} = 1,73 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Поверхностная плотность теплового потока

$$q = \alpha \cdot \Delta t = 52800 \cdot 15 = 790000 \text{ Вт/м}^2.$$

*Пример 2.14* Вода под давлением  $p = 8 \cdot 10^5$  Па движется в трубе с внутренним диаметром  $d_{вн} = 18$  мм со скоростью  $w = 1$  м/с.

Определить коэффициент теплоотдачи от стенки к кипящей воде, если температура внутренней поверхности трубы  $173^\circ\text{C}$ .

*Решение.* Определяем теплотехнические параметры воды по приложению А таблица А5 при  $p = 8 \cdot 10^5$  Па и  $t_n = 170,4^\circ\text{C}$ ;  $\gamma_{жс} = 0,181 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $\lambda_{жс} = 67,9 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К),  $Pr_{жс} = 1,05$ .

При  $t_c = 173^\circ\text{C}$ ,  $Pr_c = 1,04$ .

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_w$  при давлении однофазной жидкости

$$\alpha_w = \frac{Nu_{жс} \cdot \lambda_{жс}}{d_{вн}},$$

$$\text{где } Nu_{жс} = 0,21 Re_{жс}^{0,8} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_e.$$

$$\text{Число } Re_{жс} = \frac{w \cdot d}{\gamma_{жс}} = \frac{1 \cdot 0,018}{0,181 \cdot 10^{-6}} = 99447$$

$$\text{Тогда } Nu_{жс} = 0,21 \cdot (99447)^{0,8} \cdot (1,05)^{0,43} \left( \frac{1,05}{1,04} \right)^{0,25} = 213.$$

$$\text{Следовательно } \alpha_w = \frac{213 \cdot 0,679}{0,018} = 8040 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

Определяем значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_k$  при пузырьковом кипении в большом объеме.

$$\text{При } t_n = 170,4^\circ\text{C } l_k = \frac{c_p \cdot \rho \cdot \sigma \cdot T_n}{(r \cdot \rho'')^2} = \frac{4,19 \cdot 897,3 \cdot 443,4 \cdot 10^{-7} \cdot 443,4}{(2049,5 \cdot 4,122)^2} = 1,035 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

и расчет ведем по формуле (2.39)

$$Nu_k = 3,91 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\lambda \Delta t}{r \rho'' v} \right) \cdot Pr^{0,67} = 3,91 \cdot 10^{-3} (1,154) \cdot (1,05)^{0,67} = 4,66 \cdot 10^{-6};$$

$$\alpha_k = \frac{Nu_k \cdot \lambda_{жс}}{l_k} = \frac{4,66 \cdot 10^{-3} \cdot 0,679}{1,035 \cdot 10^{-6}} = 3058,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

Определяем отношение коэффициентов  $\alpha_k/\alpha_w$ :

$$\frac{\alpha_k}{\alpha_w} = \frac{3058,5}{8040} = 0,380$$

Так как  $\alpha_k/\alpha_w < 0,5$  то  $\alpha = \alpha_w = 8040 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ .

*Пример 2.15* Хладагент R12 кипит в горизонтальных трубах, внутренний, диаметр которых 16 мм. Массовый расход хладагента  $m_t = 85$  кг/ч. Температура насыщения –  $(-30^\circ\text{C})$ . Определить температурный напор, при котором поверхностная плотность теплового потока  $q = 4650 \text{ Вт/м}^2$ .

*Решение.* Согласно закону Ньютона-Рихмана

$$q = \alpha(t_{жс} - t_c) = \alpha \Delta t.$$

$$\text{Тогда } \Delta t = \frac{q}{\alpha};$$

Значение коэффициента теплообмена  $\alpha$  можно определить по уравнению (2.43)

$$\alpha = 58,8 \frac{q^{0,6} \cdot m_t^{0,2}}{d^{0,6}} f(p) = 58,8 \frac{4650^{0,6} (85/3600)^{0,2}}{(0,016)^{0,6}} \cdot (1,46) = 76975,6 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

$$\Delta t = \frac{4650}{76975,6} = 0,06^\circ\text{C}$$

Значение  $f(p)$  выбираем из таблицы 2.3 по температуре насыщения для R12.

**Пример 2.16.** В горизонтальном кожухотрубном испарителе холодильной машины R22 кипит в стекающей по наружной поверхности труб пленке. Температура кипения  $t_n = -18^\circ\text{C}$ .

Определить коэффициент теплообмена и поверхностную плотность теплового потока.

**Решение.** При заданной температуре насыщения  $t_n = -20^\circ\text{C}$  по приложению А таблица А10 находим давление насыщения  $p_n = 2,4614 \cdot 10^2$  кПа.

Коэффициент теплоотдачи по уравнению (2.50)

$$\alpha = c^{3,125} \Delta t^{2,088} (\rho \cdot 10^{-5})^{2,282},$$

Значение коэффициента  $c$  для данной температуры  $t_n = -20^\circ\text{C}$  выбираем из таблицы 2.4 для R22  $c = 5,9$ .

Таким образом

$$\alpha = 5,9^{3,125} \cdot 2^{2,088} \cdot 2,46^{2,282} = 8503 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Поверхностная плотность теплового потока

$$q = \alpha(t_{жс} - t_c) = 8503(-18 - (-20)) = 17006 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

## 2.7.2 Теплообмен при конденсации

При пленочной конденсации для ламинарного режима течения ( $Re = \frac{\omega \cdot \delta_x}{\gamma} < 400$ ) местный коэффициент теплообмена можно приближенно определить по формуле Нуссельта

$$\alpha_x = \sqrt[4]{\frac{r \rho^2 g \lambda^3}{4 \mu (t_n - t_c) x}}; \quad (2.53)$$

$$\alpha_x = \frac{\lambda}{\delta_x}. \quad (2.54)$$

Среднее значение коэффициента теплопередачи для вертикальной поверхности при ламинарном движении пленки ( $Re_{жс} = 5 \dots 7$ ) определяется по формуле:

$$\alpha_{вер} = 0,943 \sqrt[4]{\frac{r \rho^2 g \lambda^3}{4 \mu (t_n - t_c) H}}; \quad (2.55)$$

При  $7 < Re_{жс} < 400$

$$\alpha_{вер} = 1,15 \sqrt[4]{\frac{r \rho^2 g \lambda^3}{\mu (t_n - t_c) H}}; \quad (2.56)$$

Для горизонтальных труб

$$\alpha_{гор} = 0,728 \sqrt[4]{\frac{r \rho^2 g \lambda^3}{\mu (t_n - t_c) d}}, \quad (2.57)$$

где  $r$  – теплота парообразования, Дж/кг (принимается при температуре конденсации  $t_n$ );

$\rho$  – плотность конденсата, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\lambda$  – теплопроводность конденсата, Вт/(м·К);

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;

$d$  – диаметр трубы, м;

$H$  – высота стенки, м;

$w$  – локальная по высоте и средняя по сечению скорость стекания пленки, м/с.

$\delta_x$  – толщина пленки на расстоянии  $x$  от поверхности пленки, м;

$t_n$  и  $t_c$  – соответственно температуры насыщения и стенки, °C;

$\gamma$  – кинематическая вязкость коэффициента, м<sup>2</sup>/с.

При конденсации хладонов в медных трубах  $\alpha$  можно определить по формулам: (2.55), (2.56), (2.57) при  $H = d_{вн}$  и  $d = d_{вн}$

Для условий конденсации пара внутри горизонтальных труб плоского змеевика, коэффициент теплоотдачи хладагента

$$\alpha_{зм} = 0,195 \alpha \cdot q^{0,15}, \quad (2.58)$$

где  $\alpha$  определяется по формуле (2.57).

**Пример 2.17** На наружной поверхности вертикальной трубы диаметром  $d_n=20$  мм и высотой 2 м конденсируется сухой насыщенный водяной пар при давлении  $p=100$  кПа. Температура поверхности трубы  $t_c=94,5^\circ\text{C}$ .

Определить средний коэффициент теплоотдачи от пара к трубе и массу пара, которая конденсируется на поверхности трубы.

**Решение.** При давлении  $p=100$  кПа по приложению находим температуру насыщения  $t_n=99,6^\circ\text{C}$  и  $Z=2258$  кДж/кг;  $\lambda_{жк}=68,3$  Вт/(м·К);  $\mu_{жк}=282,5 \cdot 10^{-6}$  Па·с;  $\nu=0,295 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\rho_{жк}=959$  кг/м<sup>3</sup>.

Определяем приведённую высоту вертикальной поверхности

$$Z = \frac{H(t_n - t_c)}{z\rho\gamma} \left( \frac{q}{\gamma} \right)^{1/3} = \frac{2(99,64 - 94,5) \cdot 68,3 \cdot 10^{-2}}{2258 \cdot 10^3 \cdot 959 \cdot 0,295 \cdot 10^{-6}} = \left( \frac{9,81}{(0,295 \cdot 10^{-6})^2} \right)^{1/3} = 525$$

525 < 2300 Режим течения ламинарный.

При пленочной конденсации сухого насыщенного пара на горизонтальных трубах средний по периметру коэффициент теплоотдачи можно определить по формуле

$$Re = 0,81 \cdot z^{0,75}, \quad (2.59)$$

где  $Re = \frac{\alpha(t_n - t_c)\pi R}{z\rho\nu}$  - число Рейнольдса;

$$z = \frac{\lambda(t_n - t_c)\pi R}{z\rho\gamma} \left( \frac{q}{\nu^2} \right)^{1/3};$$

$R$  - радиус трубы, м.

Тепло физические параметры конденсата в формулах (2.58) и (2.59) выбираются по температуре насыщения.

Средний коэффициент теплоотдачи при конденсации на пучке гладких труб определяют по формуле

$$\alpha_n = \alpha \cdot \varepsilon_n = \alpha \cdot n^{-0,167} \quad (2.60)$$

где  $n$  - среднее по аппарату число труб по вертикали для коридорного или половины ряда шахматного пучка;

$\varepsilon_n$  - коэффициент, учитывающий влияние числа рядов труб.

$n$	1	3	5	10	15	20
$\varepsilon_n$	1	0,83	0,765	0,68	0,635	0,605

$\nu$ -кинематическая вязкость конденсата, м<sup>2</sup>/с.

В уравнениях (2.55), (2.56) и (2.57) физические параметры плёнки конденсата  $\rho$ ,  $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $\nu$  определяют при средней температуре  $t_{cp}=0,5(t_n+t_c)$ , а  $r$  - при температуре насыщения  $t_n$ .

При пленочной конденсации сухого насыщенного пара для ламинарного режима течения пленки конденсата на вертикальной поверхности и вертикальных трубах средний по высоте коэффициент теплоотдачи можно определить по формуле

$$Re = 0,95 Z^{0,78} \cdot \varepsilon_i, \quad (2.61)$$

где  $Re = \frac{\alpha(t_n - t_c)H}{Z\rho\nu}$  - число Рейнольдса;

$$Z = \frac{H(t_n - t_c)\lambda}{z\rho\nu} \left( \frac{d}{\gamma^2} \right)^{1/3} - \text{приведенная высота вертикальной поверхности};$$

Формула справедлива при  $Re < Re_{кр} \leq 1600$

$Z_{кр}=2300$ . Если  $Re > Re_{кр}$ , то расчётное уравнение

$$Re = (253 + 0,069 \left( \frac{Pr_{жк}}{Pr_c} \right)^{0,25} Pr^{0,5} (Z - 2300))^{4/3}, \quad (2.62)$$

где  $Pr_{жк}$  и  $Pr_c$  - значения числа Прандтля для конденсата соответственно при температуре  $t_n$  и  $t_c$ ,

$$\varepsilon_t = \left( \left( \frac{\lambda_c}{\lambda} \right)^3 \left( \frac{\mu}{\mu_c} \right) \right)^{\frac{1}{8}}$$

$$h_p = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D_p^2 - d_H^2}{D_p} \right),$$

где  $D_p$  - диаметр ребра, м;

$d_H$  - наружный диаметр трубы, м;

$A_z$  - площадь горизонтальной поверхности межреберных участков трубы и торцев ребер.

$$A_z = 0,5 \pi (D_p^2 - d_H^2) / S_p; \quad A_z = \pi d_H (1 - \delta_0 / S_p) + \pi D_p \delta_m / S_p,$$

где  $S_p$  - шаг ребер;

$\delta_0, \delta_m$  - толщина ребра в основании и в торце.

Величина  $E_p$  зависит как от геометрии и материала ребра, так и условий теплоотдачи.

Для плоского ребра величину  $E_p$  рассчитывают по формуле

$$E_p = (th(mh) / mh), \quad (2.63)$$

где  $th(mh) = (e^{mh} - e^{-mh}) / (e^{mh} + e^{-mh})$  – гиперболический тангенс по аргументу  $mh$ ;

$$m = \frac{\sqrt{2\alpha}}{(\lambda_p \delta)} \text{ - вспомогательная величина;}$$

$h$  и  $\delta$  - высота и толщина ребра, м;

$\lambda_p$  - теплопроводность материала ребра, Вт/(м·К).

В зависимости от  $mh$  величина  $E$  принимает значения:

$mh$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
$E_p$	1	0,097	0,987	0,971	0,950	0,924	0,895	0,830	0,762
$mh$	1,2	1,4	4,6	1,8	2,0	2,5	3	3,5	4,0
$E_p$	0,695	0,32	0,576	0,525	0,482	0,394	0,332	0,285	0,250

Коэффициент  $E_p$  для круглых, квадратных и пластинчатых труб постоянно толщины находят по формуле

$$E_p = (th(mh')) / mh'; \quad mh' = h' / (\delta 2 Bi) \quad (2.64)$$

где  $h'$  - приведенная высота ребра, м;

$Bi = \alpha \delta / \lambda_p$  - критерий Био.

Приведенная высота ребер рассчитывается:

$$\text{для круглых ребер:} \quad h' = h \left( 1 + 0,805 \lg \frac{D_p}{d_H} \right), \quad (2.65)$$

где  $h = 0,5(D_p - d_H)$  – высота ребра.

Коэффициент теплоотдачи при конденсации аммиака в горизонтальных стальных трубах можно определить по формуле

$$\alpha_m = 8980 q^{-0,2} d_{вн}^{-0,33} = 194007^{-0,167} d_{вн}^{-0,275} \quad (2.66)$$

Средний коэффициент теплообмена при конденсации на пучке оребренных труб

$$\alpha_{np} = \alpha \cdot \varepsilon_p \cdot n^{-0,167} \quad (2.67)$$

где  $\varepsilon_p$  коэффициент оребрения определяемая формулой

$$\varepsilon_p = 1,1 (A_B / A_{op}) E_p^{0,75} (d_w / h_p)^{0,25} + (A_z / A_{op}) \quad (2.68)$$

где  $\varepsilon_p$  - коэффициент эффективности ребра,

$A_B$  - площадь вертикальной поверхности ребра, м<sup>2</sup>,

$A_{op}$  - полная площадь наружной поверхности трубы с учётом ребра, м<sup>2</sup>

Прямоугольное со сторонами  $a$  и  $b$ ,  $a > b$ .

$$h' = 0,5 d_H \left( 1,28 \frac{b}{d_H} \sqrt{\frac{a}{b} - 0,2} - 1 \right) \left( 1 + 0,805 \lg \left( 1,28 \frac{b}{d_H} \sqrt{\frac{a}{b} - 0,2} \right) \right) \quad (2.69)$$

При  $a = b$

$$h' = 0,5 d_H \left( 1,15 \frac{b}{d_H} - 1 \right) \left( 1 + 0,805 \lg 1,15 \frac{b}{d_H} \right) \quad (2.70)$$

Пластинчатые:

Коридорный пучок рассчитывается по формулам (2.69) и (2.70).

Шахматный пучок при  $a > b$

$$h' = 0,5d_H \left( 1,27 \frac{b}{d_H} \sqrt{\frac{a}{b} - 0,3} - 1 \right) (1 + 0,805 \lg(1,27 \frac{b}{d_H} \sqrt{\frac{a}{b} - 0,3})) \quad (2.71)$$

При  $a = b$

$$h' = 0,5d_H \left( 1,065 \frac{b}{d_H} - 1 \right) (1 + 0,805 \lg 1,065 \frac{b}{d_H}) \quad (2.72)$$

## ЗАДАЧИ

**2.1.** В горизонтальном кожухотрубном теплообменном аппарате на наружной поверхности труб происходит пленочная конденсация сухого насыщенного пара при давлении насыщения 0,3 мПа. Наружный диаметр труб 18 мм. Температура поверхности стенки  $t_{cm} = 20^\circ\text{C}$ .

Определить коэффициент теплоотдачи от конденсирующего пара к поверхности труб, расположенных в первом, третьем и девятом рядах шахматного пучка.

**2.2.** В горизонтальном двухтрубном конденсаторе сухой насыщенный пар R12 конденсируется во внутренней трубе диаметром  $d_{вн}/d_H = 14/16$  мм. Длина рабочей части конденсатора 1 м. Давление насыщения  $p_H = 5,76 \cdot 10^5$  Па.

Определить температуру стенки внутренней поверхности трубы при  $m_t = 0,558$  кг/(ч·м) конденсируемого пара.

**2.3.** В горизонтальном кожухотрубном конденсаторе, трубы которого имеют наружное оребрение, происходит конденсация сухого насыщенного пара хладагента R12. Температура насыщения  $30^\circ\text{C}$ , средняя температура поверхности ребер и межреберных участков  $28^\circ\text{C}$ . Ребра выполнены из меди круглыми толщиной  $\delta = 2$  мм, шаг ребер  $S = 4$  мм. Диаметр ребер  $D_p = 30$  мм, диаметр трубы  $d_H = 20$  мм. Число рядов труб по вертикали  $n = 10$ . Определить коэффициент теплоотдачи.

**2.4.** В оребренном кожухотрубном испарителе холодильной машины необходимо поддерживать температуру кипения хладона R12  $t_H = -20^\circ\text{C}$  и поверх плотность теплового потока  $q = 6500$  Вт/м<sup>2</sup>.

Определить температуру стенки испарителя.

**2.5.** В горизонтальном испарителе холодильной машины хладагент R12 кипит в стекающей пленке. Температура насыщения  $t_H = -30^\circ\text{C}$ , поверхности стенки  $t_{cm} = -28^\circ\text{C}$ . Наружный диаметр трубы  $d_H = 18$  мм.

Определить линейную плотность теплового потока.

**2.6.** На поверхности вертикальной трубы высотой 3 м происходит пленочная конденсация сухого насыщенного водяного пара. Давление пара  $p = 0,04 \cdot 10^5$  Па. Температура поверхности трубы  $t_c = 20^\circ\text{C}$ .

Определить значение линейного коэффициента теплоотдачи на расстоянии  $x = 2$  м от верхнего конца трубы, если течение плёнки конденсата ламинарное по всей высоте трубы.

**2.7.** На наружной поверхности горизонтальной трубы диаметром  $d = 32$  мм и длиной 2 м конденсируется сухой насыщенный водяной пар при давлении  $p = 100$  кПа. Температура поверхности трубы  $94,5^\circ\text{C}$ .

Определить средний коэффициент теплоотдачи от пара и трубы и количество пара  $m_t$  кг/ч, которое конденсируется на поверхности.

**2.8.** Слой яблок охлаждается потоком воздуха. Средний размер яблок  $d = 42$  мм. Температура воздуха, входящего в слой  $t_{жс} = 0^\circ\text{C}$ , выходящего из него -  $t_{жс} = 20^\circ\text{C}$ . Скорость фильтрации  $w = 0,5$  м/с.

Определить коэффициент теплообмена от поверхности яблок к воздуху.

**2.9.** Паровой котёл общей площадью поверхности нагрева  $A = 15$  м<sup>2</sup> вырабатывает влажный насыщенный пар с давлением 0,3 мПа и степенью сухости  $x = 0,95$ . Температура стенки  $145^\circ\text{C}$ .

Определить количество водяного пара, получаемого за 1 час в котле.

**2.10.** В вертикальной трубе, внутренний диаметр которой  $d = 35$  мм, кипит аммиак. Температура насыщения  $t_H = 0^\circ\text{C}$  и стенки  $t_{cm} = 3^\circ\text{C}$ .

Определить коэффициент теплоотдачи от аммиака к стенке.

**2.11** В трубах испарителя холодильной машины кипит R12. Температура насыщения  $t_n = -12^\circ\text{C}$ , поверхности трубы  $t_{cm} = -7^\circ\text{C}$ . Массовый расход хладагента  $m_t = 85$  кг/ч; поверхностная плотность теплового потока  $q = 5220$  Вт/м<sup>2</sup>.

Определить внутренний диаметр трубы.

**2.12** В трубе с внутренним диаметром  $d_{вн} = 32$  мм движется кипящая вода со скоростью  $w = 1$  м/с. Вода находится под давлением  $p = 500$  кПа.

Определить коэффициент теплоотдачи от стенки трубы с кипящей воде, если температура внутренней поверхности  $154^\circ\text{C}$ .

**2.13** Рассчитать коэффициент теплоотдачи при оттаивании четвертин говяжьих туш свободным потоком воздуха, если ширина четвертин составляет 0,5 м.

**2.14.** В трубчатом водоподогревателе вода движется по трубам со скоростью  $w = 1$  м/с. При этом температура воды повышается от 20 до  $80^\circ\text{C}$ . Внутренний диаметр трубы 18 мм, длина 25 м. Средняя температура стенок  $t_c = 82^\circ\text{C}$ .

Определить коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  от поверхности трубы к движущейся воде.

**2.15.** Тушка курицы массой 1 кг обдувается воздухом с температурой  $t_{\text{воз}} = -4^\circ\text{C}$  и скоростью  $w = 4$  м/с. Эквивалентный диаметр пушки составляет 0,1 м. Определить коэффициент теплоотдачи.

**2.16** Рассчитать средний коэффициент теплоотдачи от дымовых газов следующего объемного состава:  $\text{ZH}_2\text{O} = 0,11$ ;  $\text{ZCO}_2 = 0,13$  и  $\text{ZN}_2 = 0,76$  к стенкам колбас при копчении. Колбасы диаметром 45 мм расположены в шахматном порядке. Поперечный и продольный шаги колбас соответственно равны  $S_1 = 2,5d$  и  $S_2 = 2d$ .

Средняя скорость потока газа  $w = 2,5$  м/с. По направлению потока дымовых газов пучок состоит из 6 рядов с одинаковой поверхностью. Температура газа перед пучком  $750^\circ\text{C}$ , а за пучком  $500^\circ\text{C}$ .

**2.17** Теплообменник для охлаждения воды представляет собой бак, внутри которого расположен змеевик. По змеевику циркулирует раствор хлористого натрия. Радиус змеевика 0,7 м, диаметр трубок змеевика 18 мм. Средняя температура внутренней поверхности трубы  $t_c = 0^\circ\text{C}$  и раствора  $t_m = -3^\circ\text{C}$ .

Скорость движения раствора  $w = 1,1$  м/с, концентрация раствора  $\varepsilon = 11$  ‰.

Определить общую длину змеевика, если тепловой поток передаваемый раствору  $\Phi = 10$  кВт.

**2.18.** Рассчитать поверхностную плотность теплового потока с поверхности горизонтального теплообменника цилиндрической формы при охлаждении её свободным потоком воздуха. Наружный диаметр корпуса теплообменника  $d_n = 500$  мм. Температура поверхности  $150^\circ\text{C}$  и температура воздуха в помещении  $t_{\text{воз}} = 20^\circ\text{C}$ .

**2.19** Электропроводящая шина прямоугольного сечения  $100 \times 3$  мм, расположена на ребре и охлаждается свободным потоком воздуха с температурой  $t_{\text{воз}} = 25^\circ\text{C}$ . В условиях длительной нагрузки температура шины не должна превышать  $70^\circ\text{C}$ .

Определить коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  с поверхности шины и допустимую силу тока в шине для указанных условий, если удельное сопротивление материала шины  $\rho = 0,13$  Ом·мм<sup>2</sup>/м.

**2.20** Определить эквивалентный коэффициент теплопроводности и поверхностную плотность теплового потока между головкой цилиндров и капотом двигателя, если температура головки цилиндров  $90^\circ\text{C}$ , стенки капота  $20^\circ\text{C}$ .

**2.21** В цилиндрическом баке высотой  $h = 1,5$  охлаждается молоко 3,5% жирности. Температура стенок бака  $t_{cm} = 5^\circ\text{C}$ , а молока  $35^\circ\text{C}$ . Перемешивание отсутствует.

Определить коэффициент теплоотдачи и поверхностную плотность теплового потока.

**2.22** В камере холодильника поддерживается температура  $t_{cm} = -20^\circ\text{C}$ . Потеря холода происходит только через потолок, температура которого  $t_c = -17^\circ\text{C}$ . Воздух в камере находится в спокойном состоянии.

Определить потери холода через потолок, если размер потолка  $4 \times 5$  м. Тепловое излучение не учитывать.

Приведенная высота круглого ребра  $h'$  находим по формуле (2.66)



$$h' = \frac{D_p - d_H}{2} \left( 1 + 0,35 \ln \frac{D_p}{d_H} \right) = \frac{26 - 20}{2} \left( 1 + 0,35 \ln \frac{28}{20} \right) = 3,787 \text{ мм}$$

вспомогательную величину  $m$  находим по формуле

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda_m \delta}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2533}{386 \cdot 0,002}} = 81$$

Тогда  $mh' = 81 \cdot 0,003787 = 0,307$

По приложению находим  $thmh' = 0,292$

$$E_p = \frac{0,292}{0,307} = 0,95$$

По (2.63) определяем коэффициент оребрения

$$h_p = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D_p^2 - d^2}{D_p} \right) = \frac{3,14}{4} \left( \frac{0,026^2 - 0,02^2}{0,026} \right) = 8,33 \cdot 10^{-3}$$

$$A_B = 0,5 \cdot 3,14 \frac{0,026^2 - (0,020)^2}{0,004} = 0,1083 \text{ м}^2$$

$$A_z = 3,14 \cdot 0,002 \left( 1 - \frac{0,002}{0,004} \right) + \frac{3,14 \cdot 0,0026 \cdot 0,002}{0,004} = 0,072 \text{ м}^2$$

$$E_p = 1,1 \left( \frac{0,108}{0,189} \right) \cdot 0,95^{0,75} \left( \frac{0,020}{8,33 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,25} + \left( \frac{72 \cdot 10^{-3}}{0,18} \right) = 1,19$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  находим по формуле 2.62

$$\alpha_{np} = \alpha \varepsilon_p n^{-0,167} = 2533 \cdot 1,19 \cdot 10^{-0,167} = 2052 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

$\delta = 2$  мм, шаг ребра  $S_p = 4$  мм. Диаметр ребер  $D_p = 26$  мм, диаметр трубы  $d = 20$  мм. Число рядов труб по вертикали  $n = 10$ .

Определить коэффициент теплоотдачи.

**Решение.** Средний коэффициент теплоотдачи при конденсации на пучке оребренных труб определяем по формуле (2.62)

$$\alpha_{np} = \alpha \varepsilon_p n^{-0,167}$$

$$\text{где } \alpha = 0,7284 \sqrt{\frac{\lambda_{жс}^3 \rho_{жс}^2 g z}{\mu_{жс} (t_H - t_c) d}}$$

Теплофизические свойства R22 при  $t_H = 81^\circ \text{C}$  определяем по приложению  $z = 1,7602 \cdot 10^5$  Дж/кг; остальные параметры  $\mu_{жс} = 2,295 \cdot 10^{-4}$  Па·с;  $\lambda_{жс} = 0,0826$  Вт/(м·К);  $\rho^l = 1176$  кг/м<sup>3</sup> определяем при  $t_{cp} = 0,5(t_H + t_c) = 0,5(81 + 29) = 30^\circ \text{C}$ .

$$\text{Теплопроводность меди } \alpha = 0,7284 \sqrt{\frac{0,0826^3 \cdot 1176^2 \cdot 9,81 \cdot 1,7602 \cdot 10^5}{2,295 \cdot 10^{-4} (31 - 29) \cdot 0,02}} = 2533 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

Коэффициент эффективности ребра находим по формуле  $E_p = thmh' / mh'$

Определяем теплофизические свойства R22 по приложению при  $t_H = 20^\circ \text{C}$ .

$Z = 188,41 \cdot 10^3$  Дж/кг;  $\delta = 90,12 \cdot 10^{-4}$  Н/м;  $\rho^l = 1213$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho^d = 38,760$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_{жс} = 0,082$  Вт/(м·К);  $\mu_{жс} = 2,383 \cdot 10^{-4}$  Па·с;  $\gamma_m = 0,197 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с

$$\alpha = 0,7284 \sqrt{\frac{0,082^3 \cdot 1213 \cdot 9,81 \cdot 18841 \cdot 10^3}{2,383 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta t \cdot 0,020}} = 3066 \cdot \Delta t^{\frac{1}{4}}$$

$$q = \alpha_t \Delta t; \quad q = \frac{Q}{\alpha}$$

$$We = \frac{90,12 \cdot 10^{-4}}{9,81(1213 - 38,760) \cdot 0,020^2} = \frac{90,12 \cdot 10^{-4}}{4,608} = 1,955 \cdot 10^{-3};$$

$$\alpha_t = 0,2 \cdot 1,955^{-0,25} \cdot 10^{-3} \cdot 3666 \cdot \Delta t^{-0,25} = 2866 \Delta t^{-0,25}$$

$$q = 128,95 \cdot \Delta t^{-0,25} \cdot \Delta t = 128,95 \Delta t^{0,75}$$

$$\Delta t^{0,75}=q=950=0,325; \Delta t=0,325^{1/0,75}=0,223$$

$$t_H-t_C=0,223; t_C=t_H-0,223=20-0,223=19,76$$

*Пример 2.19* В кожухотрубном горизонтальном конденсаторе, трубы которого имеют наружное оребрение, происходит конденсация сухого насыщенного пара R22. Температура насыщения  $t_H=31^\circ\text{C}$ , средняя температура поверхности ребер и межреберного участков  $t_{cm}=31^\circ\text{C}$ , средняя температура поверхности ребер и межреберного участков  $t_{cm}=29^\circ\text{C}$ . Ребра медные, круглые, толщиной  $\mu_m=9,483 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ;  $\rho_{жс}=997,5 \text{ кг/м}^3$ .

Для первого ряда пучка труб  $\alpha$  определяем по формуле (2.57)

$$\alpha = 0,7284 \sqrt{\frac{0,6017^3 \cdot 997,5^2 \cdot 9,81 \cdot 2,43 \cdot 10^6}{9,433 \cdot 10^{-4} \cdot (30-16) \cdot 0,019}} = 8786 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

По формуле (2.61) находим  $\alpha_3$  и  $\alpha_{10}$

$$\alpha_3 = \alpha \cdot \varepsilon_3 = 8786 \cdot 0,83 = 7292,68 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

$$\alpha_{10} = \alpha \cdot \varepsilon_{10} = 8786 \cdot 0,68 = 5974,48 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

*Пример 2.20* Во внутренней трубе горизонтального кожухотрубного аппарата осуществляется конденсация сухого насыщенного пара R22 при давлении насыщения  $p_n=916,93 \text{ кПа}$ . Внутренний диаметр трубы  $d_{вн}=20 \text{ мм}$ .

Определить температуру поверхности стенки трубы, если поверхностная плотность теплового потока  $q=950 \text{ Вт/м}^2$ .

*Решение.* Средний коэффициент теплоотдачи, отнесенный к полной внутренней поверхности, можно рассчитать по формуле  $\alpha_m=0,2\alpha We^{0,25}$

где  $\alpha$  определяется по формуле (2.57)

$$We = \frac{\sigma_m}{g(\rho' - \rho''z)d_{вн}^2} \quad - \text{ критерий Вибера.}$$

Определяем  $Re=0,95z^{0,78} \varepsilon_t=0,95 \cdot (525)^{0,78}$ ;

$$\varepsilon_t = \left( \left( \frac{\lambda_c}{\lambda_m} \right)^3 \left( \frac{M_m}{M_c} \right) \right)^{\frac{1}{8}} = \left( \frac{303 \cdot 236 \cdot 10^{-6}}{297,08 \cdot 10^{-6}} \right)^{\frac{1}{8}} = 125,73$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$

$$\alpha = \frac{Re z \rho \nu}{(t_H - t_c) H} = \frac{132,35 \cdot 2258 \cdot 0,295 \cdot 10^{-6} \cdot 959}{(99,64 - 94,5) \cdot 2} = 7813 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

Количество пара, которое конденсируется на поверхности трубы

$$m_t = \frac{\pi d H \alpha \Delta t}{z} = \frac{3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 7813 \cdot 5,14}{2258 \cdot 10^3} = 2,23 \cdot 10^3 \text{ кг/с.}$$

*Пример 2.21* В горизонтальном кожухотрубном аппарате на наружной поверхности труб осуществляется пленочная конденсация сухого насыщенного водяного пара при давлении насыщения  $4,242 \text{ кПа}$ . Наружный диаметр труб  $d_H=19 \text{ мм}$ . Температура поверхности  $t_c=16^\circ\text{C}$ .

Рассчитать коэффициент теплоотдачи от конденсируемого пара.

К поверхности труб, расположенных в первом, третьем и девятом ряду труб (считая сверху) шахматного пучка.

*Решение.* По приложениям при данном давлении насыщения определяем температуру насыщения при  $p_n=4,2442 \text{ кПа}$ ,  $t_H=30^\circ\text{C}$ ,

$z=2,43 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$  при  $t_{cp}=(30+16)0,5=23^\circ\text{C}$  находим  $\lambda_{жс}=0,6017 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

### 3 РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ

Теплообмен излучением является ведущим, определяющим в открытом космосе, в вакууме.

При обычных (комнатных) температурах тепловое излучение мало по сравнению с теплопроводностью и конвекцией и часто в этих условиях его можно не рассчитывать.

При высоких (более 600°C) тепловое излучение значительно больше, чем теплопроводность и конвекция и является ведущим видом теплообмена.

Плотность теплового потока излучаемого телом

$$\Phi_{\lambda} = \varepsilon C_0 A (T/100)^4, \quad (3.1)$$

где  $\varepsilon$  - коэффициент черноты (таблица 3.1);

$C_0$  – коэффициент излучения абсолютного черного тела,  $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$ .

Таблица 3.1 Степень черноты некоторых материалов

Материал	$t, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon$
Алюминий окисленный	200...600	0,11...0,19
Бумага тонкая	20...100	0,92
Вода	20	0,95
Дерево сухое	20	0,8
Железо окисленное	120...520	0,78...0,82
Латунь прокат	22	0,06
Картон асбестовый	40...370	0,93...0,95
Кирпич красный	20	0,93
Кирпич огнеупорный	-	0,8...0,9
Краски масляные	100	0,92...0,86
Сажа	100...270	0,95
Штукатурка известковая	10...88	0,91

Теплообмен между телами (взаимное облучение)

$$\Phi_{\lambda} = \varepsilon_{np} \cdot C_0 A_1 ((T_1/100)^4 - (T_2/100)^4), \quad (3.2)$$

где  $\varepsilon_{np}$  – приведенная степень черноты;

$A_1$  – площадь поверхности тела,  $\text{м}^2$ .

Приведенная степень черноты в простых случаях может определяться расчетом.

Например:

для теплообмена излучением между двумя плоскими стенками при малом расстоянии между ними или при бесконечно больших поверхностях

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{(1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)}, \quad (3.3)$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – коэффициенты черноты, первой и второй поверхностей.

Для теплообмена излучением в замкнутом пространстве (одно тело охвачено другим, например, тело в помещении):

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{(1/\varepsilon_1 + A_1/A_2(1/\varepsilon_2 - 1))}, \quad (3.4)$$

где  $A_1 < A_2$  – площади тел.

Для теплообмена излучением при малых поверхностях или большом удалении друг от друга:

$$\varepsilon_{np} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2, \quad (3.5)$$

Для более сложных случаев

$$\varepsilon_{np} = \varepsilon_1 \cdot \varphi_{12} = \varepsilon_2 \varphi_{21}, \quad (3.6)$$

где  $\varphi_{12}$  – коэффициент облученности первого тела на второе,  $\varphi_{12} \leq 1$ .

Коэффициент облученности принимается по литературным или экспериментальным данным.

**Пример 3.1** Определить потери тепла путем излучения с поверхности стальной трубы  $d=70$  мм и длиной  $l=3$  м при  $t_{cl}=100^\circ\text{C}$ , если труба находится в большом кирпичном помещении, температура стенок которого  $20^\circ\text{C}$ .

*Решение.* Согласно условию  $A_1 < A_2$ , поэтому  $\varepsilon_{np} = \varepsilon_1$ . Находим степень черноты стальной трубы из таблицы 3.1  $\varepsilon_1 = 0,8$ . Тогда согласно (3.3)

$$\Phi_{\lambda} = \varepsilon_{np} \cdot C_0 A_1 ((T_1/100)^4 - (T_2/100)^4) = 0,8 \cdot 5,7 \cdot 3,14 \cdot 0,07 \cdot 3(3,73^4 - 2,93^4) = 360,4 \text{ Вт}$$

#### 4 РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕНА КОНВЕКЦИЕЙ И ИЗЛУЧЕНИЕМ

Теплообмен через газовую (воздушную) среду происходит конвекцией и излучением. При повышенных температурах (+50...600°C) излучение играет заметную роль.

Плотность теплового потока

$$\Phi = \Phi_k + \Phi_l = \alpha A \Delta T \quad (4.1)$$

где  $\Phi_k$  и  $\Phi_l$  – плотность теплового потока передаваемого, соответственно, конвекцией и излучением, Вт;

$\alpha$  – суммарный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Суммарный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l, \quad (4.2)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией;

$\alpha_l$  – коэффициент теплоотдачи излучением.

где  $\Phi_l$  – рассчитывается по зависимостям.

**Пример 4.1** Для отопления бригадного пункта технического обслуживания вдоль наружной стены проложена стальная труба диаметром  $d=0,1$  м, длиной  $l=10$  м.

Рассчитать коэффициент теплоотдачи и тепловой поток отдаваемый трубой в помещение, если по трубе циркулирует горячая вода, температура трубы  $t_m=85^\circ\text{C}$ , температура воздуха  $t_6=20^\circ\text{C}$ , температура стен помещения  $t_c=15^\circ\text{C}$ .

*Решение.* Помещение отапливается за счет теплообмена конвекцией (поверхность трубы и подвижная среда – воздух) и теплового излучения (температура трубы значительно отличается от температуры стен и излучением нельзя пренебречь). Таким образом, тепловой поток от трубы в помещении рассчитываем по формуле (4.1) и (4.2):

$$\Phi = \alpha A \Delta t = (\alpha_k + \alpha_l) A \Delta t = \Phi_k + \Phi_l;$$

где  $\Phi_k$  и  $\Phi_l$  – тепловые потоки конвекцией и излучением (лучевой), Вт;

$\alpha$ ,  $\alpha_k$ ,  $\alpha_l$  – коэффициенты теплоотдачи общий, конвекцией, излучением Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\Delta t$  – разность температур, К.

Труба находится в помещении, следовательно, не обдувается ветром и находится в условиях свободной конвекции. Для выбора критериальной зависимости рассчитываем критерии Грасгофа и Прандтля. При горизонтальном расположении трубы за определяющий конвекцию размер принимаем диаметр трубы

$$Gr = \frac{g\beta(t_m - t_6)d^3}{\gamma^2} = \frac{9,81 \cdot 3,1 \cdot 10^{-3}(85 - 20) \cdot 0,1^3}{(18,2 \cdot 10^{-6})^2} = 5,97 \cdot 10^6;$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести, м<sup>2</sup>/с;

$\beta$  – коэффициент объемного расширения, для газов  $\beta = 1/T_{\text{опр}} = 1/(273 + 52,5) = 3,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ;

$d$  – диаметр трубы (определяющий размер), м;

$\gamma$  – кинематическая вязкость подвижной среды (воздуха), принимается из таблицы 6 по средней температуре

$$t_{cp} = 0,5(t_m + t_6) = 0,5(85 + 20) = 52,5^\circ\text{C}.$$

С учетом интерполяции  $\gamma = 18,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . По таблице 6 при  $t_{cp}$  принимаем значение критерия Прандтля  $Pr = 0,7$ .

Вычисляем произведение  $Gr \cdot Pr = 5,97 \cdot 10^6 \cdot 0,7 = 4,16 \cdot 10^6$ , выбираем критериальную зависимость и рассчитываем критерий Нуссельта.

$$Nu = 0,50(Gr \cdot Pr)^{0,25} = 0,50(4,16 \cdot 10^6)^{0,25} = 22,58.$$

Вычисляем коэффициент теплоотдачи конвекцией

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = \frac{22,58 \cdot 28,4 \cdot 10^{-3}}{0,1} = 6,41 \text{ Вт/(м}^2\text{/К)};$$

где  $\lambda$  - теплопроводность воздуха принимается из таблицы 6 по  $t_{cp}=52,5^\circ\text{C}$ ;  $\lambda=28,4 \cdot 10^{-3}$  Вт/(м·К).

Для расчета теплообмена излучением учтем, что труба находится внутри помещения и поверхность ее во многом раз меньше поверхности стен  $A_m \ll A_c$ , поэтому, по формуле (3.4) получаем

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{(1/\varepsilon_1 + A_1/A_2)(1/\varepsilon_2 - 1))} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 0} = \varepsilon_1.$$

Из таблицы 4 для железа окисленного получаем  $\varepsilon_1=0,8$ .

Теплообмен излучением (формула 3.2)

$$\Phi_l = \varepsilon_{np} C_o A_m ((T_m/100)^4 - (T_c/100)^4) = 0,8 \cdot 5,67 \cdot 3,14 (3,58^4 - 2,88^4) = 1360 \text{ Вт.}$$

где  $C_o$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $C_o=5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

$A_m = \pi d l = 3,14 \cdot 0,1 \cdot 10 = 3,14$  – поверхность трубы, м<sup>2</sup>.

Коэффициент теплоотдачи излучением (формула 4.2)

$$\alpha_l = \frac{\Phi_l}{A_m (t_m - t_c)} = \frac{1360}{3,14(85 - 20)} = 6,66 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}.$$

Общий коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l = 6,93 + 6,66 = 13,5 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}.$$

Отсюда видно, что в этом примере теплообмен конвекцией и излучением, примерно, одинаковы, первоначальное предположение подтвердилось расчетом.

Тепловой поток, отдаваемый в помещение

$$\Phi = \alpha A_m \Delta T = 13,6 \cdot 3,14 (85 - 20) = 2,78 \text{ Вт.}$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1 Физические свойства сухого воздуха при  $p_B=101,325$  кПа=760 мм рт. ст.

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{н}\cdot\text{с/м}^2$	$\gamma \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,500	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

Таблица А2 Термодинамические свойства влажного воздуха (p=100 кПа=760 мм рт. ст.)

t, °C	p <sub>n</sub> , Па	d'', г/кг	c <sub>p</sub> , кДж/(кг·К)	c <sub>p</sub> , кДж/(кг·К)	h <sub>c</sub> , кДж/кг	h <sub>n</sub> , кДж/кг	h'', кДж/кг	ρ <sub>c</sub> , кг/м³
1	2	3	4	5	6	7	8	9
-30	37,330	0,2323	1,006	1,0064	-30,18	0,5680	-29,61	1,434
-29	41,463	0,2580	1,006	1,0065	-29,17	0,6313	-28,54	1,428
-28	45,996	0,2862	1,006	1,0065	-28,17	0,7008	-27,47	1,422
-27	51,062	0,3178	1,006	1,0066	-27,16	0,7788	-26,38	1,416
-26	56,395	0,3510	1,006	1,0067	-26,16	0,8608	-25,30	1,411
-25	62,795	0,3908	1,006	1,0067	-25,15	0,9591	-24,19	1,405
-24	69,461	0,4324	1,006	1,0068	-24,14	1,062	-23,08	1,399
-23	76,794	0,4780	1,006	1,0069	-23,14	1,175	-21,96	1,394
-22	84,793	0,5279	1,006	1,0069	-22,13	1,298	-20,83	1,388
-21	93,459	0,5818	1,006	1,0071	-21,13	1,432	-19,69	1,383
-20	102,925	0,6408	1,006	1,0072	-20,12	1,579	-18,54	1,377
-19	113,324	0,7057	1,006	1,0073	-19,11	1,740	-17,37	1,372
-18	124,656	0,7763	1,006	1,0075	-18,11	1,915	-16,19	1,366
-17	136,922	0,8528	1,006	1,0076	-17,10	2,106	-15,00	1,361
-16	150,387	0,9368	1,006	1,0078	-16,10	2,315	-13,78	1,356
-15	165,053	1,028	1,006	1,0079	-15,09	2,542	-12,55	1,351
-14	180,918	1,127	1,006	1,0081	-14,08	2,789	-11,30	1,345
-13	198,117	1,235	1,006	1,0083	-13,08	3,059	-10,02	1,340
-12	216,915	1,352	1,006	1,0085	-12,07	3,351	-8,72	1,335
-11	237,313	1,480	1,006	1,0088	-11,07	3,671	-7,40	1,330
-10	259,445	1,618	1,006	1,0090	-10,06	4,016	-6,04	1,325
-9	283,308	1,767	1,006	1,0093	-9,05	4,390	-4,66	1,320
-8	309,440	1,931	1,006	1,0096	-8,05	4,800	-3,25	1,315
-7	337,571	2,107	1,006	1,0099	-7,04	5,242	-1,80	1,310
-6	368,102	2,298	1,006	1,0103	-6,04	5,722	-0,31	1,305
-5	401,033	2,504	1,006	1,0107	-5,03	6,239	1,21	1,300
-4	436,763	2,729	1,006	1,0111	-4,02	6,805	2,78	1,295
-3	475,426	2,971	1,006	1,0116	-3,02	7,414	4,40	1,290
-2	517,156	3,233	1,006	1,0120	-2,01	8,074	6,06	1,286
-1	562,086	3,516	1,006	1,0126	-1,01	8,787	7,78	1,281
0	610,8	3,823	1,006	1,0131	0	9,561	9,56	1,276
1	656,6	4,111	1,006	1,0127	1,01	10,289	11,30	1,272
2	705,4	4,419	1,006	1,0143	2,01	11,068	13,08	1,267
3	757,5	4,748	1,006	1,0149	3,02	11,901	14,92	1,262
4	812,9	5,098	1,006	1,0155	4,02	12,788	16,81	1,258
5	871,8	5,470	1,006	1,0162	5,03	13,732	18,76	1,253
6	934,6	5,868	1,006	1,0170	6,04	14,742	20,78	1,249
7	1001,2	6,290	1,006	1,0178	7,04	15,814	22,86	1,244
8	1072,1	6,741	1,006	1,0186	8,05	16,960	25,01	1,240
9	1147,3	7,219	1,006	1,0195	9,05	18,176	27,23	1,236
10	1227,1	7,727	1,006	1,0205	10,06	19,470	29,53	1,231
11	1311,8	8,268	1,006	1,0215	11,07	20,848	31,91	1,227
12	1401,5	8,841	1,006	1,0225	12,07	22,310	34,38	1,223
13	1496,7	9,451	1,006	1,0237	13,08	23,867	36,95	1,218
14	1597,4	10,097	1,006	1,0249	14,08	25,517	39,60	1,214

Продолжение таблицы А 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	1704,1	10,783	1,006	1,0268	15,09	27,271	42,36	1,210
16	1817,0	11,511	1,006	1,0275	16,10	29,133	45,23	1,206
17	1936,4	12,282	1,006	1,0290	17,10	31,108	48,21	1,201
18	2062,6	13,100	1,006	1,0305	18,11	33,204	51,31	1,197
19	2196,0	13,966	1,006	1,0322	19,11	35,425	54,54	1,193
20	2336,8	14,883	1,006	1,0339	20,12	37,779	57,90	1,189
21	2485,5	15,854	1,006	1,0357	21,13	40,273	61,10	1,185
22	2642,4	16,882	1,0061	1,0379	22,13	42,916	65,05	1,181
23	2807,9	17,970	1,0061	1,0398	23,14	45,716	68,86	1,177
24	2982,4	19,121	1,0061	1,0416	24,15	48,680	72,83	1,173
25	3166,6	20,338	1,0061	1,0435	25,15	51,816	76,97	1,169
26	3360,0	21,626	1,0061	1,0472	26,16	55,138	81,30	1,165
27	3563,9	22,987	1,0061	1,0491	27,16	58,651	85,82	1,161
28	3778,5	24,425	1,0061	1,0510	28,17	62,366	90,54	1,158
29	4004,3	25,946	1,0062	1,0548	29,18	66,298	95,48	1,154
30	4241,7	27,552	1,0062	1,0586	30,19	70,453	100,64	1,150
31	4491,3	29,250	1,0062	1,0604	31,19	74,850	106,04	1,146
32	4753,6	31,043	1,0062	1,0642	32,20	79,496	111,69	1,142
33	5029,0	32,937	1,0063	1,0680	33,21	84,408	117,61	1,139
34	5318,2	34,937	1,0063	1,0718	34,21	89,599	123,81	1,135
35	5621,7	37,050	1,0063	1,0755	35,22	95,087	130,31	1,131
36	5940,1	39,281	1,0063	1,0792	36,23	100,886	137,11	1,128
37	6274,0	41,937	1,0064	1,0849	37,24	107,015	144,25	1,124
38	6624,0	44,124	1,0064	1,0883	38,24	113,49	151,73	1,12
39	6990,7	46,750	1,0064	1,0937	39,25	120,33	159,58	1,117

Таблица А3 Физические свойства дымовых газов ( $p_B=760$  мм рт. ст.;  $\bar{p}_{CO_2}=0,13$ ;  $\bar{p}_{H_2O}=0,11$ ;  $\bar{p}_{N_2}=0,76$ )

t, °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^6$ , н·с/м <sup>2</sup>	$\gamma \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
0	1,295	1,042	2,28	16,9	15,8	12,20	0,72
100	0,950	1,068	3,13	30,8	20,4	21,54	0,69
200	0,748	1,097	4,01	48,9	24,5	32,80	0,67
300	0,617	1,122	4,84	69,9	28,2	45,81	0,65
400	0,525	1,151	5,70	94,3	31,7	60,38	0,64
500	0,457	1,185	6,56	121,1	34,8	76,30	0,63
600	0,405	1,214	7,42	150,9	37,9	93,61	0,62
700	0,363	1,239	8,27	183,8	40,7	112,1	0,61
800	0,330	1,264	9,15	219,7	43,4	131,8	0,60
900	0,301	1,290	10,0	258,0	45,9	152,5	0,59
1000	0,275	1,306	10,90	303,4	48,4	174,3	0,58
1100	0,257	1,323	11,75	345,5	50,7	197,1	0,57
1200	0,240	1,340	12,62	392,4	53,0	221,0	0,56



Таблица А4 Физические свойства водяного пара на линии насыщения

$t$ , °C	$p$ , бар	$\rho''$ , кг/м <sup>3</sup>	$i'$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /сек	$\mu \cdot 10^6$ , н·сек/м <sup>2</sup>	$\gamma \cdot 10^8$ , м <sup>2</sup> /сек	$Pr$
100	1,013	0,598	2675,9	2256,8	2,135	2,372	18,58	11,97	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2691,4	2230,0	2,177	2,489	13,83	12,46	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2706,5	2202,8	2,206	2,593	10,50	12,85	11,46	1,09
130	2,70	1,496	2720,7	2174,3	2,257	2,686	7,975	13,24	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2734,1	2154,0	2,315	2,791	6,130	13,54	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2746,7	2114,3	2,395	2,884	4,728	13,93	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2758,0	2082,6	2,479	3,012	3,722	14,32	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2768,9	2049,5	2,583	3,128	2,939	14,72	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2778,5	2015,2	2,709	3,268	2,339	15,11	2,93	1,25
190	12,55	6,397	2786,4	1978,8	2,856	3,419	1,872	15,60	2,44	1,30
200	15,55	7,862	2793,1	1940,7	3,023	3,547	1,492	15,99	2,03	1,36
210	19,08	9,588	2798,2	1900,5	3,199	3,722	1,214	16,38	1,71	1,41
220	23,20	11,62	2801,5	1857,8	3,408	3,896	0,983	16,87	1,45	1,47
230	27,98	13,99	2803,2	1813,0	3,634	4,094	0,806	17,36	1,24	1,54

Таблица А5 Физические свойства воды на линии насыщения

$t$ , °C	$p$ , бар	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$i$ , кДж/кг	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /сек	$\mu \cdot 10^{-6}$ , н·сек/м <sup>2</sup>	$\gamma \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /сек	$\beta \cdot 10^6$ , н·сек/м <sup>2</sup>	$\sigma \cdot 10^8$ , м <sup>2</sup> /сек	$Pr$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	1,013	999,9	0	4,212	0,560	13,2	1788	1,789	-0,63	756,4	13,5
10	1,013	999,7	42,04	4,191	0,580	13,8	1306	1,306	+0,70	741,6	9,45
20	1,013	998,2	83,91	4,183	0,597	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,03
30	1,013	995,7	125,7	4,174	0,612	14,7	801,5	0,805	3,21	712,2	5,45
40	1,013	992,2	167,5	4,174	0,627	15,1	653,3	0,659	3,87	696,5	4,36
50	1,013	988,1	209,3	4,174	0,640	15,5	549,4	0,566	4,49	676,9	3,59
60	1,013	983,1	251,1	4,179	0,650	15,8	469,9	0,478	5,11	662,2	3,03
70	1,013	977,8	293,0	4,187	0,662	16,1	406,1	0,415	5,70	643,5	2,58
80	1,013	971,8	335,0	4,195	0,669	16,3	355,1	0,365	6,32	625,9	2,23
90	1,013	965,3	377,0	4,208	0,676	16,5	314,9	0,326	6,95	607,2	1,97
100	1,013	958,4	419,1	4,220	0,684	16,8	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	0,685	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,98	943,1	503,7	4,250	0,686	17,1	237,4	0,252	8,64	548,8	1,47
130	2,70	934,8	546,1	4,266	0,686	17,3	217,8	0,233	9,16	528,8	1,35
140	3,61	926,1	589,1	4,287	0,685	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,76	917,0	632,2	4,313	0,684	17,3	186,4	0,203	10,3	486,6	1,17
160	6,18	907,4	675,4	4,346	0,681	17,8	173,6	0,191	10,7	466,0	1,10
170	7,92	897,3	719,3	4,380	0,676	17,2	162,8	0,181	11,3	443,4	1,05
180	10,03	886,9	763,3	4,417	0,672	17,2	153,0	0,173	11,9	422,8	1,03
190	12,55	876,0	807,8	4,459	0,664	17,2	144,2	0,165	12,6	400,2	0,965
200	15,55	863,0	852,5	4,505	0,658	17,0	136,4	0,158	13,3	376,7	0,932
210	19,08	852,8	897,7	4,555	0,649	16,7	130,5	0,153	14,1	354,1	0,915
220	23,20	840,3	943,7	4,614	0,640	16,5	124,6	0,148	14,8	331,6	0,898
230	27,98	827,3	990,2	4,681	0,629	16,3	119,7	0,145	15,9	310,0	0,888
240	33,48	813,6	1037,5	4,76	0,617	16,0	114,8	0,141	16,8	285,5	0,883
250	39,78	799,0	1085,7	4,87	0,605	15,5	109,0	0,137	18,1	261,9	0,884
260	46,94	784,0	1135,7	4,98	0,593	15,2	105,9	0,135	19,7	237,4	0,892
270	55,05	767,9	1185,3	5,12	0,578	14,7	102,0	0,133	21,6	214,8	0,905
280	64,19	750,7	1236,8	5,30	0,565	14,3	98,1	0,131	23,7	191,3	0,917
290	74,45	732,3	1290,0	5,50	0,548	13,7	94,2	0,129	26,2	168,7	0,944
300	85,92	712,5	1344,9	5,76	0,532	13,0	91,2	0,128	29,2	144,2	0,986
310	98,70	691,1	1402,2	6,11	0,514	12,2	88,3	0,128	32,9	120,7	1,05
320	112,90	667,1	1462,1	6,57	0,494	11,3	85,3	0,128	38,2	98,10	1,14

Продолжение таблицы А5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
330	128,65	640,2	1526,2	7,25	0,471	10,2	81,4	0,127	43,3	76,71	1,25
340	146,08	610,1	1594,8	8,20	0,446	8,95	77,5	0,127	53,4	56,70	1,42
350	165,37	574,4	1671,4	10,10	0,431	7,90	72,6	0,126	66,8	38,16	1,70
360	186,74	528,0	1761,5	14,65	0,367	4,2	66,7	0,126	109	20,21	2,66
370	210,53	450,5	1892,5	40,32	0,338	1,85	56,9	0,126	264	4,709	6,80

Таблица 6 Теплофизические свойства R11 (жидкость) на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-2}, \text{кПа}$	$r, \text{кДж/кг}$	$\rho', \text{кг/м}^3$	$\rho'', \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$\alpha \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^{-7}, \text{н}\cdot\text{с/м}^2$	$\gamma \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	$\sigma \cdot 10^{-4}, \text{м}^2/\text{сек}$	$\beta \cdot 10^{-4}, \text{н}\cdot\text{сек/м}^2$	$Pr$
-40	0,5093	1620,7	0,3619	204,06	0,84	0,107	0,783	9,806	0,605	264,8	13,0	7,72
-30	0,09206	1600,8	0,6285	200,69	0,85	0,104	0,772	8,159	0,510	253,0	13,2	6,60
-20	0,1576	1579,0	1,037	197,29	0,86	0,101	0,761	6,992	0,444	240,3	13,5	5,83
-10	0,2573	1554,7	1,633	193,84	0,86	0,098	0,747	6,119	0,394	224,6	13,9	5,27
0	0,4030	1534,4	2,477	190,34	0,87	0,095	0,733	5,443	0,354	212,8	14,4	4,83
10	0,6083	1511,5	3,630	186,79	0,88	0,093	0,716	4,893	0,324	201,0	15,0	4,52
20	0,8891	1487,5	5,165	183,17	0,88	0,090	0,697	4,442	0,300	186,3	15,7	4,30
30	1,263	1463,7	7,158	179,45	0,89	0,087	0,678	4,060	0,277	173,6	16,5	4,09
40	1,748	1439,0	9,709	175,60	0,90	0,084	0,658	3,746	0,260	160,8	17,5	3,95
50	2,366	1413,8	12,900	171,53	0,91	0,081	0,636	3,471	0,245	149,1	18,6	3,85
60	3,138	1387,9	16,858	167,35	0,92	0,078	0,614	3,226	0,232	137,3	19,8	3,78
70	4,088	1361,3	21,697	162,87	0,93	0,075	0,591	3,020	0,222	123,6	21,1	3,76
80	5,240	1333,9	27,579	158,09	0,95	0,073	0,566	2,844	0,212	111,8	22,5	3,74
100	8,253	1275,8	43,196	147,46	0,98	0,067	0,539	2,540	0,200	89,2	24,6	3,72
120	12,393	1211,8	65,660	135,03	1,02	0,061	0,505	2,295	0,189	66,7	28,2	3,74
140	17,896	1138,3	98,619	120,28	1,07	0,056	0,466	2,089	0,183	45,1	34,3	3,92

Таблица А 7 Теплофизические свойства R12 (жидкость) на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-2}, \text{кПа}$	$r, \text{кДж/кг}$	$\rho', \text{кг/м}^3$	$\rho'', \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$\alpha \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^{-7}, \text{н}\cdot\text{с/м}^2$	$\gamma \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	$\sigma \cdot 10^{-4}, \text{м}^2/\text{сек}$	$\beta \cdot 10^{-4}, \text{н}\cdot\text{сек/м}^2$	$Pr$
-40	0,6423	170,95	1515	4,096	0,8834	0,1000	0,747	4,227	0,280	180,44	19,76	3,79
-30	1,0052	167,43	1486	6,201	0,8960	0,0954	0,716	3,776	0,254	165,73	20,86	3,55
-20	1,5102	163,62	1457	9,039	0,9085	0,0907	0,685	3,422	0,236	152,98	21,90	3,44
-10	2,1927	159,48	1426	12,80	0,9211	0,0861	0,656	3,138	0,220	137,29	20,00	3,36
0	3,0881	154,95	1394	17,66	0,9337	0,0814	0,625	2,942	0,211	124,06	23,75	3,38
10	4,2933	150,05	1361	23,80	0,9504	0,0768	0,594	2,775	0,204	110,81	24,55	3,44
20	5,6731	144,70	1327	31,52	0,9672	0,0721	0,562	2,648	0,199	98,06	26,62	3,55
30	7,4451	138,75	1292	41,16	0,9839	0,0675	0,531	2,510	0,194	85,32	27,20	3,66
40	9,5947	132,14	1254	53,12	1,0006	0,0628	0,500	2,403	0,191	71,59	28,92	3,82
50	12,1463	124,56	1213	68,56	1,0844	0,0582	0,442	2,427	0,186	61,19	32,98	4,21
60	15,1814	116,90	1167	85,69	1,1179	0,0535	0,410	2,270	0,184	42,76	37,70	4,49
70	18,7265	108,02	1108	108,81	1,1597	0,0477	0,363	2,187	0,183	32,07	44,62	4,97
80	22,8393	97,68	1064	138,31	1,2225	0,0419	0,322	2,128	0,182	24,12	54,51	5,65

Таблица А 8 Теплофизические свойства насыщения пара R12

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5}$ кПа	$\rho''$ , кг/м <sup>3</sup>	$r$ , кДж/кг	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^{-2}$ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^{-4}$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^{-5}$ , н·с/м <sup>2</sup>	$\gamma \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /сек	$Pr$
-80	0,0616	0,4668	185,83	0,456	0,558	0,262	9,71	20,80	0,79
-70	0,1226	0,8857	182,10	0,469	0,593	0,143	10,18	11,50	0,80
-60	0,2262	1,566	178,29	0,486	0,628	0,0825	10,41	6,65	0,81
-50	0,3919	2,608	174,35	0,498	0,663	0,0510	10,74	4,12	0,81
-40	0,6430	4,131	170,26	0,519	0,698	0,0326	10,99	2,66	0,82
-30	1,006	6,268	166,00	0,536	0,733	0,0218	11,28	1,80	0,82
-20	1,513	9,169	161,58	0,557	0,779	0,0152	11,64	1,27	0,84
-10	2,196	13,0	156,92	0,582	0,837	0,0111	11,96	0,92	0,83
0	3,091	17,96	152,06	0,603	0,896	0,00827	12,39	0,69	0,83
10	4,235	24,28	146,92	0,636	0,977	0,00633	12,87	0,53	0,84
20	5,669	32,20	141,46	0,670	1,070	0,00496	13,52	0,42	0,85
30	7,435	42,08	135,64	0,712	1,175	0,00392	14,31	0,34	0,87
40	9,577	54,34	129,32	0,741	1,268	0,00315	14,67	0,27	0,88
50	12,14	69,58	122,40	0,787	1,384	0,00253	15,31	0,22	0,87
60	15,19	88,63	114,65	0,850	1,535	0,00204	16,84	0,19	0,93

Таблица А9 Теплофизические свойства R13 (жидкость) на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-2}$ кПа	$r$ , кДж/кг	$\rho'$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho''$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^{-7}$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^{-7}$ , н·с/м <sup>2</sup>	$\gamma \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	$\sigma \cdot 10^{-4}$ , м <sup>2</sup> /сек	$\beta \cdot 10^{-4}$ , н·сек/м <sup>2</sup>	$Pr$
-110	0,161	162,57	1634	1,257	0,816	0,114	0,855	6,727	0,408	204,0	23,14	4,77
-100	0,333	158,47	1597	2,457	0,854	0,109	0,799	5,433	0,340	186,0	22,62	4,26
-90	0,628	154,00	1558	4,427	0,879	0,104	0,760	4,648	0,298	168,0	25,24	3,92
-80	1,098	149,26	1520	7,452	0,908	0,0984	0,712	3,962	0,261	151,0	27,73	3,67
-70	1,805	144,19	1481	11,848	0,929	0,0933	0,677	3,560	0,240	134,0	27,03	3,55
-60	2,817	138,62	1439	18,044	0,971	0,0882	0,631	3,177	0,221	117,9	29,20	3,50
-50	4,204	132,43	1395	26,497	1,009	0,0831	0,590	2,844	0,204	101,3	31,16	3,46
-40	6,051	125,56	1349	37,850	1,042	0,0780	0,555	2,667	0,199	85,5	35,71	3,59
-30	8,420	117,98	1300	52,938	1,072	0,0729	0,523	2,510	0,194	69,9	39,79	3,72
-20	11,430	109,53	1247	72,833	1,1405	0,0678	0,493	2,393	0,192	54,9	43,31	3,90

Таблица А 10 Теплофизические свойства R22 (жидкость) на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-2}$ кПа	$r$ , кДж/кг	$\rho'$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho''$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^{-7}$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^{-7}$ , н·с/м <sup>2</sup>	$\gamma \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	$\sigma \cdot 10^{-4}$ , м <sup>2</sup> /сек	$\beta \cdot 10^{-4}$ , н·сек/м <sup>2</sup>	$Pr$
-70	0,2048	250,58	1489	1,064	0,9504	0,1244	0,879	6,482	0,434	230,48	15,69	3,94
-60	0,3743	245,05	1465	1,869	0,9885	0,1198	0,301	4,746	0,323	215,25	16,91	3,88
-50	0,6472	239,48	1439	3,096	1,0161	0,1163	0,795	3,962	0,275	201,03	19,50	3,46
-30	1,6465	227,55	1382	7,407	1,0819	0,1082	0,724	3,197	0,232	168,67	20,82	3,20
-20	2,4614	220,94	1350	10,760	1,1145	0,1035	0,688	2,952	0,218	152,00	23,74	3,17
-10	3,5598	214,36	1318	15,290	1,1476	0,1000	0,661	2,765	0,210	136,31	24,52	3,18
0	5,0013	206,95	1285	21,230	1,1803	0,0954	0,629	2,628	0,204	120,13	29,72	3,25
10	6,8547	198,29	1249	28,900	1,2129	0,0907	0,599	2,491	0,199	103,95	29,53	3,32
20	9,1691	188,41	1213	38,760	1,2460	0,0872	0,522	2,383	0,197	90,12	30,51	3,41
30	12,6228	177,27	1176	51,550	1,2786	0,0826	0,549	2,295	0,196	75,90	33,70	3,55
40	15,4845	164,75	1132	67,570	1,3117	0,0790	0,532	2,216	0,196	60,21	39,95	3,67
50	19,6424	155,33	1034	88,500	1,3444	0,0744	0,510	2,089	0,196	46,68	45,50	3,78
60	24,4378	149,13	1032	111,480	1,3732	0,0709	0,500	2,030	0,202	33,69	54,60	3,92
70	30,0765	142,00	969	146,180	1,4068	0,0669	0,491	1,961	0,208	21,28	68,83	4,11
80	36,5979	134,50	895	196,350	1,4403	0,0628	0,487	1,922	0,219	11,18	95,71	4,41

Таблица А 11 Теплофизические свойства R113 (жидкость) на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-2}$ кПа	$r$ , кДж/кг	$\rho'$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho''$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^7$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^{-7}$ , н·с/м <sup>2</sup>	$\gamma \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	$\sigma \cdot 10^{-4}$ , м <sup>2</sup> /сек	$\beta \cdot 10^{-4}$ , н·сек/м <sup>2</sup>	$Pr$
0	0,148	160,56	1626	1,23	0,9127	0,0766	0,517	9,316	0,573	215,25	13,70	11,15
10	0,236	157,97	1600	1,90	0,9295	0,0743	0,500	8,100	0,506	202,01	14,49	10,10
20	0,364	154,95	1580	2,85	0,9462	0,0722	0,483	7,070	0,447	192,21	14,60	9,23
30	0,541	152,15	1560	4,12	0,9630	0,0702	0,467	6,158	0,394	182,40	15,01	8,45
40	0,783	148,84	1530	5,59	0,9797	0,0681	0,456	5,456	0,359	168,18	15,40	7,88
50	1,101	146,12	1510	8,00	0,9965	0,0661	0,439	4,834	0,323	158,86	16,07	7,35
60	1,512	145,70	1480	10,80	1,0090	0,0640	0,428	4,462	0,302	144,16	17,00	7,06
70	2,033	138,88	1460	14,20	1,0258	0,0620	0,141	4,060	0,278	136,31	17,30	6,71
80	2,677	135,11	1430	18,50	1,0425	0,0598	0,403	3,628	0,254	124,54	18,16	6,30
90	3,472	130,71	1400	23,70	1,0593	0,0578	0,389	3,305	0,236	111,79	21,43	6,07
100	4,421	126,11	1380	30,00	1,0760	0,0556	0,375	3,020	0,218	102,97	24,49	5,82

Таблица А 12 Теплофизические свойства аммиака (жидкость) на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-2}$ кПа	$\rho'$ , кг/м <sup>3</sup>	$r \cdot 10^{-3}$ , кДж/кг	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^7$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^4$ , н·с/м <sup>2</sup>	$\gamma \cdot 10^2$ , м <sup>2</sup> /с	$\sigma \cdot 10^4$ , м <sup>2</sup> /сек	$\beta \cdot 10^{-4}$ , н·сек/м <sup>2</sup>	$Pr$
-77,9	-	732,6	-	4,321	0,550	-	6,502	0,887	57,1		5,10
-70	0,109	725,3	1,46	4,338	0,550	1,747	4,737	0,653	54,9	15,6	3,73
-60	0,219	713,8	1,44	4,371	0,552	1,766	3,805	0,533	51,4	16,1	3,01
-50	0,409	702,0	1,41	4,409	0,552	1,780	3,236	0,461	48,2	16,9	2,58
-40	0,719	690,0	1,39	4,438	0,551	1,795	2,854	0,414	44,8	17,7	2,30
-30	1,195	677,7	1,36	4,467	0,549	1,808	2,550	0,376	41,7	18,3	2,07
-20	1,902	665,0	1,33	4,509	0,544	1,810	2,275	0,342	38,4	19,3	1,88
-10	2,909	652,0	1,30	4,551	0,537	1,806	2,060	0,316	35,3	20,2	1,74
0	4,294	638,6	1,26	4,597	0,524	1,782	1,873	0,293	32,4	21,1	1,64
10	6,150	624,7	1,23	4,647	0,509	1,750	1,687	0,270	29,3	22,5	1,54
20	8,572	610,3	1,19	4,710	0,494	1,715	1,520	0,249	26,4	23,9	1,45
30	11,665	595,2	1,15	4,798	0,474	1,657	1,373	0,230	23,4	25,7	1,38
40	15,544	579,5	1,10	4,899	0,458	1,601	1,255	0,216	20,6	27,9	1,34
50	20,326	562,8	1,05	5,020	0,433	1,527	1,138	0,202	17,8	30,3	1,32
60	26,144	544,0	0,99	5,150	0,411	1,461	1,030	0,189	14,9	33,2	1,29

Таблица А 13 Теплофизические свойства насыщенного пара аммиака

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-2}$ кПа	$\rho''$ , кг/м <sup>3</sup>	$r$ , кДж/кг	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^7$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^4$ , н·с/м <sup>2</sup>	$\gamma \cdot 10^2$ , м <sup>2</sup> /с	$Pr$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-75	0,0751	0,078	1473,9	2,034	0,0167	102,56	6,528	83,69	0,816
-70	0,1094	0,111	1463,4	2,078	0,0169	73,50	6,723	60,62	0,825
-60	0,2186	0,216	1441,0	2,079	0,0176	39,88	7,112	33,54	0,841
-50	0,4076	0,380	1416,7	2,098	0,0183	22,98	7,501	19,75	0,859
-40	0,7159	0,643	1390,0	2,135	0,0191	13,94	7,892	12,27	0,881
-30	1,194	1,038	1360,8	2,192	0,0200	8,807	8,245	7,392	0,906
-20	1,902	1,607	1329,0	2,271	0,0210	5,760	8,860	5,400	0,938
-10	2,911	2,402	1294,5	2,374	0,0221	3,876	9,078	3,779	0,975
0	4,302	3,480	1257,4	2,504	0,0232	2,668	9,482	2,724	1,021
10	6,164	4,910	1217,8	2,665	0,0245	1,874	9,893	2,014	1,075

Продолжение таблицы А13

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	8,592	6,770	1175,9	2,862	0,02	1,337	10,31	1,523	1,139
30	11,690	9,149	1131,8	3,102	0,0274	0,966	10,74	1,174	1,215
40	15,567	12,166	1085,5	3,391	0,0291	0,705	11,19	0,921	1,306
50	20,338	15,921	1037,1	3,742	0,0309	0,518	11,66	0,732	1,413
60	26,127	20,611	986,2	4,171	0,0329	0,383	12,14	0,589	1,538
70	33,068	26,445	932,2	4,704	0,0352	0,283	12,66	0,479	1,693
80	41,309	33,734	873,9	5,386	0,0379	0,208	13,24	0,392	1,885
90	51,017	42,953	809,0	6,303	0,0408	0,151	13,89	0,324	2,146
100	-	-	-	7,651	0,0448	0,106	14,72	0,268	2,528
110	-	-	-	9,985	0,0496	0,0699	15,87	0,222	3,176
120	-	-	-	15,786	0,0566	0,0373	17,31	0,180	4,826

Таблица А 14 Теплофизические параметры паров хладогентов (в (...)) – состояние насыщения

Агент	$t$ , °C	$p$ , кПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\mu \cdot 10^4$ , н·с/м <sup>2</sup>	$\gamma \cdot 10^2$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^7$ , м <sup>2</sup> /с	$Pr$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R11	(-40)	5,100	0,364	0,519	8,83	24,3	0,0070	368,41	0,66
	(-30)	9,218	0,65	0,519	9,12	14	0,0071	210,52	0,66
	(-20)	15,691	1,04	0,536	9,46	9,2	0,0073	131,30	0,7
	(-10)	25,595	1,63	0,536	9,81	6,03	0,0076	85,87	0,7
	(0)	40,207	2,47	0,536	10,08	4,1	0,0078	58,72	0,7
	(10)	60,507	3,61	0,544	10,39	2,83	0,0081	41,55	0,7
	50	60,507	3,13	0,579	11,67	3,74	0,0090	49,31	0,76
	(20)	88,652	5,16	0,579	10,79	2,1	0,0083	28,53	0,73
	50	88,652	4,57	0,579	11,67	2,56	0,0090	33,52	0,76
	80	88,652	4,1	0,599	12,75	3,1	0,0095	38,78	0,8
	(30)	125,525	7,14	0,574	11,08	1,55	0,0085	20,50	0,76
	50	125,525	6,67	0,574	11,67	1,75	0,0090	23,27	0,75
	80	125,525	6,0	0,607	12,75	2,12	0,0095	26,04	0,82
	(50)	235,360	13,0	0,582	11,67	0,9	0,0090	11,77	0,77
	100	235,360	10,7	0,616	13,24	1,24	0,0090	14,95	0,83
R12	(-82,5)	4,903	0,375	0,452	9,807	26,2	0,0056	326,86	0,8
	-40	4,903	0,306	0,502	11,18	35,8	0,0064	412,73	0,87
	0	4,903	0,262	0,553	11,77	45,0	0,0093	639,87	0,7
	50	4,903	0,22	0,599	13,53	61,5	0,0116	850,88	0,7
	(-30,6)	98,067	6,08	0,536	11,29	1,86	0,0073	22,44	0,83
	0	98,067	5,4	0,85	11,77	2,19	0,0093	30,47	0,715
	50	98,067	4,6	0,607	13,53	2,94	0,0116	41,55	0,71
	100	98,067	4,02	0,649	14,71	3,66	0,0140	53,46	0,68
	(-1,5)	294,200	16,9	0,603	12,06	0,715	0,0088	86,70	0,82
	50	294,200	13,7	0,616	13,92	1,02	0,0128	15,24	0,66
	100	294,200	11,7	0,649	15,10	1,29	0,0140	18,34	0,70
	140	294,200	10,5	0,682	16,18	1,54	0,0163	22,71	0,68
	(32)	784,53	43,3	0,712	13,92	0,321	0,0119	3,85	0,84
	50	784,53	40,0	0,703	14,02	0,352	0,0140	4,93	0,71
	100	784,53	32,5	0,695	15,69	0,483	0,0145	6,43	0,75
	150	784,53	27,8	0,699	16,87	0,608	0,0163	8,36	0,72
	(55,6)	1372,93	77,5	0,816	15,69	0,202	0,0147	0,24	0,875
	100	1372,93	61,3	0,745	16,67	0,272	0,0145	0,32	0,85
	150	1372,93	50,5	0,728	17,65	0,35	0,0163	0,44	0,79

Продолжение таблицы А14

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R22	(-100)	2,06	0,12	0,502	7,65	64,00	0,0070	1149,55	0,555
	(-80)	10,30	0,563	0,511	8,63	15,40	,0079	274,23	0,56
	(-60)	37,46	1,87	0,565	9,61	5,14	0,0091	80,33	0,635
	(-50)	64,72	3,096	0,565	10,00	3,23	0,0088	50,41	0,64
	(-40)	105,52	4,878	0,582	10,49	2,15	0,0093	32,69	0,66
	(-30)	164,75	7,401	0,603	10,88	1,47	0,0097	21,61	0,68
	(-20)	246,15	10,76	0,616	11,18	1,04	0,01	15,07	0,69
	(-10)	355,98	15,29	0,641	11,67	0,765	0,0103	10,53	0,725
	(0)	500,14	21,23	0,653	11,96	0,585	0,0107	7,70	0,73
	(10)	685,48	28,90	0,653	12,26	0,425	0,110	5,87	0,72
	50	685,48	23,80	0,699	13,73	0,676	0,0124	7,48	0,765
	(20)	916,93	38,76	0,699	12,75	0,330	0,0144	4,18	0,78
	50	916,93	34,00	0,724	13,74	0,405	0,0124	5,07	0,80
	80	916,93	30,00	0,737	14,61	0,487	0,0134	6,01	0,81
	(30)	1202,30	51,50	0,720	13,04	0,254	0,0117	3,16	0,80
	60	1202,30	43,00	0,775	14,02	0,326	0,0128	3,85	0,84
	80	1202,30	39,20	0,794	14,61	0,374	0,0134	45,43	0,82
	(40)	1548,48	67,57	0,755	13,44	0,199	0,0121	2,31	0,86
	70	1548,48	56,20	0,796	14,32	0,255	0,0130	2,91	0,875
	100	1548,48	49,00	0,796	15,30	0,312	0,0140	3,60	0,86
	(60)	2448,73	126,58	0,837	13,92	0,11	0,0128	3,98	0,91
	100	2448,73	92,00	0,837	15,30	0,116	0,0140	1,81	0,915
R113	(-30)	2,84	0,263	0,628	8,92	34,00	0,0073	443,20	0,76
	(-20)	5,20	0,465	0,628	9,22	19,90	0,0076	257,61	0,78
	(-10)	902	0,78	0,628	9,41	12,10	0,0079	161,49	0,75
	(0)	15,00	1,25	0,628	9,61	7,70	0,0081	103,88	0,74
	(10)	23,83	1,92	0,628	9,90	5,15	0,0084	69,25	0,74
	50	23,83	1,66	0,649	10,88	6,55	0,0094	89,98	0,75
	(20)	36,58	2,87	0,628	10,15	3,54	0,0086	31,02	0,75
	50	36,58	2,40	0,649	10,88	4,55	0,0094	90,11	0,76
	80	36,58	2,20	0,670	11,47	5,23	0,01025	68,97	0,76
	(30)	54,23	4,16	0,628	10,40	2,50	0,0090	34,07	0,73
	60	54,23	3,74	0,649	11,08	2,96	0,0097	39,61	0,74
	80	54,23	3,40	0,670	11,47	3,37	0,102	44,87	0,75
	(60)	150,04	10,80	0,649	11,08	1,02	0,0097	13,77	0,74
	100	150,04	9,40	0,691	11,96	1,27	0,0107	16,43	0,77
	(80)	264,78	18,30	0,670	11,47	0,625	0,0102	8,36	0,75
	100	264,78	18,00	0,691	11,96	0,665	0,0107	8,59	0,77
NH <sub>3</sub>	(-75)	7,45	0,0775	1,968	6,86	88,5	0,851	991,65	0,89
	0	7,45	0,056	2,093	9,39	167,0	0,0221	1883,60	0,88
	50	7,45	0,465	2,135	10,98	238,0	0,0265	2659,20	0,90
	(-50)	9,81	0,380	1,968	7,65	20,1	0,0174	2326,80	0,86
	0	9,81	0,304	2,093	9,32	30,7	0,0221	346,25	0,89
	50	9,81	0,263	2,135	10,98	42,0	0,0265	468,13	0,89
	100	9,81	0,225	2,219	13,04	58,0	0,0326	650,95	0,88
	(0)	429,53	3,45	2,734	8,63	27,8	0,0221	23,27	1,19
	50	429,53	2,78	2,386	11,28	40,7	0,0265	39,61	1,02
	100	429,53	2,35	2,345	13,44	57,4	0,0326	59,28	0,97
	150	429,53	2,04	2,386	15,69	77,0	0,0395	80,33	0,96
	(50)	2029,98	15,75	3,475	15,69	0,995	0,0335	6,09	1,63

Таблица 15 Теплофизические характеристики некоторых пищевых продуктов при  $t=20^{\circ}\text{C}$ 

Продукт	Влажность $W, \%$	Плотность $\rho, \text{кг/м}^3$	Удельная теплоемкость $c, \text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	Теплопроводность $\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	Температуропроводность $a \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$
Говядина	75	1070	3730	0,48	18,8
Телятина	81	1080	3690	0,54	13,8
Свинина	72	1030	3060	0,33	10,6
Баранина	74	1050	3520	0,45	12,2
Сырой фарш колбасы докторская	68	1070	3360	0,44	12,2
Треска	80	1020	3680	0,46	12,1
Сазан	75	1046	3535	0,43	11,7
Лосось	73	991	3517	0,50	14,4
Меланж яичный	74	1020	3810	0,46	11,7
Тесто из пшеничной муки I сорта	43	1030	1750	0,44	24,4
Кровь	81	1212	3015	0,57	15,5
Картофель	80	1034	3620	0,59	15,8
Свекла	87	1050	3830	0,48	18,0
Морковь	89	1035	3870	0,55	13,7
Лук репчатый	87	944	3820	0,35	9,7
Кабачки	88	950	3400	0,50	14,7
Томаты	94	1020	4020	0,57	13,9
Яблоки	86	830	3580	0,40	13,4
Груши	85	1010	3810	0,51	13,4
Персики	88	930	3860	0,58	16,2

Таблица А16 Теплофизические свойства материалов

Материалы	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^{\circ}\text{C}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$c, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$
1	2	3	4	5
Кладка из красного кирпича:				
на холодном растворе	1700	0	0,81	0,88
на теплом растворе	1600	0	0,67	0,84
Кладка из силикатного кирпича:		0		
на холодной растворе	1000		0,87	0,84
на теплом растворе	1700	0	0,76	0,80
Кладка бутовая из камней:				
средней плотности	2000	0	1,28	0,88
Карболит черный	1150	50	0,231	-
Кожа	-	20	0,14-0,16	-
Кокс порошкообразный	411	100	0,191	1,21
Котельная накипь:				
богатая гипсом	2000-2700	100	0,7-2,3	
богатая примесью	1000-2500	100	0,15-23	
богатая силикатом	300-1200	100	0,08-0,23	
Кварц кристаллический:	-			
поперек оси		0	0,72	
вдоль оси	-	0	1,94	
Ламповая сажа	165	40	0,07-0,12	
Лед	917	0	2,2	2,26
Льняная ткань	-	-	0,088	-
Магnezия в форме сегментов для изоляции труб	266	50-200	0,073-0,084	

Продолжение таблицы А16

1	2	3	4	5
Мел	2000	50	0,9	0,88
Миканит		20	0,21-0,41	
Мрамор	2800	0	3,5	0,92
Парафин	920	20	0,27	
Песок речной мелкий (сухой)	1520	0-160	0,30-0,38	0,80
Песок речной мелкий (влажный)	1650	20	1,13	2,09
Прессшпан		20-50	0,26 - 0,22	
Плексиглас		20	0,184	
Пробковые плиты сухие	141- 198	80	0,042 – 0,053	1,76
Пробковая мелочь, величина куска 4-5 мм	85	0,60	0,044 - 0,058	1,76
Резина:				
твердая обыкновенная	1200	0-100	0,157-0,160	1,38
мягкая		20	0,13-0,16	1,38
Сахарный песок	1600	0	0,58	1,26
Сера ромбическая		21	0,28	0,762
Сланец		94	1,49	-
Слюда (поперек слоев)	2600-3200	20	0,49-0,58	
Стекло:				
зеркальное	2550	0-100	0,78-0,88	0,779
обыкновенное	2500	20	0,74	0,67
Стеклоанная вага	154- 20	38	0,051-0,059	-

Таблица А17 Теплофизические свойства молока и сливок

Вещество	$t$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c$ , кДж/(м <sup>2</sup> ·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^{-7}$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^{-4}$ , Па·с	$\gamma \cdot 10^2$ , м <sup>2</sup> /с	$\sigma \cdot 10^{-2}$ , Н/м	$Pr$
Молоко натуральное	5	1102,3	3,615	0,525	1,320	29,60	2,685	4,70	20,34
	10	1033,2	3,853	0,531	1,335	24,70	2,393	4,60	17,92
	15	1030,0	3,854	0,537	1,352	21,00	2,039	4,50	15,08
	20	1027,9	3,855	0,542	1,368	17,90	1,741	4,30	12,73
	30	1023,6	3,856	0,553	1,401	13,30	1,299	4,30	9,27
	40	1019,3	3,859	0,564	1,412	10,40	1,020	4,30	7,22
	50	1015,1	3,864	0,575	1,466	8,50	0,837	4,20	5,71
	60	1010,3	3,869	0,586	1,499	7,10	0,703	4,10	4,69
	70	1004,5	3,879	0,597	1 532	6,20	0,617		4,03
Сливки жирностью 35%	80	998,7	3,893	0,608	1,564	5,70	0,571		3,65
	5	1003,9	2,828	0,323	1,138	784,5	78,15	5,00*	686 7
	10	1000,9	2,857	0,323	1,147	392,3	39,19	4,88*	341,77
	15	997,7	2,885	0,334	1,163	171,6	17,19	4,56*	148,10
	20	994,5	2,914	0,339	1,169	117,7	11,84	4,54*	101,31
	30	988,2	2,971	0,351	1,196	68,6	6,94	4,37*	58,03
	40	981,9	3,029	0,363	1,221	44,1	4,49	4,35*	36,77
	50	975,5	3,086	0,377	1,252	25,5	2,61	4,27*	20,85
	60	969,2	3,143	0,392	1,287	25,1	2,59	4,17*	20,12
	70	962,9	3,200	0,409	1,327	24,5	2,544	—	19,17
	80	956,6	3,256	0,427	1,359	24,5	2,541	—	18,69

\* Для сливок 22%-ной жирности



Таблица А18 Теплофизические свойства раствора хлористого натрия

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\xi$ , %	$t_3$ , °C	$i$ , °C	$c$ , кДж/(кг·K)	$\lambda$ , Вт/(м·K)	$\mu \cdot 10^4$ , Па·с	$\gamma \cdot 10^4$ , м <sup>2</sup> /с	$a \cdot 10^7$ , м <sup>2</sup> /с	$Pr$
1050	7	-4,4	20	3,843	0,593	10,78	1,03	1,47	6,95
			10	3,845	0,576	14,12	1,34	1,43	9,40
			0	3,827	0,559	18,73	1,78	1,39	12,70
			-4	3,818	0,556	21,58	2,06	1,38	14,80
1080	11	-7,5	20	3,697	0,593	11,47	1,06	1,48	7,20
			10	3,684	0,570	15,20	1,41	1,43	9,90
			0	3,676	0,556	20,20	1,87	1,41	13,40
			-5	3,672	0,549	24,42	2,26	1,38	16,40
			-7,5	3,672	0,545	26,48	2,45	1,37	17,80
1100	13,6	-9,8	20	3,609	0,593	12,26	1,12	1,50	7,40
			10	3,601	0,68	16,18	1,47	1,43	10,30
			0	3,588	0,54	21,48	1,95	1,40	13,00
			-5	3,584	0,547	26,08	2,37	1,38	17,10
			-9,8	3,580	0,540	34,32	3,13	1,37	22,90
1120	16,2	-12,2	20	3,534	0,573	13,14	1,20	1,50	8,3
			10	3,525	0,569	17,26	1,57	1,43	10,9
			0	3,512	0,552	22,26	1,98	1,40	15,1
			-5	3,508	0,544	28,34	2,58	1,38	18,6
			-10	3,504	0,535	34,91	3,18	1,37	23,2
			-12,2	3,500	0,533	42,17	3,84	1,36	28,3
1140	18,8	-15,1	20	3,462	0,582	14,32	1,26	1,47	8,5
			10	3,454	0,566	18,54	1,63	1,43	11,4
			0	3,442	0,550	25,60	2,25	1,40	16,1
			-5	3,433	0,542	31,18	2,74	1,38	19,8
			-10	3,429	0,533	38,74	3,40	1,36	24,8
			-15	3,425	0,524	47,76	4,19	1,35	31,0
1160	21,2	-18,2	20	3,396	0,579	15,49	1,33	1,46	9,1
			10	3,383	0,563	20,10	1,73	1,43	12,1
			0	3,375	0,547	28,24	2,44	1,39	17,5
			-5	3,366	0,539	34,42	2,96	1,37	21,5
			-10	3,362	0,530	43,05	3,70	1,36	27,1
			-15	3,358	0,522	52,76	4,55	1,34	33,9
			-18	3,354	0,518	60,80	5,24	1,33	39,4
1175	23,1	-21,2	20	3,345	0,565	16,67	1,42	1,47	9,6
			10	3,337	0,549	21,57	1,84	1,40	13,1
			0	3,324	0,544	30,40	2,59	1,39	18,6
			-5	3,320	0,536	37,46	3,20	1,37	23,3
			-10	3,312	0,528	47,07	4,02	1,35	29,5
			-15	3,308	0,520	57,47	4,90	1,34	36,5
			-21	3,303	0,514	77,47	6,60	1,32	50,0

Таблица А19 Теплофизические свойства раствора хлористого кальция

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\xi$ , %	$t_3$ , °C	$i$ , °C	$c$ , кДж/(кг·K)	$\lambda$ , Вт/(м·K)	$\mu \cdot 10^4$ , Па·с	$\gamma \cdot 10^4$ , м <sup>2</sup> /с	$\alpha \cdot 10^7$ , м <sup>2</sup> /с	$Pr$
1080	9,4	-5,2	20	3,642	0,584	12,36,	1,15	1,48	7,75
			10	3,634	0,570	15,49	1,44	1,45	9,88
			0	3,626	0,556	21,58	2,00	1,42	14,10
			-5	3,601	0,549	25,48	2,36	1,41	16,70
1130	14,7	-10,2	20	3,362	0,576	14,91	1,32	1,51	8,70
			10	3,349	0,563	18,63	1,64	1,48	11,05
			0	3,328	0,549	25,60	2,27	1,46	15,60
			-5	3,316	0,542	30,40	2,70	1,44	18,70
			-10	3,308	0,543	40,60	3,60	1,43	25,30
1170	18,9	-15,7	20	3,148	0,572	18,04	1,54	1,55	9,90
			10	3,140	0,558	22,36	1,91	1,52	12,60
			0	3,128	0,544	29,91	2,56	1,49	17,20
			-5	3,098	0,537	34,32	2,94	1,48	19,80
			-10	3,086	0,529	46,68	4,00	1,46	27,30
			-15	3,065	0,623	61,49	5,27	1,45	35,90
1190	20,9	-19,2	20	3,077	0,569	20,01	1,68	1,55	10,90
			10	3,056	0,555	24,62	2,06	1,62	13,60
			0	3,044	0,542	32,75	2,76	1,49	18,50
			-5	3,034	0,535	38,25	3,22	1,49	21,50
			-10	3,024	0,527	50,70	4,25	1,47	28,90
			-15	3,014	0,521	65,90	5,63	1,45	38,20
1220	23,8	-25,7	20	2,998	0,565	23,54	1,94	1,67	12,60
			10	2,952	0,551	28,73	2,35	1,52	15,40
			-	2,931	0,538	38,15	3,13	1,50	20,80
			-5	2,910	0,630	44,13	3,63	1,49	24,40
			-10	2,910	0,623	69,23	4,87	1,47	33,00
			-15	2,910	0,518	75,51	6,20	1,46	42,50
			-20	2,889	0,511	94,73	7,77	1,44	53,80
			-25	2,889	0,504	115,72	9,48	1,43-	66,50
1240	25,7	-31,2	20	2,889	0,480	26,28	2,12	1,57	13,5
			10	2,879	0,548	32,17	2,61	1,62	16,5
			0	2,868	0,535	42,66	3,43	1,50	22,7
			-10	2,847	0,521	66,78	5,40	1,47	36,6
			-15	2,847	0,514	83,65	6,75	1,46	46,3
			-20	2,805	0,508	105,62	8,62	1,45	58,5
			-25	2,805	0,501	129,15	10,40	1,44	72,0
			-30	2,763	0,494	148,08	2,00	1,44	83,0

Таблица А20 Коэффициент объемного расширения растворов хлористого натрия и хлористого кальция  $\beta \cdot 10^4$ , K<sup>-1</sup>

Содержание соли в растворе, %	Температура раствора, °C					Содержание соли в растворе, %	Температура раствора, °C					
	20	10	0	-10	-20		20	10	0	-10	-20	-30
Хлористый натрий						Хлористый кальций						
10	2,9	1,9	1,8	-		15	3,4	2,9	2,4	1,9		
15	2,8	2,8	2,7	2,7		20	3,9	3,5	3,2	2,8		
20	4,5	4,0	3,6	3,2		25	4,1	3,9	3,7	3,5	3,3	
23	4,7	4,2	3,8	3,4	3,0	30	4,3	4,2	4,1	4,0	4,0	3,9

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б1 Плотность, теплопроводность, теплоемкость металлов и сплавов ( $p=0,1$  МПа,  $t=20^{\circ}\text{C}$ )

Наименование элемента	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c_p$ , кДж/(кг·К)
Алюминий	2700	209	0,896
Бронза (75% Cu, 25% Sn)	8660	25,9	0,344
Вольфрам	19340	169	0,134
Дюралюминий	2800	164	0,884
Железо	7880	74	0,44
Золото	19310	313	0,130
Калий	1370	100	0,737
Кремний	2300	33,7	-
Латунь (70% Cu, 30% Sn)	8520	110,7	0,385
Литий	534	68,6	3,31
Магний	1760	158	0,975
Медь	8930	390	0,388
Молибден	10214	136,9	0,251
Натрий	975	109	1,20
Николь	8900	67,5	0,427
Олово	7300	66,3	0,222
Платина	21460	69,8	0,132
Свинец	11350	35,1	0,127
Серебро	10500	419	0,234
Сталь 45	7794	32	0,560
Сталь углеродистая (0,5 %C)	7830	53,6	0,465
Сталь нержавеющая 1X18H9T	7900	16	0,502
Титан	4540	15,1	0,531
Углерод, графит	1700-2300	174	0,67
Цинк	7150	113	0,384
Чугун (4%C)	7270	51,9	0,419

Таблица Б2 Плотность теплопроводность конструкции и предельная температура применения основных изоляционных материалов и изделий

Наименование материала или изделия	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>		$\lambda$ , Вт/(м·К)	$t$ , °C
	в поршне	в мастичной конструкции		
1	2	3	4	5
<b>Изоляционные материалы</b>				
Асбест пушной сорт 6	800	500-550	0,130+0,00019 t	700
Асбозонолит	350	700	0,143+0,0009 t	700
Асбозорит	450	580-650	0,1622+0,000169 t	200-300
Асбослюда	400-500	550-570	0,120+0,000148 t	600
Асботермит	400-430	580-650	0,109+0,000145 t	500-550
Диатомит молотый	400-500	405-465	0,091+0,00028 t	800
Зонолит (вермикулит)	150-250	440-520	0,072+0,00262 t	900-1100
Минеральная вата	180-250	400-550	0,046+0,058	500
Новоасбозурит	400-50		0,144+0,00014 t	250
Ньювель	180-200		0,87+0,000064 t	325-370
Совелит	230-250		0,0901+0,000087 t	400-450
Торфяная крошка	200-50		0,06-0,08	100
Ферригипс	-		0,07-0,08	650
Шлаковая вата	170-200		0,06+0,000145 t	750
<b>Изоляционные изделия</b>				
Вермикулитовые плиты		350-380	0,081+0,00015 t	700-750
Вулканитовые плиты		400	0,080+0,00021 t	550-600

Продолжение таблицы Б2

1	2	3	4	5
Войлок строительный		300	0,05 при 0°C	90
Диатомовой кирпич		500-600	0,113+0,00023 t	850
Диатомовые скорлупы и сегменты		500-600	0,113+0,00023 t	850
Изделия «новоизоль»		400-450	0,073+0,00028 t	400
Камышитовые плиты		260-360	0,10 при 0°C	100
Минеральный войлок		250-300	0,058-0,076 при 50°C	-
Пенобетонные блоки		400-500	0,099-0,122 при 50°C	300
Пенодиатомовый кирпич		230-430	0,07-0,09 при 70°C	600-800
Пеностекло		290-450	0,124-0,160 при 70°C	600-800
Плиты «оргизоль»		280-350	0,078+0,00012 t	600
Пробковые плиты		250	0,07 при 0°C	120

Таблица Б3 Теплопроводность металлов и сплавов в зависимости от температуры

Наименование металла или сплава	Температура, °C							
	10	20	100	200	300	400	500	600
Алюминий	202	-	206	229	272	319	371	422
Алюминиевые сплавы: 92% Al, 8% Mg	102	106	123	148	-	-	-	-
80% Al, 20% Si	158	160	169	174	-	-	-	-
Дюралюминий: 94-96% Al, 3,5% Cu, 0,5% Mg	159	165	181	194	-	-	-	-
Латунь: 90% Cu, 10% Zn	102	-	117	134	149	160	180	125
70% Cu, 30% Zn	106	-	109	100	114	116	120	121
67% Cu, 33% Zn	100	-	107	113	121	128	135	151
50% Cu, 40% Zn	106	-	120	137	15,2	169	186	200
Медь (99,9%)	393	-	385	378	371	365	359	354

Таблица Б4 Плотность, теплопроводность, теплоемкость некоторых неметаллических материалов

Наименование материала	t, °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c_{p2}$ , кДж/(кг·К)
Асбошифр	20	1800	0,64	-
Асфальт	30	2120	0,74	1,67
Бетон с щебнем	0	2000	1,28	0,84
Бетон сухой	0	1600	0,84	-
Бумага обыкновенная	20	-	0,14	1,51
Вата хлопчатобумажная	30	80	0,042	-

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В1 Удельная теплоемкость и теплопроводность продуктов

Продукт	Удельная теплоемкость с, кДж/(кг·К)		Теплопроводность λ, Вт/(м·К)	
	охлажденного	замороженного	охлажденного	замороженного
Говядина	3,4	1,67...2,5	0,45...0,50	1,09...1,59
Свинина	2,85	1,59	0,37...0,49	0,72...1,56
Рыба	3,5...3,64	1,8...1,90	0,53	1,19...1,40
Птица	3,18	1,55	0,41	1,30
Колбаса полукопченая	2,40	-	0,50...0,55	-
Клубника	3,85	1,75	0,48	1,11
Вишня	3,34	2,52	0,52	1,34
Клюква	3,77	2,10		
Персики	3,81	1,72		
Фруктовые соки	3,60...4,00	2,00...2,20	0,55	2,08
Смородина	3,77	2,10	-	
Сливы	3,68	2,00	-	-
Огурцы	4,06	2,05	0,53	1,25
Картофель	3,43	1,80	0,48	1,09
Лук репчатый	3,81	2,13	0,47	1,30
Свекла	3,77	2,01	0,63	1,12
Томаты	3,85	1,92	0,60	1,40
Яйца	3,56	1,88	0,42	0,96
Морковь	3,89	1,88	0,62	1,10
Яблоки	3,72	1,82	-	-
Цветы	3,85	-	-	-
Шкуры	3,85	-	-	-
Тесто	2,80	2,30	0,84	-

Таблица В2 плотность укладки продуктов

Продукт	Плотность $g_v$ , кг/м <sup>3</sup>	Продукт	Плотность $g_v$ , кг/м <sup>3</sup>
Масло сливочное	700	Говядина замороженная	
Сыр без тары	500	в полутушках	300
Яйцо	300	в четвертинках	350
Цитрусовые	300	Свинина замороженная	450
Плоды	350...400	Мясо замороженное в блоках	600
Капуста в контейнерах	300	Птица в ящиках	400
Картофель в контейнерах	500	Рыба замороженная в блоках	600
Консервы разные	450		
Мясо в стоечных поддонах	600		

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г1 характеристика тары для продукции

Материал тары	Масса тары, % массы продукта	Удельная тепло- емкость, кДж/(кг·К)
Стекло	100	0,84
Дерево	20	2,51
Картон	10	1,67
Пластмасса	20	2,09
Металл:		
алюминий	15	0,84
сталь	20	0,42
Металл (тара-контейнер)	100	0,42

Примечание. Масса стеклянной бутылки вместительностью 0,5 л составляет 0,28 кг, масса банки вместительностью 1 л – 0,36 кг.

### ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Таблица Д1 Примерный диапазон изменения значений коэффициента теплоотдачи

Режим движения	Коэффициент конвективной теплоотдачи $\alpha$ , Вт/м <sup>2</sup>
Свободная конвекция газов	5...50
Вынужденная конвекция газов	30...5·10 <sup>2</sup>
Свободная конвекция воды	10 <sup>2</sup> ...10 <sup>3</sup>
Вынужденная конвекция воды	5·10 <sup>2</sup> ...2·10 <sup>4</sup>
Кипение воды	2·10 <sup>3</sup> ...4·10 <sup>4</sup>
Пленочная конденсация водяных паров	4·10 <sup>3</sup> ...1,5·10 <sup>4</sup>
Капельная конденсация водяных паров	4·10 <sup>4</sup> ...1,2·10 <sup>5</sup>

### ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Таблица Е1 Значения показательных и гиперболических функций

$x$	$e^x$	$e^{-x}$	$sh\ x$	$ch\ x$	$th\ x$	$x$	$e^x$	$e^{-x}$	$sh\ x$	$ch\ x$	$th\ x$
0,0	1,00	1,00	0,000	1,000	0,000	1,6	4,95	0,20	2,376	2,577	0,922
0,1	1,11	0,90	0,100	1,005	0,100	1,7	4,55	0,18	2,646	2,828	0,935
0,2	1,22	0,82	0,201	1,020	0,197	1,8	6,05	0,17	2,942	3,108	0,947
0,3	1,34	0,74	0,305	1,045	0,291	1,9	6,63	0,15	3,268	3,418	0,956
0,4	1,49	0,67	0,411	1,081	0,380	2,0	7,39	0,14	3,627	3,762	0,964
0,5	1,64	0,61	0,521	1,128	0,462	2,1	8,12	0,12	4,022	4,144	0,971
0,6	1,82	0,55	0,637	1,186	0,537	2,2	9,03	0,11	4,457	4,568	0,976
0,7	2,00	0,50	0,759	1,255	0,604	2,3	9,98	0,10	4,937	5,037	0,980
0,8	2,22	0,45	0,888	1,337	0,664	2,4	11,0	0,091	5,466	5,557	0,984
0,9	2,46	0,41	1,027	1,433	0,716	2,5	12,3	0,083	6,050	6,132	0,987
1,0	2,72	0,37	1,175	1,543	0,762	2,6	13,5	0,074	6,695	6,769	0,989
1,1	3,00	0,33	1,336	1,668	0,801	2,7	14,3	0,067	7,406	7,474	0,991
1,2	3,32	0,30	1,510	1,811	0,834	2,8	16,4	0,061	8,192	8,253	0,993
1,3	3,70	0,27	1,698	1,971	0,862	2,9	18,2	0,055	9,060	9,115	0,994
1,4	4,06	0,25	1,904	2,151	0,885	3,0	20,1	0,05	10,018	10,068	0,995
1,5	4,50	0,22	2,129	2,352	0,905						

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Амерханов, Р. А. Теплотехника [Текст]: учебник / Р. А. Амерханов, Б. Х. Драганов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 432 с.
2. Бараненко А.В.и др. Примеры и задачи по холодильной технологии пищевых продуктов. Часть 3. Теплофизические основы[Текст]: учебное пособие / А.В. Бараненко – М.: Колос С, 2004 – 249 с.
3. Колесников, А. И. Энергоснабжение в промышленных и коммунальных предприятиях [Текст]: учебное пособие / А. И. Колесников, М. Н. Федоров, Ю. М. Варфоломеев; под ред. М. Н. Федорова. - М.: ИНФРА-М, 2008. - 123 с.
4. Лебедев, В.И., Пермяков, Б.А., Хаванов, П.А. Расчет и проектирование теплогенерирующих установок систем теплоснабжения [Текст]: учебное пособие / В.И. Лебедев. - М.: Стройиздат, 2008.– 360с.
5. Прибытков, И. А. Теоретические основы теплотехники [Текст]: учебник / И. А. Прибытков, И. А. Левицкий; под ред. И. А. Прибыткова. - М.: Академия, 2004. – 302 с.
6. Рудобашта, С. П. «Теплотехника» [Текст] : учебник для студ. вузов, обучающихся по направлению «Агроинженерия»: допущено МСХ РФ / С. П.Рудобашта; Ассоциация «АГРООБРАЗОВАНИЕ». - М. : Колос, 2010.– 599с
7. Тихомиров, К. В. Теплотехника, теплоснабжение и вентиляция [Текст]: учебник / К. В. Тихомиров, Э. С. Сергееenko. – 5-е изд. репр. – М.: БАСТЕТ, 2009. – 480 с.
8. Фролов С.В. Тепло- и массообмен в расчетах процессов холодильной технологии пищевых продуктов [Текст]: учебное пособие/ С.В. Фролов – М.: «Колос-пресс», 2001 – 144 с.
9. Цветков, Ф. Ф. Задачник по тепломассообмену [Текст]: учеб. пособие для вузов/Ф. Ф. Цветков, Р. В. Керимов, В. И. Величко.–М.: МЭИ, 2010. – 195с.

