

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Кафедра энергетики**

**ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к практическим занятиям для студентов специальности 1 – 74 06 05 02  
«Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (теплоэнергетика)»,  
специализации 1 – 74 06 05 – 02 01 «Теплоснабжение сельского хозяйства»

**Минск 2007**

УДК 621.1.016.4(07)

ББК 31.31 я 7

Т 34

Рекомендованы научно-методического совета агроэнергетического факультета.

Протокол № 11 от 14 июня 2007г.

Авторы: канд. техн. наук, доцент **А.Г. Цубанов**;  
канд. техн. наук, доцент **А.Л. Синяков**;  
ст.преподаватель **И.А. Цубанов**;  
ассистент **С.И. Сеница**;

Рецензент: канд. техн. наук, доцент **В.А. Пашинский**

**Цубанов, А.Г.**

Т 34 Теплопередача : метод. указания к практич. занятиям для студентов специальности 1–74 06 05 02 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (теплоэнергетика)», специализации 1–74 06 05–02 01 «Теплоснабжение сельского хозяйства» / А.Г. Цубанов [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2007. – ... с.

УДК 621.1.016.4(07)

ББК 31.31 я 7

© БГАТУ, 2007

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |     |
|---|-----|
| Предисловие . . . . .   | 4   |
| Список основных обозначений . . . . .   | 6   |
| 1 Анализ размерностей при составлении обобщенных переменных . . . . .                         | 9   |
| 2 Теплопроводность при стационарном режиме . . . . .  | 13  |
| 3 Теплоотдача при вынужденной и свободной конвекции . . . . .                                 | 22  |
| 4 Теплопередача при стационарном режиме . . . . .   | 31  |
| 5 Теплообмен излучением между телами, разделенными<br>прозрачной средой . . . . .             | 39  |
| 6 Тепловой расчет теплообменных аппаратов . . . . .   | 43  |
| 7 Теплопроводность в стержнях (ребрах) . . . . .  | 55  |
| 8 Теплопередача через ребреные поверхности . . . . .  | 63  |
| 9 Теплообмен при наличии внутренних источников теплоты . . . . .                              | 74  |
| 10 Теплопроводность полугограниченного массива<br>с внутренними источниками теплоты . . . . . | 77  |
| 11 Нестационарная теплопроводность . . . . .  | 86  |
| 12 Теплообмен в зерновом слое . . . . .   | 96  |
| 13 Теплообмен при кипении жидкостей . . . . .   | 106 |
| 14 Теплообмен при конденсации пара . . . . .  | 114 |
| 15 Тепло- и массообмен в парогазовых средах . . . . .   | 123 |
| Ответы к задачам . . . . .  | 136 |
| Литература . . . . .  | 140 |
| Приложения . . . . .  | 141 |

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Методические указания предназначены для формирования у студентов практических навыков по использованию инженерных методов расчета тепло- и массообмена в различных процессах и теплотехнологическом оборудовании сельскохозяйственного производства.

Они содержат краткие теоретические сведения, задачи и типовые расчеты по дисциплине «Теплопередача». Все задачи снабжены ответами. Приложения к методическим указаниям включают справочный материал, достаточный для решения предлагаемых задач.

Разделы методических указаний соответствуют основным разделам дисциплины и темам практических занятий, приведенным в рабочей программе. Задачи распределены по разделам в порядке возрастания сложности. Их количество и содержание определены на основе опыта преподавания на кафедре энергетики Белорусского государственного аграрного технического университета.

Отдельные задачи имеют свои прототипы в ранее опубликованных задачниках, указанных в списке рекомендуемой литературы.

При решении задач необходимо:

- записать условие задачи и исходные данные;
- решение задач сопровождать кратким пояснительным текстом с обоснованием выбора расчетных уравнений;
- для используемых формул дать расшифровку буквенных обозначений в той последовательности, как они приведены в уравнении;
- вычисления производить в единицах СИ, после числового значения результата расчета обязательно проставлять обозначение единицы величины;
- при записи результатов расчета использовать правила округления чисел.

При выполнении расчетно-графических и контрольных задач исходные данные выбирают в зависимости от последней и предпоследней цифр шифра (номера зачетной книжки или номера варианта).

Расчетно-графическую работу выполняют рукописным или машинописным способом на листах формата А4 или в школьных тетрадях с отведенными полями. При рукописном способе используют чернила или пасту одного цвета: синего, фиолетового или черного. Высота букв составляет не менее 2,5 мм, а расстояние между строками – 7–10 мм.

В конце работы приводят список использованной литературы, который составляют в соответствии с перечнем литературы в настоящих методических указаниях.

Титульный лист оформляют в соответствии с приложением А.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $a$  – температуропроводность,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;
- $A$  – площадь поверхности теплообмена,  $\text{м}^2$ ;
- $c$  – удельная теплоёмкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;
- $c_p$  – удельная изобарная теплоёмкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;
- $d$  – диаметр,  $\text{м}$ ;
- $d_э$  – эквивалентный диаметр частиц,  $\text{м}$ ;
- $D$  – коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;
- $D_0$  – диаметр отверстия,  $\text{м}$ ;
- $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;
- $h$  – удельная энтальпия,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;
- $H$  – высота вертикальной поверхности,  $\text{м}$ ;
- $H_{\text{сл}}$  – высота зернового слоя,  $\text{м}$ ;
- $k$  – коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;
- $l_0$  – определяющий размер,  $\text{м}$ ;
- $m$  – масса,  $\text{кг}$ ;
- $n$  – частота вращения,  $\text{с}^{-1}$ ;
- $N$  – мощность,  $\text{Вт}$ ;
- $m_t$  – массовый расход,  $\text{кг}/\text{с}$ ;
- $P$  – давление,  $\text{Па}$ ;
- $\Delta P$  – перепад давлений,  $\text{Па}$ ;
- $q$  – поверхностная плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;
- $q_V$  – мощность внутренних источников теплоты в единице объема,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ ;
- $Q$  – количество теплоты,  $\text{кДж}$ ;
- $Q_V$  – объемный расход жидкости (газа),  $\text{м}^3/\text{с}$ ;
- $r$  – удельная теплота парообразования,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;
- $R$  – радиус,  $\text{м}$ ;
- $s$  – удельная энтропия,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;
- $S$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;

$t$  – температура, °С;  
 $t_0$  – температура в начальный момент времени, °С;  
 $T$  – термодинамическая температура, К;  
 $t_s$  – температура насыщения, °С;  
 $\Delta T$  – температурный напор на поверхности тела, К;  
 $\Delta t_{\text{ср}}$  – средний температурный напор, °С;  
 $v$  – удельный объем, м<sup>3</sup>/кг;  
 $V$  – объем, м<sup>3</sup>;  
 $w$  – скорость, м/с;  
 $x$  – степень сухости;  
 $X$  – текущая координата, м;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $\beta_T$  – температурный коэффициент объемного расширения, К<sup>-1</sup>;  
 $\beta$  – коэффициент массообмена, м/с;  
 $\delta$  – толщина, м;  
 $\vartheta$  – избыточная температура, °С;  
 $\vartheta_1$  – избыточная температура в основании ребра, °С;  
 $\vartheta_0$  – избыточная температура в начальный момент времени, °С;  
 $\theta$  – безразмерная температура;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  
 $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;  
 $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_n$  – насыпная плотность зернового слоя, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\sigma$  – поверхностное натяжение, Н/м;  
 $\tau$  – время, с;  
 $\varphi$  – относительная влажность, %;  
 $\Phi$  – тепловой поток (тепловая мощность), Вт.

## Индексы:

### верхние:

/ – параметры жидкости при температуре насыщения;

// – параметры сухого насыщенного пара;

### нижние:

ж – среда (жидкость или газ);

с – поверхность твердого тела;

м – материал твердого тела.

## Числа подобия:

– число Архимеда

$$Ar = \frac{gl_o^3}{\nu^2} \frac{\rho_m - \rho_{ж}}{\rho_{ж}};$$

– число Био

$$Bi = \frac{\alpha l_o}{\lambda_m};$$

– число Грасгофа

$$Gr = \frac{gl_o^3}{\nu^2} \beta_T \Delta T;$$

– число Льюиса–Семенова

$$Le = \frac{D}{a};$$

– число Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha l_o}{\lambda};$$

– число Нуссельта (диффузионное)

$$Nu_D = \frac{\beta l_o}{D};$$

– число Прандтля

$$Pr = \frac{\nu}{a};$$

– число Прандтля (диффузионное)

$$Pr_D = \frac{\nu}{D};$$

– число Рейнольдса

$$Re = \frac{wl_o}{\nu};$$

– число Фурье

$$Fo = \frac{a\tau}{l_o^2}.$$

# 1 АНАЛИЗ РАЗМЕРНОСТЕЙ ПРИ СОСТАВЛЕНИИ ОБОБЩЕННЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

На основании общих физических представлений установлено, что влияние различных физических величин на исследуемые процессы проявляется не в отдельности, а совместно, в составе обобщенных переменных.

Обобщенными переменными называют безразмерные комплексы, составленные из физических величин, существенных для изучаемого процесса.

При отсутствии математического описания исследуемых процессов обобщенные переменные составляют на основании метода анализа размерностей. Искомая функциональная зависимость должна отвечать требованию одинаковых размерностей ее левой и правой частей.

Согласно  $\pi$ -теореме Бэкингема число безразмерных комплексов (обобщенных переменных) равно числу физических величин, существенных для данного процесса, за вычетом числа первичных величин.

Первичными называют основные физические величины, использованные при построении системы физических величин. Каждой основной физической величине присваивают символы в виде строчной буквы латинского или греческого алфавитов, например, длина –  $L$ , масса –  $M$ , время –  $T$ , температура –  $\theta$ .

Размерность величины – выражение в виде степенного одночлена, составленного из произведений символов основных физических величин в различных степенях и отражающего связь данной величины с основными.

## Задачи

1.1. Сила  $F$ , действующая на тело при его движении в среде, зависит от площади  $S$  его поперечного сечения, скорости тела  $w$  относительно среды и параметров среды: плотности  $\rho$  и кинематической вязкости  $\nu$ .

Определить обобщенные переменные и записать зависимость между ними.

**Решение.** Число существенных физических величин  $n_1 = 5$ .

Число первичных величин (масса, длина, время), использованных при построении существенных для данного процесса величин,  $n_2 = 3$ .

Число обобщенных переменных  $n_0 = 5 - 3 = 2$ .

Составим степенной одночлен вида:

$$F^a \omega^b S^c \rho^d v^e.$$

Запишем формулы размерностей:

$$[F] = [MLT^{-2}]; \quad \omega = [LT^{-1}]; \quad S = [L^2]; \quad [\rho] = [ML^{-3}]; \quad [v] = [L^2T^{-1}].$$

Заменим в степенном одночлене обозначения физических величин формулами их размерности:

$$[MLT^{-2}]^a [LT^{-1}]^b [L^2]^c [ML^{-3}]^d [L^2T^{-1}]^e.$$

Приравняем нулю показатели степени при одинаковых символах основных единиц:

– масса  $[M]$ :

$$a + d = 0;$$

– длина  $[L]$ :

$$a + b + 2c - 3d + 2e = 0;$$

– время  $[T]$ :

$$-2a - b - e = 0.$$

Получим систему из трех уравнений с пятью неизвестными.

Выражаем показатели степени через показатели  $a$  и  $e$ , выбранные произвольно с учетом упрощения выкладок. При этих показателях в уравнениях встречаются числовые коэффициенты больше единицы. Кроме того, показатель  $a$  входит во все уравнения, а показатель  $e$  – в два уравнения. Следует учесть, что нельзя выбрать показатели  $a$  и  $d$ , т. к. связь между ними устанавливает первое уравнение.

Число показателей степени, через которые выражаем остальные, должно быть равным числу обобщенных переменных.

В результате находим:

$$d = -a; \quad v = -2a - e; \quad c = -a - 0,5e.$$

Подставляем показатели степени в степенной одночлен:

$$F^a w^{-2a-e} S^{-a-0,5e} \rho^{-a} \nu^e.$$

Группируем величины по показателям степени:

$$\left( \frac{F}{w^2 S \rho} \right)^a \left( \frac{\nu}{w S^{0,5}} \right)^e.$$

Находим обобщенные переменные:

$$\pi_1 = \frac{F}{w^2 S \rho} \quad \text{и} \quad \pi_2 = \frac{w S^{0,5}}{\nu}.$$

Вторую из них записали в виде, аналогичном числу Рейнольдса.

Функциональная зависимость:

$$\frac{F}{w^2 S \rho} = f\left( \frac{w S^{0,5}}{\nu} \right).$$

1.2. Найти обобщенные переменные и зависимость между ними для заданного процесса с учетом перечня существенных физических величин. Необходимые данные приведены в таблице 1.1 в зависимости от номера варианта. Искомая физическая величина указана первой в перечне физических величин.

Таблица 1.1 – Исходные данные

| Номер варианта | Наименование процесса   | Перечень существенных физических величин  |
|----------------|---|---|
| 1              | Теплообмен при вынужденной конвекции среды                                      | $\alpha, w, \lambda_{ж}, c_{рж}, \rho_{ж}, \nu_{ж}, l_0, X$                       |
| 2              | Нестационарная теплопроводность в твердом теле                                  | $\vartheta, \vartheta_0, \lambda_m, a_m, \alpha, \tau, l_0, X$                    |
| 3              | Теплопроводность в стержне постоянного поперечного сечения                      | $\Phi, \lambda_m, S, \alpha, \delta, \vartheta_1, l_0$                            |
| 4              | Переход зернового слоя в состояние взвешивания газовым потоком                  | $w_0, d_э, \nu_{ж}, \rho_{ж}, \rho_m, g$  |
| 5              | Теплоотдача вертикальных поверхностей при стекающей пленке жидкости шириной $l$ | $\alpha, Q_V, H, l, \lambda_{ж}, \nu_{ж}, a_{ж}, g$                               |
| 6              | Нагрев частиц в неподвижном слое потоком среды                                  | $\vartheta, \vartheta_0, a_m, \lambda_m, \alpha, c_{рж}\rho_{ж}\omega, d_э, \tau$ |
| 7              | Теплообмен через прослойку между вертикальными пластинами                       | $q, \lambda_{ж}, \delta, g, \nu_{ж}, \beta_T, \Delta T$                           |
| 8              | Истечение взвешенного зернового слоя  | $m_t, D_0, d_э, \Delta P, \rho_n, g$  |
| 9              | Турбулентное течение среды в гидравлически гладких трубах                       | $\Delta P, w, \nu_{ж}, \rho_{ж}, d, l$  |
| 10             | Перемешивание жидкостей мешалкой с диаметром лопастей $d_m$                     | $N, \nu_{ж}, \rho_{ж}, g, n, d_m$   |
| 11             | Теплоотдача при перемешивании жидкостей в аппарате диаметром $D_{ап}$           | $\alpha, \lambda_{ж}, \nu_{ж}, a_{ж}, n, d_m, D_{ап}$                             |
| 12             | Истечение плотного зернового слоя высотой $H$ при встречном газовом потоке      | $m_t, \rho_n, D_0, d_э, g, \Delta P, H$   |
| 13             | Теплообмен при кипении в большом объеме   | $\alpha, \lambda_{ж}, \nu_{ж}, a_{ж}, \rho^{//}, r, q, l_0$                       |
| 14             | Горение газообразного топлива при длине факела $L$                              | $L, D_0, w, \nu_{ж}, D, g$  |

## 2 ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Теплопроводностью принято называть молекулярный перенос теплоты посредством теплового движения микрочастиц, обусловленный неоднородностью распределения температур.

Расчет теплопроводности зависит от формы тела и стенки. Наиболее типичными являются плоская и цилиндрическая стенки, толщина которых намного меньше других размеров (длины, ширины или высоты).

Уравнения теплопроводности многослойной стенки при постоянной теплопроводности материалов отдельных слоев имеют следующий вид:

– для плоской стенки:

$$q = \frac{t_{c_1} - t_{c_{(n+1)}}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \quad (2.1)$$

где  $q$  – поверхностная плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$t_{c_1}$  и  $t_{c_{(n+1)}}$  – температуры на наружных поверхностях стенки, °С;

$\delta_i$  – толщина  $i$ -го слоя, м;

$\lambda_i$  – теплопроводность материала  $i$ -го слоя, Вт/(м·К);

– для цилиндрической стенки:

$$q_l = 2\pi \frac{t_{c_1} - t_{c_{(n+1)}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}, \quad (2.2)$$

где  $q_l$  – линейная плотность теплового потока, Вт/м;

$d_{i+1}$  и  $d_i$  – наружный и внутренний диаметры  $i$ -го слоя, м.

Соответственно для однослойной стенки:

– плоской:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c_1} - t_{c_2}), \quad (2.3)$$

– цилиндрической:

$$q_l = \frac{2\pi\lambda(t_{c_1} - t_{c_2})}{\ln \frac{d_2}{d_1}}. \quad (2.4)$$

Тепловой поток рассчитывают по уравнениям:

– для плоской стенки

$$\Phi = qA, \quad (2.5)$$

где  $A$  – площадь поверхности теплообмена,  $\text{м}^2$ ;

– для цилиндрической стенки:

$$\Phi = q_l l, \quad (2.6)$$

где  $l$  – длина (высота) цилиндрической стенки,  $\text{м}$ ;

– для однослойной шаровой стенки:

$$\Phi = \pi\lambda \frac{d_1 d_2}{\delta} (t_{c_1} - t_{c_2}), \quad (2.7)$$

где  $d_1$  и  $d_2$  – внутренний и наружный диаметры стенки,  $\text{м}$ ;

$\delta$  – толщина стенки.

Температуры в однослойной стенке при постоянной теплопроводности материала слоя ( $\lambda = \text{const}$ ):

– цилиндрическая стенка:

$$\frac{t - t_{c_1}}{t_{c_2} - t_{c_1}} = \frac{\ln(d/d_1)}{\ln(d_2/d_1)}, \quad (2.8)$$

– шаровая стенка:

$$\frac{t - t_{c_1}}{t_{c_2} - t_{c_1}} = \frac{1/d_1 - 1/d}{1/d_1 - 1/d_2}, \quad (2.9)$$

где  $t$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ , при диаметре поверхности  $d$ , принятом в пределах от  $d_1$  до  $d_2$ .

Теплопроводность некоторых материалов и веществ указана в приложении Б.

Теплопроводность строительных и теплоизоляционных материалов определяют с учетом влияния температуры:

$$\lambda = \lambda_0 + \epsilon t, \quad (2.10)$$

где  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности материала при 0 °С;

$\epsilon$  – температурный коэффициент;

$t$  – средняя температура материала, °С.

Данные к расчету по уравнению (2.10) приведены в приложении Б (таблица Б.2).

Для тонких цилиндрических стенок, когда отношение наружного и внутреннего диаметров  $d/d_1 < 2$ , допустимо выполнять расчеты, как для плоской стенки. Толщину стенки определяют как полуразность наружного и внутреннего диаметров, а площадь поверхности теплообмена – как площадь цилиндрической поверхности с использованием среднеарифметического диаметра.

## Задачи

2.1. Определить потерю теплоты за 1 ч через кирпичную стену площадью 20 м<sup>2</sup>, выполненную из красного глиняного кирпича толщиной 380 мм. Температуры на поверхностях стены составляют 110 и 40 °С.

2.2. Плоскую поверхность надо изолировать так, чтобы потери теплоты с единицы площади поверхности не превышали 450 Вт/м<sup>2</sup>. Температура внутренней поверхности изолируемой стальной стенки равна 500 °С, а температура внешней поверхности изоляции составляет 50 °С.

Определить требуемую толщину тепловой изоляции, выполненной минераловатными матами марки 100.

Толщина стенки из углеродистой стали равна 10 мм.

2.3. Обмуровка печи состоит из пеношамота толщиной 125 мм и слоя из красного кирпича толщиной 500 мм. Температура на внутренней поверхности обмуровки  $t_{c_1} = 1100$  °С, на наружной –  $t_{c_3} = 50$  °С.

Найти поверхностную плотность теплового потока и температуру в плоскости соприкосновения слоев.

2.4. В условиях задачи 8.3 необходимо уменьшить толщину слоя из красного кирпича в 2 раза за счет размещения между слоями пеношамота и красного кирпича засыпки из диатомитовой крошки.

Какую нужно предусмотреть толщину засыпки, чтобы при тех же температурах на поверхностях обмуровки остались неизменными теплопотери через стенку?

**Решение.** В условиях предыдущей задачи поверхностная плотность теплового потока  $q_T = 1090$  Вт/м<sup>2</sup>.

Принимаем среднюю температуру пеношамота  $t_{cp1} = 1000$  °С и находим его теплопроводность по формуле (2.10) с использованием данных приложения Б:

$$\lambda_1 = 0,28 + 0,00023 \times 1000 = 0,51 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Температура в плоскости соприкосновения пеношамота и диатомитовой засыпки по уравнению (2.3):

$$t_{c_2} = t_{c_1} - q_T \frac{\delta_1}{\lambda_1} = 1100 - 1090 \times \frac{0,125}{0,51} = 833 \text{ °С}.$$

Уточняем выбор теплопроводности пеношамота

$$t_{cp1} = \frac{1100 + 833}{2} = 966,5 \text{ °С},$$

$$\lambda_1 = 0,28 + 0,00023 \times 966,5 = 0,5 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Температура в плоскости соприкосновения

$$t_{c_2} = 1100 - 1090 \times \frac{0,125}{0,5} = 828 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Дальнейшего уточнения не требуется.

Аналогично рассчитываем температуру в плоскости соприкосновения диатомитовой засыпки и красного кирпича:

$$t_{c_3} = t_{c_4} + q \frac{\delta_3}{\lambda_3} = 50 + 1090 \times \frac{0,25}{0,7} = 439 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Средняя температура диатомитовой засыпки

$$t_{cp_2} = \frac{828 + 439}{2} = 633,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Теплопроводность диатомитовой засыпки по формуле (2.10):

$$\lambda_2 = 0,113 + 0,00023 \times 633,5 = 0,259 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Толщина засыпки по уравнению (2.3):

$$\delta_2 = \frac{t_{c_2} - t_{c_3}}{q_T} \lambda_2 = \frac{828 - 439}{1090} \times 0,259 = 0,092 \text{ м;}$$

$$\delta_2 = 92 \text{ мм.}$$

2.5. Лыжник одет в куртку из поролона, покрытого изнутри и снаружи тканью толщиной 0,5 мм и теплопроводностью 0,1 Вт/(м·К). Толщина поролона 10 мм, его теплопроводность 0,05 Вт/(м·К). При ходьбе на внутренней поверхности куртки устанавливается температура 29 °С. На наружной поверхности температура –15 °С.

Определить теплотери с 1 м<sup>2</sup> куртки за 1 ч.

2.6. Поверхностная плотность теплового потока через укрытие картофельного бурта не должна превышать 10 Вт/м<sup>2</sup>. Температуры на поверхностях укрытия 2 и –20 °С. Укрытие выполнено из слоя подзолистого грунта

толщиной 0,3 м и слоя уплотненной соломы теплопроводностью 0,15 Вт/(м·К).

Определить требуемую толщину слоя соломы.

2.7. Стены телятника выполнены трехслойными: железобетон толщиной 50 мм, пенополистирол толщиной 80 мм и железобетон толщиной 50 мм.

Температура на наружной поверхности стены  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , на внутренней поверхности  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Определить плотность теплового потока и температуры в плоскости соприкосновения слоев.

2.8. Стены сушильной камеры выполнены из слоя красного кирпича толщиной 250 мм и минераловатных плит толщиной 50 мм. Со стороны плит предусмотрена штукатурка толщиной 25 мм.

Определить плотность теплового потока и температуры в плоскости соприкосновения слоев.

Температуры наружных поверхностей стен равны  $110$  и  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

2.9. Стальная стенка толщиной 10 мм покрыта слоем минераловатного войлока толщиной 50 мм и штукатуркой толщиной 10 мм.

Коэффициент теплопроводности стали 45 Вт/(м·К), минераловатного войлока 0,064 Вт/(м·К).

Температура наружной поверхности стальной стенки  $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ , наружной поверхности штукатурки  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Определить плотность теплового потока и температуры в плоскости соприкосновения слоев.

2.10. Стены «снежного» домика выполнены, считая изнутри, из фанеры толщиной 10 мм, суглинка и снега.

Поверхностная плотность теплового потока не должна превышать  $60\text{ Вт/м}^2$ . Расчетные температуры поверхностей стены  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Какой толщины должны быть слои суглинка и снега, при условии минимально возможной толщины суглинка? Что произойдет, если толщина слоя снега будет больше расчетной?

2.11. Обмуровка печи выполнена трехслойной: пеношамот, красный глиняный кирпич и силикатный кирпич. На внутренней поверхности обмуровки температура 1 150 °С, на внешней – 60 °С. Толщина кладки из красного кирпича – 250 мм, из силикатного – 60 мм.

Какой должна быть толщина пеношамота, чтобы температура красного кирпича не превышала 750 °С? При этой толщине пеношамота найти температуру в плоскости соприкосновения кладок из красного и из силикатного кирпича.

2.12. Стальной трубопровод из углеродистой стали внутренним диаметром 100 мм и наружным 108 мм покрыт тепловой изоляцией в два слоя одинаковой толщины – по 50 мм. Температура внутренней поверхности трубы 250 °С, а наружной поверхности изоляции 50 °С.

Первый слой выполнен из материала теплопроводностью 0,06 Вт/(м·К), а второй – из материала с теплопроводностью 0,12 Вт/(м·К). Определить линейную плотность теплового потока и температуру в плоскости слоев изоляции, а также на внутренней поверхности изоляции.

**Решение.** Определяем диаметры слоев изоляции:

$$d_3 = d_2 + 2\delta_2 = 108 + 2 \times 50 = 208 \text{ мм};$$

$$d_4 = d_3 + 2\delta_3 = 208 + 2 \times 50 = 308 \text{ мм}.$$

Находим по формуле (2.2)

$$q_l = 2\pi \frac{250 - 50}{\frac{1}{50} \ln \frac{108}{100} + \frac{1}{0,06} \ln \frac{208}{108} + \frac{1}{0,12} \ln \frac{308}{208}} = 88,5 \text{ Вт/м}.$$

Используя уравнение теплопроводности (2.4) однослойной цилиндрической стенки, определяем:

$$t_{c_2} = 250 - 88,5 \frac{\ln \frac{108}{100}}{2\pi \times 50} = 249,98 \text{ °С};$$

$$t_{c_3} = 50 + 88,5 \frac{\ln \frac{308}{208}}{2\pi \times 0,12} = 96 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

2.13. Как изменятся линейная плотность теплового потока и температура плоскости соприкосновения слоев тепловой изоляции, если их поменять местами, т.е. слой с большей теплопроводностью положить непосредственно на трубу?

2.14. Паропровод наружным диаметром 89 мм и длиной 30 м теплоизолирован минераловатными плитами марки 75 толщиной 50 мм. Температуры на внешней и внутренней поверхностях изоляции соответственно равны 40 и 190 °С.

Определить потерю теплоты паропроводом в течение суток.

2.15. Электронагреватель мощностью 2 кВт расположен внутри фарфоровой трубки внутренним диаметром 44 мм и толщиной 3 мм. Длина трубки 0,75 м. Электронагреватель предназначен для подогрева воды до температуры 150 °С. Температура трубки не должна превышать 250 °С.

Обеспечиваются ли допустимые условия работы фарфоровой трубки, если температура ее внешней поверхности на 7 °С выше температуры воды?

2.16. Рассчитать допустимую силу тока по проводу диаметром 2 мм и удельным электрическим сопротивлением  $3,28 \times 10^{-8}$  Ом·м. Допустимая температура электрической изоляции 70 °С, температура на наружной ее поверхности 50 °С. Теплопроводность электрической изоляции 0,16 Вт/(м·К), толщина 1 мм.

2.17. Найти толщину тепловой изоляции трубопровода тепловых сетей, выполненную из пенополистирола. Температура трубопровода 150 °С, а наружной поверхности теплоизоляционной конструкции 40 °С. Линейная плотность теплового потока через тепловую изоляцию не должна превышать 90 Вт/м. Наружный диаметр трубопровода составляет 219 мм.

2.18. Определить тепловой поток через латунную шаровую стенку внутренним диаметром 100 мм и толщиной 40 мм. Температуры на внутренней и наружной поверхностях стенки принять равными 250 и 150 °С.

2.19. По условиям задачи 2.18 построить температурный график в толще стенки. При этом рассчитать температуры при значениях текущего диаметра 120, 140 и 160 мм.

2.20. Варочный котел сферической формы с внутренним диаметром 1 000 мм изготовлен из легированной стали толщиной 10 мм. Снаружи котел покрыт тепловой изоляцией, выполненной толщиной 60 мм из минераловатных изделий маркой 100. Температуры внутренней поверхности котла и наружной поверхности тепловой изоляции 180 и 60 °С.

Определить тепловой поток и температуру на наружной поверхности котла.

### 3 ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ И СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

Теплоотдачей называют конвективный теплообмен между поверхностью твердого тела и движущейся средой. Конвективный теплообмен осуществляется совместным действием конвекции теплоты и теплопроводности в движущихся газах и жидкостях.

При расчетах используют уравнения теплоотдачи:

– для плоской стенки

$$q = \alpha (t_{\text{ж}} - t_{\text{с}}), \quad (3.1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$t_{\text{ж}}$  — средняя температура среды (жидкости или газа) на удалении от поверхности, °С;

– для цилиндрической стенки

$$q_l = \pi \alpha d (t_{\text{ж}} - t_{\text{с}}), \quad (3.2)$$

где  $d$  — диаметр наружной поверхности, м.

Для определения коэффициентов теплоотдачи предложены расчетные зависимости в виде функциональных связей между числами подобия.

Структура чисел подобия приведена в перечне основных обозначений.

При вынужденной конвекции обычно записывают расчетное уравнение в следующем виде:

$$Nu = C_1 \text{Re}_{\text{ж}}^m \text{Pr}_{\text{ж}}^n \left( \frac{\text{Pr}_{\text{ж}}}{\text{Pr}_{\text{с}}} \right)^{0,25}, \quad (3.3)$$

где коэффициент  $C_1$  и показатели степени  $m$  и  $n$  зависят от режима движения среды, от условий и особенностей обтекания средой поверхности твердого тела.

Индексы «ж» и «с» означают, что физические свойства среды (жидкости или газа) принимают при температуре среды  $t_{ж}$  на удалении от поверхности твердого тела или при температуре стенки (поверхности)  $t_{с}$ .

Множитель  $\left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{с}}\right)^{0,25}$  имеет существенное значение для вязких жидкостей. Для газов его принимают равным единице.

В формулу (3.3) могут быть введены коэффициенты, учитывающие влияние участка тепловой стабилизации, поворота среды в трубках змеевика, конструктивных характеристик трубного пучка и других факторов.

Значения постоянных для некоторых случаев теплообмена даны в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения постоянных в уравнении (3.3)

| Условия движения   | $Re_{ж}$          | $C_1$   | $m$  | $n$  |
|--|-------------------|---------|------|------|
| В прямых трубах и каналах  | $> 10^4$          | 0,021   | 0,8  | 0,43 |
| В каналах между пластинами с гофрами в «ёлочку»  | от 100 до 30 000  | 0,1     | 0,73 | 0,43 |
| В кольцевом канале между двумя трубами*  | $> 7 \times 10^3$ | 0,017** | 0,8  | 0,4  |
| * Коэффициент теплоотдачи рассчитывается на внутренней поверхности канала.   |                   |         |      |      |
| ** В уравнение (3.3) дополнительно вводится множитель $(d_2/d_1)^{0,18}$ , где $d_2$ и $d_1$ – внешний и внутренний диаметры кольцевого канала |                   |         |      |      |

В качестве определяющего размера при рассмотренных условиях движения используют диаметр или эквивалентный диаметр,

$$d_3 = \frac{4S}{\Pi}, \quad (3.4)$$

где  $S$  и  $\Pi$  – площадь и периметр поперечного сечения потока среды,  $m^2$  и  $m$ .

Для кольцевого канала  $d_3 = d_2 - d_1$ , а для щелевого канала между пластинами  $d_3 = 2\delta$ , где  $\delta$  – зазор между пластинами.

При турбулентном течении жидкостей в прямых трубах и каналах принимают коэффициент влияния участка тепловой стабилизации  $\varepsilon_l = 1$  в случае  $\frac{l}{d} \geq 50$ , где  $l$  и  $d$  – длина и внутренний диаметр трубы.

В случае свободной конвекции среды в большом объеме расчетная зависимость имеет следующий вид:

$$Nu = C_2 (Gr Pr)^n \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (3.5)$$

где коэффициент  $C_2$  и показатель степени  $n$  зависят от условий движения и обтекания средой поверхности тела.

Таблица 3.2 – Значения постоянных в уравнении (3.5)

| Условия движения          | Определяющая температура | $Gr Pr$              | $C_2$ | $n$   |
|---------------------------|--------------------------|----------------------|-------|-------|
| На горизонтальной трубе   | $t_{ж}^*$                | от $10^3$ до $10^9$  | 0,5   | 0,25  |
| То же                     | $t_{пс}^*$               | $< 500$              | 1,18  | 0,125 |
| Вдоль вертикальной стенки | $t_{ж}$                  | от $10^3$ до $10^9$  | 0,75  | 0,25  |
| То же                     | $t_{ж}$                  | $> 6 \times 10^{10}$ | 0,15  | 0,333 |

\* Средняя температура среды в пограничном слое определяется как  $t_{пс} = (t_{ж} + t_c) / 2$

Определяющим размером при расчете теплоотдачи в условиях свободной конвекции являются наружный диаметр горизонтальной цилиндрической поверхности или высота вертикальной стенки (плиты).

Теплофизические свойства некоторых сред даны в приложениях Б и В.

Теплообмен на поверхности твердых тел может происходить путем конвективного и лучистого теплообмена – путем радиационно-конвективного теплообмена. В этом случае пользуются уравнением теплоотдачи с введением суммарного коэффициента теплоотдачи

$$\alpha_{кл} = \alpha_k + \alpha_l, \quad (3.6)$$

где  $\alpha_k$  и  $\alpha_l$  – конвективная и лучистая составляющие коэффициента теплоотдачи.

Если одно тело окружено поверхностью другого и площадь этой поверхности намного больше площади поверхности первого тела, то допустимо определять условный коэффициент теплоотдачи излучением (лучистую составляющую коэффициента теплоотдачи) как

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{\varepsilon_1 c_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{T_1 - T_2}, \quad (3.7)$$

где  $\varepsilon_1$  – коэффициент теплового излучения (степень черноты) первого тела;  
 $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – излучательная способность абсолютно черного тела;  
 $T_1$  и  $T_2$  – термодинамические температуры первого тела и поверхности второго тела, К.

Поверхность второго тела образует замкнутую оболочку.

Конвективную составляющую (коэффициент теплоотдачи при конвекции среды) рассчитывают исходя из вышеприведенных положений.

### Задачи

3.1. Определить линейную плотность теплового потока на цилиндрической поверхности горизонтального аппарата диаметром 400 мм в условиях свободной конвекции воздуха. Температура поверхности 200 °С, а температура окружающего воздуха 30 °С.

**Решение.** При определяющей температуре  $t_{\text{ж}} = 30 \text{ °С}$  выписываем из приложения В теплофизические свойства воздуха:

$$\lambda_{\text{ж}} = 0,0265 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad \nu_{\text{ж}} = 16,38 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \text{Pr}_{\text{ж}} = 0,71; \quad \beta_{\text{ж}} = 0,0033 \text{ К}^{-1}.$$

При температуре воздуха  $t_{\text{с}} = 200 \text{ °С}$   $\text{Pr}_{\text{с}} = 0,71$ .

Рассчитываем

$$(Gr \times Pr)_{\text{ж}} = \frac{9,81 \times 0,4^3}{(16,38 \times 10^{-6})^2} \times 0,0033 \times (200 - 30) \times 0,71 = 9,3 \times 10^8.$$

По таблице 3.2 находим  $C_2 = 0,5$  и  $n = 0,25$ .

В таком случае по уравнению (3.5)

$$Nu = 0,5 \times (9,3 \times 10^8)^{0,25} = 87,31.$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_{\text{ж}}}{l} = 87,31 \times \frac{0,0265}{0,4} = 5,78 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Линейная плотность теплового потока по уравнению (3.2)

$$q_l = \pi \times 5,78 \times 0,4(200 - 30) = 1235 \text{ Вт}/\text{м}.$$

3.2. Рассчитать тепловой поток от горизонтального трубопровода наружным диаметром 109 мм и длиной 25 м при свободной конвекции воздуха. Температуры поверхности трубопровода и окружающего воздуха равны 115 и 18 °С.

3.3. Как изменится тепловой поток в условиях задачи 3.2, если температура поверхности трубопровода уменьшится до 90 °С?

3.4. Определить допустимую силу тока для горизонтальной нихромовой проволоки диаметром 3 мм в условиях свободного движения воздуха у поверхности проволоки. Допустимая температура проволоки равна 600 °С, а температура окружающего воздуха составляет 20 °С. Удельное электрическое сопротивление принять равным  $1,1 \times 10^{-6}$  Ом·м. Теплообмен излучением не учитывается.

3.5. Определить поверхностную плотность теплового потока от вертикальной стенки высотой 0,5 м в условиях свободной конвекции воздуха.

Температура поверхности плиты 100 °С, а температура окружающего воздуха 30 °С.

3.6. Медная шина прямоугольного сечения размером 100 × 3 мм расположена на ребре и омывается свободным потоком воздуха температурой 25 °С. Температура шины не должна превышать 70 °С.

Определить допустимую силу тока в условиях двухстороннего отвода теплоты. Удельное электрическое сопротивление меди  $1,8 \times 10^{-8}$  Ом·м.

3.7. Трубчатый пастеризатор молока выполнен из труб длиной 1,8 м и внутренним диаметром 21 мм. Внутри труб движется молоко со средней скоростью 0,8 м/с. Температуры молока и внутренней поверхности трубы составляют 60 и 75 °С. Найти коэффициент теплоотдачи и тепловой поток при теплоотдаче на поверхности одной трубы.

3.8. Рассчитать коэффициент теплоотдачи от воды к внутренней поверхности трубы диаметром 51 мм. Температуры воды и поверхности трубы соответственно равны 90 и 60 °С. Скорость воды в трубе 0,5 м/с. Влияние участка тепловой стабилизации не учитывать.

3.9. В теплообменнике типа «труба в трубе» нагреваемая вода температурой 40 °С движется со скоростью 1,5 м/с по кольцевому каналу. Наружный и внутренний диаметры канала равны 26 и 20 мм, длина канала – 1,4 м. Средняя температура наружной поверхности внутренней трубы равна 70 °С.

Определить тепловой поток, подводимый к нагреваемой воде.

**Решение.** С учетом данных таблицы 3.1 записываем расчетное уравнение (3.3) в следующем виде:

$$Nu_{ж} = 0,017 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,4} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^{0,18}.$$

Выписываем свойства воды из приложения Б:

– при  $t_{ж} = 40$  °С

$$\lambda_{ж} = 0,635 \text{ Вт/(м·К)}; \quad \nu_{ж} = 0,66 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad Pr_{ж} = 4,33;$$

– при  $t_c = 70 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\text{Pr}_c = 2,55.$$

Рассчитываем:

– эквивалентный диаметр кольцевого канала:

$$d_3 = d_2 - d_1 = 26 - 20 = 6 \text{ мм}; \quad d_3 = 0,006 \text{ м};$$

– числа подобия:

$$\text{Re}_{\text{ж}} = \frac{1,5 \times 0,006}{0,66 \times 10^{-6}} = 13640;$$

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,017 \times 13640^{0,8} \times 4,33^{0,4} \left( \frac{4,33}{2,55} \right)^{0,25} \left( \frac{26}{20} \right)^{0,18} = 74,3;$$

– коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \text{Nu}_{\text{ж}} \frac{\lambda_{\text{ж}}}{d_3} = 74,3 \times \frac{0,635}{0,006} = 7860 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

– линейную плотность теплового потока по формуле (3.2):

$$q_l = \pi \times 7860 \times 0,02 \times (70 - 40) = 14830 \text{ Вт}/\text{м};$$

– тепловой поток по уравнению (2.6):

$$\Phi = 14\,830 \times 1,4 = 20\,800 \text{ Вт}.$$

3.10. Молоко средней температурой  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  движется по кольцевому каналу. Наружный и внутренний диаметры канала равны 30 и 15 мм. Температура внутренней поверхности канала составляет  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности канала при скорости молока 1 м/с.

3.11. Скорость молока в каналах между пластинами, гофрированными в «ёлочку», равна 0,365 м/с. Средняя температура молока  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , средняя тем-

пература пластин  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Расстояние между пластинами  $2,8\text{ мм}$ . Рассчитать коэффициент теплоотдачи на пластинах, а также тепловой поток при площади поверхности теплообмена  $0,4\text{ м}^2$ .

3.12. В теплообменнике вода движется по трубе внутренним диаметром  $28\text{ мм}$  и длиной  $2\text{ м}$  со скоростью  $0,8\text{ м/с}$ . Температура трубы равна  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а средняя температура воды –  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить температуры воды на входе и выходе трубы.

3.13. Нихромовая проволока разогрета до температуры  $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить коэффициент теплоотдачи излучением с поверхности проволоки при ее расположении в помещении с температурой воздуха  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Решение.** Принимаем температуру внутренних поверхностей строительных ограждений помещения равной температуре воздуха в помещении. В таком случае  $t_2 = 17\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Принимаем коэффициент теплового излучения никрома  $\varepsilon = 0,75$ .

В условиях задачи имеет место теплообмен излучением между телом (нихромовая проволока) и оболочкой (строительными ограждениями) при малых размерах тела по сравнению с оболочкой.

По уравнению (3.7) определяем

$$\alpha_{\text{л}} = 0,75 \times 5,67 \times \left[ \left( \frac{1000 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{17 + 273}{100} \right)^4 \right] / (1\ 000 - 17) = 113\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

3.14. Чугунный радиатор с высотой вертикальной его поверхности  $580\text{ мм}$  расположен в помещении с температурой воздуха  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Теплоноситель – горячая вода средней температурой  $82,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Найти суммарный коэффициент теплоотдачи на внешней поверхности радиатора, приняв температуру поверхности равной температуре воды.

## Контрольная задача 1

Определить допустимую силу тока для нихромовой проволоки, подвешенной горизонтально в спокойном воздухе температурой 20 °С. Коэффициент теплового излучения поверхности нихрома  $\varepsilon_1 = 0,75$ ; удельное электрическое сопротивление –  $1,15 \times 10^{-6}$  Ом·м.

Диаметр проволоки  $d_0$  принять в зависимости от последней цифры номера шифра, а допустимую температуру поверхности проволоки  $t_d$  – от предпоследней цифры номера.

Температуру окружающих проволоку поверхностей принять равной температуре воздуха.

Таблица 3.3 – Исходные данные к контрольной задаче 1

|                           |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Последняя цифра шифра     | 0   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   |
| $d_0$ , мм                | 0,5 | 0,8 | 1,0 | 1,2 | 1,4 | 1,6 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 4,0 |
| Предпоследняя цифра шифра | 0   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   |
| $t_d$ , °С                | 900 | 400 | 600 | 700 | 800 | 200 | 400 | 600 | 700 | 800 |

#### 4 ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Теплопередачей принято называть процесс теплообмена между теплоносителями (жидкостями и газами) через разделяющую их твердую стенку.

Теплопередача происходит путем теплопроводности в разделяющей стенке и теплоотдачи на поверхностях стенки (от горячей среды к одной поверхности и от другой поверхности к холодной, нагреваемой среде).

Уравнения теплопередачи записывают в следующей форме:

– для плоской стенки

$$q = k(t_{ж_1} - t_{ж_2}), \quad (4.1)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$t_{ж_1}$  и  $t_{ж_2}$  – температуры жидкостей (газов), °С;

– для цилиндрической стенки

$$q_l = \pi k_l (t_{ж_1} - t_{ж_2}), \quad (4.2)$$

где  $k_l$  – линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К).

Коэффициент теплопередачи через плоскую стенку

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{D_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (4.3)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи на поверхностях стенки, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Линейный коэффициент теплопередачи

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_1^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}}. \quad (4.4)$$

При расчетах используют уравнения теплоотдачи:

– в случае плоской стенки:

$$q = \alpha_1(t_{ж_1} - t_{c_1}), \quad (4.5)$$

$$q = \alpha_2(t_{c_{n+1}} - t_{ж_2}); \quad (4.5a)$$

– при цилиндрической стенке:

$$q_l = r\alpha_1 d_1(t_{ж_1} - t_{c_1}), \quad (4.6)$$

$$q_l = \pi b_2 d_2(t_{c_{n+1}} - t_{ж_2}). \quad (4.6a)$$

Для тонких цилиндрических стенок (при отношении наружного и внутреннего диаметра не более 1,2) допустимо выполнять инженерные расчеты как для плоской стенки, используя уравнения (4.1) и (4.3). При этом толщину стенки (слоя стенки) определяют как полуразность наружного и внутреннего диаметров.

Площадь поверхности теплообмена

$$A = \pi d_X l, \quad (4.7)$$

где  $d_X$  – расчетный диаметр поверхности теплообмена, м.

Для уменьшения погрешности расчета принимают в качестве расчетного диаметр той поверхности, со стороны которой меньше коэффициент теплоотдачи (например,  $\alpha_1 \ll \alpha_2$ , то  $d_X = d_1$ ). Если же коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1 \approx \alpha_2$ , то используют среднеарифметический диаметр.

Связь между коэффициентами теплопередачи устанавливает зависимость:

$$k_l = k d_X. \quad (4.8)$$

## Задачи

4.1. Обмуровка печи выполнена из слоя огнеупорного кирпича толщиной 250 мм и слоя красного кирпича толщиной 125 мм. Температура в печи равна 1300 °С, температура наружного воздуха – 25 °С. Коэффициент тепло-

отдачи от газов к обмуровке – 90 Вт/(м<sup>2</sup>·К), а от обмуровки к воздуху – 12 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Теплопроводность огнеупорного кирпича 0,93 Вт/(м·К).

Определить плотность теплового потока, рассчитать температуру на границе слоев обмуровки.

**Решение.** Выписываем из приложения Б теплопроводность красного кирпича  $\lambda_2 = 0,7$  Вт/(м·К).

Рассчитываем:

– коэффициент теплопередачи по формуле (4.3):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{90} + \frac{0,25}{0,93} + \frac{0,125}{0,7} + \frac{1}{12}} = 1,845 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)};$$

– поверхностную плотность теплового потока по уравнению (4.1):

$$q = 1,845(1300 - 25) = 2353 \text{ Вт/м}^2;$$

– температуру внутренней поверхности по уравнению (4.5):

$$t_{c_1} = t_{ж_1} - \frac{q}{\alpha_1} = 1300 - \frac{2353}{90} = 1274 \text{ }^\circ\text{C};$$

– температуру на границе слоев обмуровки по зависимости (2.3):

$$t_{c_2} = t_{c_1} - \frac{\delta_1}{\lambda_1} q = 1274 - \frac{0,25}{0,93} \times 2353 = 641 \text{ }^\circ\text{C}.$$

4.2. Плоская стальная стенка толщиной 30 мм омывается с одной стороны дымовыми газами, температура которых 770 °С, а с другой стороны – воздухом температурой 150 °С. Коэффициенты теплоотдачи от дымовых газов к стенке и от стенки к воздуху равны соответственно 45 и 80 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Определить температуры поверхностей стенки.

4.3. Рассчитать температуры чистой и загрязненной стенки чугунного водогрейного котла.

Толщина стенки – 8 мм, коэффициенты теплоотдачи от дымовых газов к стенке и от стенки к воде соответственно 50 и 1 200 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Температуры дымовых газов и нагреваемой воды – 1 000 °С и 95 °С. Стенка загрязнена слоем сажи (со стороны газов) толщиной 1 мм и слоем накипи (со стороны воды) толщиной 2 мм.

4.4. Найти тепловой поток через стену из силикатного кирпича толщиной 500 мм, покрытую изнутри штукатуркой толщиной 30 мм. Температура воздуха внутри помещения 18 °С, снаружи – –25 °С. Площадь стены 50 м<sup>2</sup>.

Определить также температуры внутренней и внешней поверхностей стены.

Коэффициент теплоотдачи: со стороны внутреннего воздуха – 8,7 Вт/(м<sup>2</sup>·К), со стороны наружного – 23 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

4.5. Варочный котел выполнен из листовой стали толщиной 8 мм. Температура рабочей среды в котле составляет 140 °С, воздуха в варочной – 20 °С. Тепловая изоляция выполнена из минераловатных матов марки 100.

Определить толщину тепловой изоляции, если поверхностная плотность теплового потока через тепловую изоляцию не должна превышать 70 Вт/м<sup>2</sup>.

При расчете пренебречь термическим сопротивлением на внутренней поверхности котла и принять коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности изоляции равным 12 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Расчет выполнить как для плоской стенки.

4.6. Чан из деревянных досок заполнен водой температурой 5 °С. Температура окружающего воздуха 18 °С, его относительная влажность 70 %. Определить требуемую толщину досок из условия предотвращения конденсации водяных паров на наружной поверхности чана. Коэффициент теплоотдачи на этой поверхности – 7 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

4.7. Сколько следует сжечь угля в печи, КПД которой равен 70 %, чтобы восполнить теплотери помещением в сутки через стену из красного

кирпича площадью  $20 \text{ м}^2$ , толщиной  $510 \text{ мм}$ ? Температура в помещении равна  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ , а температура наружного воздуха –  $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ ?

При расчете принять суммарный коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности стены равным  $8,75 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , суммарный коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности  $23 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Теплота сгорания угля –  $19\,500 \text{ кДж}/\text{кг}$ .

4.8. Стены здания сложены из шлакобетонных блоков толщиной  $500 \text{ мм}$ . Снаружи и изнутри предусмотрена штукатурка толщиной каждого слоя по  $30 \text{ мм}$ . Температуры внутреннего и наружного воздуха, коэффициент теплоотдачи на поверхностях стены принять как в задаче 4.7.

Найти поверхностную плотность теплового потока и температуры на поверхностях отдельных слоев.

4.9. По стальному трубопроводу внутренним диаметром  $100 \text{ мм}$  и толщиной стенок  $5 \text{ мм}$  протекает горячая вода температурой  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Труба теплоизолирована пенополиуретаном теплопроводностью  $0,033 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  и толщиной  $42 \text{ мм}$ .

Рассчитать температуры на поверхностях стенки трубопровода и теплоизоляционного слоя. При расчете принять коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности трубопровода равным  $2\,000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , а на наружной поверхности изоляции –  $12 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Температура окружающего воздуха составляет  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Решение.** Принимаем для углеродистой стали по приложению Б  $\lambda = 50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Находим линейный коэффициент теплопередачи по формуле (4.4):

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{2000 \times 0,1} + \frac{1}{2 \times 50} \ln \frac{110}{100} + \frac{1}{2 \times 0,033} \ln \frac{194}{110} + \frac{1}{12 \times 0,194}} = 0,1107 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}).$$

Линейная плотность теплового потока по уравнению (4.2):

$$q_l = \pi \times 0,1107(150 - 5) = 50,4 \text{ Вт}/\text{м}.$$

По уравнениям (4.6) и (2.4) рассчитываем температуры:

– на внутренней поверхности трубы:

$$t_{c_1} = 150 - \frac{50,4}{p \times 2000 \times 0,1} = 149,92 \text{ } ^\circ\text{C};$$

– на наружной поверхности трубы:

$$t_{c_2} = 149,92 - \frac{50,4}{2p50} \ln \frac{110}{100} = 149,9 \text{ } ^\circ\text{C};$$

– на наружной поверхности изоляции:

$$t_{c_3} = 149,9 - \frac{50,4}{2p0,033} \ln \frac{194}{110} = 12 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

**Проверка.** По уравнению (4.6) определяем:

$$t_{c_3} = 5 + \frac{50,4}{p \times 12 \times 0,194} = 11,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4.10. Определить линейную плотность теплового потока через теплоизоляционную конструкцию паропровода наружным диаметром 159 мм. Паропровод изолирован двумя слоями тепловой изоляции, первый из которых толщиной 20 мм и теплопроводностью 0,037 Вт/(м·К), а второй толщиной 50 мм и теплопроводностью 0,14 Вт/(м·К).

Температуры пара в трубопроводе и окружающего воздуха равны 195 и 20 °С. Найти температуру в плоскости соприкосновения слоев.

При расчете принять толщину стенки трубопровода равной 4,5 мм, коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности трубопровода и на наружной поверхности изоляции соответственно 500 и 29 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

4.11. Выполнить расчет в условиях задачи 4.10, но при этом поменять местами теплоизоляционные слои. Сравнить результаты расчета с полученными в задаче 4.10.

4.12. Стальной трубопровод наружным диаметром 76 мм теплоизолирован минераловатными матами марки 100 толщиной 40 мм. Температура теплоносителя 80 °С, температура окружающего воздуха –30 °С, коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности изоляции – 9,3 Вт/(м<sup>2</sup> К).

Определить линейную плотность теплового потока через тепловую изоляцию и температуры на поверхности изоляции. Термическими сопротивлениями на внутренней поверхности трубопровода и при теплопроводности его стенки пренебречь.

4.13. Горячая вода температурой 115 °С на выходе из котельной подается по трубопроводу наружным диаметром 58 мм и длиной 100 м. Расход воды – 1 кг/с. Температура окружающего воздуха – –10 °С. Коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности – 29 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Тепловая изоляция выполнена толщиной 60 мм из материала теплопроводностью 0,35 Вт/(м·К).

Определить уменьшение температуры воды в трубопроводе, не учитывая термических сопротивлений теплоотдачи со стороны воды и теплопроводности стенки трубопровода.

## Контрольная задача 2

По горизонтальному трубопроводу внутренним диаметром  $d_1$  и толщиной стенки  $\delta_1$  движется горячая вода со скоростью  $\vartheta$  и средней температурой  $t_1$ . Для снижения теплотерь предусмотрена тепловая изоляция теплопроводностью  $\lambda_2$  и толщиной  $\delta_2$ . Трубопровод охлаждается в условиях свободной конвекции атмосферного воздуха температурой  $t_2$  и лучистого теплообмена на наружной поверхности тепловой изоляции. Коэффициент теплового излучения поверхности изоляции  $\varepsilon = 0,95$ . Теплопроводность стали  $\lambda_1 = 45$  Вт/(м·К).

Определить температуры поверхностей трубопровода и изоляции, линейный коэффициент теплопередачи и линейную плотность теплового потока.

Определить критический диаметр изоляции и сделать вывод о ее эффективности.

Построить в масштабе температурный график, исходные данные принять в зависимости от номера шифра.

Таблица 4. – Исходные данные к контрольной задаче 2

| Последняя цифра шифра | $t_1$ , °C | $\vartheta$ , м/с | $\delta_2$ , мм | Предпоследняя цифра шифра | $t_2$ , °C | $d_1$ , мм | $\delta_1$ , мм | $\lambda_2$ , Вт/(м·К) |
|-----------------------|------------|-------------------|-----------------|---------------------------|------------|------------|-----------------|------------------------|
| 1                     | 90         | 0,5               | 40              | 1                         | -20        | 21         | 2               | 0,05                   |
| 2                     | 110        | 1,0               | 50              | 2                         | -10        | 28         | 2               | 0,075                  |
| 3                     | 130        | 1,5               | 60              | 3                         | 0          | 34         | 2               | 0,1                    |
| 4                     | 150        | 2,0               | 70              | 4                         | 10         | 41         | 2               | 0,15                   |
| 5                     | 170        | 2,5               | 80              | 5                         | 20         | 51         | 3               | 0,2                    |
| 6                     | 90         | 0,5               | 40              | 6                         | -20        | 70         | 3               | 0,25                   |
| 7                     | 110        | 1,0               | 50              | 7                         | -10        | 83         | 3               | 0,3                    |
| 8                     | 130        | 1,5               | 60              | 8                         | 0          | 101        | 4               | 0,35                   |
| 9                     | 150        | 2,0               | 70              | 9                         | 10         | 126        | 4,5             | 0,4                    |
| 0                     | 170        | 2,5               | 80              | 0                         | 20         | 150        | 4,5             | 0,5                    |

## 5 ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ МЕЖДУ ТЕЛАМИ, РАЗДЕЛЕННЫМИ ПРОЗРАЧНОЙ СРЕДОЙ

В основу расчета теплообмена излучением положен закон Стефана–Больцмана.

Поверхностная плотность теплового потока собственного интегрального излучения, Вт/м<sup>2</sup>,

$$E = \epsilon c_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (5.1)$$

где  $\epsilon$  – коэффициент теплового излучения (степень черноты);

$c_0$  – излучательная способность абсолютно черного тела; принимают

$$c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4);$$

$T$  – температура тела, К.

Коэффициенты теплового излучения приведены в приложении Г.

Во многих случаях рассматривают теплообмен излучением между телами, разделенными прозрачной средой. Такой средой являются одно- и двухатомные газы, сухой воздух.

Тепловой поток излучением между двумя телами, имеющими температуры  $T_1$  и  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ) и разделенными прозрачной средой,

$$\Phi_{1,2} = \epsilon_{\text{пр}} c_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] A \varphi_{1,2}, \quad (5.2)$$

где  $\epsilon_{\text{пр}}$  – приведенный коэффициент теплового излучения системы двух тел;

$A_1$  – площадь поверхности тела температурой  $T_1$ ;

$\varphi_{1,2}$  – угловой коэффициент облученности второго тела со стороны первого.

Приведенный коэффициент теплового излучения находят с использованием коэффициентов теплового излучения первого и второго тела (соответственно  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ ) и с учетом взаимного расположения тел:

– в системе тел с плоскопараллельными поверхностями большого размера:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}, \quad (5.3)$$

– при расположении одного тела в полости другого, когда площадь поверхности первого тела намного меньше площади поверхности полости второго,

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \varepsilon_1. \quad (5.4)$$

В вышеприведенных случаях теплообмена излучением следует принять  $\varphi_{1,2} = 1$ .

Поверхностная плотность теплового потока излучением между двумя телами, разделенными прозрачной средой,

$$E_{1,2} = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{1,2}. \quad (5.5)$$

Для уменьшения теплообмена излучением между поверхностями тел устанавливают экраны из тонких листов.

При одинаковых коэффициентах теплового излучения экранов и тел с плоскопараллельными поверхностями тепловой поток излучением при наличии экранов

$$\Phi_{\text{э}} = \frac{\Phi_{1,2}}{n+1}, \quad (5.6)$$

где  $\Phi_{1,2}$  – тепловой поток излучением при отсутствии экранов по уравнению (5.2);

$n$  – число экранов.

## Задачи

5.1. Стальное изделие имеет температуру 800 °С. Вычислить поверхностную плотность теплового потока излучением с поверхности изделия, приняв ее окисленной, шероховатой.

5.2. Определить тепловой поток собственного излучения трубопровода в условиях задачи 3.2, приняв коэффициент теплового излучения поверхности трубопровода равным 0,95.

5.3. Определить тепловой поток теплопотерь поверхностью кормозапарника путем лучистого теплообмена. Температура поверхности 80 °С, температура воздуха в кормоприготовительной 20 °С. Площадь поверхности излучения принять равной 8 м<sup>2</sup>. Поверхность окрашена масляной краской.

5.4. Обмуровка печи выполнена из пеношамота и внешней обшивки из листовой стали с теплоизоляционным покрытием снаружи. Между пеношамотом и обшивкой оставлен воздушный зазор толщиной 20 мм. Температура обшивки 200 °С, температура внешней поверхности пеношамота 250 °С. Рассчитать поверхностную плотность теплового потока лучистого теплообмена через воздушную прослойку в условиях стационарного режима.

5.5. Двухстенный сосуд Дьюара с посеребренными поверхностями заполнен жидким кислородом при температуре –183 °С. Снаружи сосуд окружен воздухом температурой 27 °С. Найти тепловой поток излучением между стенками сосуда, которые приобретают температуру сред, с которыми они соприкасаются. Поверхность теплообмена равна 0,05 м<sup>2</sup>. Между стенками сосуда создан глубокий вакуум.

5.6. Выполнить расчет в условиях задачи 5.5, приняв, что стенки сосуда изготовлены из полированной стали без посеребрения.

5.7. Рассчитать теплообмен излучением между двумя параллельно расположенными пластинами больших размеров с температурами 600 и 200 °С. Пластины – алюминиевые, окисленные. Площадь пластины равна 2 м<sup>2</sup>.

5.8. Между двумя поверхностями, температуры которых составляют 900 и 100 °С, установлен экран. Принимая коэффициенты теплового излучения поверхностей и экрана равными 0,75, определить поверхностную плотность теплового потока и температуру экрана.

5.9. Температуры двух пластин, помещенных в вакуум, равны 327 и 127 °С. Коэффициенты теплового излучения пластин одинаковы и равны 0,8.

Между пластинами, расположенными параллельно друг другу, установлен экран с коэффициентом теплового излучения равным 0,05. Определить плотность теплового потока излучением и температуру экрана.

5.10. Выполнить расчет по условиям задачи 5.9, приняв коэффициенты теплового излучения: для первой пластины – 0,8, а для второй – 0,4.

5.11. Вольфрамовая проволока длиной 200 мм и диаметром 3 мм помещена в вакуумную камеру, внутренняя поверхность которой намного больше поверхности проволоки. При нагреве проволоки затрачивается электрическая мощность 45 Вт. Температура поверхности камеры составляет 20 °С.

Определить степень черноты проволоки при температуре 1 000 °С.

5.12. В канале, по которому движется горячий газ, установлена термопара. При установившемся тепловом режиме температура газа, измеренная термопарой, составляет 300 °С. Определить истинную температуру газа, приняв:

- температуру стенок канала равной 200 °С;
- степень черноты термочувствительного элемента равной 0,8;
- коэффициент теплоотдачи на поверхности термочувствительного элемента равным 60 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

## 6 ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Тепловой расчет теплообменных аппаратов может быть конструкторским, целью которого является определение площади поверхности теплообмена, и поверочным, в результате которого устанавливаются конечные температуры теплоносителей. В обоих случаях основными расчетными уравнениями являются уравнения теплового баланса и теплопередачи.

Уравнения теплового баланса имеют следующий вид:

а) для теплообменников без изменения агрегатного состояния теплоносителей

$$\Phi = c_{P1}m_{t1}(t_1' - t_1'')\varepsilon = c_{P2}m_{t2}(t_2'' - t_2'), \quad (6.1)$$

где  $\Phi$  – тепловая мощность теплообменного аппарата;

$c_{P1}, c_{P2}$  – удельные изобарные теплоёмкости теплоносителей;

$m_{t1}, m_{t2}$  – массовые расходы теплоносителей;

$t_1', t_2'$  – температуры теплоносителей на входе в теплообменный аппарат;

$t_1'', t_2''$  – температуры теплоносителей на выходе из теплообменного аппарата;

$\eta$  – коэффициент, учитывающий теплотери теплообменного аппарата в окружающую среду (принимается в пределах 0,95–0,98);

б) для теплообменников с изменением агрегатного состояния горячего теплоносителя (водяного пара)

$$\Phi = m_{t1}(h_{п} - h_{к})\varepsilon = c_{P2}m_{t2}(t_2'' - t_2'), \quad (6.2)$$

где  $h_{п}, h_{к}$  – удельные энтальпии теплоносителя на входе и на выходе из теплообменного аппарата.

В уравнениях (6.1) и (6.2) индекс «1» использован для обозначения греющего теплоносителя, а индекс «2» – для обозначения холодного (нагреваемого) теплоносителя. Во многих случаях пренебрегают теплотерями в окружающую среду и принимают  $\eta = 1$ .

Уравнение теплопередачи:

$$\Phi = kA\Delta t_{\text{cp}}, \quad (6.3)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи;

$\Delta t_{\text{cp}}$  – средний температурный напор;

$A$  – площадь поверхности теплообмена.

Средний температурный напор

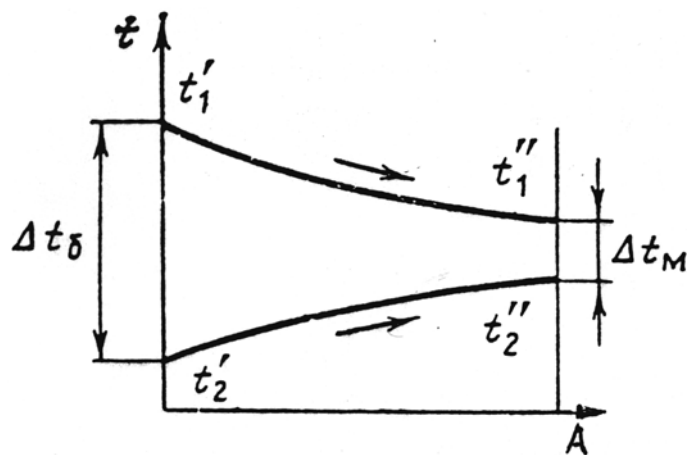
$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{M}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{M}}}}, \quad (6.4)$$

где  $\Delta t_{\delta}$ ,  $\Delta t_{\text{M}}$  – большая и меньшая разности температур теплоносителей на входе и выходе из теплообменного аппарата.

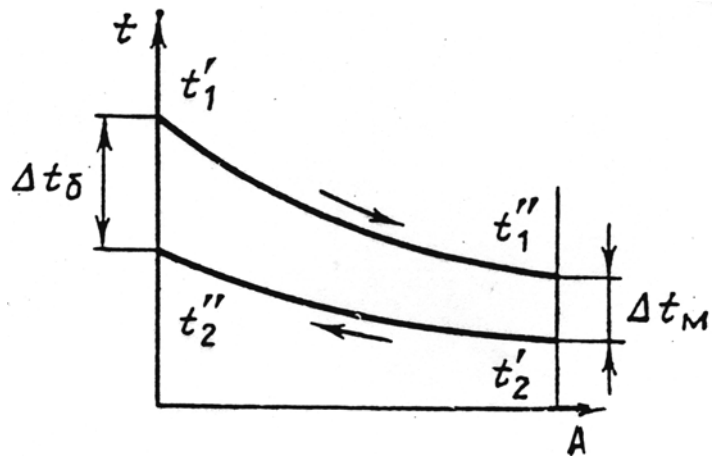
При  $\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{M}}} < 1,7$  допускается расчет по формуле:

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{\text{M}}}{2}. \quad (6.4a)$$

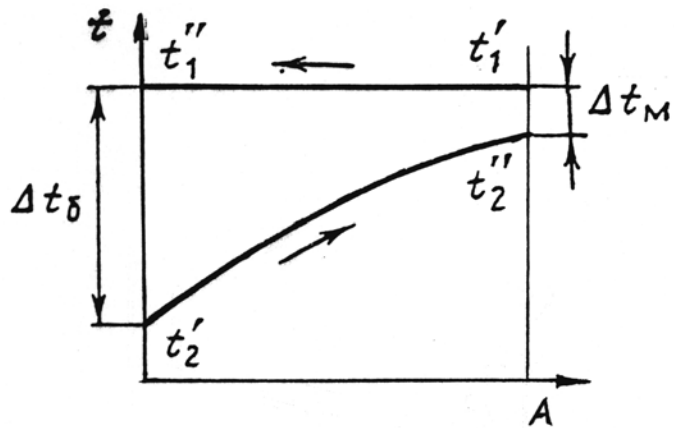
При расчете среднего температурного напора рекомендуется построить температурные графики теплоносителей (рисунок 6.1).



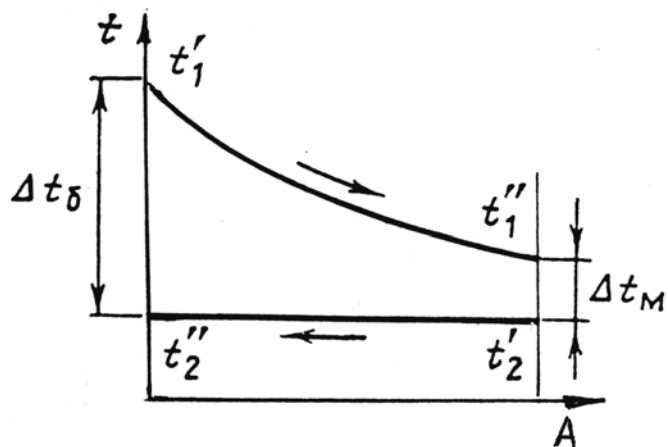
a



а



б



в

Рисунок 6.1 – Графики изменения температур в теплообменных аппаратах:  
 а – при прямотоке; б – при противотоке; в – при конденсации горячего теплоносителя;  
 г – при испарении холодного теплоносителя

## Коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + R_3' + R_3'' + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (6.5)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи от греющей среды и к нагреваемой среде;

$\delta$  – толщина стенки;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала разделяющей стенки;

$R_3'$ ,  $R_3''$  – термические сопротивления загрязняющего слоя с обеих сторон стенки (таблица 6.1).

Таблица 6.1 – Термические сопротивления загрязнений

| Теплоносители и загрязнения      | $R_3$ ,<br>м <sup>2</sup> ·К/Вт |
|----------------------------------|---------------------------------|
| Вода речная                      | $2,5 \times 10^{-4}$            |
| Вода загрязненная                | $6 \times 10^{-4}$              |
| Органические жидкости, рассолы   | $1,7 \times 10^{-4}$            |
| Накипь при толщине слоя 0,5 мм   | $3,3 \times 10^{-4}$            |
| Ржавчина при толщине слоя 0,5 мм | $5 \times 10^{-4}$              |

В водоподогревателях систем теплоснабжения допускается расчет по упрощенной формуле:

$$k = \mu \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}, \quad (6.6)$$

где  $\mu$  – коэффициент, учитывающий загрязнение трубок (допустимо принять в пределах от 0,75 до 0,85).

Расчет трубчатых водоподогревателей систем теплоснабжения и горячего водоснабжения производится в такой последовательности.

Определяют расходы греющей и нагреваемой воды в водоводяных подогревателях или водяного пара и нагреваемой воды в пароводяных подогревателях. При расчете используют зависимости (6.1) и (6.2).

Рассчитывают требуемую площадь живого сечения трубок, внутри которых движется нагреваемая вода:

$$f_{\text{тр}} = \frac{m_{t2}}{\rho_{\text{в}} \vartheta_{\text{тр}}}, \quad (6.7)$$

где  $m_{t2}$  – расход нагреваемой воды, кг/с;

$\rho_{\text{в}}$  – плотность воды; принимается равной 1 000 кг/м<sup>3</sup>;

$\vartheta_{\text{тр}}$  – скорость воды в трубках; принимается в пределах 0,5–2,5 м/с.

По требуемой площади живого сечения трубок выбирают типоразмер (номер) водоводяного подогревателя и выписывают его технические данные (приложение Д).

Производят расчет действительной скорости воды в трубках по уравнению (6.7) с использованием действительной площади живого сечения трубок для принятого типоразмера водоподогревателя.

Определяют скорость греющей воды в межтрубном пространстве:

$$\vartheta_{\text{м}} = \frac{m_{t1}}{\rho_{\text{в}} f_{\text{м}}}, \quad (6.8)$$

где  $f_{\text{м}}$  – площадь живого сечения межтрубного пространства для принятого типоразмера подогревателя.

Скорость воды в межтрубном пространстве должна быть в пределах 0,5–2,5 м/с.

При превышении вышеуказанных значений скорости необходимо принять другой типоразмер подогревателя или использовать параллельную схему их включения. В этом случае повторяется расчет скоростей теплоносителей в трубках и в межтрубном пространстве.

Коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), между водой и поверхностью трубок водоподогревателя находят по уравнению:

$$\alpha = (1630 + 21t - 0,041t^2) \frac{\vartheta^{0,8}}{d^{0,2}}, \quad (6.9)$$

где  $t$  – средняя температура воды (греющей или подогреваемой), равная среднеарифметическому температур на входе и выходе из теплообменного аппарата;

$\vartheta$  – скорость воды в трубках или в межтрубном пространстве, м/с;

$d$  – внутренний диаметр трубок или эквивалентный диаметр межтрубного пространства, м.

В водоводяных трубчатых подогревателях греющую воду обычно пропускают по межтрубному пространству, а нагреваемую – в трубках подогревателя.

Рассчитывают коэффициент теплопередачи по формуле (6.5) или (6.6) с учетом загрязнений поверхности трубок.

Средний температурный напор вычисляют по уравнению (6.4) с учетом противоточной схемы движения теплоносителей.

Определяют требуемую площадь поверхности теплообмена по формуле (6.3) и сравнивают ее с площадью поверхности теплообмена принятого типоразмера подогревателя.

Расчет заканчивается определением числа секций водоводяного подогревателя, которое не должно превышать 10. При выборе числа и типоразмера подогревателя необходимо обеспечить запас по поверхности теплообмена не более 20 %.

### **Задачи**

6.1. В воздухоподогревателе подогревается воздух от 20 до 210 °С, а дымовые газы охлаждаются от 410 до 250 °С.

Определить средний температурный напор при прямоточной и противоточной схемах присоединения воздухоподогревателя. Построить температурные графики теплоносителей.

6.2. В маслоохладитель поступает трансформаторное масло с температурой 70 °С и охлаждается до температуры 30 °С. Массовые расходы масла и

охлаждающей воды составляют соответственно 10 т/ч и 17,6 т/ч. Температура охлаждающей воды на входе в маслоохладитель равна 20 °С.

Определить средний температурный напор.

6.3. Температура дымовых газов на входе в водяной экономайзер равна 360 °С, а за водяным экономайзером – 190 °С. В экономайзере вода нагревается от 104 до 145 °С. Определить средний температурный напор при прямотоке и противотоке.

6.4. Определить площадь поверхности теплообмена водяного экономайзера. Расход дымовых газов – 220 т/ч, удельная изобарная теплоёмкость дымовых газов – 1,045 кДж/(кг·К), температура их на входе в экономайзер составляет 420 °С. Расход нагреваемой воды – 120 т/ч, температура воды на входе в экономайзер равна 105 °С, на выходе из экономайзера – 200 °С. Коэффициент теплопередачи равен 70 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Расчет выполнить при прямоточной и противоточной схемах включения водяного экономайзера.

**Решение.** По формуле (6.1) рассчитываем тепловую мощность водяного экономайзера:

$$\Phi = c_{P2} m_{t2} (t_2'' - t_2') = 4,3 \times \frac{120000}{3600} \times (200 - 105) = 13600 \text{ кВт.}$$

Приняв  $\eta = 0,98$ , по формуле (6.1) определяем конечную температуру дымовых газов:

$$t_1'' = t_1' - \frac{\Phi}{c_{P1} m_{t1} \eta} = 420 - \frac{13600 \times 3600}{1,045 \times 225000 \times 0,98} = 207,5 \text{ °С.}$$

Рассчитываем средний температурный напор по уравнению (6.4):

– при противотоке

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{(420 - 200) - (207,5 - 105)}{\ln \frac{420 - 200}{207,5 - 105}} = 153,8 \text{ °С;}$$

– при прямотоке

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{(420 - 105) - (207,5 - 200)}{\ln \frac{420 - 105}{207,5 - 200}} = 82,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

При расчете среднего температурного напора пользуемся графиками на рисунке 6.1.

Вычисляем площадь поверхности теплообмена по формуле (6.3):

– при противотоке

$$A = \frac{\Phi}{k\Delta t_{\text{cp}}} = \frac{13600000}{79 \times 153,8} = 1120 \text{ м}^2;$$

– при прямотоке

$$A = \frac{\Phi}{k\Delta t_{\text{cp}}} = \frac{13600000}{79 \times 82,3} = 2090 \text{ м}^2.$$

6.5. Определить площадь поверхности теплообмена водоводяного теплообменника. Расход нагреваемой воды  $m_{t2} = 5$  кг/с, ее температура на входе в теплообменник  $t_2' = 17$  °С и на выходе  $t_2'' = 60$  °С. Температура греющей воды на входе  $t_1' = 95$  °С и на выходе  $t_1'' = 70$  °С. Расчет выполнить при прямотоке и противотоке. При расчете принять  $k = 800$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

6.6. Определить площадь поверхности теплообмена в пастеризаторе молока. Расход молока  $m_{t2} = 600$  кг/ч, температура молока изменяется от 28 до 75 °С. Расход горячей воды  $m_{t1} = 650$  кг/ч, температура воды на входе в пастеризатор  $t_1' = 80$  °С. Коэффициент теплопередачи принять равным 1 150 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

6.7. В теплообменном аппарате охлаждается трансформаторное масло. Его расход составляет 0,5 м<sup>3</sup>/ч, температура масла на входе в теплообменник  $t_1' = 95$  °С, на выходе  $t_1'' = 40$  °С. Охлаждающая вода нагревается от 12 до 50 °С. Коэффициенты теплоотдачи: со стороны масла  $\alpha_1 = 200$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),

со стороны воды  $\alpha_2 = 800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Толщина стальных трубок  $\delta = 2 \text{ мм}$ , трубки покрыты слоями ржавчины и накипи.

Определить расход воды и требуемую площадь поверхности теплообмена.

6.8. В водонагреватель тепловой мощностью  $70 \text{ кВт}$  поступают греющая вода с температурой  $t_1' = 85 \text{ }^\circ\text{С}$  и нагреваемая вода с температурой  $t_2' = 25 \text{ }^\circ\text{С}$ . Расходы воды: греющей  $m_{t1} = 2 \text{ т/ч}$ , нагреваемой  $m_{t2} = 1,5 \text{ т/ч}$ .

Определить конечные температуры теплоносителей, а также площадь поверхности теплообмена. Принять при расчетах  $k = 1400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Теплопотери в окружающую среду не учитывать.

6.9. В автомобильном радиаторе системы охлаждения двигателя охлаждается вода от  $90$  до  $70 \text{ }^\circ\text{С}$ , при этом воздух нагревается от  $10$  до  $40 \text{ }^\circ\text{С}$ . Определить площадь поверхности теплообмена и расход охлаждающей воды, приняв коэффициент теплопередачи равным  $50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , а тепловую мощность равной  $35 \text{ кВт}$ . Расчет выполнить для противоточной схемы.

6.10. В водяном экономайзере котельной установки сельскохозяйственного назначения охлаждаются дымовые газы от  $290$  до  $150 \text{ }^\circ\text{С}$ . Расход дымовых газов  $m_{t1} = 16,9 \text{ т/ч}$ , средняя удельная изобарная теплоёмкость  $c_{p1} = 1,07 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Расход нагреваемой воды  $m_{t2} = 15 \text{ т/ч}$ , начальная температура воды  $t_2' = 100 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Определить конечную температуру воды и площадь поверхности теплообмена. Расчет выполнить для противоточной схемы, коэффициент теплопередачи принять равным  $18,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

6.11. В противоточной водоводяной теплообменник с поверхностью нагрева в  $2,5 \text{ м}^2$  поступает холодная вода температурой, равной  $15 \text{ }^\circ\text{С}$ . Расход холодной воды –  $1,5 \text{ т/ч}$ , ее конечная температура после нагрева составляет  $65 \text{ }^\circ\text{С}$ . Расход горячей воды –  $3 \text{ т/ч}$ , ее начальная температура (на входе в теплообменник) –  $95 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Найти коэффициент теплопередачи в теплообменнике.

6.12. В пароводяном водонагревателе используется сухой насыщенный пар давлением 0,8 МПа. Конденсация пара происходит полностью, но без переохлаждения конденсата. Вода подогревается от 20 до 90 °С, расход воды  $m_{t2} = 8$  т/ч.

Рассчитать площадь поверхности теплообмена и расход пара. Коэффициент теплопередачи принять равным 1 800 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

**Решение.** Из приложения Е выписываем термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения при давлении 0,8 МПа:

- температура насыщения  $t_s = 170,42$  °С;
- удельная энтальпия сухого насыщенного пара  $h'' = 2\,768,4$  кДж/кг;
- удельная энтальпия воды при температуре насыщения  $h' = 720,9$  кДж/кг.

Удельная теплоёмкость воды  $c_{p2} = 4,19$  кДж/(кг·К).

Тепловую мощность водонагревателя определяем по формуле (6.2):

$$\Phi = 4,19 \frac{8000}{3600} (90 - 20) = 652 \text{ кВт.}$$

Расход пара определяем, используя уравнение (6.2):

$$m_{t1} = \frac{652}{2768,4 - 720,9} = 0,318 \text{ кг/с} = 1\,150 \text{ кг/ч.}$$

Определим средний температурный напор, учитывая постоянство температуры водяного пара (см. рисунок 6.1), по уравнению (6.4):

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{(170,42 - 20) - (170,42 - 90)}{\ln \frac{170,42 - 20}{170,42 - 90}} = 111,8 \text{ °С.}$$

Площадь поверхности теплообмена вычисляем по формуле (6.3):

$$A = \frac{652000}{1800 \times 111,8} = 3,24 \text{ м}^2.$$

6.13. В пароводяном водонагревателе с площадью поверхности теплообмена  $A = 2 \text{ м}^2$  используется влажный насыщенный пар давлением  $0,16 \text{ МПа}$  и степенью сухости  $0,95$ . Пар конденсируется полностью без переохлаждения конденсата. Расход нагреваемой воды  $m_{t_2} = 5 \text{ т/ч}$ , вода подогревается от  $10$  до  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить расход пара и коэффициент теплопередачи.

6.14. Определить расход пара и площадь поверхности теплообмена в подогревателе мазута. Расход мазута  $m_{t_2} = 800 \text{ кг/ч}$ , удельная теплоёмкость  $c_{p2} = 2,15 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ ; начальная температура мазута  $t_2^I = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , конечная температура  $t_2^{II} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ . В качестве греющего теплоносителя используется сухой насыщенный пар давлением  $1,4 \text{ МПа}$ . Пар конденсируется полностью без переохлаждения конденсата. Коэффициент теплопередачи  $k = 150 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ .

6.15. В противоточном водоводяном теплообменнике типа «труба в трубе» определить требуемую длину труб, если греющая вода поступает во внутреннюю стальную трубу диаметром  $d_2 / d_1 = 35 / 32 \text{ мм}$ . Расход греющей воды  $2\,130 \text{ кг/ч}$ , ее температура на входе  $95 \text{ }^\circ\text{C}$ . Нагреваемая вода движется по кольцевому зазору между трубами и нагревается от  $15$  до  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ . Расход нагреваемой воды  $3\,200 \text{ кг/ч}$ . Внутренний диаметр внешней трубы  $48 \text{ мм}$ . Коэффициенты теплоотдачи от греющей воды к стенке трубы и от стенки внутренней трубы к нагреваемой воде принять равными  $3\,900$  и  $4\,500 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ .

Расчет выполнить двумя методами: по уравнениям теплопередачи через цилиндрическую стенку и по упрощенным зависимостям при переходе к плоской стенке.

### Контрольная задача 3

Выбрать типоразмер секционного водоводяного подогревателя, устанавливаемого в системе теплоснабжения сельскохозяйственного объекта, и определить число секций, принятых к установке.

Построить температурные графики сетевой и нагреваемой воды.

Тепловую мощность подогревателя  $\Phi$ , температуры сетевой воды на входе в подогреватель  $t_1'$  и на выходе  $t_1''$ , а также температуры нагреваемой воды на входе в подогреватель  $t_2'$  и на выходе  $t_2''$  принять по таблице 6.1 в зависимости от номера варианта.

Таблица 6.1 –Исходные данные к контрольной задаче 3

| Последняя цифра шифра | $\Phi$ , кВт | Предпоследняя цифра шифра | Температура, °С |         |         |        |
|-----------------------|--------------|---------------------------|-----------------|---------|---------|--------|
|                       |              |                           | $t_1'$          | $t_1''$ | $t_2''$ | $t_2'$ |
| 1                     | 160          | 1                         | 70              | 20      | 60      | 10     |
| 2                     | 200          | 2                         | 70              | 25      | 60      | 5      |
| 3                     | 300          | 3                         | 70              | 30      | 55      | 5      |
| 4                     | 400          | 4                         | 70              | 35      | 60      | 10     |
| 5                     | 500          | 5                         | 70              | 20      | 55      | 5      |
| 6                     | 600          | 6                         | 70              | 25      | 60      | 10     |
| 7                     | 700          | 7                         | 70              | 30      | 60      | 5      |
| 8                     | 800          | 8                         | 70              | 35      | 55      | 5      |
| 9                     | 900          | 9                         | 70              | 30      | 60      | 10     |
| 0                     | 1 000        | 0                         | 70              | 35      | 60      | 5      |

## 7 ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В СТЕРЖНЯХ (РЕБРАХ)

Оребрение поверхностей теплообмена предусматривают для повышения интенсивности теплообмена и уменьшения размеров и материалоёмкости теплотехнического и теплотехнологического оборудования.

Тепловой поток на поверхности ребер

$$\Phi_p = \beta_p \vartheta_o A_p E, \quad (7.1)$$

где  $\beta_p$  – коэффициент теплоотдачи на поверхности ребра, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\vartheta_o$  – избыточная температура у основания ребра, °С;

$A_p$  – площадь поверхности ребер, м<sup>2</sup>;

$E$  – коэффициент эффективности ребра.

Избыточная температура у основания ребра

$$\vartheta_o = t_o - t_{ж}, \quad (7.1a)$$

где  $t_o$  – температура основания ребра, °С;

$t_{ж}$  – температура среды, окружающей ребро, °С.

Коэффициент эффективности ребра – его основная характеристика. Он выражает отношение теплового потока, действительно передаваемого поверхностью ребер, к максимальному, теоретически возможному значению теплового потока:

$$E = \frac{t_p - t_{ж}}{t_o - t_{ж}}, \quad (7.2)$$

где  $t_p$  – средняя температура поверхности ребра, °С.

Коэффициент эффективности прямых ребер постоянного поперечного сечения определяют как

$$E = \frac{thx}{x}, \quad (7.3)$$

где  $x$  – текущий параметр;

$$thx = \frac{(e^X - e^{-X})}{(e^X + e^{-X})} - \text{тангенс гиперболический.}$$

Значения гиперболических функций приведены в приложении Ж.

При расчете теплопроводности ребер текущий параметр

$$x = m_p h_p, \quad (7.3a)$$

где  $m_p$  – характерный параметр при теплопроводности ребер,  $m^{-1}$ ;

$h_p$  – высота ребра, м.

Для тонких ребер с малой толщиной по сравнению с длиной (высотой) ребра

$$m_p = \sqrt{\frac{2\sigma_p}{\lambda d_p}}, \quad (7.4)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность материала ребра, Вт/(м·К);

$d_p$  – толщина ребра, м.

Теплопроводность металлов дана в приложении Б.

Значения коэффициентов эффективности прямых ребер постоянного поперечного сечения приведены в таблице 7.1 в зависимости от параметра  $m_p h_p$ .

Таблица 7.1 – Коэффициенты эффективности

|           |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $m_p h_p$ | 0     | 0,2   | 0,3   | 0,4   | 0,6   | 0,8   | 1,0   | 1,2   |
| $E$       | 1     | 0,987 | 0,971 | 0,95  | 0,895 | 0,83  | 0,762 | 0,695 |
| $m_p h_p$ | 1,4   | 1,6   | 1,8   | 2,0   | 2,5   | 3,0   | 3,5   | 4,0   |
| $E$       | 0,632 | 0,576 | 0,525 | 0,482 | 0,394 | 0,332 | 0,285 | 0,25  |

Для ребер другой формы вводят условную высоту с последующим использованием вышеприведенных данных о коэффициентах эффективности.

Круглые ребра:

$$h_{кр} = \frac{D_H - d_H}{2} \left(1 + 0,35 \ln \frac{D_H}{d_H}\right), \quad (7.5)$$

где  $D_H$  – наружный диаметр ребер, м;

$d_H$  – наружный диаметр трубы, на наружной поверхности которой выполнено оребрение, м.

Прямоугольные ребра:

$$h_{\text{пр}} = 0,5d_H (c_{\text{пр}} - 1)(1 + 0,35 \ln c_{\text{пр}}), \quad (7.6)$$

где  $\rho_{\text{пр}}$  – геометрический параметр,

$$c_{\text{пр}} = 1,28(B_0 / d_H) \sqrt{(A_0 / B_0) - 0,2}, \quad (7.7)$$

где  $A_0$  и  $B_0$  – большая и меньшая стороны прямоугольного ребра.

Квадратные ребра ( $A_0 = B_0$ )

$$c_{\text{кв}} = 1,15(B_0 / d_H). \quad (7.7a)$$

При пластинчатом оребрении трубных пучков условно разделяют пластины оребрения на прямоугольные ребра в коридорных пучках или на шестиугольные ребра в шахматных пучках.

Для расчета условной высоты ребер при пластинчатом оребрении используют уравнение (7.6). Геометрический параметр прямоугольных ребер рассчитывают по формуле (7.7), а для шестиугольных ребер применяют зависимость следующего вида:

$$c_{\text{шр}} = 1,27(B_0 / d_H) \sqrt{(A_0 / B_0) - 0,3}. \quad (7.8)$$

Размеры  $A_0$  и  $B_0$  в формулах (7.7) и (7.8) приравнивают к расстояниям между осями соседних труб в ряду и между осями соседних рядов по ходу среды (поперечному и продольному шагам в расположении труб в трубном пучке).

При учете теплоотдачи с торцевой поверхности ребер принято увеличивать их расчетную высоту на половину их толщины.

Избыточная температура на конце ребра

$$\vartheta_k = \vartheta_o / ch(m_p h_p), \quad (7.9)$$

где  $ch(m_p h_p) = 0,5(e^{m_p h_p} + e^{-m_p h_p})$  – гиперболический косинус.

Значения гиперболического косинуса приведены в приложении Ж.

Тепловой поток с гладкой поверхности стенки в промежутках между ребрами

$$\Phi_{гп} = \alpha_r \vartheta_o A_{гп}, \quad (7.10)$$

где  $\alpha_r$  – коэффициент теплоотдачи на гладкой поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$A_{гп}$  – площадь гладкой поверхности, м<sup>2</sup>.

Тепловой поток с оребренной поверхности (с учетом теплоотдачи промежутков между ребрами)

$$\Phi_{рс} = \alpha_{пр} \vartheta_o A_{рс}, \quad (7.11)$$

где  $\alpha_{пр}$  – приведенный коэффициент теплоотдачи на оребренной поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$A_{рс}$  – общая площадь оребренной поверхности, м<sup>2</sup>.

Приведенный коэффициент теплоотдачи с учетом термического контактного сопротивления  $c_k$ :

$$\alpha_{пр} = \alpha_r c_k E \frac{A_p}{A_{рс}} + \alpha_{гп} \frac{A_{гп}}{A_{рс}}. \quad (7.12)$$

Коэффициент  $c_k$  характеризует эффективность контакта насадных ребер с поверхностью трубы. В воздушных аппаратах с наружным пластинчатым оребрением принято принимать  $c_k = 0,75 \div 0,85$ . Для поверхностей с монолитными ребрами или с ребрами, подвергшимися металлизации,  $c_k = 1$ .

При расчетах обычно принимают равными коэффициенты теплоотдачи на поверхности ребер и промежутков между ними и переходят к расчетной зависимости вида:

$$\bar{\alpha}_{\text{пр}} = \bar{\alpha}_p \left( c_k E + \frac{1 - c_k E}{\varphi_H} \right), \quad (7.12a)$$

где  $\varphi_H$  – коэффициент оребрения как отношение площади оребренной поверхности к площади участков между ребрами.

### Задачи

7.1 Сравнить коэффициенты эффективности медного и стального (из углеродистой стали) ребер при одинаковых условиях теплообмена. Ребра прямые, прямоугольного сечения, толщиной 1 мм, высотой 40 мм и большой длины. Коэффициент теплоотдачи на поверхности ребер – 60 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

7.2 Найти коэффициент эффективности круглого латунного ребра диаметром 130 мм. Наружный диаметр трубы – 40 мм. Толщина ребра – 0,6 мм. Коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности ребра – 40 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

7.3 Квадратные ребра прямоугольного сечения насажены на трубу наружным диаметром 20 мм. Размеры ребра – 40 × 40 мм, его толщина – 0,5 мм. Ребра выполнены из углеродистой стали. Коэффициент теплоотдачи на поверхности ребер – 100 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Найти коэффициент эффективности ребра.

7.4 В условиях задачи 7.3 определить приведенный коэффициент теплоотдачи при шаге между осями ребер равном 5 мм. Коэффициент термического контактного сопротивления – 0,75.

7.5 Водяной экономайзер котельной установки выполнен из чугунных ребристых труб наружным диаметром 76 мм. Диаметр ребер – 200 мм, их толщина – 5 мм. Определить тепловой поток, передаваемый воде средней температурой  $t_{\text{ср}2} = 150$  °С от дымовых газов средней температурой  $t_{\text{ср}1} = 400$  °С, омываемых снаружи ребристые трубы. Средняя температура наружной поверхности труб – 190 °С. Длину ребристых труб принять равной 30 м, а шаг между ребрами – 20 мм. Коэффициент теплоотдачи от газов к ребристой поверхности – 35 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

**Решение.** Выписываем из приложения Б теплопроводность чугуна:

$$\lambda = 48 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}).$$

По уравнению (7.4)

$$m_p = \sqrt{\frac{2 \times 35}{48 \times 0,005}} = 17 \text{ м}^{-1}.$$

По формуле (7.5)

$$h_{кр} = \frac{0,2 - 0,076}{2} \left(1 + 0,35 \ln \frac{0,2}{0,076}\right) = 0,083 \text{ м}.$$

Параметр  $m_p h_p = 17 \times 0,083 = 1,41$ .

По таблице 7.1 коэффициент эффективности ребра  $E = 0,63$ .

Находим площади поверхности ребер и участков между ребрами для трубы длиной 1 м.

Число ребер  $n_p = l / S_p = 1000 / 20 = 50$ .

Площадь поверхности 50 ребер

$$A_p = 50 \times 2 \times \frac{p}{4} (0,2^2 - 0,076^2) = 2,69 \text{ м}^2.$$

Площадь участков между ребрами

$$A_r = 50 \times p \times 0,076 \times (0,02 - 0,005) = 0,179 \text{ м}^2.$$

Суммарная площадь оребренной поверхности на длине трубы в 1 м

$$A_{pc1} = 2,69 + 0,179 = 2,87 \text{ м}^2.$$

По уравнению (7.12)

$$\bar{\alpha}_{пр} = 35 \times \left(0,63 \times \frac{2,69}{2,87} + \frac{0,179}{2,87}\right) = 22,85 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}).$$

В таком случае по формуле (7.11)

$$\Phi = \bar{\alpha}_{пр} A_{pc1} l_{тр} (t_{cp1} - t_c) = 22,85 \times 2,87 \times 30 \times (400 - 190) = 413000 \text{ Вт} = 413 \text{ кВт}.$$

7.6. Нагревательный прибор выполнен в виде горизонтальной стальной трубы с продольными стальными ребрами постоянного поперечного сечения. Длина трубы – 1,2 м; ее наружный диаметр – 60 мм; высота ребер – 50 мм; толщина ребер – 3 мм. Общее число ребер равно 20. Температура у основания ребра 80 °С, температура окружающего воздуха 18 °С. Коэффициент теплоотдачи от оребренной поверхности – 8,3 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Определить тепловой поток прибора.

7.7. Рассчитать температуру конца ребра в условиях предыдущей задачи.

7.8. Прямое ребро толщиной 0,5 мм выполнено из дюралюминия. Коэффициент теплоотдачи на поверхности ребер – 35 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Какую высоту должно иметь ребро, чтобы избыточная температура на конце ребра составляла половину избыточной температуры у основания ребра?

7.9. Температуры прямого стального ребра: у основания – 200 °С, на торце – 100 °С. Длина ребра – 2 м, высота – 60 мм и толщина – 4 мм.

Определить тепловой поток от ребра к среде температурой 20 °С.

7.10. На плоской стенке из дюралюминия размерами 1 000×800 мм равномерно расположено 100 продольных прямых ребер длиной 1 000 мм, толщиной 2 мм и высотой 50 мм. Температура у основания ребер – 80 °С, температура окружающего воздуха – 10 °С. Коэффициент теплоотдачи на поверхности ребер и на участках гладкой поверхности равен 12 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Найти температуру на конце ребер, а также тепловой поток на оребренной поверхности и при отсутствии ребер.

7.11. Во сколько раз увеличится тепловой поток от воздуха к охлаждающей батарее, выполненной из стальной трубы наружным диаметром 14 мм, если ее оребрить круглыми ребрами из латуни постоянной толщиной 0,5 мм? Диаметр ребер – 38 мм, шаг между осями ребер – 12,5 мм. Средний коэффициент теплоотдачи на оребренной и гладкой поверхностях – 5,8 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Коэффициент термического контактного сопротивления равен 0,8.

7.12. Охладитель трансформаторного масла выполнен из трех латунных трубок наружным диаметром 30 мм и длиной 1,5 м каждая. Снаружи на каждой трубе расположено по 120 круглых латунных ребер диаметром 50 мм и толщиной 1 мм. Температура у основания ребер – 75 °С, температура окружающей среды – 15 °С. Коэффициент теплоотдачи оребренной поверхности – 22 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Определить тепловой поток через оребренные трубы.

7.13. В условиях задачи 7.12 найти тепловой поток через оребренные трубы при замене круглых ребер на квадратные размером 50 × 50 мм.

## 8 ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ ОРЕБРЕННЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

Геометрической характеристикой оребренных поверхностей является коэффициент оребрения  $\varphi_p$ , который представляет собой отношение площадей оребренной и неоребреной поверхностей разделяющей стенки.

$$\varphi_p = \frac{A_{pc}}{A_r}, \quad (8.1)$$

где  $A_{pc}$  – площадь оребренной поверхности;

$A_r$  – площадь неоребреной (гладкой) поверхности.

В случае оребрения наружной поверхности коэффициентом оребрения называют отношение площадей наружной оребренной поверхности и внутренней неоребреной (гладкой) поверхности.

Важной теплотехнической характеристикой является коэффициент теплопередачи. Численное значение коэффициента теплопередачи через оребренные поверхности зависит не только от условий теплообмена, но и от того, к какой поверхности его относят.

В теплообменных аппаратах трубчатого типа с оребренными поверхностями принято рассчитывать коэффициент теплопередачи по уравнениям для плоской стенки.

Коэффициент теплопередачи по отношению к площади гладкой поверхности

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{2п}\varphi_p}}, \quad (8.2)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи на неоребреной поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$d$  – толщина стенки, м;

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

$\bar{b}_{2\text{пр}}$  – приведенный коэффициент теплоотдачи на оребренной поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Коэффициент теплопередачи по отношению к площади оребренной поверхности

$$k_{\text{рс}} = \frac{\kappa}{\Phi_{\text{р}}} . \quad (8.3)$$

Для расчета коэффициентов теплоотдачи оребренных поверхностей предложены расчетные зависимости, полученные с учетом конструктивного оформления оребрения.

Теплообмен на наружной поверхности оребренных трубных пучков с круглыми (шайбовыми) ребрами при поперечном омывании газами рассчитывают по уравнению:

$$Nu_{\text{ж}} = c_n c_Z c_S \text{Re}_{\text{ж}}^n \left( \frac{d_{\text{н}}}{s_{\text{р}}} \right)^{-0,54} \left( \frac{h_{\text{р}}}{s_{\text{р}}} \right)^{-0,14} , \quad (8.4)$$

где  $c_n = 0,23$  для шахматных пучков;  $c_n = 0,105$  для коридорных пучков;

$c_Z$  – коэффициент, зависящий от числа рядов труб;

$c_S$  – коэффициент, учитывающий расположение трубок в пучке;

$n$  – показатель степени ( $n = 0,65$  для шахматных пучков и  $n = 0,72$  для коридорных пучков);

$d_{\text{н}}$  – наружный диаметр трубок, м;

$s_{\text{р}}$  – шаг между осями ребер, м;

$h_{\text{р}}$  – геометрическая высота ребра, м. Здесь  $h_{\text{р}} = (D_{\text{н}} - d_{\text{н}})/2$ , где  $D_{\text{н}}$  – наружный диаметр ребер, м.

Коэффициент  $c_Z = 1$  при числе рядов труб не менее четырех в коридорных пучках и не менее восьми в шахматных пучках.

Коэффициент  $c_S = 1$  в коридорных пучках при  $S_2 / d_{\text{н}} \geq 2$ .

В шахматных пучках

$$c_S = \left( \frac{S_2 - d_H}{S_2' - d_H} \right)^{0,2}, \quad (8.5)$$

где  $S_2$  и  $S_2'$  – продольный и диагональный шаги в расположении трубок.

В качестве определяющей скорости принята скорость газа в узком сечении, а в качестве определяющего размера – шаг между осями ребер.

Уравнение (8.4) справедливо при  $Re_{ж} = 300 \div 25000$ ;  $d_H / S_p = 2,4 \div 4,8$ ;  $h_p / S_p = 0,36 \div 5$ . Эту зависимость допустимо использовать для оребрения труб квадратными ребрами при условии введения поправочного коэффициента (множителя) равного 0,92.

При поперечном обтекании воздухом пластинчатых ребристых поверхностей с коридорным расположением труб получена зависимость:

$$Nu_{ж} = \epsilon_p Re_{ж}^n \left( \frac{L}{d_3} \right)^m, \quad (8.6)$$

где  $L$  – длина пластин по ходу воздуха, м;

$d_3$  – эквивалентный диаметр живого сечения между ребрами и трубами, м.

Определяющий размер – эквивалентный диаметр, определяющая скорость – скорость воздуха в узком сечении.

При расчете коэффициента и показателей степени пользуются формулами:

$$\epsilon_p = \epsilon_0 (1,36 - 2,4 \times 10^{-4} Re_{ж}), \quad (8.7)$$

где  $\epsilon_0$  в зависимости от  $L/d_3$ :

|              |       |       |       |       |       |       |       |      |       |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| $L/d_3$      | 4     | 6     | 10    | 15    | 20    | 25    | 30    | 40   | 50    |
| $\epsilon_0$ | 0,432 | 0,394 | 0,326 | 0,256 | 0,201 | 0,158 | 0,125 | 0,08 | 0,048 |

$$n = 0,45 + 0,0066L/d_3; \quad (8.8)$$

$$m = -0,28 + 8 \times 10^{-5} Re_{ж}. \quad (8.9)$$

Формула (8.6) получена при  $Re_{ж} = 500 \div 2500$ ;  $S_p / d_n = 0,18 \div 0,35$ ;  $L/d_э = 4 \div 50$  и  $S_1 / d_n = 2 \div 5$ , где  $S_1$  – поперечный шаг при расположении трубок в ряду, м.

Эквивалентный диаметр не загроможденного трубами и пластинами живого сечения

$$d_э = \frac{2(S_1 - d_n)(S_p - d_p)}{S_1 - d_n + S_p - d_p}. \quad (8.10)$$

При расчете теплообменных аппаратов с оребренными поверхностями пользуются уравнением теплопередачи:

$$\Phi = \kappa A_{вн} \Delta t_{ср}, \quad (8.11)$$

где  $A_{вн}$  – площадь внутренней неоребренной поверхности труб, м<sup>2</sup>;

$\Delta t_{ср}$  – средний температурный напор, °С, по формулам (6.4) и (6.4а).

### Задачи

8.1. Нагревательный прибор представляет собой шахматный пучок оребренных труб. Трубы и ребра стальные. Наружный диаметр – 38 мм, геометрическая высота ребра – 25 мм, шаг между осями ребер – 15 мм, ребра круглые. Трубы омываются поперечным потоком воздуха средней температурой 70 °С. Скорость воздуха в узком сечении трубного пучка – 10 м/с.

Найти средний коэффициент теплоотдачи на оребренной поверхности. При расчете принять  $c_z = 1$  и  $c_s = 1,03$ .

8.2. Выполнить расчет при условиях задачи 8.1 при коридорном расположении труб.

8.3. Калорифер выполнен в виде алюминиевой трубы длиной 1,5 м, внутренним диаметром 54 мм и толщиной стенок в 3 мм. Внутри трубы движется горячая вода средней температурой 90 °С, а снаружи – воздух средней температурой 10 °С. Коэффициент теплоотдачи со стороны воды равен

310 Вт/(м<sup>2</sup>·К), а со стороны воздуха – 10 Вт/(м<sup>2</sup>·К). На наружной поверхности трубы выполнены круглые алюминиевые ребра толщиной 2 мм, наружным диаметром 160 мм. Число ребер – 75. Найти тепловой поток в калорифере.

8.4. Определить тепловой поток по условиям задачи 8.3 при отсутствии оребрения.

8.5. Маслоохладитель изготовлен из трех латунных трубок диаметром 30/28 мм и длиной по 1 000 мм каждая. Внутри труб движется трансформаторное масло средней температурой 80 °С. Снаружи на каждой трубке расположено по 80 круглых латунных ребер постоянной толщиной 1 мм и диаметром 50 мм. Предусмотрено воздушное охлаждение. Средняя температура воздуха – 15 °С, коэффициент теплоотдачи на поверхности ребер – 22 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Определить тепловой поток. При расчете принять коэффициент теплоотдачи со стороны масла равным 400 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

8.6. Найти поверхностную плотность теплового потока через плоскую стенку, выполненную из углеродистой стали толщиной 2 мм. Теплопередача происходит между теплоносителем средней температурой 100 °С и воздухом средней температурой 30 °С. Расчет выполнить для двух вариантов: в первом – стенка гладкая, во втором – оребренная со стороны воздуха. Ребра стальные постоянного поперечного сечения. Их толщина – 1 мм, высота – 30 мм, шаг между ребрами – 5 мм. Коэффициенты теплоотдачи:

– со стороны теплоносителя – 1 000 Вт/(м<sup>2</sup>·К);

– со стороны воздуха как на поверхности ребер, так и на гладкой поверхности – 20 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

8.7. Нагревательный прибор представляет собой коридорный пучок оребренных круглыми ребрами труб наружным диаметром 20 мм. Высота ребра – 10 мм, его толщина – 1 мм, шаг ребер – 5 мм. Прибор омывается поперечным потоком воздуха средней температурой 50 °С. Скорость воздуха в узком сечении пучка – 12 м/с, число рядов труб равно пяти, продольный шаг в расположении труб  $S_2 = 50$  мм.

Найти коэффициент теплоотдачи на оребренной поверхности.

8.8. В воздухоохладителе тепловой мощностью 22 кВт охлаждается воздух начальной температурой  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Трубы предусмотрены медные, диаметром 18/16 мм, оребрение – пластинчатое, материал ребер – алюминий, толщина ребер – 0,4 мм, шаг ребер  $S_p = 5$  мм. Расположение труб – коридорное, поперечный шаг  $S_1 = 35$  мм, продольный шаг  $S_2 = 25$  мм. Длина оребренной трубы в пределах корпуса аппарата  $l_{\text{тр}} = 1,2$  м. Температура испарения холодильного агента в трубках воздухоохладила –  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности трубок  $\alpha_1 = 1\ 000\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

Определить площадь поверхности теплообмена и число оребренных труб (общее и в одном ряду).

**Решение.** Находим геометрические характеристики оребрения, рассматривая «ячейку» воздушного потока между двумя соседними пластинами и двумя соседними трубами. Незагроможденное сечение такой «ячейки» определяется произведением поперечного шага труб на шаг между осями ребер.

Коэффициент живого сечения (в наиболее узком сечении)

$$\text{Ж} = \frac{(S_p - d_p)(S_1 - d_n)}{S_1 S_p} = \frac{(5 - 0,4)(35 - 18)}{5 \times 35} = 0,45.$$

Эквивалентный диаметр наиболее узкого сечения в соответствии с формулой (8.10)

$$d_3 = \frac{2 \times (35 - 18)(5 - 0,4)}{35 - 18 + 5 - 0,4} = 7,24\ \text{мм} = 7,24 \times 10^{-3}\ \text{м}.$$

Коэффициент оребрения:

– отнесенный к внутренней поверхности труб:

$$\begin{aligned} \varphi_p &= \frac{2 \left( S_1 S_2 - \frac{p}{4} d_n^2 \right) + p d_n (S_p - d_p)}{p d_{\text{вн}} S_p} = \\ &= \frac{2 \times \left( 35 \times 25 - \frac{p}{4} 18^2 \right) + p \times 18(5 - 0,4)}{p \times 16 \times 5} = 5,97; \end{aligned}$$

– отнесенный к площади участков между ребрами:

$$\varphi_n = \frac{2\left(S_1 S_2 - \frac{p}{4} d_n^2\right)}{p d_n (S_p - d_p)} + 1 = \frac{2 \times \left(35 \times 25 - \frac{p}{4} \times 18^2\right)}{p \times 18(5 - 0,4)} + 1 = 5,77.$$

При расчете коэффициента оребрения использована условная разбивка пластин на прямоугольные ребра размерами в соответствии с шагами труб –  $35 \times 25$  мм. Длина внутренней поверхности трубы в пределах «ячейки» потока равна шагу между ребрами, а длина наружной межреберной поверхности – разности между шагом в расположении ребер и толщиной ребер.

Параметры воздуха при его средней температуре  $-20$  °С по приложению В:

$$\rho = 1,35 \text{ кг/м}^3; c_p = 1 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; \lambda = 0,0228 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}; \nu = 11,97 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Для расчета теплообмена на оребренных поверхностях в условиях задачи используем уравнение (8.6).

Соответственно выбираем число Рейнольдса из допустимого интервала значений от 500 до 2 500. Принимаем  $Re = 2\,300$ .

Скорость воздуха в узком сечении воздухоохладителя

$$w = Re \frac{x}{d_3} = 2300 \times \frac{11,97 \times 10^{-6}}{7,24 \times 10^{-3}} = 3,8 \text{ м/с}.$$

Параметры  $S_p / d_n = 5/18 = 0,28$  и  $S_1 / d_n = 35/18 = 1,94$  удовлетворяют условиям применения уравнения (8.6).

Принимаем предварительно 5 рядов трубок по ходу воздуха. В таком случае длина пластин по ходу воздуха  $L = 5S_2 = 5 \times 25 = 125$  мм.

Параметр  $L / d_3 = 125 / 7,24 = 17,3$ , что также находится в допустимых пределах.

Находим по уравнениям (8.7), (8.8) и (8.9):

$$\epsilon_p = 0,231 \times (1,36 - 2,4 \times 10^{-4} \times 2300) = 0,187;$$

$$n = 0,45 + 0,0066 \times 17,3 = 0,564;$$

$$m = -0,28 + 8 \times 10^{-5} \times 2300 = -0,096.$$

Коэффициент теплоотдачи на поверхности ребер, используя зависимость (8.6):

$$Nu_{\text{ж}} = 0,187 \times 2300^{0,564} \times 17,3^{-0,096} = 11,2;$$

$$\alpha_p = 11,2 \times \frac{0,0228}{7,24 \times 10^{-3}} = 35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Теплопроводность алюминия определяем по приложению Б:

$$\lambda = 180 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

Находим:

– параметр  $m_p$  по формуле (7.4):

$$m_p = \sqrt{\frac{2 \times 35}{180 \times 0,0004}} = 31,2 \text{ м}^{-1};$$

– условную высоту по уравнениям (7.7) и (7.6):

$$c_{\text{пр}} = 1,28 \times (35/18) \times \sqrt{(35/25) - 0,2} = 2,73;$$

$$h_{\text{пр}} = 0,5 \times 18 \times (2,73 - 1)(1 + 0,35 \ln 2,73) = 21 \text{ мм} = 0,021 \text{ м};$$

– величину характерного параметра

$$m_p h_{\text{пр}} = 31,2 \times 0,021 = 0,66.$$

Коэффициент эффективности ребер берем из таблицы 7.1:  $E = 0,87$ .

Принимаем коэффициент, учитывающий термическое контактное сопротивление,  $c_k = 0,8$ .

Приведенный коэффициент теплоотдачи находим по формуле (7.12а):

$$\alpha_{2\text{шт}} = 35 \times (0,8 \times 0,87 + \frac{1 - 0,8 \times 0,87}{5,77}) = 26,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Коэффициент теплопередачи – по уравнению (8.2):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{1000} + \frac{0,001}{380} + \frac{1}{26,2 \times 5,97}} = 135 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Принимаем изменение температуры воздуха в процессе его охлаждения равным 4 °С. В таком случае температура охлажденного воздуха на выходе воздухоохладителя  $t_1'' = t_1' - 4 = -18 - 4 = -22$  °С.

Средний температурный напор определяется по формуле (6.4):

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{[-18 - (-30)] - [-22 - (-30)]}{\ln \frac{12}{8}} = 9,9 \text{ °С}.$$

Площадь внутренней гладкой поверхности трубок – по зависимости (8.11):

$$A_{\text{вн}} = \frac{22000}{135 \times 9,9} = 16,5 \text{ м}^2.$$

Длина труб

$$l = \frac{A_{\text{вн}}}{\pi d_{\text{вн}}} = \frac{16,5}{\pi \times 0,016} = 328 \text{ м}.$$

Число труб длиной по 1,2 м

$$n_{\text{тр}} = \frac{328}{1,2} = 273.$$

Массовый расход воздуха через воздухоохладитель – по формуле (6.1):

$$m_{t_1} = \frac{\Phi}{c_p (t_1' - t_1'')} = \frac{22}{1 \times (-18 + 22)} = 5,5 \text{ кг/с}.$$

Поперечное сечение аппарата без учета ребристых труб

$$S = \frac{m_{t1}}{\rho_{\text{ж}} w_{y.c}} = \frac{5,5}{1,35 \times 0,45 \times 3,8} = 2,38 \text{ м}^2.$$

Ширина корпуса аппарата, определяемая шириной ряда труб в трубном пучке,

$$e_{\text{к}} = \frac{S}{l_{\text{тр}}} = \frac{2,38}{1,2} = 2 \text{ м.}$$

Число труб в одном ряду

$$n_1 = \frac{e_{\text{к}}}{S_1} = \frac{2000}{35} = 57.$$

Число рядов

$$m = \frac{n_{\text{тр}}}{n_1} = \frac{273}{57} = 4,8.$$

Принимаем 5 рядов труб, что соответствует ранее принятому числу рядов.

Число трубок в воздухоохладителе  $n = 5 \times 57 = 285$ , что больше требуемого по условиям теплообмена на  $\frac{285 - 273}{273} \times 100 \% = 4,4 \%$ .

#### Контрольная задача 4

В воздухоохладителе тепловой мощностью  $\Phi$ , кВт, охлаждается воздух начальной температурой  $t_1'$ , °С. Снижение температуры воздуха в воздухоохладителе происходит на 5 °С. Температуру кипения холодильного агента в трубках воздухоохладителя принять на 10 °С ниже температуры воздуха на входе.

Воздухоохладитель выполнен из труб с пластинчатым оребрением. Трубы использованы медные (М) с алюминиевыми ребрами или стальные (Ст) со стальными ребрами. Толщина ребер  $\delta_p = 0,4$  мм, шаг между осями ре-

бер –  $S_p$ , мм. Наружный и внутренний диаметры труб –  $d_n/d_{вн}$ , мм. Расположение труб – коридорное. Шаг между осями труб в ряду –  $S_1$ , мм. Продольный шаг между осями рядов –  $S_2 = S_1$ . Длина оребренной трубы в пределах корпуса аппарата –  $l_{тр}$ , м. Коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности труб  $\alpha_1 = 2000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Исходные данные к расчету принять по таблице 8.2 в зависимости от номера варианта.

Определить общее число оребренных труб и количество рядов труб.

Таблица 8.2 – Исходные данные к расчету

| Номер варианта | $\Phi$ , кВт | Материал труб | Диаметры $d_n/d_{вн}$ , мм | $S_1$ , мм | $S_p$ , мм | $l_{тр}$ , м | $t'_1$ , °С |
|----------------|--------------|---------------|----------------------------|------------|------------|--------------|-------------|
| 01             | 3            | М             | 10/8                       | 38         | 3          | 0,8          | -5          |
| 02             | 5            | Ст            | 22/19,6                    | 65         | 8          | 1,0          | -10         |
| 03             | 7            | М             | 12/10                      | 30         | 2          | 1,0          | -15         |
| 04             | 10           | Ст            | 25/20                      | 75         | 8          | 1,2          | -20         |
| 05             | 12           | М             | 15/13                      | 50         | 5          | 1,2          | -25         |
| 06             | 15           | Ст            | 25/20                      | 75         | 5          | 1,5          | -5          |
| 07             | 17,5         | М             | 16/14,4                    | 40         | 5          | 1,5          | -10         |
| 08             | 20           | Ст            | 30/25                      | 75         | 10         | 1,8          | -15         |
| 09             | 25           | М             | 18/16                      | 60         | 5          | 1,8          | -20         |
| 10             | 30           | Ст            | 38/32                      | 80         | 7,5        | 2,0          | -25         |
| 11             | 3            | М             | 12/10                      | 45         | 3          | 0,8          | -25         |
| 12             | 5            | М             | 10/8                       | 25         | 2          | 1,0          | -20         |
| 13             | 7            | Ст            | 22/19,6                    | 70         | 8          | 1,0          | -15         |
| 14             | 10           | М             | 15/13                      | 70         | 3          | 1,2          | -10         |
| 15             | 12           | Ст            | 25/20                      | 75         | 5          | 1,2          | -5          |
| 16             | 15           | М             | 16/14,4                    | 50         | 5          | 1,5          | -25         |
| 17             | 17,5         | Ст            | 25/20                      | 60         | 8          | 1,5          | -20         |
| 18             | 20           | М             | 18/16                      | 70         | 5          | 1,8          | -15         |
| 19             | 25           | Ст            | 38/32                      | 80         | 8          | 1,8          | -10         |
| 20             | 30           | Ст            | 30/25                      | 75         | 5          | 2,0          | -5          |
| 21             | 7            | М             | 15/13                      | 38         | 3          | 1,0          | -15         |
| 22             | 10           | Ст            | 22/19,6                    | 60         | 7,5        | 1,2          | -20         |
| 23             | 12           | М             | 16/14,4                    | 40         | 3          | 1,2          | -25         |
| 24             | 15           | Ст            | 30/25                      | 75         | 10         | 1,5          | -10         |
| 25             | 17,5         | М             | 18/16                      | 50         | 3          | 1,5          | -5          |
| 26             | 20           | Ст            | 25/20                      | 75         | 5          | 1,8          | -15         |
| 27             | 25           | М             | 18/15                      | 70         | 5          | 1,8          | -20         |
| 28             | 30           | Ст            | 38/32                      | 80         | 12,5       | 2,0          | -25         |

## 9 ТЕПЛООБМЕН ПРИ НАЛИЧИИ ВНУТРЕННИХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫ

Тепловыделяющие элементы характеризуются наличием источников теплоты, равномерно распределенных по объему. Характеризуя тепловыделение, используют мощность источников теплоты в единице объема (интенсивность объемных тепловыделений)  $q_V$ , Вт/м<sup>3</sup>.

Для однородной пластины, толщина которой мала по сравнению с двумя другими размерами, предложены расчетные уравнения:

$$t_{\text{п}} = t_{\text{ж}} + q_V \frac{\delta_0}{\alpha}, \quad (9.1)$$

где  $t_{\text{п}}$  и  $t_{\text{ж}}$  – температуры поверхности и окружающей среды, °С;

$\delta_0$  – полутолщина пластины, м;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на поверхности пластины, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$$t_0 = t_{\text{ж}} + q_V \delta_0 \left( \frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_0}{2\lambda} \right), \quad (9.2)$$

где  $t_0$  – температура по оси пластины, °С;

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

$$t_0 = t_{\text{п}} + q_V \frac{\delta_0^2}{2\lambda}. \quad (9.3)$$

Зависимости получены при условии отвода теплоты с обеих боковых поверхностей пластины. Для упрощения анализа процесса принято постоянное значение теплопроводности материала.

Связь между объемными тепловыделениями с поверхностной плотностью теплового потока на боковых поверхностях устанавливает следующая зависимость:

$$q = q_V \delta_0. \quad (9.4)$$

Для однородного цилиндрического стержня, радиус которого мал по сравнению с его длиной, записывают:

$$t_{\text{п}} = t_{\text{ж}} + q_V \frac{d_0}{4\alpha}, \quad (9.5)$$

где  $d_0$  – диаметр стержня, м;

$$t_0 = t_{\text{ж}} + q_V d_0 \left( \frac{1}{4\alpha} + \frac{d_0}{16\lambda} \right), \quad (9.6)$$

где  $t_0$  – температура по оси цилиндрического стержня, °С,

$$t_0 = t_{\text{п}} + q_V \frac{d_{\text{п}}^2}{16\lambda}. \quad (9.7)$$

Поверхностная плотность теплового потока на поверхности цилиндра

$$q = q_V \frac{d_0}{4}. \quad (9.8)$$

Приведенные уравнения позволяют рассчитывать неизвестные температуры и интенсивности объемных тепловыделений.

### Задачи

9.1. Электрический нагреватель выполнен из проволоки диаметром 2 мм. Интенсивность объемных тепловыделений 70 МВт/м<sup>3</sup>. Нагреватель обдувается воздухом температурой 20 °С. Коэффициент теплоотдачи на поверхности проволоки 50 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Теплопроводность нихрома 20 Вт/(м К).

Вычислить тепловой поток с 1 м нагревателя, а также температуры на поверхности проволоки и по ее оси.

9.2. Выполнить расчет по условиям предыдущей задачи, приняв, что проволока охлаждается водой температурой  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи на поверхности проволоки  $2\ 000\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

9.3. На поверхности нихромового стержня диаметром  $5\ \text{мм}$  кипит вода под давлением  $0,6\ \text{МПа}$ . Интенсивность объемных тепловыделений  $500\ \text{МВт}/\text{м}^3$ . Коэффициент теплоотдачи на поверхности стержня  $45\ 000\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Теплопроводность нихрома  $17,5\ \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Найти температуры на поверхности и по оси стержня.

9.4. Горизонтальная нихромовая проволока диаметром  $3\ \text{мм}$  включена в электрическую сеть. Удельное электрическое сопротивление нихрома  $1,2 \times 10^{-6}\ \text{Ом}\cdot\text{м}$ . Проволока охлаждается воздухом температурой  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  в условиях свободного движения. Сила тока в проволоке  $30\ \text{А}$ . Найти температуры на поверхности и по оси проволоки, а также линейную плотность теплового потока. При расчете коэффициента теплоотдачи использовать уравнение (3.5).

9.5. Прямоугольная шина размерами  $30 \times 3\ \text{мм}$  находится под током  $450\ \text{А}$ . По условиям эксплуатации температура шины не должна превышать  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  при температуре окружающего воздуха  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить температуры поверхности и по оси шины, если коэффициент теплоотдачи на боковых поверхностях равен  $10\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Удельное электрическое сопротивление меди равно  $1,6 \times 10^{-8}\ \text{Ом}\cdot\text{м}$ .

9.6. Тепловыделяющий элемент характеризуется теплопроводностью  $4\ \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  и диаметром  $12\ \text{мм}$ . Найти поверхностную плотность теплового потока, температуру и коэффициент теплоотдачи на поверхности элемента, если температура окружающей среды  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура по оси элемента  $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Объемные тепловыделения составляют  $2 \times 10^8\ \text{Вт}/\text{м}^3$ .

9.7. Максимальная температура стальной шины прямоугольного сечения размером  $100 \times 3\ \text{мм}$ , установленной на ребро, не должна превышать  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура окружающего воздуха  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , сила тока в шине  $600\ \text{А}$ , удельное электрическое сопротивление стали  $0,13 \times 10^{-6}\ \text{Ом}\cdot\text{м}$ . Найти минимальное значение коэффициента теплоотдачи на боковых поверхностях шины.

## 10 ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУОГРАНИЧЕННОГО МАССИВА С ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛОТЫ

В ряде сельскохозяйственных производственных зданий используют обогрев полов и почвы. В животноводческих зданиях обогревают полы при содержании поросят, телят и цыплят, в теплицах предусматривают почвенный обогрев, а в холодильниках – обогрев полов с целью предотвращения промерзания грунтов под полами. Процессы прогрева грунта наблюдаются и при подземной прокладке трубопроводов тепловых сетей.

При тепловых расчетах обогрева полов и почвы, а также прогрева грунта рассматривают теплопроводность полуограниченного массива в условиях стационарного температурного поля при наличии внутренних источников теплоты.

Полуограниченным массивом считают почву, грунт или пол вместе с другими конструктивными слоями. Источниками теплоты являются теплопроводы: трубопроводы горячей воды или водяного пара, электрические провода и каналы подогретого воздуха.

Рассматривая задачу о тепловых потоках и температурном поле в полуограниченном массиве, используют следующие допущения:

- теплопроводы представляют собой линейные источники теплоты;
- для трубопроводов горячей воды и водяного пара можно пренебречь термическими сопротивлениями стенок трубопроводов и на внутренней их поверхности и принять температуру их наружной поверхности равной температуре теплоносителя;
- температуры  $t_0$  и  $t_T$  (соответственно окружающей среды и наружной поверхности трубопроводов или жилы электропроводов) принимаются постоянными.

Линейная плотность теплового потока с поверхности теплопровода, Вт/м,

$$q_l = \frac{t_T - t_0}{R_\lambda}, \quad (10.1)$$

где  $R_\lambda$  – суммарное термическое сопротивление теплопроводности, м·К/Вт.

$$R_{\lambda} = R_{\Gamma} + R_{\text{из}}, \quad (10.2)$$

где  $R_{\Gamma}$  и  $R_{\text{из}}$  – термические сопротивления грунта и изоляции на поверхности трубопровода или жилы электропровода, м·К/Вт.

Для одиночного теплопровода наружным диаметром  $d$ , проложенного на глубине  $h$  от поверхности массива, получена зависимость:

$$R_{\Gamma} = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \left[ \frac{2h}{d} + \sqrt{\frac{(2h)^2}{d^2} - 1} \right], \quad (10.3)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность почвы, грунта или материала пола, Вт/(м·К).

В случае  $h > 2d$

$$R_{\Gamma} = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{4h}{d}. \quad (10.3a)$$

При этом массив имеет такое же термическое сопротивление как цилиндрическая стенка с наружным диаметром равным  $4h$ , и внутренним диаметром  $d$ .

Для ряда параллельно расположенных на глубине  $h$  теплопроводов наружным диаметром  $d$  и с расстоянием между их осями  $\varrho$

$$R_{\Gamma} = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \left[ \frac{2\varrho}{\pi d} sh \left( 2\pi \frac{h}{\varrho} \right) \right], \quad (10.4)$$

где  $sh \left( 2\pi \frac{h}{\varrho} \right)$  – гиперболический синус параметра  $z = 2\pi \frac{h}{\varrho}$ .

$$shz = 0,5[\exp z - \exp(-z)]. \quad (10.4a)$$

Значения гиперболических функций приведены в приложении Ж.

Термическое сопротивление слоя изоляции

$$R_{\text{из}} = \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{из}}} \ln \frac{d}{d_{\text{из}}}, \quad (10.5)$$

где  $\lambda_{\text{из}}$  – теплопроводность материала изоляционного слоя, Вт/(м·К);

$d_{\text{из}}$  – диаметр изолируемой поверхности трубопровода или жилы электропровода.

При задании температуры наружной поверхности теплопровода  $t_{\text{п}}$

$$q_l = \frac{t_{\text{п}} - t_o}{R_{\Gamma}}. \quad (10.6)$$

Для теплопроводов глубокого заложения ( $\frac{h}{d} > 2$ ) в качестве температуры окружающей среды обычно используют температуру поверхности массива, считая ее постоянной, а для теплопроводов мелкого заложения ( $\frac{h}{d} \leq 2$ ) – температуру воздуха над поверхностью массива.

Во втором случае указывают также значение коэффициента теплоотдачи на поверхности массива.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), на поверхности обогреваемых полов и почвы в помещениях с температурой внутреннего воздуха 20 ÷ 30 °С допустимо рассчитывать с учетом конвективной и лучистой составляющих теплообмена по уравнению:

$$\alpha = 5,1 + 2,26\sqrt[3]{\tau_0 - t_{\text{в}}}, \quad (10.7)$$

где  $\tau_0$  и  $t_{\text{в}}$  – температуры поверхности пола (почвы) и воздуха внутри помещения, °С.

При расчете термического сопротивления грунта в случае задания температуры воздуха и коэффициента теплоотдачи на поверхности массива пользуются методом дополнительной стенки и в уравнения (10.3), (10.3а) и (10.4) подставляют приведенную глубину заложения теплопровода

$$h^* = h + \frac{\lambda}{\alpha}. \quad (10.8)$$

Погрешность такого приема существенно уменьшается при  $\frac{h}{h^*} < 1,4$ .

Температура  $t$  в произвольной точке массива вокруг одиночного теплопровода при удалении данной точки на расстояние  $x$  по горизонтали от оси теплопровода и при ее заглублении на величину  $y$  от поверхности массива

$$t = t_0 + \frac{t_T - t_0}{2\pi\lambda R_\lambda} \ln \sqrt{\frac{x^2 + (y+h)^2}{x^2 + (y-h)^2}}. \quad (10.9)$$

В случае использования температуры внутреннего воздуха в уравнение (10.9) следует подставить приведенную глубину по уравнению (10.8) и приведенную координату

$$y^* = y + \frac{\lambda}{\alpha}. \quad (10.9a)$$

Изотермы в вертикальной плоскости вокруг одиночного теплопровода имеют вид окружностей, центры которых перемещаются вниз по вертикальной оси, пересекающей ось теплопровода. Радиус окружностей увеличивается по мере снижения температуры. Чем ближе данная точка к поверхности массива, тем больше радиус изотермы и тем ниже центр окружности.

При расчете изотермических окружностей вокруг одиночного теплопровода определяют:

– параметр  $c$

$$c = \exp\left(\frac{4\pi\lambda\Delta t}{q_l}\right), \quad (10.10)$$

где  $\Delta t = t - t_0$ ;

– глубину расположения центра изотермической окружности при  $\Delta t_0 = t_T - t_0$

$$y_0 = \sqrt{h^2 - \left(\frac{d_H}{2}\right)^2}; \quad (10.10a)$$

– координату  $y_c$  расположения центра изотермической окружности при заданном значении  $\Delta t$

$$y_c = y_0 \frac{c+1}{c-1}; \quad (10.11)$$

– радиус окружности

$$R_c = \frac{2y_0 \sqrt{c}}{c-1}. \quad (10.12)$$

Поверхностная плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ , на поверхности массива при использовании ряда теплопроводов

$$q = \frac{q_l}{e}. \quad (10.13)$$

Средняя температура поверхности массива в этом случае

$$\tau_0 = t_B + \frac{q}{\alpha}. \quad (10.14)$$

### Задачи

10.1. Определить температуру на поверхности электрокабеля диаметром 40 мм, проложенного в земле на глубине 1,5 м. Температуру поверхности земли принять равной 15 °С, теплопроводность грунта – 2 Вт/(м·К), линейную плотность теплового потока – 200 Вт/м.

10.2. Трубопровод наружным диаметром 57 мм проложен на глубине 1,2 м. Температура поверхности земли равна 5 °С, теплопроводность грунта – 1,1 Вт/(м·К), температура горячей воды в трубопроводе – 90 °С. Определить линейную плотность теплового потока и температуру грунта на глубине 0,7 м в точке над трубопроводом.

10.3. В условиях задачи 10.2 определить глубину расположения под трубопроводом точки, в которой температура составляет 30,6 °С.

10.4. Определить в условиях задачи 10.2 координаты центра и радиус изотермических окружностей для точек грунта с температурами 30,6 и 8 °С.

10.5. Паропровод наружным диаметром 108 мм проложен в грунте теплопроводностью 1,75 Вт/(м·К) – на глубине 0,8 м. Температура пара 115 °С, температура поверхности грунта 10 °С.

Определить температуру грунта на глубине 0,3 м над осью паропровода. Расчет выполнить для неизолированного и изолированного паропровода.

При расчете принять толщину тепловой изоляции равной 45 мм, а теплопроводность материала изоляции – 0,035 Вт/(м·К).

10.6. Трубопровод наружным диаметром 70 мм проложен на глубине 100 мм в почве теплопроводностью 0,8 Вт/(м·К). Температура горячей воды 45 °С, температура воздуха над почвой 16 °С, коэффициент теплоотдачи на ее поверхности 10 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Определить температуры поверхности почвы на расстояниях 0; 0,2; 0,5; 1,0 и 2,0 м от оси теплопровода.

10.7. Выполнить расчет в условиях задачи 10.6 при расположении трубопровода на глубине 0,4 м.

10.8. Температура на поверхности пола 30 °С, температура на поверхности электропровода 45 °С, диаметр электропровода 6 мм, шаг укладки проводов 125 мм, глубина укладки проводов 80 мм, теплопроводность бетона 1,74 Вт/(м·К). Найти поверхностную плотность теплового потока на поверхности пола.

10.9. В условиях задачи 10.8 определить температуру жилы электропровода, приняв толщину изоляции 2 мм и теплопроводность изоляции 0,18 Вт/(м·К).

10.10. Поверхностная плотность теплового потока на поверхности электрообогреваемого пола 300 Вт/м<sup>2</sup>, глубина укладки электропроводов 80 мм, диаметр проводов 5 мм, теплопроводность бетона 1,74 Вт/(м·К).

Найти шаг укладки проводов при разности температур поверхностей проводов и пола равной 30 °С.

**Решение.** Используя уравнения (10.1), (10.4) и (10.13), запишем:

$$\frac{t_{\text{п}} - t_0}{q} = \frac{e}{2\pi\lambda} \ln \left[ \frac{2e}{\pi d} \operatorname{sh} \left( 2\pi \frac{h}{e} \right) \right].$$

В полученном уравнении неизвестен шаг укладки проводов. При решении уравнения используем метод подбора значений.

Определим

$$\frac{t_{\text{п}} - t_0}{q} = \frac{30}{300} = 0,1 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

Значения правой части  $A$  уравнения при различных величинах шага укладки электропроводов приведены в таблице 10.1.

Таблица 10.1

|                                    |       |       |       |        |        |
|------------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|
| $e, \text{ м}$                     | 0,05  | 0,1   | 0,15  | 0,2    | 0,25   |
| $A, \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ | 0,051 | 0,063 | 0,077 | 0,0924 | 0,1088 |

Решения уравнения заключены между значениями шага укладки проводов 0,2 и 0,25 м. Для нахождения решения используем метод линейной интерполяции.

Обозначим исходное значение шага укладки как  $e$  и запишем на основании табличных данных:

$$0,1 = 0,0924 + \frac{0,1088 - 0,0924}{0,25 - 0,2} (e - 0,2).$$

Отсюда находим  $e = 0,223$  м.

Принимаем  $e = 0,225$  м.

Проверка расчета при найденном значении шага укладки:

$$\frac{0,225}{2\pi \cdot 1,74} \ln \left[ \frac{2 \times 0,225}{\pi \cdot 0,005} \operatorname{sh} \left( 2\pi \frac{0,08}{0,225} \right) \right] = 0,1005 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

10.11. Определить среднюю температуру поверхности пола в условиях предыдущей задачи, если температура внутреннего воздуха равна 18 °С.

**Решение.** Из уравнений (10.7) и (10.14) находим

$$q = (5,1 + 2,26\sqrt{\Delta t_{\text{п}}})\Delta t_{\text{п}},$$

где  $\Delta t_{\text{п}} = \tau_0 - t_{\text{в}}$ .

Методом подбора находим  $\Delta t_{\text{п}} = 25,5$  °С.

Отсюда  $\tau_0 = \Delta t_{\text{п}} + t_{\text{в}} = 25,5 + 18 = 43,5$  °С.

### Контрольная задача 5

Определить шаг укладки теплопроводов и температуру поверхности пола (почвы), если заданы:

- поверхностная плотность теплового потока  $q_{\text{т}}$ ;
- разность температур  $\Delta t_{\text{п}}$  поверхности теплопровода и поверхности пола (почвы);
- глубина укладки теплопроводов  $h$ ;
- диаметр наружной поверхности теплопровода  $d$ ;
- теплопроводность пола, почвы или грунта  $\lambda$ ;
- температура внутреннего воздуха  $t_{\text{в}} = 20$  °С.

Исходные данные принять из таблицы 10.2 в зависимости от номера варианта.

Таблица 10.2 – Исходные данные к контрольной задаче 5

| Номер<br>варианта | $q_T$ ,<br>Вт/м <sup>2</sup> | $\Delta t_{п}$ ,<br>°С | $h$ ,<br>мм | $d$ ,<br>мм | $\lambda$ ,<br>Вт/(м·К) |
|-------------------|------------------------------|------------------------|-------------|-------------|-------------------------|
| 1                 | 185                          | 15                     | 80          | 10          | 1,2                     |
| 2                 | 150                          | 15                     | 100         | 8           | 1,4                     |
| 3                 | 200                          | 10                     | 60          | 5           | 1,6                     |
| 4                 | 100                          | 10                     | 100         | 5           | 1,8                     |
| 5                 | 210                          | 33,5                   | 80          | 3           | 0,8                     |
| 6                 | 75                           | 9                      | 80          | 5           | 1,0                     |
| 7                 | 285                          | 16                     | 60          | 10          | 1,2                     |
| 8                 | 165                          | 15                     | 80          | 8           | 1,6                     |
| 9                 | 60                           | 13                     | 400         | 80          | 2,0                     |
| 10                | 50                           | 17,5                   | 500         | 50          | 1,8                     |
| 11                | 50                           | 24,5                   | 600         | 60          | 1,6                     |
| 12                | 40                           | 18                     | 400         | 70          | 1,4                     |
| 13                | 37,5                         | 30                     | 500         | 80          | 1,2                     |
| 14                | 25                           | 25                     | 600         | 50          | 1,0                     |
| 15                | 25                           | 28                     | 400         | 70          | 0,8                     |
| 16                | 125                          | 20                     | 100         | 10          | 0,8                     |
| 17                | 250                          | 23                     | 80          | 8           | 1,2                     |
| 18                | 120                          | 16                     | 80          | 5           | 1,4                     |
| 19                | 100                          | 13                     | 60          | 3           | 1,2                     |
| 20                | 230                          | 18                     | 100         | 12          | 1,7                     |
| 21                | 42                           | 25                     | 500         | 40          | 1,2                     |
| 22                | 20                           | 16                     | 600         | 60          | 1,4                     |
| 23                | 25                           | 19                     | 600         | 70          | 1,2                     |
| 24                | 12,5                         | 17                     | 500         | 50          | 0,8                     |
| 25                | 33                           | 16                     | 400         | 30          | 1,2                     |
| 26                | 25                           | 19,5                   | 600         | 40          | 1,6                     |
| 27                | 165                          | 19,5                   | 80          | 10          | 1,0                     |
| 28                | 10                           | 19,5                   | 600         | 30          | 0,8                     |

## 11 НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

В ряде производственных процессов АПК предусматривают нагрев (охлаждение) продукции сельского хозяйства, а также деталей и изделий. К таким процессам относится термическая обработка зерна и семян, картофеля и корнеплодов, фруктов и ягод, деталей и изделий на ремонтных предприятиях, обжиг кирпича и др. Нагрев (охлаждение) объектов обработки происходит в условиях нестационарной теплопроводности.

Принято рассматривать процессы в телах типовых геометрических форм: бесконечная (неограниченная) пластина, бесконечный (бесконечно длинный) цилиндр и шар. При этом температурное поле внутри тела представляют как одномерное нестационарное. Текущей координатой, влияющей на температуру, является расстояние от оси пластины или текущий радиус шара или цилиндра.

При расчетах используется функциональная зависимость:

$$\theta = f(Bi, Fo, X/l_0), \quad (11.1)$$

где  $\theta$  – безразмерная температура;

$$\theta = \frac{t - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}}, \quad (11.1a)$$

где  $t$  – температура тела в момент времени  $\tau$ .

Определяющим геометрическим размером  $l_0$  принимают полутолщину пластины или радиус цилиндра (шара).

Расчетные уравнения и номограммы для упрощения расчетов приведены в литературе [1, 2, 4].

При числах Фурье  $Fo \geq 0,3$  расчетные зависимости записывают в следующем виде:

– безразмерная температура на поверхности тела

$$\theta_{п} = P \times \exp(-\mu_1^2 Fo); \quad (11.2)$$

– безразмерная температура посередине пластины, по оси цилиндра или в центре шара

$$\theta_c = N \times \exp(-\mu_1^2 Fo); \quad (11.3)$$

– средняя по объему безразмерная температура в момент времени  $\tau$

$$\bar{\theta} = M \times \exp(-\mu_1^2 Fo). \quad (11.4)$$

Значения параметров  $P$ ,  $M$ ,  $N$ ,  $\mu_1$  или  $\mu_1^2$  в зависимости от формы тела и числа Био даны в приложении И.

Количество теплоты, воспринятой (отданной) телом за время  $\tau$  в процессе нагрева (охлаждения),

$$Q_\tau = Q(1 - \bar{\theta}), \quad (11.5)$$

где  $Q$  – количество теплоты, переданной за время полного нагрева (охлаждения);

$$Q = c_m m_m (t_0 - t_{ж}). \quad (11.5a)$$

При числе Био  $Bi < 0,1$  принимают температуру тела одинаковой во всех точках.

В этом случае:

– для бесконечной пластины

$$\theta_{пл} = \exp(-BiFo); \quad (11.6)$$

– для бесконечного цилиндра

$$\theta_{ц} = \exp(-2BiFo); \quad (11.7)$$

– для шара

$$\theta_{ш} = \exp(-3BiFo). \quad (11.8)$$

В ряде случаев используют эмпирические зависимости.

Продолжительность охлаждения мясных полутуш в камерах на подвесных путях

$$\tau = 0,0962 \frac{c\delta\rho}{\alpha} \left( \frac{t_0 - t_{ж}}{t - t_{ж}} \right)^{1,5}, \quad (11.9)$$

где  $c$  – удельная теплоёмкость мяса, Дж/(кг·К);

$\delta$  – толщина полутуши, м;

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

$t$  – конечная температура в центре бедренной части, °С.

При расчетах нагрева (охлаждения) пользуются закономерностями регулярного режима нестационарной теплопроводности.

Продолжительность нагрева (охлаждения)

$$\tau = \frac{1}{m_0} \ln \frac{t_0 - t_{ж}}{t - t_{ж}}, \quad (11.10)$$

где  $m_0$  – темп охлаждения, с<sup>-1</sup> или ч<sup>-1</sup>.

При охлаждении растительной продукции в таре принимают  $m_0 = 0,05 \div 0,07$  ч<sup>-1</sup>.

При хранении картофеля, корнеплодов и капусты россыпью темп охлаждения, ч<sup>-1</sup>,

$$m_0 = 0,00133 \frac{41,6 - t_{ж}}{24,4 - t_{ж}} \times \frac{V_0}{c}, \quad (11.11)$$

где  $V_0$  – интенсивность вентилирования, м<sup>3</sup>/ч, из расчета на 1 т продукции;

$c$  – удельная теплоёмкость продукции, кДж/(кг·К).

Теплофизические свойства материалов и продуктов приведены в приложении Б.

## Задачи

11.1. Стальной лист толщиной 50 мм нагрет до 500 °С и охлаждается на воздухе температурой 20 °С.

Определить:

- время охлаждения листа до температуры на поверхности  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- температуру посередине листа в этот момент времени;
- количество теплоты, отведенной от листа площадью  $1\text{ м}^2$ .

При расчете принять:

- сталь углеродистой;
- коэффициент теплоотдачи на поверхности листа равным  $20\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;
- охлаждение двухсторонним.

**Решение.** Выписываем теплофизические свойства углеродистой стали из приложения Б:

- теплопроводность  $\lambda = 50\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;
- удельная теплоёмкость  $c = 0,46\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;
- плотность  $\rho = 7\,800\text{ кг}/\text{м}^3$ .

Определяем:

- температуропроводность стали:

$$a = \frac{50}{0,46 \times 10^3 \times 7800} = 1,4 \times 10^{-5}\text{ м}^2/\text{с};$$

- число Био:

$$Bi = \frac{20 \times 0,025}{50} = 0,01.$$

Определяющим размером при расчете числа Био принята полутолщина листа.

В связи с малым числом Био ( $Bi \leq 0,1$ ) расчет проводим по уравнению (11.6), принимая температуры пластины одинаковыми по всей ее толщине.

Безразмерная температура пластины по формуле (11.1а)

$$\theta_{\text{пл}} = \frac{50 - 20}{500 - 20} = 0,0625.$$

Число Фурье, исходя из зависимости (11.6):

$$Fo = -\frac{\ln \theta_{\text{пл}}}{Bi} = -\frac{\ln 0,0625}{0,01} = 277.$$

Время охлаждения

$$\tau = \frac{Fol^2}{a} = \frac{277 \times 0,025^2}{1,4 \times 10^{-5}} = 12380 \text{ с} = 3,4 \text{ ч.}$$

Температура посередине пластины при числе Био  $Bi \leq 0,1$  равна температуре на поверхности:

$$t_c = t_{\text{п}} = 50 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Для расчета количества теплоты находим:

– объем листа площадью  $S = 1 \text{ м}^2$ :

$$V = S\delta = 1 \times 0,05 = 0,05 \text{ м}^3;$$

– массу листа площадью  $S = 1 \text{ м}^2$ :

$$m = \rho V = 7800 \times 0,05 = 390 \text{ кг};$$

– среднюю безразмерную температуру при  $Bi \leq 0,1$  принимаем равной безразмерной температуре на поверхности:

$$\bar{\theta} = \theta_{\text{пл}} = 0,0625;$$

– количество теплоты за время полного охлаждения по формуле (11.5а):

$$Q = 0,46 \times 390(500 - 20) = 86100 \text{ кДж} = 86,1 \text{ МДж.}$$

Количество теплоты, отведенной при охлаждении до  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , по уравнению (11.5):

$$Q_{\text{ф}} = 86,1(1 - 0,0625) = 80,7 \text{ МДж.}$$

11.2. Стальной лист толщиной 60 мм и температурой 20 °С помещен в печь, температура в которой равна 1 200 °С.

Считая нагрев двухсторонним, определить:

- время нагрева поверхности листа до 900 °С;
- температуру посередине листа;
- количество подведенной теплоты при массе листа в 200 кг.

Сталь – легированная, коэффициент теплоотдачи на поверхности листа  $\alpha = 390 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

11.3. Резиновая пластина толщиной 20 мм, нагретая до температуры 140 °С, помещена в воздушную среду с температурой 15 °С.

Определить температуры посередине и на поверхности пластины через 20 минут после начала охлаждения. Охлаждение считать двухсторонним, расчет выполнить как для неограниченной пластины при коэффициенте теплоотдачи на поверхности 25 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

11.4. Бетонная плита толщиной 200 мм помещается в камеру испытаний на трещиностойкость. Температура в камере  $t_{\text{ж}} = -30 \text{ °С}$ . Начальная температура плиты  $t_0 = 20 \text{ °С}$ . Коэффициент теплоотдачи на поверхности  $\alpha = 22 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Считая охлаждение двухсторонним, определить температуры на поверхности и по оси плиты спустя 1 ч после помещения в камеру.

11.5. Пластины из углеродистой стали толщиной 2 мм подвергают закалке. Для этого их предварительно нагревают до температуры 800 °С, а затем опускают в масляную ванну, температура в которой 30 °С.

Определить температуру пластины через 10 с после погружения пластин в ванну. Пластины считать неограниченными, охлаждение – двухсторонним, а коэффициент теплоотдачи на поверхности пластин равным 1 000 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

11.6. Мясные полутуши охлаждаются в холодильной камере с температурой воздуха в ней  $t_{\text{ж}} = -4 \text{ °С}$ . Начальная температура мяса  $t_0 = 35 \text{ °С}$ . Коэф-

коэффициент теплоотдачи на поверхности  $\alpha = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Масса полутуши – 80 кг, средняя толщина – 0,25 м.

Определить длительность охлаждения и количество отведенной теплоты при охлаждении до температуры в центре бедренной части  $t_c = 4 \text{ }^\circ\text{С}$ .

При расчете считать полутушу неограниченной пластиной, а охлаждение – двухсторонним.

Определить также температуру на поверхности мяса в данный момент времени.

Сравнить рассчитанную продолжительность охлаждения с ее значением по формуле (11.9).

11.7. Вал диаметром 140 мм при начальной температуре  $20 \text{ }^\circ\text{С}$  поместили в печь, температура в которой составляет  $800 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Определить температуры на поверхности и по оси вала через 12 мин после начала нагрева. Вал выполнен из углеродистой стали. Коэффициент теплоотдачи на поверхности  $160 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

11.8. Цилиндрический вал диаметром 80 мм закаливают в масляной ванне, температура в которой поддерживается постоянной и равной  $30 \text{ }^\circ\text{С}$ . Перед погружением в ванну вал равномерно нагревают до  $850 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Какими будут температуры на поверхности и на оси вала через 1 мин от начала охлаждения? Определить также количество теплоты, отведенной от вала длиной 1,2 м за это время.

Вал выполнен из углеродистой стали, коэффициент теплоотдачи на поверхности  $2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

11.9. Выполните расчеты, предусмотренные в условиях задачи 11.8, при времени охлаждения вала 2 мин.

11.10. В холодильной камере охлаждаются яблоки, их начальная температура  $25 \text{ }^\circ\text{С}$ . Температура в камере  $t_{\text{ж}} = -2 \text{ }^\circ\text{С}$ , коэффициент теплоотдачи на поверхности  $\alpha = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Средний диаметр яблок – 88 мм, яблоки не соприкасаются друг с другом.

Сколько потребуется времени для охлаждения яблок до температуры на поверхности  $t_{\text{п}} = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ? Какая температура будет в центре яблок?

**Решение.** Выписываем из приложения Б теплофизические свойства яблок:

- теплопроводность  $\lambda = 0,55 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;
- удельная теплоёмкость  $c = 3,77 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;
- плотность  $\rho = 800 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;
- температуропроводность  $a = 0,55/(3770 \times 800) = 1,8 \times 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Определяем:

- число Био:

$$Bi = \frac{8 \times 0,044}{0,55} = 0,64,$$

где определяющим геометрическим размером принят радиус яблока;

- безразмерную температуру на поверхности по уравнению (11.1а):

$$\theta_{\text{п}} = \frac{1+2}{25+2} = 0,111;$$

- число Фурье по зависимости (11.2), считая заранее, что оно больше 0,3:

$$Fo = -\frac{\ln\left(\frac{\theta_{\text{п}}}{P}\right)}{\mu_1^2} = -\frac{\ln\left(\frac{0,111}{0,876}\right)}{1,3^2} = 1,22,$$

где значения  $P = 0,876$  и  $\mu_1 = 1,3$  приняты по приложению И;

- время охлаждения:

$$\tau = \frac{Fol_0^2}{a} = \frac{1,22 \times 0,044^2}{(1,8 \times 10^{-7})} = 13100 \text{ с} = 3,6 \text{ ч};$$

- безразмерную температуру в центре яблок по выражению (11.3):

$$\theta_{\text{с}} = 1,182 \exp(-1,3^2 \times 1,22) = 0,15,$$

где  $N = 1,182$  по приложению И;

- температуру в центре, используя зависимость (11.1а):

$$t_{\text{с}} = 0,15 \times (25 + 2) - 2 = 2,05 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

11.11. Частица угля сферической формы диаметром 2 мм и температурой 20 °С помещена в печь, внутри которой поддерживается температура 1 000 °С. Определить время для нагрева поверхности до температуры самовоспламенения, равной 700 °С, и температуру в центре частицы в этот момент времени. Коэффициент теплоотдачи на поверхности частицы – 200 Вт/(м<sup>2</sup>·К), теплопроводность угля – 0,2 Вт/(м·К), температуропроводность частицы – 10<sup>-7</sup> м<sup>2</sup>/с.

11.12. Картофель температурой 4 °С охлаждается воздухом температурой  $t_{ж} = -15$  °С. Определить время охлаждения клубней до температуры на поверхности  $t_{п} = -2$  °С, а также температуру в центре в этот момент времени. Клубни сферической формы диаметром 70 мм не соприкасаются друг с другом. Коэффициент теплоотдачи на поверхности – 6 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

11.13. По условиям предыдущей задачи выполнить расчет охлаждения картофеля в таре, используя закономерности регулярного режима нестационарной теплопроводности и принимая конечную температуру клубней  $t = -1$  °С.

11.14. Определить время охлаждения капусты при ее хранении россыпью в условиях активного вентилирования. Начальная температура кочанов капусты  $t_0 = 15$  °С, охлаждение до температуры  $t = 0$  °С. Температура охлаждающего воздуха  $t_{ж} = -2$  °С, интенсивность вентилирования  $V = 150$  м<sup>3</sup>/ч на 1 т продукции.

11.15. Яблоки охлаждаются от 25 до 6 °С в камере, температура воздуха в которой 0 °С. Определить продолжительность охлаждения при размещении яблок в таре и россыпью без контакта друг с другом. Диаметр яблок принять равным 100 мм. Конечная температура задана в центре яблок. Коэффициент теплоотдачи на поверхности яблок  $\alpha = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

11.16. Тушки птицы охлаждаются на транспортере в ванне с водой. Начальная температура птицы  $t_0 = 35$  °С, конечная –  $t = 4$  °С. Температура воды в ванне  $t_{ж} = 1$  °С. Принимая регулярный режим охлаждения, определить продолжительность охлаждения. Темп охлаждения  $m = 0,6$  ч<sup>-1</sup>.

11.17. При запаривании картофель нагревается от 10 до 95 °С (в центре клубней). Принимая температуру окружающей среды (воды и конденсата)  $t_{ж} = 105$  °С, определить продолжительность нагрева. Форму клубней принять сферической диаметром 60 мм, коэффициент теплоотдачи на их поверхности – 2 000 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

### Контрольная задача 6

В холодильной камере охлаждаются ягоды, фрукты или овощи. Определить продолжительность охлаждения до заданной температуры на поверхности и температуру в центре в этот момент времени.

При расчете принять, что отдельные плоды не соприкасаются друг с другом и охлаждаются по всей наружной поверхности.

Вид продукта принять по таблице 11.1 в зависимости от последней цифры шифра (номера варианта), а коэффициент теплоотдачи, начальную температуру продукта  $t_0$ , температуру на поверхности  $t_{п}$  и температуру охлаждающего воздуха  $t_{ж}$  – по предпоследней цифре шифра.

Таблица 11.1 – Исходные данные к контрольной задаче 6

| Последняя цифра шифра | Продукт          | Предпоследняя цифра шифра | $\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) | $t_0$ , °С | $t_{п}$ , °С | $t_{ж}$ , °С |
|-----------------------|------------------|---------------------------|-----------------------------------|------------|--------------|--------------|
| 1                     | Абрикосы         | 1                         | 6                                 | 15         | 0            | -2           |
| 2                     | Вишня            | 2                         | 8                                 | 18         | 1            | -2           |
| 3                     | Горошек зеленый  | 3                         | 10                                | 20         | 2            | 0            |
| 4                     | Клубника мелкая  | 4                         | 12                                | 22         | 3            | 0            |
| 5                     | Клубника средняя | 5                         | 15                                | 25         | 4            | 1            |
| 6                     | Клубника крупная | 6                         | 15                                | 15         | 4            | 1            |
| 7                     | Клюква           | 7                         | 12                                | 18         | 3            | 1            |
| 8                     | Слива            | 8                         | 10                                | 20         | 2            | -1           |
| 9                     | Смородина        | 9                         | 8                                 | 22         | 1            | -1           |
| 0                     | Фасоль           | 0                         | 6                                 | 25         | 0            | -2           |

## 12 ТЕПЛООБМЕН В ЗЕРНОВОМ СЛОЕ

Теплообмен в зерновом слое определяет тепловые процессы в технологических аппаратах при термической обработке различных материалов. При этом рассматривают теплообмен на поверхности частиц (зерен).

Теплообмен в плотном неподвижном слое описывается следующими уравнениями:

– при  $Re = 20 \div 200$

$$Nu = 0,124 Re Pr^{0,43}; \quad (12.1)$$

– при  $Re = 200 \div 1\ 700$

$$Nu = 0,71 Re^{0,67} Pr^{0,43}; \quad (12.2)$$

– при  $Re > 1\ 700$

$$Nu = 0,58 Re^{0,7} Pr^{0,3}. \quad (12.3)$$

Определяющей температурой является средняя температура среды, определяющим размером – эквивалентный диаметр частиц.

Скорость среды определяют из расчета на все поперечное сечение, свободное от частиц.

В случае использования газов расчетные зависимости упрощаются:

$$Nu = 0,106 Re; \quad (12.1a)$$

$$Nu = 0,61 Re^{0,67}; \quad (12.2a)$$

$$Nu = 0,52 Re^{0,7}. \quad (12.3a)$$

Переход неподвижного слоя в псевдооживленный («кипящий») слой происходит при вполне определенной скорости среды, называемой скоростью начала псевдооживления.

При этом критической скорости гидравлическое (аэродинамическое) сопротивление слоя становится равным весу слоя, приходящемуся на едини-

цу площади поперечного сечения, и частицы переходят во взвешенное состояние, теряя контакты (соприкосновения) друг с другом.

Скорость начала псевдооживления находят по общей формуле [5]:

$$Re'_0 = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}, \quad (12.4)$$

где  $Re'_0$  – критическое значение числа Рейнольдса, определяющее скорость начала псевдооживления.

Оптимальную скорость  $w_{\text{опт}}$  потока среды через слой принимают в 1,5 раза больше скорости начала псевдооживления.

В ряде случаев она может быть определена по частным зависимостям. В случае псевдооживленного слоя плодов и ягод при псевдооживлении воздухом

$$w_{\text{опт}} = 2,25 + 1,95 \lg m_T, \quad (12.5)$$

где  $m_T$  – масса одного плода или одной ягоды, г.

Для расчета теплообмена между частицами и газовым потоком в псевдооживленном слое допускается использовать:

– при  $Re = 60 \div 500$  – зависимость:

$$Nu = 0,316 Re^{0,8}; \quad (12.6)$$

– при  $Re = 500 \div 1700$  – уравнение (5.2а);

– при  $Re > 1700$  – уравнение (5.3а).

Пояснения к выбору определяющих параметров и скорости среды даны выше.

## Задачи

12.1. Слой яблок охлаждается потоком воздуха, температура которого изменяется в слое от 2 до 10 °С. Скорость фильтрации, отнесенная ко всему сечению аппарата, равна 0,6 м/с. Средний диаметр яблок 42 мм.

Вычислить коэффициент теплоотдачи на поверхности яблок.

12.2. В технологии приготовления бетона предусмотрено предварительное охлаждение гравия водой в неподвижном слое. Средний размер гравия 27 мм, средняя температура охлаждающей воды 10 °С. Скорость воды на входе в слой 0,02 м/с.

Определить коэффициент теплоотдачи на поверхности частиц.

12.3. Черника охлаждается воздухом в неподвижном слое. Скорость воздуха 1,2 м/с. Эквивалентный диаметр ягод 12 мм, средняя температура воздуха 2 °С.

Найти коэффициент теплоотдачи на поверхности ягод.

12.4. Охлаждение вишни размером плодов 25 мм от 20 до 0 °С предусмотрено в плотном слое, медленно движущемся на транспортере от места загрузки до места выгрузки. Воздух, проходя слой вишни в направлении снизу вверх, нагревается от –2 до 3 °С. Скорость воздуха при входе в слой 0,8 м/с.

Рассчитать коэффициент теплоотдачи.

12.5. В условиях задачи 12.4 найти минимально необходимую массу вишни в аппарате, приняв производительность аппарата по охлаждению вишни 500 кг/ч.

**Решение.** Выписываем из приложения Б теплофизические свойства вишни:

– плотность  $\rho_m = 1\,060$  кг/м<sup>3</sup>;

– удельную теплоёмкость  $c_m = 3,52$  кДж/(кг·К).

Тепловой поток при охлаждении вишни

$$\Phi = c_m m_t (t_1 - t_2) = 3,52 \times \frac{500}{3600} \times (20 - 0) = 9,8 \text{ кВт.}$$

Рассчитываем средний температурный напор по уравнению (6.4), переходя от перекрестного тока к противотоку (рисунок 12.1).

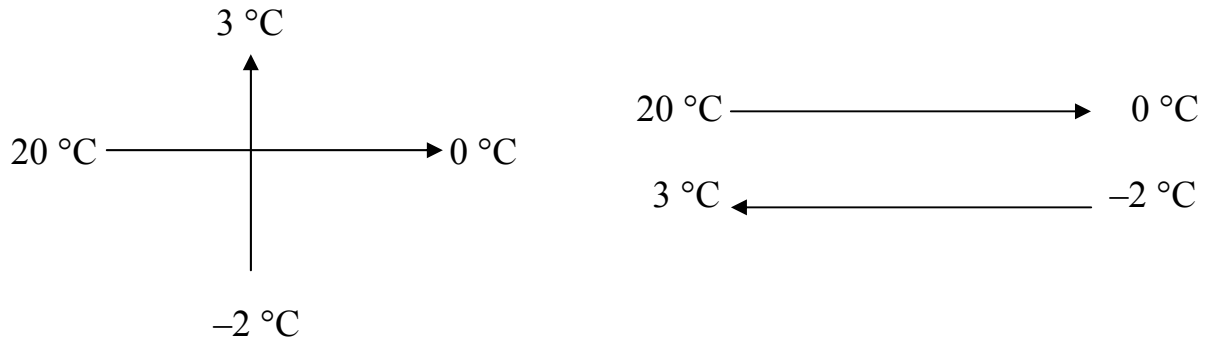


Рисунок 12.1

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{(20 - 3) - (0 + 2)}{\ln \frac{17}{2}} = 7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Вводим температурный коэффициент к температурному напору, равный 0,8.

$$\Delta t_{\text{cp}} = 0,8 \times 7 = 5,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Используем значение коэффициента теплоотдачи из расчета задачи 12.4:

$$\alpha = 78 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Требуемая площадь наружной поверхности плодов вишни на транспортере в пределах аппарата охлаждения

$$A = \frac{\Phi \times 10^3}{\alpha \Delta t_{\text{cp}}} = \frac{9800}{78 \times 5,6} = 22,4 \text{ м}^2.$$

Определяем площадь наружной поверхности плодов массой 1 кг:

$$A_m = \frac{6}{\rho_M d_3}. \tag{12.7}$$

$$A_m = \frac{6}{1060 \times 0,025} = 0,226 \text{ м}^2/\text{кг}.$$

Необходимая масса продукции по условию обеспечения требуемой площади наружной поверхности плодов

$$m = \frac{A}{A_m} = \frac{22,4}{0,226} = 100 \text{ кг.}$$

Учитывая, что плоды касаются друг друга, необходимо увеличить массу плодов на транспортере в пределах аппарата на 20 % с целью обеспечения необходимой поверхности теплообмена:

$$m_d = 1,2 \times 100 = 120 \text{ кг.}$$

12.6. В воздушном морозильном аппарате замораживается клюква, средний диаметр ягод которой равен 15 мм. Средняя температура воздуха в аппарате минус 20 °С.

Определить коэффициент теплоотдачи на поверхности ягод в псевдоожоженном слое при оптимальной скорости воздушного потока.

12.7. Зеленый горошек эквивалентным диаметром 12 мм охлаждается на конвейерной ленте в плотном слое. Начальная температура горошка 25 °С, конечная температура 5 °С. Температура воздуха на входе в слой 0 °С, а на выходе равна 3 °С. Скорость воздуха в сечении перед слоем горошка 0,6 м/с. Определить необходимую массу горошка на конвейере в пределах аппарата при производительности аппарата 200 кг/ч.

12.8. Воздушный морозильный аппарат для замораживания черники имеет производительность  $m_t = 700$  кг/ч. Замораживание организуется в псевдоожоженном слое. Температура воздуха на входе в слой равна –30 °С, на выходе – –27 °С. Начальная температура продукта 25 °С, конечная – –20 °С. Найти время замораживания и необходимую массу продукта в грузовом отсеке аппарата.

**Решение.** Выписываем теплофизические свойства черники из приложения Б:

– масса единичного продукта  $m_t = 1,1$  г;

- плотность  $\rho_m = 1\,000 \text{ кг/м}^3$ ;
- эквивалентный диаметр  $d_э = 12 \text{ мм}$ ;
- влажность  $\omega_1 = 92,3 \%$ ;
- удельная теплоёмкость:
  - свежего продукта  $c = 3,6 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;
  - замороженного  $c_3 = 1,9 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;
- криоскопическая температура  $t_{кр} = -1,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- насыпная плотность  $\rho_n = 600 \text{ кг/м}^3$ ;
- удельная теплота льдообразования  $r_l = 277 \text{ кДж/кг}$ .

Средняя температура воздуха

$$t_{cp} = \frac{-27 - 30}{2} = -28,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Теплофизические свойства воздуха из приложения В:

- плотность  $\rho_{ж} = 1,42 \text{ кг/м}^3$ ;
- изобарная удельная теплоёмкость  $c_p = 1 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;
- теплопроводность  $\lambda = 0,022 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;
- кинематическая вязкость  $\nu = 11,2 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Число Архимеда

$$Ar = \frac{9,81 \times 0,012^3}{(11,2 \times 10^{-6})^2} \times \frac{1000 - 1,42}{1,42} = 9,5 \times 10^7.$$

Критическое число Рейнольдса по формуле (12.4):

$$Re'_0 = \frac{9,5 \times 10^7}{1400 + 5,22 \sqrt{9,5 \times 10^7}} = 1817.$$

Скорость начала псевдооживления

$$w_0 = \frac{1817 \times 11,2 \times 10^{-6}}{0,012} = 1,7 \text{ м/с}.$$

Оптимальная скорость воздуха

$$w_{\text{опт}} = 1,5 \times 1,7 = 2,55 \text{ м/с.}$$

Вычислим оптимальную скорость по уравнению (12.5):

$$w_{\text{опт}} = 2,25 + 1,95 \ln 1,1 = 2,43 \text{ м/с.}$$

Из двух значений принимаем наибольшее:

$$w_{\text{опт}} = 2,55 \text{ м/с.}$$

Находим:

– число Рейнольдса:

$$Re = \frac{w_{\text{опт}} d_{\text{э}}}{\nu} = \frac{2,55 \times 0,012}{11,2 \times 10^{-6}} = 2732;$$

– число Нуссельта по формуле (12.3а):

$$Nu = 0,52 \times 2732^{0,7} = 132,3;$$

– коэффициент теплоотдачи на поверхности ягод в псевдооживленном слое

$$\alpha = 132,3 \frac{0,022}{0,012} = 240 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К).}$$

Выполним расчет удельной теплоты замораживания, используя данные об энтальпии продукта из приложения Б:

$$q_3 = h_1 - h_2 = 365,6 - 0 = 365,6 \text{ кДж/кг.}$$

Принимаем теплопроводность замороженного продукта  $\lambda_3 = 1,1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  и рассчитываем время замораживания по уравнению:

$$\tau = \frac{q_3 \rho l_3}{(t_{\text{кр}} - t_{\text{ж}})} \left[ R_0 \frac{l_0}{\lambda_3} + P_0 \left( \frac{1}{\alpha} + \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right) \right], \quad (12.8)$$

где  $\tau$  – продолжительность замораживания, с;

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

$q_3$  – удельная теплота замораживания, Дж/кг;

$t_{кр}$  – криоскопическая температура, °С;

$t_{ж}$  – средняя температура охлаждающей среды, °С;

$R_0$  и  $P_0$  – коэффициенты, зависящие от формы и размеров замораживаемого продукта;

$\lambda_3$  – теплопроводность замороженного продукта, Вт/(м·К);

$\sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$  – термическое сопротивление упаковки продукта, м<sup>2</sup>·К/Вт.

Для сферических частиц принимают:

– определяющий геометрический размер равным их диаметру;

– коэффициенты формы тела  $R_0 = 0,0417$  и  $P_0 = 0,167$ .

Находим

$$\tau = \frac{365600 \times 1000 \times 0,012}{-1,4 - (-28,5)} \times \left( 0,0417 \times \frac{0,012}{1,1} + 0,167 \times \frac{1}{240} \right) = 186 \text{ с.}$$

При расчете среднего температурного напора допустимо принять температуру ягод одинаковой по всему объему псевдооживленного слоя и равной температуре замороженного продукта.

В таком случае расчетная площадь поверхности теплообмена (площадь поверхности ягод) завышена.

$$\Delta t_{ср} = \frac{[-20 - (-30)] - [-20 - (-27)]}{\ln \frac{-20 + 30}{-20 + 27}} = 8,4 \text{ °С.}$$

Тепловой поток при охлаждении ягод

$$\Phi = q_3 m_t = 365,6 \times \frac{700}{3600} = 71,1 \text{ кВт} = 71\,100 \text{ Вт.}$$

Площадь поверхности теплообмена

$$A = \frac{71\,100}{240 \times 8,4} = 35,3 \text{ м}^2.$$

Площадь наружной поверхности ягод массой 1 кг по уравнению (12.7):

$$a_m = \frac{6}{1000 \times 0,012} = 0,5 \text{ м}^2/\text{кг}.$$

Необходимая для обеспечения теплообмена масса продукта

$$m = \frac{35,3}{0,5} = 70,5 \text{ кг}.$$

Определим объемный расход охлаждающего воздуха:

$$Q_V = \frac{\Phi}{c_p \rho (t_2 - t_1)} = \frac{71,1}{1 \times 1,42 \times 3} = 16,7 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Площадь поперечного сечения аппарата

$$S = \frac{Q_V}{w_{\text{опт}}} = \frac{16,7}{2,55} = 6,6 \text{ м}^2.$$

Высоту неподвижного плотного слоя принято принимать равной от 5 до 10 эквивалентных диаметров ягод или плодов.

Принимаем  $H_{\text{н.с}} = 5 \times 0,012 = 0,06 \text{ м}$ .

Объем неподвижного плотного слоя в грузовом отсеке

$$V_{\text{н.с}} = 0,06 \times 6,6 = 0,39 \text{ м}^3.$$

Масса ягод в слое в пределах грузового отсека

$$m = V_{\text{н.с}} \rho_{\text{н}} = 0,39 \times 600 = 235 \text{ кг}.$$

Среднее время пребывания ягод в грузовом отсеке

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{m}{m_t} = \frac{235}{700} = 0,34 \text{ ч} = 1\,200 \text{ с},$$

что значительно больше требуемого времени замораживания.

*Ответ:* 186 с и 235 кг.

## Контрольная задача 7

Рассчитать время замораживания и необходимую массу продукта в грузовом отсеке воздушного морозильного аппарата псевдоожиженного слоя.

Вид продукта принять по таблице 11.1 в зависимости от последней цифры шифра (варианта).

Производительность, температуры продукта и воздуха приведены в таблице 12.1 в зависимости от предпоследней цифры шифра (варианта).

Таблица 12.1 – Исходные данные к контрольной задаче 7

| Предпоследняя цифра шифра | Производительность $m_t$ , кг/ч | Температуры, °С |          |          |           |
|---------------------------|---------------------------------|-----------------|----------|----------|-----------|
|                           |                                 | продукта        |          | воздуха  |           |
|                           |                                 | начальная       | конечная | на входе | на выходе |
| 1                         | 100                             | 10              | – 10     | – 20     | – 17      |
| 2                         | 200                             | 15              | – 15     | – 25     | – 22      |
| 3                         | 300                             | 18              | – 18     | – 30     | – 27      |
| 4                         | 400                             | 20              | – 20     | – 30     | – 27      |
| 5                         | 500                             | 25              | – 10     | – 18     | – 15      |
| 6                         | 50                              | 10              | – 15     | – 22     | – 18      |
| 7                         | 70                              | 15              | – 18     | – 26     | – 22      |
| 8                         | 120                             | 18              | – 20     | – 28     | – 25      |
| 9                         | 150                             | 20              | – 10     | – 22     | – 18      |
| 0                         | 250                             | 25              | – 15     | – 24     | – 20      |

Теплопроводность замороженных продуктов  $\lambda_3$  допустимо принять в зависимости от их вида:

- ягоды – 1,1 Вт/(м·К);
- вишня – 1,35 Вт/(м·К);
- сливы и абрикосы – 1,7 Вт/(м·К).

### 13 ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ

Кипение жидкостей рассматривают в большом объеме при свободном движении или в трубах и каналах при вынужденном движении. Интенсивность теплообмена при кипении зависит от природы жидкости и ее теплофизических свойств. Определяющей температурой является температура насыщения.

Ограничимся рассмотрением теплообмена в условиях пузырькового режима кипения.

При кипении в большом объеме и с заданной поверхностной плотностью теплового потока (тепловой нагрузки поверхности нагрева) рассчитывают теплообмен, используя следующие зависимости:

– при  $Re_* \geq 0,01$

$$Nu_* = 0,125 Re_*^{0,65} Pr^{0,33}; \quad (13.1)$$

– при  $Re_* < 0,01$

$$Nu_* = 0,0625 Re_*^{0,5} Pr^{0,33}. \quad (13.2)$$

В уравнениях приняты обозначения обобщенных переменных:

$$Nu_* = \frac{\alpha l_*}{\lambda}, \quad (13.3)$$

где  $l_*$  – характерный геометрический размер, пропорциональный критическому диаметру парового пузырька на поверхности нагрева (парообразования), м;

$$Re_* = \frac{w_* l_*}{\nu}, \quad (13.4)$$

где  $w_*$  – приведенная скорость парообразования, которая характеризует объем пара, образующегося на единице площади поверхности нагрева в единицу времени,  $m^3/(m^2 \cdot c)$ ;

$$w_* = \frac{q}{r\rho_{\text{п}}}, \quad (13.4a)$$

где  $q$  – тепловая нагрузка, Вт/м<sup>2</sup>;

$r$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;

$\rho_{\text{п}}$  – плотность образующегося пара, кг/м<sup>3</sup>.

Зависимости справедливы при следующих условиях:  $10^{-5} \leq \text{Re}_* \leq 10^4$ ;  
 $0,86 \leq \text{Pr} \leq 7,6$ ; объемное содержание пара в кипящей жидкости не превышает 70 %.

Принято записывать:

$$\text{Re}_* = A_* q, \quad (13.5)$$

где  $A_*$  – параметр, зависящий от теплофизических свойств жидкости, м<sup>2</sup>/Вт.

При кипении в большом объеме и с заданным температурным напором (разностью температуры поверхности нагрева и температуры насыщения) используют уравнения:

– при  $B_* \Delta t \text{Pr}^{0,33} \geq 1,6$ :

$$\text{Nu}_* = 2,63 \times 10^{-3} (B_* \Delta t)^{1,86} \text{Pr}^{0,952}; \quad (13.6)$$

– при  $B_* \Delta t \text{Pr}^{0,33} < 1,6$ :

$$\text{Nu}_* = 3,91 \times 10^{-3} B_* \Delta t \text{Pr}^{0,67}, \quad (13.7)$$

где  $\Delta t = t_c - t_s$  – температурный напор, К;

$B_*$  – параметр, зависящий от теплофизических свойств жидкости, К<sup>-1</sup>.

Значения параметров  $l_*$ ,  $A_*$  и  $B_*$  приведены для воды в приложении К в зависимости от температуры насыщения.

Вышеприведенные расчетные зависимости используют при тепловых нагрузках меньше первой критической тепловой нагрузки, при которой наблюдается переход к пленочному режиму кипения. Значение первой критической тепловой нагрузки для воды приведены в таблице 13.1.

Таблица 13.1

|                                       |      |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $P$ , МПа                             | 0,01 | 0,1 | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 4,0 | 10  | 20  |
| $q_{\text{кр1}}$ , МВт/м <sup>2</sup> | 0,5  | 1,2 | 2,2 | 2,8 | 3,5 | 4,0 | 4,0 | 2,5 |

Для определенного рода жидкости коэффициент теплоотдачи при кипении в большом объеме зависит только от поверхностной плотности теплового потока и давления насыщения. Поэтому используют эмпирические зависимости.

Для воды в диапазоне давлений от 0,1 до 4 МПа получены зависимости:

$$\alpha = 4,24q^{0,7} P^{0,15}, \quad (13.8)$$

$$\alpha = 122\Delta t^{2,33} P^{0,5}, \quad (13.9)$$

где  $P$  – давление насыщения, МПа;

$q$  – тепловая нагрузка, Вт/м<sup>2</sup>.

При пузырьковом кипении в трубах и каналах учитывают, что теплоотдача определяется как конвекцией жидкости при ее вынужденном движении, так и процессом парообразования в кипящей жидкости.

В случае кипения при объемном паросодержании не более 70 % рассчитывают теплоотдачу следующим образом:

- находят коэффициенты теплоотдачи при вынужденном движении в трубах и при пузырьковом кипении в большом объеме (соответственно  $\alpha_{ж}$  и  $\alpha_{к}$ );
- определяют коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{тр}$  при пузырьковом кипении в трубах:

– при  $\frac{\alpha_{к}}{\alpha_{ж}} \leq 0,5$  принимают  $\alpha_{тр} = \alpha_{ж}$ ;

– при  $0,5 < \frac{\alpha_{к}}{\alpha_{ж}} < 2$  вычисляют

$$\alpha_{тр} = \alpha_{ж} \frac{4\alpha_{ж} + \alpha_{к}}{5\alpha_{ж} - \alpha_{к}}; \quad (13.10)$$

– при  $\frac{\alpha_{к}}{\alpha_{ж}} \geq 2$  принимают  $\alpha_{тр} = \alpha_{к}$ .

## Задачи

13.1. Определить коэффициент теплоотдачи от горизонтальной поверхности нагревателя к кипящей воде, находящейся под давлением 0,5 МПа.

Тепловая нагрузка поверхности нагревателя равна  $1 \text{ МВт/м}^2$ .

**Решение.** Тепловая нагрузка поверхности нагревателя меньше первой критической при том же давлении (см. выше):

$$1 \times 10^6 \text{ Вт/м}^2 < 2,2 \times 10^6 \text{ Вт/м}^2.$$

Режим кипения является пузырьковым.

При заданном давлении из приложений Б и Е выписываем параметры воды:

$$t_S = 151,84 \text{ }^\circ\text{C}; \quad \text{Pr} = 1,17 \quad \text{и} \quad \lambda = 0,684 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Определяем характеристики теплообмена при кипении воды по приложению К:

$$l_* = 2,6 \times 10^{-6} \text{ м}; \quad A_* = 2,33 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{Вт}.$$

Находим по формуле (13.5):

$$\text{Re}_* = 1 \times 10^6 \times 2,33 \times 10^{-6} = 2,33.$$

Определяем по уравнению (13.1):

$$\text{Nu}_* = 0,125 \times 2,33^{0,65} \times 1,17^{0,33} = 0,23.$$

Коэффициент теплоотдачи исходя из выражения числа  $\text{Nu}_*$  по уравнению (13.3):

$$\alpha = 0,23 \frac{0,684}{2,6 \times 10^{-6}} = 60 \text{ 000 Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

13.2. Выполнить расчет в условиях задачи 13.1 по формуле (13.8) и сравнить с результатом предыдущего расчета.

13.3. На поверхности трубчатого электронагревателя с наружным диаметром 38 мм и длиной 1 м кипит вода под давлением 480 кПа. Мощность электронагревателя 14 кВт.

Определить температуру наружной поверхности нагревателя.

13.4. Вода под давлением 1,5 МПа кипит в большом объеме. Тепловая нагрузка нагревателя составляет  $1,25 \text{ МВт/м}^2$ . Определить коэффициент теплоотдачи. Выполнить расчет по уравнениям (13.1) и (13.8).

13.5. Определить тепловую нагрузку поверхности нагрева при кипении воды в большом объеме, в котором вода находится под давлением 0,62 МПа. Температура поверхности нагрева равна  $175 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Решение.** При давлении воды при  $P = 0,62 \text{ МПа}$  выписываем из приложений Б и Е:

$$t_S = 160 \text{ }^\circ\text{C}; \quad \text{Pr} = 1,1 \quad \text{и} \quad \lambda = 0,68 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Принимаем пузырьковый режим кипения.

Из приложения К находим:

$$B_* = 0,526 \text{ К}^{-1} \quad \text{и} \quad l_* = 1,73 \times 10^{-6} \text{ м}.$$

Определяем:

$$B_* \Delta t \text{ Pr}^{0,33} = 0,526 \times (175 - 160) 1,1^{0,33} = 8,15.$$

В таком случае по уравнению (13.6)

$$\text{Nu}_* = 2,63 \times 10^{-3} (0,526 \times 15)^{1,86} \times 1,1^{0,952} = 0,134.$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_* = 0,134 \times \frac{0,68}{1,73 \times 10^{-6}} = 53000 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Тепловая нагрузка

$$q = 53000 \times (175 - 160) = 800000 \text{ Вт/м}^2.$$

Критическая тепловая нагрузка  $q_{кр1} = 2,4 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, что значительно больше расчетной в условиях задачи. Режим кипения является пузырьковым.

13.6. Из воды, кипящей в большом объеме, необходимо получить 250 кг сухого насыщенного пара за 1 ч. Найти необходимую поверхность нагрева, если давление пара – 0,8 МПа, а температура поверхности нагрева равна 180 °С.

13.7. На поверхности провода электрокипяtilьника происходит пузырьковое кипение воды в большом объеме при давлении 0,15 МПа. Диаметр провода 3 мм, а удельное сопротивление –  $1,1 \times 10^{-6}$  Ом·м. Допустимый перегрев воды равен 20 °С. Определить допустимую силу тока.

13.8. В парообразователе с общей площадью поверхности нагрева 12 м<sup>2</sup> получают сухой насыщенный водяной пар давлением 0,02 МПа из кипящей воды. Определить паропроизводительность аппарата при температурном напоре на поверхности нагрева равном 17 °С.

13.9. Вычислить коэффициент теплоотдачи при кипении воды и массу пара, получаемую в испарителе за 1 ч. Общая площадь поверхности нагрева равна 5 м<sup>2</sup>, перегрев кипящей воды на поверхности нагрева составляет 12 °С, получаемый пар – влажный насыщенный, степень сухости 0,9, давление пара равно 0,17 МПа.

13.10. Определить необходимую площадь испарительной поверхности котла паропроизводительностью 10 т/ч. Давление водяного пара – 1,4 МПа, пар является сухим насыщенным. Температурный напор на поверхности нагрева равен 10 °С. Расчет выполнить в условиях пузырькового кипения в большом объеме.

13.11. Какой температурный напор необходимо обеспечить в условиях задачи 6.10, чтобы при той же площади поверхности нагрева увеличить паропроизводительность в 2 раза?

13.12. В трубе внутренним диаметром 30 мм и длиной 2 м происходит пузырьковое кипение воды. Скорость воды 1,3 м/с, давление воды 0,2 МПа.

Определить тепловой поток от стенки трубы к воде, приняв температурный напор на поверхности трубы равным  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Решение.** Определяем по приложению Е при заданном давлении температуру насыщения  $t_s = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Выписываем теплофизические свойства воды при этой температуре:

$$\nu_{\text{ж}} = 0,252 \times 10^{-6} \text{ м/с}; \quad \lambda_{\text{ж}} = 0,686 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}; \quad \text{Pr}_{\text{ж}} = 1,47.$$

Температура внутренней поверхности трубы  $t_c = 120 + 8 = 128\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

При этой температуре  $\text{Pr}_c = 1,38$ .

Рассчитываем при вынужденном движении воды в трубе:

– число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{ж}} = \frac{1,3 \times 0,03}{0,252 \times 10^{-6}} = 154\,800;$$

– число Нуссельта по уравнению (3.3):

$$\text{Nu}_{\text{ж}} = 0,021 \times 154\,800^{0,8} \times 1,43^{0,43} \left( \frac{1,43}{1,38} \right)^{0,25} = 350,4;$$

– коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{\text{ж}} = 350,4 \times \frac{0,686}{0,03} = 8\,000 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

По уравнению (13.9) рассчитываем коэффициент теплоотдачи при кипении воды:

$$\alpha_{\text{к}} = 122 \times 8^{2,33} \times 0,2^{0,5} = 6\,950 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Вычисляем:

– отношение  $\frac{\alpha_{\text{к}}}{\alpha_{\text{ж}}}$ :

$$\frac{\alpha_{\text{к}}}{\alpha_{\text{ж}}} = \frac{6\,950}{8\,000} = 0,87;$$

– коэффициент теплоотдачи по формуле (13.10):

$$\alpha_{\text{тр}} = 8\,000 \times \frac{4 \times 8\,000 + 6\,950}{5 \times 8\,000 - 6\,950} = 9\,400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

– тепловой поток:

$$\Phi = \alpha A (t_c - t_s), \quad )$$

$$\Phi = 9\,400 \times \pi \times 0,03 \times 2 \times 8 = 14\,200 \text{ Вт} = 14,2 \text{ кВт}.$$

13.13. В трубе внутренним диаметром 18 мм движется кипящая вода со скоростью 1,5 м/с. Вода находится под давлением 0,79 МПа.

Определить коэффициент теплоотдачи к кипящей воде, приняв температуру внутренней поверхности трубы равной 173 °С.

13.14. Рассчитать коэффициент теплоотдачи в условиях задачи 13.13, приняв температуру внутренней поверхности трубы равной 180 °С.

13.15. Определить температуру внутренней поверхности трубы, если тепловая нагрузка поверхности равна 0,5 МВт/м<sup>2</sup>, скорость кипящей воды – 1,5 м/с, давление воды – 1,26 МПа. Внутренний диаметр трубы равен 38 мм.

## 14 ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА

В практике инженерных расчетов, как правило, имеет место пленочная конденсация пара при ламинарном движении пленки конденсата по смачиваемой поверхности теплообмена. На вертикальных поверхностях ламинарное движение сопровождается волновым течением пленки конденсата, что приводит к повышению интенсивности теплообмена в связи с уменьшением толщины стекающей пленки конденсата.

Во многих случаях происходит конденсация неподвижного (малоподвижного) пара, когда его скорость относительно поверхности конденсации не превышает 5 м/с.

При пленочной конденсации сухого насыщенного пара на вертикальной стенке и ламинарном течении пленки конденсата могут быть приближенно определены по формулам Нуссельта:

– толщина пленки, м,

$$\delta_y = 4 \sqrt{\frac{4\lambda_{\text{ж}}\mu_{\text{ж}}(t_S - t_c)y}{\rho_{\text{ж}}^2 gr}}, \quad (14.1)$$

где  $\lambda_{\text{ж}}$  – теплопроводность конденсата, Вт/(м·К);

$\mu_{\text{ж}}$  – динамическая вязкость конденсата, Па·с;

$t_S$  и  $t_c$  – температуры насыщения пара и поверхности стенки, °С;

$y$  – расстояние от верхней кромки, м;

$\rho_{\text{ж}}$  – плотность конденсата, кг/м<sup>3</sup>;

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

$r$  – удельная теплота парообразования, при температуре насыщения, Дж/кг;

– местный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К),

$$\alpha_y = \frac{\lambda_{\text{ж}}}{\delta_y}; \quad (14.2)$$

– динамическая вязкость

$$\mu_{\text{ж}} = \rho_{\text{ж}} \nu_{\text{ж}},$$

где  $\nu_{\text{ж}}$  – кинематическая вязкость,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Используя зависимости (14.1) и (14.2), можно получить уравнения для расчетов коэффициентов теплоотдачи:

– местного на расстоянии  $y$  от верхней кромки вертикальной стенки

$$\alpha_y = 4 \sqrt{\frac{r \rho_{\text{ж}}^2 g \lambda_{\text{ж}}^3}{4 \mu_{\text{ж}} (t_{\text{с}} - t_{\text{ж}}) y}}; \quad (14.3)$$

– среднего на вертикальной поверхности высотой  $H$ , м,

$$\alpha = 0,9434 \sqrt{\frac{r \rho_{\text{ж}}^2 g \lambda_{\text{ж}}^3}{\mu_{\text{ж}} (t_{\text{с}} - t_{\text{ж}}) H}}. \quad (14.4)$$

Теплопроводность, плотность и динамическую вязкость конденсата принимают при средней температуре пленки конденсата  $t_{\text{ж}} = \frac{t_{\text{с}} + t_{\text{ж}}}{2}$ .

Средний по окружности горизонтальной трубы коэффициент теплоотдачи находят по уравнению Нуссельта:

$$\alpha = 0,7284 \sqrt{\frac{r \rho_{\text{ж}}^2 g \lambda_{\text{ж}}^3}{\mu_{\text{ж}} (t_{\text{с}} - t_{\text{ж}}) d_{\text{н}}}}, \quad (14.5)$$

где  $d_{\text{н}}$  – наружный диаметр трубы, м.

Для упрощения расчетов вводят в уравнения параметры, объединяющие теплофизические свойства конденсата и зависящие только от рода жидкости и температуры насыщения. Переменность теплофизических свойств в зависимости от температуры конденсата учитывают поправочным коэффициентом  $\varepsilon_t$ .

Средний по высоте вертикальной стенки коэффициент теплоотдачи в условии ламинарно-волнового течения пленки

$$\alpha = 3,8 \frac{A_{\kappa}^{0,78}}{B_{\kappa} [(t_S - t_c)H]^{0,22}} \varepsilon_t, \quad (14.6)$$

где  $A_{\kappa}$  и  $B_{\kappa}$  – комплексы теплофизических свойств жидкости при температуре насыщения.

Они являются размерными:  $A_{\kappa}$ ,  $(\text{м} \cdot \text{К})^{-1}$ ;  $B_{\kappa}$ ,  $\text{м}/\text{Вт}$ .

Переход ламинарного движения пленки конденсата в турбулентное наблюдается при критической высоте  $H_{\text{кр}}$ , отсчитываемой от верхней кромки вертикальной поверхности

$$H_{\text{кр}} = \frac{2300}{A_{\kappa} (t_S - t_c)}. \quad (14.7)$$

Для расчета коэффициента теплоотдачи при пленочной конденсации неподвижного пара на наружной поверхности горизонтальных труб предложена зависимость:

$$\alpha = \frac{M_{\kappa}}{[(t_S - t_c)d_{\text{н}}]^{0,25}} \varepsilon_t, \quad (14.8)$$

где  $M_{\kappa}$  – параметр, зависящий только от рода жидкости и температуры насыщения,  $\text{Вт}/(\text{м}^{1,75} \cdot \text{К}^{1,75})$ .

Формулы (14.5) и (14.8) допустимо использовать при небольших диаметрах наружной поверхности горизонтальных труб (при конденсации водяного пара не более 50 мм).

Поправку на переменность свойств в уравнениях (14.6) и (14.8) рассчитывают по формуле:

$$\varepsilon_t = \left( \frac{\text{Pr}_S}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25}, \quad (14.9)$$

где  $Pr_S$  и  $Pr_c$  – числа Прандтля при температурах насыщения и поверхности стенки.

При малых температурных перепадах, когда  $t_S - t_c < 10$  °С, обычно принимают  $\varepsilon_t = 1$ .

Значения комплексов  $A_k$ ,  $B_k$  и  $M_k$  при конденсации водяного пара приведены в приложении К в зависимости от температуры насыщения.

При конденсации пара на наружной поверхности пучка горизонтальных труб учитывают, что на нижних трубах увеличивается толщина слоя конденсата за счет стекающего с вышерасположенных труб.

Средний для всего пучка коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{\text{ср}} = \varepsilon_n \alpha, \quad (14.10)$$

где  $\varepsilon_n$  – коэффициент, зависящий от расположения труб в пучке и от числа труб в вертикальном ряду;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи для одиночной горизонтальной трубы, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Значения коэффициента  $\varepsilon_n$  приведены в таблице 14.1.

Таблица 14.1 – Значения коэффициента  $\varepsilon_n$

| Расположение труб | Число труб в вертикальном ряду |      |      |      |      |      |     |      |
|-------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|-----|------|
|                   | 1                              | 3    | 5    | 7    | 9    | 13   | 17  | 21   |
| Коридорное        | 1                              | 0,79 | 0,69 | 0,63 | 0,57 | 0,52 | 0,5 | 0,48 |
| Шахматное         | 1                              | 0,9  | 0,8  | 0,73 | 0,68 | 0,63 | 0,6 | 0,58 |

Среднее число труб в вертикальном ряду принимают в коридорном пучке равным среднему числу рядов труб по вертикали, а в шахматном – половине этого числа. В ряде случаев используют приведенное число трубок как техническую характеристику аппарата.

При конденсации водяного пара на горизонтальном трубном пучке в пароводяных скоростных подогревателях средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К),

$$\alpha = \frac{4950 + 58,5t_{\text{ж}} - 0,18t_{\text{ж}}^2}{\sqrt[4]{(t_S - t_c)m_B d_H}}, \quad (14.11)$$

где  $m_B$  – приведенное число трубок в вертикальном ряду.

Массу пара, конденсирующегося на поверхности теплообмена, находят из уравнения теплового баланса:

$$m = \frac{\alpha(t_S - t_c)A\tau}{r}, \quad (14.12)$$

где  $\tau$  – время процесса, с;

$r$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

При конденсации перегретого пара в расчетных зависимостях используют вместо теплоты парообразования разность удельных энтальпий перегретого пара и образующегося конденсата, а при конденсации влажного насыщенного пара – величину  $xr$ , где  $x$  – степень сухости пара.

### Задачи

14.1. Горизонтальная трубка наружным диаметром 20 мм и длиной 1,8 м имеет температуру наружной поверхности 22 °С. На трубке происходит пленочная конденсация сухого насыщенного водяного пара давлением 4 кПа. Найти коэффициент теплоотдачи и массу пара, конденсирующегося за 1 ч.

Расчет коэффициента теплоотдачи выполнить по формулам (14.5) и (14.8) и сравнить полученные значения.

14.2. Выполнить расчет в условиях задачи 14.1 при вертикальном расположении трубки.

14.3. На наружной поверхности горизонтальной трубы диаметром 38 мм и длиной 2 м конденсируется сухой насыщенный водяной пар давлением 140 кПа. Температура поверхности трубы 106 °С.

Определить массу образующегося за 1 ч конденсата.

14.4. Как изменятся плотность теплового потока на наружной поверхности горизонтальной трубы и масса образующегося конденсата, если давле-

ние сухого насыщенного водяного пара, конденсирующегося на горизонтальной трубе, увеличится с 0,17 до 0,65 МПа? При расчете принять неизменным температурный напор между паром и поверхностью трубы.

14.5. На поверхности вертикальной плиты высотой 2 м происходит пленочная конденсация сухого насыщенного водяного пара давлением 0,5 МПа. Температура поверхности плиты на 5 °С ниже температуры насыщенного пара. Определить толщину пленки и местный коэффициент теплоотдачи на расстояниях от верхней кромки плиты, равных 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5 и 2 м.

При расчетах не учитывать волновое течение пленки конденсата.

**Решение.** Определяем температуру насыщения водяного пара по приложению Е при заданном давлении 0,5 МПа:

$$t_s = 151,85 \text{ °С.}$$

В таком случае температура поверхности

$$t_c = 151,85 - 5 = 146,85 \text{ °С.}$$

Находим значение комплекса  $A_k$  по приложению К в зависимости от температуры насыщения с учетом интерполяции:

$$A_k = 110 \text{ (м} \cdot \text{°С)}^{-1}.$$

Определяем значение критической высоты по формуле (14.7):

$$H_{кр} = \frac{2300}{110 \times 5} = 4,2 \text{ м} > 2 \text{ м.}$$

В условиях задачи режим течения пленки конденсата по всей высоте является ламинарным. В дальнейших расчетах используем формулы Нуссельта (14.1) и (14.2).

При средней температуре пленки конденсата

$$t_{ж} = (151,85 + 146,85)0,5 = 149,35 \text{ }^{\circ}\text{C} \approx 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

выписываем из приложений Б и Е теплофизические свойства воды:

$$\lambda = 0,68 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}; \quad \mu = 1,864 \times 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}; \quad \rho = 918 \text{ кг/м}^3; \quad r = 2\,114,4 \text{ кДж/кг}.$$

При расстоянии  $y = 0,1$  м от верхней кромки

$$\delta_y = \sqrt[4]{\frac{4 \times 0,68 \times 1,864 \times 10^{-4} \times 5 \times 0,1}{2114,4 \times 10^3 \times 918^2 \times 9,81}} = 6,2 \times 10^{-5} \text{ м};$$

$$\delta_y = 0,062 \text{ мм};$$

$$\alpha_y = \frac{0,684}{6,2 \times 10^{-5}} = 11000 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

При других расстояниях расчет выполним с учетом зависимости толщины пленки от расстояния от верхней кромки.

На расстоянии  $y = 0,25$  м от верхней кромки

$$\delta_y = 6,2 \times 10^{-5} \times \sqrt[4]{\frac{0,25}{0,1}} = 6,2 \times 10^{-5} \times \sqrt[4]{2,5} = 7,8 \times 10^{-5} \text{ м};$$

$$\alpha_y = \frac{0,684}{7,8 \times 10^{-5}} = 8800 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Результаты расчетов при других расстояниях от верхней кромки приведены в таблице 14.2:

Таблица 14.2

|   |       |       |       |       |       |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| $y, \text{ м}$                            | 0,5   | 0,75  | 1     | 1,5   | 2     |
| $\delta_y, \text{ мм}$                    | 0,093 | 0,1   | 0,11  | 0,12  | 0,13  |
| $\alpha_y, \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ | 7 400 | 6 700 | 6 200 | 5 600 | 5 200 |

14.6. Определить средний коэффициент теплоотдачи на поверхности плиты в условиях предыдущей задачи и расход конденсирующего пара из расчета на  $1 \text{ м}^2$  поверхности плиты.

14.7. На поверхности горизонтальной трубы наружным диаметром 18 мм и длиной 1,5 м конденсируется сухой насыщенный водяной пар давлением 0,15 МПа. Температура поверхности трубы  $t_c = 107$  °С. Найти средний коэффициент теплоотдачи и массу пара, конденсирующегося за 1 ч на поверхности трубы.

14.8. Определить коэффициент теплоотдачи в условиях задачи 14.7 при расположении трубок вертикально с учетом волнового течения пленки конденсата.

14.9. Сухой насыщенный водяной пар давлением 8 кПа конденсируется на вертикальной стенке, температура которой 28 °С. Найти толщину пленки конденсата и местный коэффициент теплоотдачи на расстояниях 0,3; 0,6; 0,9 и 1,2 м от верхней кромки стенки.

14.10. На вертикальных трубках конденсатора длиной 2 м конденсируется сухой насыщенный водяной пар давлением 5 кПа. Температуру поверхности трубок принять равной 29 °С.

Определить толщину пленки конденсата и местный коэффициент теплоотдачи на расстояниях от верхнего конца трубы 0,1; 0,5; 1,0; 1,5 и 2 м.

При расчете не учитывать волновое течение пленки конденсата.

14.11. На горизонтальной трубе наружным диаметром 16 мм и длиной 2 м необходимо обеспечить конденсацию водяного пара в количестве 18 кг/ч. Конденсируется влажный насыщенный водяной пар давлением 0,2 МПа и степенью сухости 0,9.

Определить необходимую температуру поверхности трубы и коэффициент теплоотдачи в этих условиях.

14.12. В пароводяном теплообменнике выполнен коридорный пучок из 16 горизонтальных трубок длиной 1,2 м и наружным диаметром 22 мм по 4 трубки в каждом ряду. На наружной поверхности трубок конденсируется сухой насыщенный водяной пар давлением 170 кПа. Температура поверхности трубок 110 °С.

Определить массу конденсата, образующегося за 1 ч.

14.13. Выполнить расчет в условиях задачи 14.12 при шахматном расположении труб в пучке.

14.14. Найти коэффициент теплоотдачи при пленочной конденсации сухого насыщенного водяного пара на горизонтальных трубках наружным диаметром 16 мм в пароводяном скоростном подогревателе. Давление пара – 0,6 МПа, температура поверхности трубок на 10 °С ниже температуры насыщения. Расчет выполнить по формулам (14.10) и (14.11).

При расчете принять  $m_b = 12,6$ .

## 15 ТЕПЛО- И МАССООБМЕН В ПАРОГАЗОВЫХ СРЕДАХ

Массообменом принято называть процессы переноса массы данного компонента в пространстве с неоднородным полем его концентрации или парциального давления.

Во многих практических случаях происходит массоотдача как конвективный массообмен между движущейся средой и поверхностью жидкости или твердого тела.

Уравнение массоотдачи:

$$m_t = \beta(\rho_{Iw} - \rho_{I0})S_W = \beta_P(p_{Iw} - p_{I0})S_W, \quad (15.1)$$

где  $\beta$  – коэффициент массообмена, отнесенный к разности концентраций компонента, м/с;

$\rho_{Iw}$  и  $\rho_{I0}$  – плотности (концентрации) компонента у поверхности раздела фаз и вдали от нее, кг/м<sup>3</sup>;

$S_W$  – площадь поверхности массообмена, м<sup>2</sup>;

$\beta_P$  – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности парциальных давлений компонента, с/м;

$p_{Iw}$  и  $p_{I0}$  – парциальные давления данного компонента у поверхности раздела фаз и вдали от нее, Па.

В случае массообмена, направленного к поверхности раздела фаз, необходимо в уравнении (15.1) поменять местами величины в круглых скобках, чтобы из большего значения вычитать меньшее.

Соотношение между коэффициентами массообмена и массоотдачи обычно записывают в следующем виде:

$$\beta_P = \frac{\beta}{R_0 T_W}, \quad (15.2)$$

где  $R_0$  – удельная газовая постоянная компонента, Дж/(кг К);

$T_W$  – термодинамическая температура поверхности жидкости или твердого тела, К.

Процессы теплообмена могут сопровождаться процессами массообмена, обусловленными конденсацией паров или испарением жидкости. При этом отличаются «мокрый» теплообмен от «сухого», происходящего при отсутствии массообмена и рассчитываемого традиционно используемым методом.

В условиях совпадения направлений процессов тепло- и массообмена

$$\Phi = \pm \alpha (t_W - t_0) S_W + m_t r \times 10^3, \quad (15.3)$$

где  $t_W$  и  $t_0$  – температуры поверхности раздела фаз и вдали от этой поверхности, °С;

$r$  – удельная теплота парообразования, кДж/кг.

Знак «плюс» – для испарения жидкости; знак «минус» – для конденсации паров.

Допускается принять  $r = 2\,500$  кДж/кг.

При испарении жидкости принимают параметры диффундирующего компонента у поверхности жидкости как для насыщенного пара при температуре этой поверхности.

При свободном движении воздуха у поверхности испаряющейся воды при  $Ar Pr_D = 10^4 \div 3 \times 10^8$  коэффициент массообмена (влагообмена) находят из следующей зависимости:

$$Nu_D = 0,66 (Ar Pr_D)^{0,26}. \quad (15.4)$$

При этом

$$Ar = \frac{gl_o^3}{\nu^2} \frac{|\rho_0 - \rho_W|}{\rho_W}, \quad (15.5)$$

где  $\rho_0$  и  $\rho_W$  – плотности влажного воздуха вдали и у поверхности воды, кг/м<sup>3</sup>.

При невысоких температурах воздуха (менее 50°С) допустимо принять:

$$\frac{|\rho_0 - \rho_W|}{\rho_W} = \frac{|T_W - T_0|}{T_0}, \quad (15.5a)$$

где  $T_0$  – температура влажного воздуха (по «сухому» термометру), К;

$T_W$  – температура поверхности испарения (температура по «мокрому» термометру), К.

Определяющий размер находят как сторону квадрата, равновеликого по площади поверхности.

Теплопроводность и кинематическую вязкость влажного воздуха определяют при его температуре вдали от поверхности испарения, а коэффициент диффузии водяных паров в составе влажного воздуха – при средней температуре  $T$  пограничного слоя

$$D = 9 \times 10^{-8} \frac{T^{1,8}}{B}, \quad (15.6)$$

где  $T$  и  $B$  – температура, К, и давление, кПа, воздуха.

При вынужденной конвекции воздуха у поверхности испарения воды

$$Nu_D = K_D Pr_D^{0,33} Re^n Gu^m, \quad (15.7)$$

где  $Gu = \frac{T_c - T_m}{T_c}$  – критерий Гухмана, характеризующий пароаккумулирующую способность влажного воздуха.

В критерии Гухмана  $T_c$  и  $T_m$  – термодинамические температуры по «сухому» и «мокрому» термометру, К.

Определяющим размером является длина поверхности испарения по направлению движения воздуха. Выбор определяющей температуры приведен выше в пояснениях к уравнениям (15.4) и (15.5).

Постоянные  $K_D$ ,  $n$  и  $m$  принимают в зависимости от числа Рейнольдса (таблица 15.1).

Таблица 15.1

| Re                                      | $K_D$  | $n$  | $m$   |
|---|--------|------|-------|
| $3 \times 10^3 \div 2,2 \times 10^4$    | 0,49   | 0,61 | 0,135 |
| $2,2 \times 10^4 \div 3,15 \times 10^5$ | 0,0248 | 0,9  | 0,135 |

В расчетах процессов массообмена широко используют аналогию с процессом теплообмена и считают, что процессы массообмена описываются аналогичными уравнениями теплообмена.

С учетом подобия процессов записывают расчетные уравнения в следующем виде:

$$m_t = \sigma(d_W'' - d_0)S_W \times 10^{-3}, \quad (15.8)$$

$$\Phi = \sigma(h_W'' - h_0)S_W \times 10^3, \quad (15.9)$$

где  $\sigma$  – коэффициент испарения, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$d_W''$  и  $h_W''$  – влагосодержание, г/кг, и энтальпия, кДж/кг, насыщенного влажного воздуха при температуре поверхности испарения;

$d_0$  и  $h_0$  – влагосодержание, г/кг, и энтальпия, кДж/кг, влажного воздуха вдали от поверхности испарения.

При этом

$$\sigma = \rho_{\text{вл}} \beta, \quad (15.10)$$

где  $\rho_{\text{вл}}$  – средняя плотность влажного воздуха в пограничном слое, примыкающем к поверхности испарения, кг/м<sup>3</sup>.

Исходя из аналогии процессов тепло- и массообмена,

$$\sigma = 10^{-3} Le \frac{\alpha}{C_{\text{вл}}}, \quad (15.11)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи на поверхности испарения при «сухом» теплообмене, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$C_{\text{вл}}$  – удельная изобарная теплоёмкость влажного воздуха, кДж/(кг·К).

В процессах испарения воды при температуре воздуха не более 50 °С значение  $Le = 1,15$ , что позволяет считать приблизительно выполненными условия подобия процессов тепло- и влагообмена.

При испарении нагретой воды в условиях движения воздуха у поверхности воды со скоростью  $w = 1 \div 7$  м/с коэффициент массоотдачи, м/с, может быть определен по эмпирической зависимости:

$$\beta_p = (\epsilon + 0,0362w) \times 10^{-6}, \quad (15.12)$$

где  $\epsilon$  – фактор гравитационной подвижности;

$w$  – скорость воздуха у поверхности воды, м/с.

Значения фактора гравитационной подвижности воздуха температурой  $15 \div 30$  °С в зависимости от температуры поверхности испарения приведены в таблице 15.2.

Таблица 15.2

| $t_w, \text{°C}$ | 30     | 50     | 70     | 90    |
|------------------|--------|--------|--------|-------|
| $\epsilon$       | 0,0458 | 0,0687 | 0,0853 | 0,106 |

Температура поверхности испарения несколько ниже температуры воды.

В практике инженерных расчетов теплотехнического оборудования нередко встречаются процессы теплообмена, осложненные процессами конденсации водяных паров из состава влажного воздуха на поверхности теплообмена. Это происходит, например, в теплообменниках-теплоутилизаторах систем вентиляции или в воздухоохладителях систем охлаждения.

Трудности расчета связаны с определением не только коэффициентов массообмена, но и той части поверхности теплообмена, на которой происходит конденсация паров.

Принято использовать упрощенный метод расчета с введением коэффициента влаговываждения

$$\xi = \frac{h_1 - h_2}{c_{\text{вл}}(t_1 - t_2)}, \quad (15.13)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – энтальпия влажного воздуха на входе и выходе, кДж/кг;

$t_1$  и  $t_2$  – температуры влажного воздуха на входе и выходе, °С.

Коэффициент влаговываждения принимают в пределах от 1 до 3,5. Его значение можно определить следующим образом:

– рассчитывают энтальпию  $h_2$ , исходя из теплового баланса оборудования;

- если точка пересечения изоэнтальпии  $h_2$  с линией влагосодержания  $d_1$  выше линии насыщенного влажного воздуха, то принимают  $\xi = 1$  в связи с отсутствием конденсации водяных паров;
- в противном случае определяют температуру насыщенного влажного воздуха  $t_2''$ , при которой его энтальпия соответствует энтальпии  $h_2$ ;
- находят температуру воздуха на выходе:

$$t_2 = t_2'' + \Delta t, \quad (15.13a)$$

где увеличение температуры  $\Delta t$  принимают в пределах от 0,2 до 0,5 °С;

- рассчитывают коэффициент влаговываждения по уравнению (4.13).

При расчетах пользуются условным коэффициентом теплоотдачи, характерным для «мокрого» теплообмена:

$$\alpha_m = \xi \alpha_c, \quad (15.14)$$

где  $\alpha_c$  – коэффициент теплоотдачи в условиях «сухого» теплообмена.

При расчете параметров влажного воздуха используют следующие уравнения:

$$c_{вл} = 1,006 + 0,00187d, \quad (15.15)$$

где  $d$  – влагосодержание, г/кг;

$$d = \frac{\varphi}{100} d'' \frac{B - P''_{п}}{B - P_{п}}, \quad (15.16)$$

где  $\varphi$  – относительная влажность воздуха, %;

$d''$  – влагосодержание насыщенного влажного воздуха, г/кг;

$P''_{п}$  – парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре воздуха, кПа;

$P_{п}$  – парциальное давление водяного пара в составе воздуха, Па,

$$P_{п} = \frac{\varphi}{100} P''_{п}; \quad (15.16a)$$

$$h = h_c + \frac{\varphi}{100}(h''_{\text{вл}} - h_c), \quad (15.17)$$

где  $h_c$  и  $h''_{\text{вл}}$  – энтальпии сухого и влажного насыщенного воздуха при температуре влажного воздуха, кДж/кг;

$$\rho_{\text{вл}} = \rho_c \frac{1 + 0,001d}{1 + 0,00161d}, \quad (15.18)$$

где  $\rho_c$  – плотность сухого воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Теплопроводность и вязкость принимают как для сухого воздуха.

Теплофизические свойства воздуха приведены в приложении В.

### Задачи

15.1. Определить массу испаряющейся воды со смоченной поверхности площадью 0,8 м<sup>2</sup>.

Параметры воздуха: температура  $t_0 = 15$  °С, относительная влажность  $\varphi = 70$  %. Температура поверхности испарения  $t_w = 12$  °С. Время испарения – 8 ч.

**Решение.** Принимаем процесс массообмена при естественном движении воздуха.

Выписываем из приложения В теплофизические свойства воздуха при температуре 15 °С:

– теплопроводность  $\lambda = 2,55 \times 10^{-2}$  Вт/(м·К);

– вязкость  $\nu = 15,14 \times 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

При средней температуре пограничного слоя  $t_{\text{ср}} = \frac{15+12}{2} = 13,5$  °С определяем коэффициент диффузии по уравнению (15.6), приняв  $B = 100$  кПа:

$$D = 9 \times 10^{-8} \frac{(273,15 + 13,5)^{1,8}}{100} = 2,38 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Определяющий геометрический размер

$$l = \sqrt{S} = \sqrt{0,8} = 0,89 \text{ м.}$$

Число Архимеда по уравнению (15.5) с учетом зависимости (15.5а):

$$Ar = \frac{9,81 \times 0,89^3}{(15,14 \times 10^{-6})^2} \times \frac{15 - 12}{273 + 15} = 3,14 \times 10^8.$$

Диффузионное число Прандтля

$$Pr_D = \frac{15,14 \times 10^{-6}}{2,38 \times 10^{-5}} = 0,64.$$

Произведение  $Ar Pr_D = 3,14 \times 10^8 \times 0,64 = 2 \times 10^8$ .

Диффузионное число Нуссельта по формуле (15.4):

$$Nu_D = 0,66(2 \times 10^8)^{0,26} = 95,02.$$

Коэффициент массообмена

$$\beta = \frac{Nu_D D}{l_0} = \frac{95,02 \times 2,38 \times 10^{-5}}{0,89} = 2,54 \times 10^{-3} \text{ м/с.}$$

Коэффициент массоотдачи по уравнению (15.2):

$$\beta_P = \frac{2,54 \times 10^{-3}}{461(273 + 12)} = 1,93 \times 10^{-8} \text{ с/м.}$$

Для водяного пара  $R_0 = 461 \text{ Дж/(кг·К)}$ .

Парциальные давления водяного пара на линии насыщения по приложению В:

– при  $t_W = 12 \text{ °C}$       $P_{I\ W}'' = 1401 \text{ Па}$ ;

– при  $t_0 = 15 \text{ °C}$       $P_{I\ 0}'' = 1704 \text{ Па}$ .

Парциальное давление водяного пара в составе влажного воздуха:

$$P_{I0} = \frac{\varphi}{100} P_{I0}'' = \frac{70}{100} \times 1704 = 1193 \text{ Па.}$$

Массовый расход испаряемой влаги по зависимости (15.1):

$$m_t = 1,93 \times 10^{-8} (1401 - 1193) 0,8 = 3,22 \times 10^{-6} \text{ кг/с} = 1,16 \times 10^{-2} \text{ кг/ч.}$$

Масса испаряемой влаги

$$m = m_t \tau = 1,16 \times 10^{-2} \times 8 = 0,093 \text{ кг.}$$

15.2. Выполнить расчет массообмена в условиях задачи 15.1 при вынужденной конвекции воздуха у поверхности испарения. Скорость воздуха  $w = 0,8$  м/с, определяющий геометрический размер  $l_0 = 0,89$  м.

**Решение.** Число Рейнольдса

$$Re = \frac{0,8 \times 0,89}{15,14 \times 10^{-6}} = 47000.$$

Диффузионное число Нуссельта по формуле (15.7) с учетом принятых коэффициентов

$$Nu_d = 0,0248 \times 0,64^{0,33} \times 47000^{0,9} \left( \frac{15 - 12}{273 + 15} \right)^{0,135} = 185.$$

Коэффициент массообмена

$$\beta = \frac{185 \times 2,38 \times 10^{-5}}{0,89} = 4,95 \times 10^{-3} \text{ м/с.}$$

Коэффициент массоотдачи

$$\beta_P = \frac{4,95 \times 10^{-3}}{461 \times 285} = 3,77 \times 10^{-8} \text{ с/м.}$$

Массовый расход

$$m_t = 3,77 \times 10^{-8} \times (1401 - 1193) \times 0,8 = 6,27 \times 10^{-6} \text{ кг/с} = 2,26 \times 10^{-2} \text{ кг/ч.}$$

Масса испаряемой влаги

$$m = 2,26 \times 10^{-2} \times 8 = 0,18 \text{ кг.}$$

15.3. В открытой ванне находится нагретая вода температурой  $4^\circ\text{C}$ . Температура окружающего воздуха равна  $20^\circ\text{C}$ , его относительная влажность –  $60\%$ . Площадь поверхности испарения –  $0,15 \text{ м}^2$ .

Рассчитать массовый расход испаряемой влаги в условиях свободного движения воздуха. При расчете принять температуру поверхности испарения равной  $51^\circ\text{C}$ . Атмосферное давление  $B = 101 \text{ кПа}$ .

15.4. Как изменится расход испаряемой влаги в условиях предыдущей задачи при переходе к вынужденному движению воздуха со скоростью  $3 \text{ м/с}$ . Определяющий размер принять равным  $0,4 \text{ м}$ , а температуру воздуха по «мокрому» термометру  $t_{\text{м}} = 15,5^\circ\text{C}$ . При расчете использовать уравнение (4.7).

15.5. Выполнить расчет по условиям задачи 15.4, определив коэффициент массоотдачи по формуле (15.12).

15.6. Определить расход испаряющейся влаги с поверхности испарения площадью  $0,5 \text{ м}^2$ . Подвижность воздуха у поверхности испарения  $2,5 \text{ м/с}$ , температура воздуха  $20^\circ\text{C}$ , его относительная влажность  $65\%$ , температура поверхности испарения  $16^\circ\text{C}$ . Давление воздуха  $B = 100 \text{ кПа}$ . Определяющий размер принять равным  $0,25 \text{ м}$ .

15.7. Открытая поверхность воды площадью  $0,8 \text{ м}^2$  обдувается воздухом со скоростью  $1,5 \text{ м/с}$ .

Определить массу влаги, испаряющейся за  $1,5 \text{ ч}$ . Температура поверхности испарения  $t_{\text{ш}} = 35^\circ\text{C}$ , температура воздуха  $t_0 = 22^\circ\text{C}$ , его относительная влажность  $50\%$ . Определяющий размер  $0,2 \text{ м}$ .

Расчет выполнить в двух вариантах, определяя коэффициент массообмена (массоотдачи) по формулам (15.7) и (15.12).

Температура воздуха по «мокрому» термометру  $t_{\text{м}} = 16^\circ\text{C}$ .

15.8. Вода в водоеме нагревается в солнечный день, и температура ее поверхности в вечернее время составляет  $25^\circ\text{C}$ . Температура воздуха над водо-

емом  $t_B = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ , его относительная влажность  $\varphi = 50 \%$ . Скорость воздуха у поверхности воды  $2 \text{ м/с}$ , а длина водоема в направлении движения воздуха  $15 \text{ м}$ .

Определить тепловой поток с площади  $10 \text{ м}^2$ .

**Решение.** Используем аналогию с процессами теплообмена.

Выписываем теплофизические свойства влажного воздуха при  $t_B = 18^\circ\text{C}$ , принимаем их как для сухого воздуха, что допустимо при низких температурах воздуха:

$$\lambda = 2,56 \times 10^{-2} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}; \nu = 15,4 \times 10^{-6} \text{ м}^2\text{/с}; c_{\text{вл}} = 1 \text{ 000 Дж/(кг}\cdot\text{К)}; \text{Pr} = 0,71.$$

Число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{2 \times 15}{15,4 \times 10^{-6}} = 1,95 \times 10^6.$$

В этом случае режим омывания поверхности водоема является турбулентным. Теплообмен описывается уравнением [3]:  $Nu = 0,037 \text{ Re}^{0,8} \text{ Pr}^{0,43}$ , в котором определяющей температурой принимают температуру воздуха, а определяющим размером – размер в направлении движения воздуха:

$$Nu = 0,037(1,95 \times 10^6)^{0,8} \times (0,71)^{0,43} = 3440.$$

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{l} = 3440 \times \frac{2,56 \times 10^{-2}}{15} = 5,87 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Коэффициент испарения по формуле (15.11):

$$\sigma = 10^{-3} \times 1,15 \times \frac{5,87}{1} = 6,75 \times 10^{-3} \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)}.$$

где  $c_{\text{вл}} = 1 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ .

Выписываем из приложения В:

– при  $t_0 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$   $h_c = 18,11 \text{ кДж/кг}$ ;  $h''_{\text{вл}} = 51,31 \text{ кДж/кг}$ ;

– при  $t_W = 25 \text{ }^\circ\text{C}$   $h_c = 25,15 \text{ кДж/кг}$ ;  $h''_{\text{вл}} = 76,97 \text{ кДж/кг}$ .

Находим энтальпию влажного воздуха по формуле (15.17):

$$h_0 = 18,11 + \frac{50}{100} \times (51,31 - 18,11) = 34,7 \text{ кДж/кг};$$

$$h_W = h_{\text{вл}}'' = 76,97 \text{ кДж/кг}.$$

Тепловой поток по уравнению (15.9):

$$\Phi = 6,75 \times 10^{-3} \times (76,97 - 34,7) 10 \times 10^3 = 2850 \text{ Вт}.$$

15.9. По условию задачи 15.8 определить массовый расход испарившейся воды, используя аналогию с процессами теплообмена.

15.10. Ванна с открытой горизонтальной поверхностью размерами  $1,2 \times 2,5$  м содержит нагретую воду. Температура поверхности испарения  $t_W = 40$  °С, температура воздуха в помещении  $t_b = 25$  °С, его относительная влажность  $\varphi = 70$  %.

Определить тепловой поток с открытой поверхности в условиях свободной конвекции воздуха на основании уравнений (15.3) и (15.9).

При расчете использовать аналогию с процессами теплообмена. Коэффициент теплоотдачи находят при  $GrPr > 10^9$  по уравнению:

$$Nu = 0,195(Gr Pr)^{0,33},$$

в котором определяющая температура – температура воздуха, а определяющий размер – длина короткой стороны поверхности испарения [3].

15.11. Определить коэффициент влаговываждения при охлаждении воздуха температурой 32 °С и относительной влажностью 80 %. Состояние охлажденного воздуха характеризуется энтальпией 67 кДж/кг.

**Решение.** Определяем параметры воздуха перед охлаждением.

При  $t = 32$  °С находим по приложению В:

$$P_{\text{п}}'' = 4\,753,6 \text{ Па}; \quad d'' = 31,043 \text{ г/кг}; \quad h_c = 32,2 \text{ кДж/кг} \text{ и } h_{\text{вл}}'' = 111,69 \text{ кДж/кг}.$$

По уравнениям (15.15), (15.16) и (15.17):

$$P_{\text{п}} = \frac{80}{100} \times 4753,6 = 3800 \text{ Па} = 3,8 \text{ кПа};$$

$$d = \frac{80}{100} \times 31,043 \times \frac{100 - 4,75}{100 - 3,8} = 24,6 \text{ г/кг};$$

$$h = 32,2 + \frac{80}{100} \times (111,69 - 32,2) = 95,8 \text{ кДж/кг};$$

$$c_{\text{вл}} = 1,006 + 0,00187 \times 24,6 = 1,05 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

При  $h''_{\text{вл}} = h_2 = 67 \text{ кДж/кг}$  определяем по приложению В температуру насыщенного влажного воздуха  $t_2'' = 22,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Принимаем  $t_2 = 22,5 + 0,3 = 22,8 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Коэффициент влаговываждения по формуле (15.13):

$$\xi = \frac{95,8 - 67}{1,05 \times (32 - 22,8)} = 3.$$

15.12. Воздух температурой  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  и относительной влажностью  $80 \%$  охлаждается в теплоутилизаторе. Энтальпия воздуха на выходе  $h_2 = 15,6 \text{ кДж/кг}$ .

Определить коэффициент теплоотдачи в условиях конденсации водяных паров, если при «сухом» теплообмене  $\alpha_c = 42 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ .

15.13. Воздухом температурой  $18 \text{ }^\circ\text{C}$  и энтальпией  $43 \text{ кДж/кг}$  охлаждается до состояния при энтальпии  $28,3 \text{ кДж/кг}$ .

Определить коэффициент влаговываждения и изменение влагосодержания воздуха.

15.14. Воздух температурой  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  и относительной влажностью  $70 \%$  охлаждается до состояния при энтальпии  $39,5 \text{ кДж/кг}$ .

Определить коэффициент теплоотдачи, если в условиях «сухого» теплообмена  $\alpha_c = 50 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ .

## ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

- 2.1. 9,3 МДж.
- 2.2. 103 мм.
- 2.3. 1 090 Вт/м<sup>2</sup>; 828 °С.
- 2.5. 754 кДж.
- 2.6. 270 мм.
- 2.7. 22,9 Вт/м<sup>2</sup>; 11,24 °С; -19,3 °С.
- 2.8. 58,9 Вт/м<sup>2</sup>; 88,8 °С; 36,6 °С.
- 2.9. 164 Вт/м<sup>2</sup>; 175 °С; 46,8 °С.
- 2.10. 0,4 м; 0,15 м.
- 2.11. 126 мм; 184 °С.
- 2.13. 105 Вт/м; 159 °С.
- 2.14. 220 МДж.
- 2.15. 209 °С.
- 2.16. 52,7 А.
- 2.17. 65 мм.
- 2.18. 1 555 Вт.
- 2.19. 187,5 °С; 214 °С; 234,5 °С.
- 2.20. 513 Вт; 180 °С.
- 3.2. 5 760 Вт.
- 3.3. 4 320 Вт.
- 3.4. 30,7 А.
- 3.5. 460 Вт/м<sup>2</sup>.
- 3.6. 3 640 А.
- 3.7. 3 850 Вт/(м<sup>2</sup>·К); 6 860 Вт.
- 3.8. 2 750 Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- 3.10. 2 440 Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- 3.11. 11 820 Вт/(м<sup>2</sup>·К); 47,3 кВт.
- 3.12. 4 °С; 56 °С.
- 3.14. 12,5 Вт/(м<sup>2</sup> К).
- 4.2. 388,2 °С; 364,8 °С.
- 4.3. 138,5 °С; 130,9 °С; 298,3 °С; 294,3 °С.
- 4.4. 2 535 Вт; 12,2 °С; -22,8 °С.
- 4.5. 102 мм.
- 4.6. 27 мм.
- 4.7. 6,15 кг.
- 4.8. 44,4 Вт/м<sup>2</sup>; 12,9 °С; 11,5 °С; -21,6 °С; - 23,1 °С.
- 4.10. 119 Вт/м; 194,5 °С; 79,1 °С; 24,4 °С.
- 4.11. 144,2 Вт/м; 194,5 °С; 114,5 °С; 25,4 °С.
- 4.12. 44,9 Вт/м; 80 °С; -20,2 °С.
- 4.13. 5,1 °С.
- 5.1. 71,4 кВт/м<sup>2</sup>.
- 5.2. 10,45 кВт.
- 5.3. 3,5 кВт.

- 5.4.  $1\,140\text{ Вт/м}^2$ .  
 5.5.  $0,23\text{ Вт}$ .  
 5.6.  $8,4\text{ Вт}$ .  
 5.7.  $2\,440\text{ Вт/м}^2$ .  
 5.8.  $32\text{ кВт/м}^2$ ;  $716\text{ }^\circ\text{C}$ .  
 5.9.  $146\text{ Вт/м}^2$ ;  $255\text{ }^\circ\text{C}$ .  
 5.10.  $141\text{ Вт/м}^2$ ;  $257\text{ }^\circ\text{C}$ .  
 5.11.  $0,16$ .  
 5.12.  $344\text{ }^\circ\text{C}$ .  
 6.1.  $153,7\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $214,7\text{ }^\circ\text{C}$ .  
 6.2.  $21,6\text{ }^\circ\text{C}$ .  
 6.3.  $121,4\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $140,8\text{ }^\circ\text{C}$ .  
 6.5.  $33,9\text{ м}^2$ ;  $25,9\text{ м}^2$ .  
 6.6.  $3,6\text{ м}^2$ .  
 6.7.  $280\text{ кг/ч}$ ;  $2,5\text{ м}^2$ .  
 6.8.  $65\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $55\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $2,03\text{ м}^2$ .  
 6.9.  $12,8\text{ м}^2$ .  
 6.10.  $417\text{ м}^2$ ;  $140\text{ }^\circ\text{C}$ .  
 6.11.  $845\text{ Вт/(м}^2\text{ К)}$ .  
 6.13.  $445\text{ кг/ч}$ ;  $1\,660\text{ Вт/(м}^2\text{ К)}$ .  
 6.14.  $70\text{ кг/ч}$ ;  $2,1\text{ м}^2$ .  
 6.15.  $12,9\text{ м}$ .  
 7.1.  $0,86$  и  $0,49$ .  
 7.2.  $0,45$ .  
 7.3.  $0,6$ .  
 7.4.  $51\text{ Вт/(м}^2\text{ К)}$ .  
 7.6.  $1\,240\text{ Вт}$ .  
 7.7.  $71,9\text{ }^\circ\text{C}$ .  
 7.8.  $47\text{ мм}$ .  
 7.9.  $1\,510\text{ Вт}$ .  
 7.10.  $74,3\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $8\,600\text{ Вт}$ ;  $670\text{ Вт}$ ;  
 7.11. В  $3,8$  раза.  
 7.12.  $1\,760\text{ Вт}$ .  
 7.13.  $2\,240\text{ Вт}$ .  
 8.1.  $85,6\text{ Вт/(м}^2\text{ К)}$ .  
 8.2.  $73\text{ Вт/(м}^2\text{ К)}$ .  
 8.3.  $1\,600\text{ Вт}$ .  
 8.4.  $220\text{ Вт}$ .  
 8.5.  $1\,070\text{ Вт}$ .  
 8.6.  $1\,370\text{ Вт/м}^2$ ;  $12\,300\text{ Вт/м}^2$ .  
 8.7.  $85\text{ Вт/(м}^2\text{ К)}$ .  
 9.1.  $220\text{ Вт/м}$ ;  $720$  и  $721\text{ }^\circ\text{C}$ .  
 9.2.  $37,5$  и  $38,4\text{ }^\circ\text{C}$ .  
 9.3.  $172,7$  и  $217,3\text{ }^\circ\text{C}$ .  
 9.4.  $604$  и  $604,7\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $153\text{ Вт/м}$ .

- 9.5. 80 и 80,1 °С.
- 9.6. 600 кВт/м<sup>3</sup>; 1 500 Вт/(м<sup>2</sup>·К); 550 °С.
- 9.7. 14,2 Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- 10.1. 95 °С.
- 10.2. 132,5 КТ/м; 30,6 °С.
- 10.3. 2,06 м.
- 10.4. 1,38 и 0,68 м; 7,73 и 7,63 м.
- 10.5. 34,5 и 12,5 °С.
- 10.6. 27,9 °С; 20,8 °С; 17,3 °С; 16,3 и 16,1 °С.
- 10.7. 18,9 °С; 18,5 °С; 17,4 °С; 16,5 и 16,2 °С.
- 10.8. 222 Вт/м<sup>2</sup>.
- 10.9. 71,9 °С.
- 11.2. 490 с; 828 °С; 96,5 МДж.
- 11.3. 61,5 °С; 40 °С.
- 11.4. -4 °С; 13,5 °С.
- 11.5. 77 °С.
- 11.6. 33 ч; 9,5 МДж; -2,2 °С; 12 ч.
- 11.7. 432 °С; 383 °С.
- 11.8. 201 °С; 361 °С; 12,4 МДж.
- 11.9. 84 °С; 133 °С; 16,1 МДж.
- 11.11. 4 с; 530 °С.
- 11.12. 2 500 с; 0,3 °С.
- 11.13. 5,1 ч.
- 11.14. 26,5 ч.
- 11.15. 24 ч; 3 ч.
- 11.16. 4 ч.
- 11.17. 1 710 с.
- 12.1. 55 Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- 12.2. 250 Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- 12.3. 130 Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- 12.4. 78 Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- 12.6. 250 Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- 12.7. 13 кг.
- 13.2. 60 500 Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- 13.3. 159 °С.
- 13.4. 79 000 и 83 500 Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- 13.6. 0,7 м<sup>2</sup>.
- 13.7. 250 А.
- 13.8. 1,1 кг/с.
- 13.9. 16 500 Вт/(м<sup>2</sup>·К); 0,5 кг/с.
- 13.10. 18 м<sup>2</sup>.
- 13.11. 12,3 °С.
- 13.13. 11 000 Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- 13.14. 23 200 Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- 13.15. 202 °С.

- 14.1. 10 500 и 10 700 Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- 14.2. 4 600 и 5 250 Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- 14.3. 19,5 кг.
- 14.4. Увеличатся в 1,07 и 1,15 раза.
- 14.6. 6 950 Вт/(м<sup>2</sup>·К); 60 кг/ч.
- 14.7. 17 200 Вт/(м<sup>2</sup>·К); 10,3 кг.
- 14.8. 8 900 Вт/(м<sup>2</sup> К).
- 14.9. 0,134 мм; 0,16 мм; 0,176 и 0,19 мм; 4 700, 3 940, 3 600 и 3 300 Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- 14.10. 0,076 мм; 0,114 мм; 0,135 мм; 0,15 и 0,16 мм; 8 200, 5 450, 4 600, 4 150 и 3 850 Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- 14.11. 114,3 °С; 16 600 Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- 14.12. 130 кг/ч.
- 14.13. 167 кг/ч.
- 14.14. 9 560 и 9 740 Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- 15.3. 0,1 кг/ч.
- 15.4. 0,36 кг/ч.
- 15.5. 0,43 кг/ч.
- 15.6. 0,066 кг/ч.
- 15.7. 1,8 кг; 2 кг.
- 15.9. 3,4 кг/ч.
- 15.10. 1 800 Вт; 1 900 Вт.
- 15.12. 66 Вт/(м<sup>2</sup>·К).
- 15.13. 1,8; 2,6 г/кг.
- 15.14. 88 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Авчухов, В.В. Задачник по процессам тепломассообмена [Текст] : учеб. пособие для вузов / В.В. Авчухов, Б.Я. Паюсте. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.: ил.
2. Данилова, Г.Н. Сборник задач по процессам теплообмена в пищевой и холодильной промышленности [Текст] : учеб. пособие для вузов / Г.Н. Данилова [и др.]. – Москва : Агропромиздат, 1986. – 288 с.: ил.
3. Исаченко, В.П. Теплопередача [Текст] : учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 416 с.: ил.
4. Краснощеков, Е.А. Задачник по теплопередаче [Текст] : учеб. пособие для вузов / Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. – Москва : Энергия, 1980. – 288 с.: ил.
5. Промышленные тепломассообменные процессы и установки [Текст] : учебник для вузов/ А.М. Бакластов [и др.]; под ред. А.И. Бакластова. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.: ил.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Титульный лист расчетно-графической работы

---

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра энергетики

Расчетно-графическая работа №

по дисциплине «Теплопередача»

Студент (подпись)  
(дата)

Группа (номер)  
Должность преподавателя,  
ученая степень,  
ученое звание

(инициалы и фамилия)

Номер зачетной книжки (номер)  
(подпись) (инициалы и фамилия)  
(дата)

Минск  
2007

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Теплофизические свойства материалов и веществ

Таблица Б.1 – Технические материалы

| Наименование материала  | $t$ ,<br>°С | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $\lambda$ ,<br>Вт/(м·К) | $c$ ,<br>кДж/(кг·К) |
|-------------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------|---------------------|
| Бетон с каменным щебнем | 20          | 2 400                         | 1,74                    | 0,84                |
| Грунт:                  |             |                               |                         |                     |
| подзолистый             | 20          | 1 500                         | 0,73                    | 0,96                |
| суглинок                | 20          | 1 960                         | 1,5                     | 1,15                |
| Дерево поперек волокон  | 20          | 500                           | 0,14                    | 2,7                 |
| Дюралюминий             | 100         | 2 800                         | 180                     | 0,88                |
| Железобетон             | 20          | 2 200                         | 1,5                     | 0,84                |
| Кладка из кирпича:      |             |                               |                         |                     |
| красного глиняного      | 20          | 1 800                         | 0,7                     | 0,88                |
| силикатного             | 20          | 1 800                         | 0,76                    | 0,84                |
| Масло трансформаторное  | 50          | 850                           | 0,108                   | 1,85                |
| Медь                    | 20 ÷ 100    | 8 900                         | 395                     | 0,39                |
| Латунь                  | 20          | 8 500                         | 110                     | 0,39                |
| Накипь                  | 100         | 500                           | 0,25                    | –                   |
| Пленка полиэтиленовая   | 20          | –                             | 0,28                    | –                   |
| Сажа                    | 40          | 150                           | 0,09                    | –                   |
| Резина техническая      | 20          | 1 200                         | 0,16                    | 1,4                 |
| Снег уплотненный        | –           | 350                           | 0,35                    | 2,1                 |
| Сталь:                  |             |                               |                         |                     |
| углеродистая            | 20          | 7 800                         | 50                      | 0,46                |
|                         | 500         | 7 800                         | 45                      | 0,68                |
| высоколегированная      | 20          | 7 800                         | 15                      | 0,5                 |
|                         | 500         | 7 800                         | 22                      | 0,58                |
|                         | 1 000       | 7 800                         | 25                      | 0,58                |
| Фанера                  | 20          | 600                           | 0,15                    | –                   |
| Фарфор                  | 100         | 2 400                         | 1,04                    | 0,9                 |
| Чугун                   | 400         | 7 600                         | 48                      | 0,54                |
| Шлакобетон              | 20          | 1 400                         | 0,67                    | 0,75                |
| Штукатурка              | 20          | 1 800                         | 0,93                    | –                   |

Таблица Б.2 – Теплоизоляционные и огнеупорные материалы  
и изделия при положительных температурах

| Материалы и изделия  | Марка<br>(плотность,<br>кг/м <sup>3</sup> ) | $\lambda_0$ ,<br>Вт/(м·К) | $b$ ,<br>Вт/(м·К·°С) | Температура<br>применения,<br>°С,<br>не более |
|----------------------|---|---------------------------|----------------------|---|
| Крошка диатомитовая  | 600   | 0,113                     | 0,00023              | 600   |
| Маты минераловатные  | 100   | 0,045                     | 0,00021              | 450   |
| Пенополистирол       | 100   | 0,06                      | –                    | 60  |
| Пеношамот            | 600   | 0,28                      | 0,00023              | 1350  |
| Плиты минераловатные | 75  | 0,043                     | 0,00022              | 400   |

Таблица Б.3 – Трансформаторное масло

| $t$ ,<br>°С | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $c_p$ ,<br>кДж/(кг·К) | $\lambda$ ,<br>Вт/(м·К) | $\nu \times 10^6$ ,<br>м <sup>2</sup> /с | $\beta_T \times 10^4$ ,<br>К <sup>-1</sup> | Pr   |
|-------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|--|--|------|
| 10          | 886,4                         | 1,620                 | 0,1115                  | 37,9                                     | 6,85                                       | 484  |
| 20          | 880,3                         | 1,666                 | 0,1106                  | 22,5                                     | 6,90                                       | 298  |
| 30          | 874,2                         | 1,729                 | 0,1098                  | 14,7                                     | 6,95                                       | 202  |
| 40          | 868,2                         | 1,788                 | 0,1090                  | 10,3                                     | 7,00                                       | 146  |
| 50          | 862,1                         | 1,846                 | 0,1082                  | 7,58                                     | 7,05                                       | 111  |
| 60          | 856,0                         | 1,905                 | 0,1072                  | 5,78                                     | 7,10                                       | 87,8 |
| 70          | 850,0                         | 1,964                 | 0,1064                  | 4,54                                     | 7,15                                       | 71,3 |
| 80          | 843,9                         | 2,026                 | 0,1056                  | 3,66                                     | 7,20                                       | 59,3 |
| 90          | 837,8                         | 2,085                 | 0,1047                  | 3,03                                     | 7,25                                       | 50,5 |
| 100         | 831,8                         | 2,144                 | 0,1038                  | 2,56                                     | 7,30                                       | 43,9 |
| 110         | 825,7                         | 2,202                 | 0,1030                  | 2,20                                     | 7,35                                       | 38,8 |
| 120         | 819,6                         | 2,261                 | 0,1022                  | 1,92                                     | 7,40                                       | 34,9 |

Таблица Б.4 – Вода при температурах ниже температуры насыщения

| $t$ ,<br>°C | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $c_p$ ,<br>кДж/(кг·К) | $\lambda$ ,<br>Вт/(м·К) | $\nu \times 10^6$ ,<br>м <sup>2</sup> ·с | $\beta$ ,<br>1/К | Pr   |
|-------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|--|------------------|------|
| 0           | 1 000                         | 4,21                  | 0,55                    | 1,79                                     | –                | 13,3 |
| 10          | 1 000                         | 4,19                  | 0,58                    | 1,31                                     | 0,0007           | 9,43 |
| 20          | 1 000                         | 4,18                  | 0,60                    | 1,00                                     | 0,00018          | 7,02 |
| 30          | 995                           | 4,18                  | 0,62                    | 0,81                                     | 0,00032          | 5,42 |
| 40          | 990                           | 4,18                  | 0,635                   | 0,66                                     | 0,00039          | 4,33 |
| 50          | 990                           | 4,18                  | 0,65                    | 0,56                                     | 0,00045          | 3,55 |
| 60          | 985                           | 4,18                  | 0,66                    | 0,48                                     | 0,00051          | 2,98 |
| 70          | 980                           | 4,19                  | 0,67                    | 0,41                                     | 0,00057          | 2,55 |
| 80          | 970                           | 4,20                  | 0,67                    | 0,37                                     | 0,00063          | 2,22 |
| 90          | 970                           | 4,20                  | 0,675                   | 0,325                                    | 0,00069          | 1,95 |
| 100         | 960                           | 4,21                  | 0,68                    | 0,295                                    | 0,00075          | 1,75 |
| 110         | 952                           | 4,22                  | 0,685                   | 0,27                                     | 0,00081          | 1,58 |
| 120         | 944                           | 4,24                  | 0,685                   | 0,252                                    | 0,00086          | 1,47 |
| 130         | 935                           | 4,26                  | 0,685                   | 0,233                                    | 0,00092          | 1,36 |
| 140         | 928                           | 4,28                  | 0,685                   | 0,215                                    | 0,00097          | 1,26 |
| 150         | 918                           | 4,30                  | 0,68                    | 0,203                                    | 0,00103          | 1,17 |
| 160         | 908                           | 4,33                  | 0,68                    | 0,19                                     | 0,00107          | 1,1  |
| 170         | 900                           | 4,37                  | 0,68                    | 0,18                                     | 0,00113          | 1,02 |
| 180         | 887                           | 4,42                  | 0,675                   | 0,173                                    | 0,00119          | 1,0  |
| 200         | 863                           | 4,50                  | 0,66                    | 0,158                                    | 0,00133          | 0,93 |

Таблица Б.5 – Молоко при атмосферном давлении

| $t$ ,<br>°C | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $c_p$ ,<br>кДж/(кг·К) | $\lambda$ ,<br>Вт/(м·К) | $\nu \times 10^6$ ,<br>м <sup>2</sup> ·с | Pr    |
|-------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|--|-------|
| 0           | 1 040                         | 3,85                  | 0,52                    | 2,98                                     | 22,92 |
| 10          | 1 033                         | 3,88                  | 0,531                   | 2,393                                    | 18,12 |
| 20          | 1 028                         | 3,94                  | 0,542                   | 1,74                                     | 12,99 |
| 30          | 1 024                         | 3,94                  | 0,553                   | 1,3                                      | 9,49  |
| 40          | 1 020                         | 3,96                  | 0,564                   | 1,02                                     | 7,29  |
| 50          | 1 015                         | 3,97                  | 0,575                   | 0,837                                    | 5,85  |
| 60          | 1 010                         | 3,98                  | 0,586                   | 0,703                                    | 4,82  |
| 70          | 1 005                         | 3,99                  | 0,597                   | 0,617                                    | 4,14  |
| 80          | 1 000                         | 4,0                   | 0,608                   | 0,57                                     | 3,75  |
| 90          | 993                           | 4,0                   | 0,619                   | 0,55                                     | 3,53  |

Таблица Б.6а – Сельскохозяйственная продукция

| Продукт         | Масса ягоды (плода), г | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $d_3$ , мм | Влажность, % | $\lambda$ , Вт/(м·К) |
|-----------------|------------------------|----------------------------|------------|--------------|----------------------|
| Абрикосы        | 35                     | 1 030                      | 35 ÷ 45    | 86,9         | 0,57                 |
| Вишня           | 2,6 ÷ 3,5              | 1 060                      | 16 ÷ 19    | 73,1         | 0,57                 |
| Горошек зеленый | 1,2                    | 1 020                      | 12 ÷ 14    | 75,1         | 0,6                  |
| Клубника:       |                        |                            |            |              |                      |
| мелкая          | 2,2                    | 900                        | 14 ÷ 18    | 90           | 0,5                  |
| средняя         | 8,5                    | 900                        | 20 ÷ 30    | 90           | 0,5                  |
| крупная         | 45                     | 900                        | 40 ÷ 50    | 90           | 0,5                  |
| Клюква          | 0,8 ÷ 1,8              | 980                        | 10 ÷ 15    | 87,4         | 0,5                  |
| Слива           | 18 ÷ 23                | 1 040                      | 30 ÷ 35    | 85,7         | 0,55                 |
| Смородина       | 0,6 ÷ 1,2              | 1 000                      | 10 ÷ 15    | 84,7         | 0,5                  |
| Фасоль          | 1,8 ÷ 2,2              | 950                        | 15 ÷ 19    | 88,9         | 0,6                  |
| Черника         | 1 ÷ 1,5                | 1 000                      | 10 ÷ 12    | 82,3         | 0,5                  |
| Капуста         | –                      | 1 030                      | –          | 90           | 1,1                  |
| Картофель       | –                      | 1 100                      | –          | 75 ÷ 85      | 0,61                 |
| Яблоки          | –                      | 800                        | –          | 83 ÷ 88      | 0,55                 |
| Говядина        | –                      | 1 050                      | –          | 57 ÷ 78      | 0,51                 |

Таблица Б.6б – Сельскохозяйственная продукция

| Продукт         | $c$ , кДж/(кг·К) |               | $t_{кр}$ , °С | $r_l$ , кДж/кг | $\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup> |
|-----------------|------------------|---------------|---------------|----------------|------------------------------|
|                 | свежего          | замороженного |               |                |                              |
| Абрикосы        | 3,77             | 1,92          | –1,0          | 285            | 550                          |
| Вишня           | 3,52             | 2,52          | –3,5          | 281            | 560                          |
| Горошек зеленый | 3,56             | 1,96          | –0,9          | 298            | 650                          |
| Клубника:       |                  |               |               |                |                              |
| мелкая          | 3,85             | 1,75          | –0,85         | 298            | 420                          |
| средняя         | 3,85             | 1,75          | –0,85         | 298            | 420                          |
| крупная         | 3,85             | 1,75          | –0,85         | 298            | 420                          |
| Клюква          | 3,77             | 1,92          | –0,9          | 289            | 540                          |
| Слива           | 3,68             | 2,38          | –1,7          | 335            | 600                          |
| Смородина       | 3,68             | 1,88          | –1,0          | 281            | 550                          |
| Фасоль          | 3,81             | 1,96          | –0,8          | 298            | 420                          |
| Черника         | 3,6              | 1,9           | –1,4          | 277            | 600                          |
| Капуста         | 4,08             | –             | –             | –              | 430                          |
| Картофель       | 3,48             | –             | –             | –              | 650                          |
| Яблоки          | 3,77             | –             | –             | –              | 500                          |
| Говядина        | 3,57             | –             | –1,0          | –              | –                            |

Таблица Б.7 – Энтальпия продуктов, кДж/кг

| $t$ ,<br>°С | Говядина,<br>мясо птицы | Виноград,<br>абрикосы, слива | Фрукты и плоды<br>других видов |
|-------------|-------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| -20         | 0                       | 0                            | 0                              |
| -18         | 4,6                     | 7,5                          | 6,7                            |
| -15         | 13,0                    | 20,6                         | 17,2                           |
| -10         | 30,2                    | 49,8                         | 38,5                           |
| -5          | 51,3                    | 116,0                        | 82,9                           |
| -3          | 75,3                    | 202,0                        | 139,0                          |
| -2          | 98,8                    | 229,0                        | 211,0                          |
| -1          | 185,5                   | 232,6                        | 267,9                          |
| 0           | 239,2                   | 235,8                        | 271,7                          |
| 5           | 246,8                   | 253,5                        | 290,5                          |
| 10          | 264,5                   | 271,8                        | 308,8                          |
| 15          | 280,4                   | 289,6                        | 328,0                          |
| 20          | 296,8                   | 307,0                        | 346,0                          |
| 25          | 312,0                   | 325,5                        | 365,6                          |

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Теплофизические свойства воздуха

Таблица В.1 – Сухой воздух при давлении 98,1 кПа

| $t$ ,<br>°C | $\rho$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $c_p$ ,<br>кДж/(кг·К) | $\lambda$ ,<br>Вт/(м·К) | $\nu \times 10^6$ ,<br>м <sup>2</sup> ·с | $\beta$ ,<br>1/К | Pr   |
|-------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|--|------------------|------|
| -50         | 1,53                          | 1,01                  | 0,0204                  | 9,23                                     | 0,0045           | 0,72 |
| -20         | 1,35                          | 1,00                  | 0,0228                  | 11,97                                    | 0,004            | 0,71 |
| 0           | 1,25                          | 1,00                  | 0,0244                  | 13,75                                    | 0,0037           | 0,71 |
| 10          | 1,21                          | 1,00                  | 0,0251                  | 14,66                                    | 0,0035           | 0,71 |
| 20          | 1,17                          | 1,00                  | 0,0258                  | 15,61                                    | 0,0034           | 0,71 |
| 30          | 1,13                          | 1,00                  | 0,0265                  | 16,38                                    | 0,0033           | 0,71 |
| 40          | 1,09                          | 1,00                  | 0,0272                  | 17,57                                    | 0,0032           | 0,71 |
| 50          | 1,06                          | 1,00                  | 0,0279                  | 18,58                                    | 0,0031           | 0,71 |
| 60          | 1,03                          | 1,01                  | 0,0286                  | 19,6                                     | 0,0030           | 0,71 |
| 70          | 1,0                           | 1,01                  | 0,0292                  | 20,05                                    | 0,0029           | 0,71 |
| 80          | 0,97                          | 1,01                  | 0,0299                  | 21,74                                    | 0,0028           | 0,71 |
| 90          | 0,94                          | 1,01                  | 0,0306                  | 22,82                                    | 0,00275          | 0,71 |
| 100         | 0,92                          | 1,01                  | 0,0312                  | 23,91                                    | 0,0027           | 0,71 |
| 150         | 0,81                          | 1,02                  | 0,0343                  | 29,83                                    | 0,0024           | 0,71 |
| 200         | 0,72                          | 1,03                  | 0,0374                  | 36,03                                    | 0,0021           | 0,71 |
| 250         | 0,65                          | 1,03                  | 0,0406                  | 42,75                                    | 0,0019           | 0,71 |
| 300         | 0,59                          | 1,05                  | 0,0437                  | 49,87                                    | 0,0017           | 0,71 |
| 350         | 0,55                          | 1,06                  | 0,0464                  | 57,33                                    | 0,0016           | 0,72 |
| 400         | 0,51                          | 1,07                  | 0,0491                  | 65,22                                    | 0,0015           | 0,72 |
| 500         | 0,44                          | 1,09                  | 0,0545                  | 81,85                                    | 0,0013           | 0,72 |

Таблица В.2 – Влажный воздух при давлении 100 кПа

| $t$ ,<br>°C | $P''$ ,<br>Па | $d''$ ,<br>г/кг | $c''_{\text{вл}}$ ,<br>кДж/(кг·К) | $h_c$ ,<br>кДж/кг | $h''_{\text{вл}}$ ,<br>кДж/кг | $\rho_c$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $\rho''_{\text{вл}}$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> |
|-------------|---------------|-----------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------------------|---------------------------------|---|
| -30         | 37,33         | 0,232           | 1,0064                            | -30,18            | -29,61                        | 1,434                           | 1,434                                       |
| -29         | 41,46         | 0,258           | 1,0065                            | -29,17            | -28,54                        | 1,428                           | 1,428                                       |
| -28         | 46,00         | 0,286           | 1,0065                            | -28,17            | -27,47                        | 1,422                           | 1,422                                       |
| -27         | 51,06         | 0,318           | 1,0066                            | -27,16            | -26,38                        | 1,416                           | 1,416                                       |
| -26         | 56,39         | 0,351           | 1,0067                            | -26,16            | -25,30                        | 1,411                           | 1,410                                       |
| -25         | 62,80         | 0,391           | 1,0067                            | -25,15            | -24,19                        | 1,405                           | 1,405                                       |
| -24         | 69,46         | 0,432           | 1,0068                            | -24,14            | -23,08                        | 1,399                           | 1,399                                       |
| -23         | 76,79         | 0,478           | 1,0069                            | -23,14            | -21,96                        | 1,394                           | 1,393                                       |
| -22         | 84,79         | 0,528           | 1,0069                            | -22,13            | -20,83                        | 1,388                           | 1,388                                       |
| -21         | 93,46         | 0,582           | 1,0071                            | -21,13            | -19,69                        | 1,383                           | 1,383                                       |
| -20         | 102,9         | 0,641           | 1,0072                            | -20,12            | -18,54                        | 1,377                           | 1,377                                       |
| -19         | 113,3         | 0,706           | 1,0073                            | -19,11            | -17,37                        | 1,372                           | 1,371                                       |
| -18         | 124,6         | 0,776           | 1,0075                            | -18,11            | -16,19                        | 1,366                           | 1,366                                       |
| -17         | 136,9         | 0,853           | 1,0076                            | -17,10            | -15,00                        | 1,361                           | 1,360                                       |
| -16         | 150,4         | 0,937           | 1,0078                            | -16,10            | -13,78                        | 1,356                           | 1,355                                       |
| -15         | 165,0         | 1,028           | 1,0079                            | -15,09            | -12,55                        | 1,351                           | 1,350                                       |
| -14         | 180,9         | 1,127           | 1,0081                            | -14,08            | -11,30                        | 1,345                           | 1,344                                       |
| -13         | 198,1         | 1,235           | 1,0083                            | -13,08            | -10,02                        | 1,340                           | 1,339                                       |
| -12         | 216,9         | 1,352           | 1,0085                            | -12,07            | -8,72                         | 1,335                           | 1,334                                       |
| -11         | 237,3         | 1,480           | 1,0088                            | -11,07            | -7,40                         | 1,330                           | 1,329                                       |
| -10         | 259,4         | 1,618           | 1,0090                            | -10,06            | -6,04                         | 1,325                           | 1,324                                       |
| -9          | 283,3         | 1,767           | 1,0093                            | -9,05             | -4,66                         | 1,320                           | 1,318                                       |
| -8          | 309,4         | 1,931           | 1,0096                            | -8,05             | -3,25                         | 1,315                           | 1,313                                       |
| -7          | 337,6         | 2,107           | 1,0099                            | -7,04             | -1,80                         | 1,310                           | 1,308                                       |
| -6          | 368,1         | 2,298           | 1,0103                            | -6,04             | -0,31                         | 1,305                           | 1,303                                       |
| -5          | 401,0         | 2,504           | 1,0107                            | -5,03             | 1,21                          | 1,300                           | 1,298                                       |
| -4          | 436,8         | 2,729           | 1,0111                            | -4,02             | 2,78                          | 1,295                           | 1,293                                       |
| -3          | 475,4         | 2,971           | 1,0116                            | -3,02             | 4,40                          | 1,290                           | 1,288                                       |
| -2          | 517,1         | 3,233           | 1,0120                            | -2,01             | 6,06                          | 1,286                           | 1,283                                       |
| -1          | 562,1         | 3,516           | 1,0126                            | -1,01             | 7,78                          | 1,281                           | 1,278                                       |
| 0           | 610,8         | 3,823           | 1,0131                            | 0,0               | 9,56                          | 1,276                           | 1,273                                       |
| 1           | 656,6         | 4,111           | 1,0137                            | 1,01              | 11,30                         | 1,272                           | 1,268                                       |
| 2           | 705,4         | 4,419           | 1,0143                            | 2,01              | 13,08                         | 1,267                           | 1,264                                       |
| 3           | 757,5         | 4,748           | 1,0149                            | 3,02              | 14,92                         | 1,262                           | 1,259                                       |
| 4           | 812,9         | 5,098           | 1,0155                            | 4,02              | 16,81                         | 1,258                           | 1,254                                       |
| 5           | 871,8         | 5,470           | 1,0162                            | 5,03              | 18,76                         | 1,253                           | 1,249                                       |
| 6           | 934,6         | 5,868           | 1,0170                            | 6,04              | 20,78                         | 1,249                           | 1,244                                       |

Окончание таблицы В.2

| $t$ ,<br>°C | $P''$ ,<br>Па | $d''$ ,<br>г/кг | $c''_{вл}$ ,<br>кДж/(кг·К) | $h_c$ ,<br>кДж/кг | $h''_{вл}$ ,<br>кДж/кг | $\rho_c$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $\rho''_{вл}$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> |
|-------------|---------------|-----------------|----------------------------|-------------------|------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| 7           | 1001,2        | 6,290           | 1,0178                     | 7,04              | 22,86                  | 1,244                           | 1,240                                |
| 8           | 1072,1        | 6,741           | 1,0186                     | 8,05              | 25,01                  | 1,240                           | 1,235                                |
| 9           | 1147,3        | 7,219           | 1,0195                     | 9,05              | 27,23                  | 1,236                           | 1,230                                |
| 10          | 1227,1        | 7,727           | 1,0205                     | 10,06             | 29,53                  | 1,231                           | 1,225                                |
| 11          | 1311,8        | 8,268           | 1,0215                     | 11,07             | 31,91                  | 1,227                           | 1,221                                |
| 12          | 1401,5        | 8,841           | 1,0225                     | 12,07             | 34,38                  | 1,223                           | 1,216                                |
| 13          | 1496,7        | 9,451           | 1,0237                     | 13,08             | 36,95                  | 1,218                           | 1,211                                |
| 14          | 1597,4        | 10,097          | 1,0249                     | 14,08             | 39,60                  | 1,214                           | 1,207                                |
| 15          | 1704,1        | 10,783          | 1,0268                     | 15,09             | 42,36                  | 1,210                           | 1,202                                |
| 16          | 1817,0        | 11,511          | 1,0275                     | 16,10             | 45,23                  | 1,206                           | 1,197                                |
| 17          | 1936,4        | 12,282          | 1,0290                     | 17,10             | 48,21                  | 1,201                           | 1,193                                |
| 18          | 2062,6        | 13,100          | 1,0305                     | 18,11             | 51,31                  | 1,197                           | 1,188                                |
| 19          | 2196,0        | 13,966          | 1,0322                     | 19,11             | 54,54                  | 1,193                           | 1,183                                |
| 20          | 2336,8        | 14,883          | 1,0339                     | 20,12             | 57,90                  | 1,189                           | 1,179                                |
| 21          | 2485,5        | 15,854          | 1,0357                     | 21,13             | 61,40                  | 1,185                           | 1,174                                |
| 22          | 2642,4        | 16,882          | 1,0379                     | 22,13             | 65,05                  | 1,181                           | 1,169                                |
| 23          | 2807,9        | 17,970          | 1,0398                     | 23,14             | 68,86                  | 1,177                           | 1,165                                |
| 24          | 2982,4        | 19,121          | 1,0416                     | 24,15             | 72,83                  | 1,173                           | 1,160                                |
| 25          | 3166,3        | 20,338          | 1,0435                     | 25,15             | 76,97                  | 1,169                           | 1,155                                |
| 26          | 3360,0        | 21,626          | 1,0472                     | 26,16             | 81,30                  | 1,165                           | 1,150                                |
| 27          | 3563,9        | 22,987          | 1,0491                     | 27,16             | 85,82                  | 1,161                           | 1,146                                |
| 28          | 3778,5        | 24,425          | 1,0510                     | 28,17             | 90,54                  | 1,158                           | 1,141                                |
| 29          | 4004,3        | 25,946          | 1,0548                     | 29,18             | 95,48                  | 1,154                           | 1,136                                |
| 30          | 4241,7        | 27,552          | 1,0586                     | 30,19             | 100,64                 | 1,150                           | 1,131                                |
| 31          | 4491,3        | 29,250          | 1,0604                     | 31,19             | 106,04                 | 1,146                           | 1,127                                |
| 32          | 4753,6        | 31,043          | 1,0642                     | 32,20             | 111,69                 | 1,142                           | 1,122                                |
| 33          | 5029,0        | 32,937          | 1,0680                     | 33,21             | 117,61                 | 1,139                           | 1,117                                |
| 34          | 5318,2        | 34,937          | 1,0718                     | 34,21             | 123,81                 | 1,135                           | 1,113                                |
| 35          | 5621,7        | 37,050          | 1,0755                     | 35,22             | 130,31                 | 1,131                           | 1,107                                |
| 36          | 5940,1        | 39,281          | 1,0792                     | 36,23             | 137,11                 | 1,128                           | 1,102                                |
| 37          | 6274,0        | 41,637          | 1,0849                     | 37,24             | 144,25                 | 1,124                           | 1,097                                |
| 38          | 6624,0        | 44,124          | 1,0883                     | 38,24             | 151,73                 | 1,120                           | 1,092                                |
| 39          | 6990,7        | 46,750          | 1,0937                     | 39,25             | 159,58                 | 1,117                           | 1,087                                |
| 40          | 7374,9        | 49,524          | 1,0999                     | 40,26             | 167,82                 | 1,113                           | 1,082                                |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Коэффициенты полного теплового излучения

| Материал и характер поверхности    | $\varepsilon$ |
|------------------------------------|---------------|
| Алюминий:                          |               |
| полированный                       | 0,05          |
| окисленный                         | 0,15          |
| Кирпич огнеупорный неглазурованный | 0,85          |
| Масляные краски различных цветов   | 0,94          |
| Проволока нихромовая               | 0,75          |
| Серебро полированное               | 0,02          |
| Сталь:                             |               |
| полированная                       | 0,54          |
| окисленная, шероховатая            | 0,95          |
| Стекло гладкое                     | 0,94          |
| Чугунное литье                     | 0,81          |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

### Технические данные водоводяных скоростных подогревателей

| Номер | Диаметр корпуса, мм |            | Число трубок, шт. | Площадь поверхности теплообмена, м <sup>2</sup> | Площадь сечения трубок, м <sup>2</sup> | Межтрубное пространство         |           |
|-------|---------------------|------------|-------------------|---|--|---------------------------------|-----------|
|       | наружный            | внутренний |                   |   |  | площадь сечения, м <sup>2</sup> | $d_3$ , м |
| 1     | 57                  | 50         | 4                 | 0,37  | 0,00062                                | 0,00116                         | 0,013     |
| 2     | 57                  | 50         | 4                 | 0,75  | 0,00062                                | 0,00116                         | 0,013     |
| 3     | 76                  | 69         | 7                 | 0,65  | 0,00108                                | 0,00233                         | 0,0164    |
| 4     | 76                  | 69         | 7                 | 1,31  | 0,00108                                | 0,00233                         | 0,0164    |
| 5     | 89                  | 82         | 12                | 1,11  | 0,00185                                | 0,00287                         | 0,0134    |
| 6     | 89                  | 82         | 12                | 2,24  | 0,00185                                | 0,00287                         | 0,0134    |
| 7     | 114                 | 106        | 19                | 1,76  | 0,00293                                | 0,005                           | 0,0155    |
| 8     | 114                 | 106        | 19                | 3,54  | 0,00293                                | 0,005                           | 0,0155    |
| 9     | 168                 | 158        | 37                | 3,4   | 0,0057                                 | 0,0122                          | 0,0207    |
| 10    | 168                 | 158        | 37                | 6,9   | 0,0057                                 | 0,0122                          | 0,0207    |
| 11    | 219                 | 207        | 64                | 5,89  | 0,00985                                | 0,0208                          | 0,0215    |
| 12    | 219                 | 207        | 64                | 12,0  | 0,00985                                | 0,0208                          | 0,0215    |
| 13    | 273                 | 259        | 109               | 10,0  | 0,01679                                | 0,03077                         | 0,0196    |
| 14    | 273                 | 259        | 109               | 20,3  | 0,01679                                | 0,03077                         | 0,0196    |

*Примечания:*

1. В подогревателе использованы латунные трубки наружным диаметром 16 мм и толщиной 1 мм.
2. Длина корпуса подогревателей с нечетными номерами равна 2 м, а подогревателей с четными номерами – 4 м.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

### Термодинамические свойства воды и водяного пара на линии насыщения

| $P$ ,<br>МПа | $t$ ,<br>°С | $\vartheta'$ ,<br>м <sup>3</sup> /кг | $\vartheta''$ ,<br>м <sup>3</sup> /кг | $h'$ ,<br>кДж/кг | $h''$ ,<br>кДж/кг | $r$ ,<br>кДж/кг | $S'$ ,<br>кДж/(кг·К) | $S''$ ,<br>кДж/(кг·К) |
|--------------|-------------|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------|-------------------|-----------------|----------------------|-----------------------|
| 0,003        | 24,09       | 0,00100                              | 45,668                                | 101,00           | 2542,2            | 2444,2          | 0,3543               | 8,5776                |
| 0,004        | 28,98       | 0,00100                              | 34,803                                | 121,41           | 2554,1            | 2432,7          | 0,4224               | 8,4747                |
| 0,005        | 32,90       | 0,00101                              | 28,196                                | 137,77           | 2561,2            | 2423,4          | 0,4762               | 8,3952                |
| 0,006        | 36,78       | 0,00101                              | 23,742                                | 151,5            | 2567,1            | 2415,6          | 0,5209               | 8,3305                |
| 0,007        | 39,02       | 0,000101                             | 20,532                                | 163,38           | 2572,2            | 2408,8          | 0,5591               | 8,276                 |
| 0,008        | 41,53       | 0,00101                              | 18,106                                | 173,87           | 2576,7            | 2402,8          | 0,5926               | 8,2289                |
| 0,009        | 43,79       | 0,00101                              | 16,206                                | 183,28           | 2580,8            | 2397,5          | 0,6224               | 8,1875                |
| 0,01         | 45,83       | 0,00101                              | 14,676                                | 191,84           | 2584,4            | 2392,6          | 0,6493               | 8,1505                |
| 0,02         | 60,09       | 0,00102                              | 7,6515                                | 251,46           | 2609,6            | 2358,1          | 0,8321               | 7,9092                |
| 0,03         | 69,12       | 0,00102                              | 5,2308                                | 289,31           | 2625,3            | 2336,0          | 0,9441               | 7,7695                |
| 0,04         | 75,89       | 0,00103                              | 3,9949                                | 317,65           | 2636,8            | 2319,2          | 1,0261               | 7,6711                |
| 0,05         | 81,35       | 0,00103                              | 3,2415                                | 340,57           | 2646,0            | 2305,4          | 1,0912               | 7,5951                |
| 0,075        | 91,78       | 0,00104                              | 2,2179                                | 384,45           | 2663,2            | 2278,8          | 1,2132               | 7,4577                |
| 0,1          | 99,63       | 0,00104                              | 1,6946                                | 417,51           | 2675,7            | 2258,2          | 1,3027               | 7,3608                |
| 0,15         | 111,37      | 0,00105                              | 1,1597                                | 467,13           | 2693,9            | 2226,8          | 1,4336               | 7,2248                |
| 0,17         | 115,17      | 0,00106                              | 1,0315                                | 483,22           | 2699,5            | 2216,3          | 1,4752               | 7,1829                |
| 0,2          | 120,23      | 0,00106                              | 0,88592                               | 504,7            | 2706,9            | 2202,2          | 1,5468               | 7,1123                |
| 0,4          | 143,62      | 0,00108                              | 0,46242                               | 604,7            | 2738,5            | 2133,8          | 1,7764               | 6,8966                |
| 0,6          | 158,84      | 0,0011                               | 0,31556                               | 670,4            | 2756,4            | 2086,0          | 1,9308               | 6,7598                |
| 0,8          | 170,42      | 0,00111                              | 0,2403                                | 720,9            | 2768,4            | 2047,5          | 2,0457               | 6,6618                |
| 1,0          | 179,88      | 0,00113                              | 0,1943                                | 762,6            | 2777              | 2014,4          | 2,1382               | 6,5847                |
| 1,4          | 195,04      | 0,00115                              | 0,14072                               | 830,1            | 2788,4            | 1958,3          | 2,2836               | 6,4665                |
| 2,0          | 212,37      | 0,00118                              | 0,09953                               | 908,6            | 2797,4            | 1888,8          | 2,4468               | 6,3373                |
| 2,5          | 223,94      | 0,00119                              | 0,07990                               | 962,0            | 2800,8            | 1838,8          | 2,5543               | 6,2536                |
| 3,0          | 233,84      | 0,00122                              | 0,06662                               | 1008,4           | 2801,9            | 1793,5          | 2,6455               | 6,1832                |
| 3,5          | 242,54      | 0,00123                              | 0,05702                               | 1049,8           | 2801,3            | 1751,5          | 2,7253               | 6,1218                |
| 4,0          | 250,33      | 0,00125                              | 0,04974                               | 1087,5           | 2799,4            | 1711,9          | 2,7967               | 6,0670                |
| 4,5          | 257,41      | 0,00127                              | 0,04402                               | 1122,2           | 2796,5            | 1674,3          | 2,8614               | 6,0171                |
| 5,0          | 263,92      | 0,00129                              | 0,03941                               | 1154,6           | 2792,8            | 1638,2          | 2,9209               | 5,9712                |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

### Значения гиперболических функций

| $x$ | $shx$ | $chx$ | $thx$ | $x$ | $shx$  | $chx$  | $thx$ |
|-----|-------|-------|-------|-----|--------|--------|-------|
| 0,1 | 0,1   | 1,005 | 0,100 | 1,6 | 2,376  | 2,577  | 0,922 |
| 0,2 | 0,201 | 1,02  | 0,197 | 1,7 | 2,646  | 2,828  | 0,935 |
| 0,3 | 0,305 | 1,045 | 0,291 | 1,8 | 2,942  | 3,108  | 0,947 |
| 0,4 | 0,411 | 1,081 | 0,380 | 1,9 | 3,268  | 3,418  | 0,956 |
| 0,5 | 0,521 | 1,128 | 0,462 | 2,0 | 3,627  | 3,762  | 0,964 |
| 0,6 | 0,639 | 1,186 | 0,537 | 2,1 | 4,021  | 4,144  | 0,971 |
| 0,7 | 0,758 | 1,255 | 0,604 | 2,2 | 4,457  | 4,568  | 0,976 |
| 0,8 | 0,888 | 1,337 | 0,664 | 2,3 | 4,937  | 5,037  | 0,980 |
| 0,9 | 1,026 | 1,433 | 0,716 | 2,4 | 5,466  | 5,557  | 0,984 |
| 1,0 | 1,175 | 1,543 | 0,762 | 2,5 | 6,05   | 6,132  | 0,987 |
| 1,1 | 1,336 | 1,668 | 0,801 | 2,6 | 6,694  | 6,769  | 0,989 |
| 1,2 | 1,509 | 1,811 | 0,834 | 2,7 | 7,406  | 7,474  | 0,991 |
| 1,3 | 1,698 | 1,971 | 0,862 | 2,8 | 8,192  | 8,253  | 0,993 |
| 1,4 | 1,904 | 2,151 | 0,885 | 2,9 | 9,059  | 9,115  | 0,994 |
| 1,5 | 2,129 | 2,352 | 0,905 | 3,0 | 10,018 | 10,068 | 0,995 |

## ПРИЛОЖЕНИЕ И

### Коэффициенты для расчета нагрева (охлаждения) тел при числах Фурье $Fo \geq 0,3$

Таблица И.1 – Неограниченная пластина

| $Bi$ | $\mu_1^2$ | $P$   | $M$   | $N$   | $Bi$     | $\mu_1^2$ | $P$    | $M$   | $N$   |
|------|-----------|-------|-------|-------|----------|-----------|--------|-------|-------|
| 0,10 | 0,0968    | 0,967 | 1,000 | 1,016 | 2,0      | 1,162     | 0,559  | 0,964 | 1,179 |
| 0,12 | 0,1154    | 0,960 | 1,000 | 1,020 | 2,2      | 1,222     | 0,535  | 0,960 | 1,186 |
| 0,14 | 0,1337    | 0,954 | 1,000 | 1,023 | 2,4      | 1,277     | 0,510  | 0,956 | 1,193 |
| 0,16 | 0,1518    | 0,948 | 1,000 | 1,026 | 2,6      | 1,332     | 0,488  | 0,952 | 1,200 |
| 0,18 | 0,1697    | 0,942 | 1,000 | 1,029 | 2,8      | 1,380     | 0,468  | 0,948 | 1,205 |
| 0,20 | 0,1874    | 0,936 | 1,000 | 1,031 | 3,0      | 1,420     | 0,448  | 0,944 | 1,210 |
| 0,22 | 0,2048    | 0,930 | 1,000 | 1,034 | 3,5      | 1,52      | 0,406  | 0,935 | 1,221 |
| 0,24 | 0,2220    | 0,924 | 0,999 | 1,037 | 4,0      | 1,59      | 0,370  | 0,926 | 1,229 |
| 0,26 | 0,2390    | 0,918 | 0,999 | 1,040 | 4,5      | 1,66      | 0,338  | 0,919 | 1,235 |
| 0,28 | 0,2558    | 0,912 | 0,999 | 1,042 | 5,0      | 1,73      | 0,314  | 0,912 | 1,240 |
| 0,30 | 0,2723    | 0,906 | 0,999 | 1,045 | 6,0      | 1,82      | 0,273  | 0,901 | 1,248 |
| 0,35 | 0,3125    | 0,891 | 0,998 | 1,052 | 7,0      | 1,90      | 0,241  | 0,892 | 1,254 |
| 0,40 | 0,3516    | 0,877 | 0,998 | 1,058 | 8,0      | 1,95      | 0,216  | 0,885 | 1,257 |
| 0,45 | 0,3894    | 0,863 | 0,997 | 1,064 | 9,0      | 2,00      | 0,196  | 0,879 | 1,260 |
| 0,50 | 0,4264    | 0,849 | 0,996 | 1,070 | 10       | 2,04      | 0,180  | 0,874 | 1,262 |
| 0,60 | 0,497     | 0,823 | 0,994 | 1,081 | 20       | 2,24      | 0,094  | 0,847 | 1,27  |
| 0,70 | 0,564     | 0,798 | 0,992 | 1,092 | 30       | 2,30      | 0,065  | 0,836 | 1,271 |
| 0,80 | 0,626     | 0,774 | 0,990 | 1,102 | 40       | 2,35      | 0,0500 | 0,829 | 1,272 |
| 0,90 | 0,684     | 0,751 | 0,988 | 1,111 | 50       | 2,37      | 0,0400 | 0,826 | 1,272 |
| 1,00 | 0,740     | 0,729 | 0,986 | 1,119 | 60       | 2,39      | 0,0333 | 0,824 | 1,273 |
| 1,20 | 0,841     | 0,689 | 0,981 | 1,134 | 70       | 2,40      | 0,0286 | 0,822 | 1,273 |
| 1,40 | 0,931     | 0,653 | 0,977 | 1,148 | 80       | 2,41      | 0,0250 | 0,820 | 1,273 |
| 1,60 | 1,016     | 0,619 | 0,972 | 1,159 | 100      | 2,42      | 0,0200 | 0,818 | 1,273 |
| 1,80 | 1,090     | 0,587 | 0,968 | 1,169 | $\infty$ | 2,467     | 0,0000 | 0,810 | 1,273 |

Таблица И.2 – Бесконечно длинный цилиндр

| $Bi$ | $\mu_1^2$ | $P$   | $M$   | $N$   | $Bi$     | $\mu_1^2$ | $P$   | $M$   | $N$   |
|------|-----------|-------|-------|-------|----------|-----------|-------|-------|-------|
| 0,08 | 0,1569    | 0,980 | 1,000 | 1,019 | 2,2      | 2,70      | 0,584 | 0,949 | 1,357 |
| 0,10 | 0,1951    | 0,975 | 1,000 | 1,024 | 2,4      | 2,84      | 0,558 | 0,943 | 1,375 |
| 0,12 | 0,2329    | 0,970 | 1,000 | 1,029 | 2,6      | 2,97      | 0,534 | 0,937 | 1,392 |
| 0,14 | 0,2704    | 0,965 | 1,000 | 1,034 | 2,8      | 3,09      | 0,513 | 0,931 | 1,406 |
| 0,16 | 0,3075    | 0,960 | 1,000 | 1,039 | 3,0      | 3,20      | 0,492 | 0,925 | 1,420 |
| 0,18 | 0,3443    | 0,956 | 1,000 | 1,044 | 3,5      | 3,44      | 0,446 | 0,910 | 1,449 |
| 0,20 | 0,3807    | 0,951 | 1,000 | 1,048 | 4,0      | 3,64      | 0,407 | 0,896 | 1,472 |
| 0,22 | 0,4167    | 0,946 | 0,999 | 1,053 | 4,5      | 3,81      | 0,374 | 0,884 | 1,489 |
| 0,24 | 0,4524    | 0,941 | 0,999 | 1,057 | 5,0      | 3,96      | 0,345 | 0,873 | 1,504 |
| 0,26 | 0,4877    | 0,937 | 0,999 | 1,062 | 5,5      | 4,09      | 0,320 | 0,863 | 1,516 |
| 0,28 | 0,5226    | 0,932 | 0,999 | 1,067 | 6,0      | 4,20      | 0,299 | 0,854 | 1,527 |
| 0,30 | 0,5572    | 0,927 | 0,999 | 1,071 | 7,0      | 4,38      | 0,262 | 0,837 | 1,541 |
| 0,35 | 0,642     | 0,915 | 0,998 | 1,082 | 8,0      | 4,53      | 0,234 | 0,823 | 1,551 |
| 0,40 | 0,726     | 0,903 | 0,998 | 1,093 | 9,0      | 4,65      | 0,210 | 0,812 | 1,560 |
| 0,45 | 0,806     | 0,891 | 0,997 | 1,103 | 10       | 4,75      | 0,191 | 0,803 | 1,566 |
| 0,50 | 0,888     | 0,880 | 0,996 | 1,114 | 20       | 5,24      | 0,095 | 0,755 | 1,590 |
| 0,60 | 1,036     | 0,858 | 0,993 | 1,134 | 30       | 5,41      | 0,065 | 0,736 | 1,598 |
| 0,70 | 1,184     | 0,836 | 0,991 | 1,154 | 40       | 5,50      | 0,05  | 0,725 | 1,602 |
| 0,80 | 1,322     | 0,815 | 0,989 | 1,172 | 50       | 5,55      | 0,04  | 0,719 | 1,603 |
| 1,00 | 1,58      | 0,774 | 1,985 | 1,208 | 60       | 5,59      | 0,033 | 0,714 | 1,604 |
| 1,2  | 1,81      | 0,738 | 1,979 | 1,239 | 70       | 5,62      | 0,029 | 0,71  | 1,604 |
| 1,4  | 2,03      | 0,704 | 1,973 | 1,268 | 80       | 5,64      | 0,025 | 0,707 | 1,605 |
| 1,6  | 2,22      | 0,671 | 1,967 | 1,295 | 100      | 5,68      | 0,02  | 0,704 | 1,606 |
| 1,8  | 2,39      | 0,639 | 1,961 | 1,319 | $\infty$ | 5,78      | 0,00  | 0,691 | 1,606 |

Таблица И.3 – Шар (симметричная задача)

| $Bi$ | $\mu_1$ | $P$    | $M$    | $N$    | $Bi$     | $\mu_1$ | $P$    | $M$    | $N$    |
|------|---------|--------|--------|--------|----------|---------|--------|--------|--------|
| 0,1  | 0,5423  | 0,98   | 0,9997 | 1,0297 | 2,0      | 2,0288  | 0,654  | 0,9534 | 1,4793 |
| 0,15 | 0,6609  | 0,9699 | 0,9996 | 1,0443 | 2,5      | 2,1746  | 0,5897 | 0,9363 | 1,5579 |
| 0,2  | 0,7593  | 0,9603 | 0,9994 | 1,0592 | 3,0      | 2,2889  | 0,5337 | 0,9171 | 1,6223 |
| 0,3  | 0,9208  | 0,9406 | 0,9985 | 1,088  | 4,0      | 2,4557  | 0,4436 | 0,8829 | 1,7201 |
| 0,4  | 1,0528  | 0,9213 | 0,9974 | 1,1164 | 5,0      | 2,5704  | 0,3759 | 0,8533 | 1,787  |
| 0,5  | 1,1656  | 0,902  | 0,9959 | 1,144  | 6,0      | 2,6537  | 0,3239 | 0,828  | 1,8338 |
| 0,6  | 1,2644  | 0,8832 | 0,9944 | 1,1713 | 7,0      | 2,7165  | 0,2835 | 0,8068 | 1,8673 |
| 0,7  | 1,3525  | 0,8646 | 0,9926 | 1,1978 | 8,0      | 2,7654  | 0,2514 | 0,7889 | 1,892  |
| 0,8  | 1,432   | 0,8463 | 0,9905 | 1,2237 | 9,0      | 2,8044  | 0,2254 | 0,7737 | 1,9106 |
| 0,9  | 1,5044  | 0,8283 | 0,9881 | 1,2488 | 10       | 2,8363  | 0,204  | 0,7607 | 1,9249 |
| 1,0  | 1,5708  | 0,8105 | 0,9855 | 1,2732 | 11       | 2,8628  | 0,1861 | 0,7495 | 1,9364 |
| 1,1  | 1,632   | 0,7932 | 0,9828 | 1,297  | 16       | 2,9476  | 0,1286 | 0,7109 | 1,9663 |
| 1,2  | 1,6887  | 0,7762 | 0,98   | 1,32   | 21       | 2,993   | 0,0979 | 0,6886 | 1,9801 |
| 1,3  | 1,7414  | 0,7597 | 0,977  | 1,3424 | 31       | 3,0406  | 0,066  | 0,664  | 1,9905 |
| 1,4  | 1,7906  | 0,7434 | 0,9739 | 1,364  | 41       | 3,0651  | 0,0497 | 0,6509 | 1,9948 |
| 1,5  | 1,8366  | 0,7275 | 0,9707 | 1,3848 | 51       | 3,0801  | 0,0398 | 0,6427 | 1,9964 |
| 1,6  | 1,8798  | 0,7121 | 0,9678 | 1,4051 | 61       | 3,0901  | 0,0333 | 0,6372 | 1,9974 |
| 1,7  | 1,9203  | 0,6971 | 0,9641 | 1,4247 | 81       | 3,1028  | 0,025  | 0,6301 | 1,9985 |
| 1,8  | 1,9586  | 0,6823 | 0,9605 | 1,4436 | 101      | 3,1105  | 0,02   | 0,6257 | 1,9993 |
| 1,9  | 1,9947  | 0,668  | 0,9569 | 1,4618 | $\infty$ | 3,1416  | 0      | 0,6079 | 2,000  |

## ПРИЛОЖЕНИЕ К

### Коэффициенты и параметры для расчета теплоотдачи

Таблица К.1 – Пузырьковое кипение воды в большом объеме

| $t_s, ^\circ\text{C}$ | $l_* \times 10^6, \text{ м}$ | $A_* \times 10^6, \text{ м}^2/\text{Вт}$ | $B_* \times 10^2, \text{ К}^{-1}$ |
|-----------------------|------------------------------|--|-----------------------------------|
| 30                    | 16 450                       | 276 870                                  | 1040                              |
| 40                    | 5 950                        | 73 345                                   | 782                               |
| 50                    | 2 305                        | 20 894                                   | 587                               |
| 60                    | 960                          | 6 543                                    | 450                               |
| 70                    | 423                          | 2 201                                    | 347                               |
| 80                    | 197                          | 798                                      | 273                               |
| 90                    | 96,0                         | 304                                      | 216                               |
| 100                   | 48,7                         | 122,4                                    | 172                               |
| 110                   | 25,9                         | 51,8                                     | 138                               |
| 120                   | 14,2                         | 22,8                                     | 110                               |
| 130                   | 8,05                         | 10,7                                     | 96,0                              |
| 140                   | 4,70                         | 5,13                                     | 75,0                              |
| 150                   | 2,82                         | 2,58                                     | 60,5                              |
| 160                   | 1,73                         | 1,33                                     | 52,6                              |
| 170                   | 1,08                         | 0,710                                    | 44,5                              |
| 180                   | 0,715                        | 0,396                                    | 37,5                              |
| 190                   | 0,450                        | 0,216                                    | 32,2                              |
| 200                   | 0,296                        | 0,123                                    | 27,5                              |
| 210                   | 0,200                        | 0,0718                                   | 23,5                              |
| 220                   | 0,136                        | 0,0426                                   | 20,2                              |
| 230                   | 0,0938                       | 0,0254                                   | 17,3                              |
| 240                   | 0,0646                       | 0,0155                                   | 15,1                              |
| 250                   | 0,0451                       | 0,00989                                  | 13,6                              |
| 260                   | 0,0318                       | 0,00593                                  | 11,4                              |
| 280                   | 0,0158                       | 0,00243                                  | 8,80                              |
| 300                   | 0,00800                      | 0,000911                                 | 6,16                              |
| 310                   | 0,00565                      | 0,000609                                 | 5,64                              |
| 320                   | 0,00398                      | 0,000388                                 | 4,93                              |
| 330                   | 0,00278                      | 0,000249                                 | 4,34                              |
| 340                   | 0,00192                      | 0,000158                                 | 3,77                              |
| 350                   | 0,00126                      | 0,0000989                                | 3,36                              |

Таблица К.2 – Пленочная конденсация водяного пара

| $t_s, ^\circ\text{C}$ | $A_k, (\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ | $A_k^{0,78}$ | $B_k \times 10^3, \text{m/Вт}$ | $M_k, \text{Вт}/(\text{m}^{1,75}\cdot\text{K}^{0,75})$ |
|-----------------------|-------------------------------------|--------------|--------------------------------|--|
| 20                    | 5,16                                | 3,60         | 1,62                           | 6136,6   |
| 30                    | 7,88                                | 5,00         | 2,06                           | 6621,8   |
| 40                    | 11,4                                | 6,67         | 2,54                           | 7080,9   |
| 50                    | 15,6                                | 8,52         | 3,06                           | 7474,9   |
| 60                    | 20,9                                | 10,71        | 3,62                           | 7831,6   |
| 70                    | 27,1                                | 13,11        | 4,22                           | 8163,3   |
| 80                    | 34,5                                | 15,83        | 4,88                           | 8450,4   |
| 90                    | 42,7                                | 18,69        | 5,57                           | 8711,3   |
| 100                   | 51,5                                | 21,64        | 6,28                           | 8918,5   |
| 110                   | 60,7                                | 24,60        | 6,95                           | 9076,0   |
| 120                   | 70,3                                | 27,58        | 7,65                           | 9212,8   |
| 130                   | 82,0                                | 31,10        | 8,47                           | 9342,9   |
| 140                   | 94,0                                | 34,60        | 9,29                           | 9444,6   |
| 150                   | 107                                 | 38,27        | 10,15                          | 9533,5   |
| 160                   | 122                                 | 42,40        | 11,09                          | 9605,2   |
| 170                   | 136                                 | 46,15        | 12,04                          | 10263,5  |
| 180                   | 150                                 | 49,81        | 12,9                           | 9608,3   |
| 190                   | 167                                 | 54,16        | 14,02                          | 9601,9   |
| 200                   | 182                                 | 57,92        | 15,05                          | 9543,8   |
| 210                   | 197                                 | 61,61        | 16,08                          | 9450,4   |
| 220                   | 218                                 | 66,68        | 17,63                          | 9326,0   |
| 230                   | 227                                 | 68,82        | 18,4                           | 9186,8   |
| 240                   | 246                                 | 73,27        | 19,78                          | 9046,2   |
| 250                   | 264                                 | 77,42        | 21,32                          | 8888,0   |
| 260                   | 278                                 | 80,60        | 22,7                           | 8656,4   |
| 270                   | 296                                 | 84,65        | 24,42                          | 8395,1   |
| 280                   | 312                                 | 88,19        | 26,31                          | 8112,4   |
| 290                   | 336                                 | 93,44        | 28,72                          | 7817,4   |
| 300                   | 354                                 | 97,32        | 31,21                          | 7473,4   |

Учебное издание

**Цубанов** Александр Григорьевич,  
**Синяков** Анатолий Леонидович,  
**Цубанов** Игорь Александрович,  
**Синица** Светлана Ивановна

## **ТЕПЛОПЕРЕДАЧА**

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к практическим занятиям для студентов специальности 1 – 74 06 05 02  
«Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (теплоэнергетика)»,  
специализации 1 – 74 06 05 – 02 01 «Теплоснабжение сельского хозяйства»

Ответственный за выпуск: *А.Г. Цубанов*  
Электронный набор: *С.И. Синица*  
Редактор: *Н.Ф. Крицкая*  
Верстка, дизайн: *С.И. Синица, Н.Ф. Крицкая*