

**С.В.Дахин**

# **ТЕПЛООБМЕН. ЗАДАЧНИК**

**Учебное пособие**

ВГТУ

**2008**

ГОУ ВПО  
«Воронежский государственный технический  
университет»

С.В. Дахин

## ТЕПЛООБМЕН. ЗАДАЧНИК

Утверждено Редакционно-издательским советом  
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2008

УДК 620.197

Дахин С.В. Теплообмен. Задачник: учеб. пособие / С.В. Дахин. Воронеж: ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2008. 169 с.

В учебном пособии собраны задачи, которые соответствуют основным разделам дисциплины «Тепломассообмен». Многие задачи имеют подробное решение. В приложении представлен справочный материал, необходимый для решения задач.

Издание соответствует требованиям Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению 140100 «Теплоэнергетика», специальности 140104 «Промышленная теплоэнергетика», дисциплине «Тепломассообмен».

Предназначено для студентов очной формы обучения.

Табл. 32. Ил. 23. Библиогр.: 3 назв.

Научный редактор д-р техн. наук, проф. А.В. Бараков

Рецензенты: кафедра электротехники, теплотехники и гидравлики Воронежской государственной лесотехнической академии (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. В.М. Попов); канд. техн. наук, доц. В.Ю. Дубанин

© Дахин С.В., 2008

© Оформление. ГОУ ВПО

«Воронежский государственный технический университет», 2008

## ВВЕДЕНИЕ

Необходимость издания настоящего пособия вызвана отсутствием в необходимом количестве задачников по дисциплине «Тепломассообмен» последних лет издания.

Главы задачника соответствуют основным разделам дисциплины.

Для каждой группы подобных задач, первая задача приводится с подробным решением.

Приложения включают справочный материал в виде таблиц, необходимый для решения предлагаемых задач.

## 1. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

**1-1.** Вычислить плотность теплового потока через плоскую однородную стенку, толщина которой значительно меньше ширины и высоты, если стенка выполнена: а) из стали [ $\lambda = 40 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ]; б) из бетона [ $\lambda = 1,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ]; в) из диатомитового кирпича [ $\lambda = 0,11 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ].

Во всех трех случаях толщина стенки  $\delta = 50 \text{ мм}$ .

Температуры на поверхностях стенки поддерживаются постоянными:

$$t_{c1} = 100 \text{ }^\circ\text{C} \text{ и } t_{c2} = 90 \text{ }^\circ\text{C}.$$

**Ответ:**

для стальной стенки  $q = 8000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ;

для бетонной стенки  $q = 220 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ;

для стенки из диатомитового кирпича  $q = 22 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

**1-2.** Плотность теплового потока через плоскую стенку толщиной  $\delta = 50 \text{ мм}$   $q = 70 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

Определить разность температур на поверхностях стенки и численные значения градиента температуры в стенке, если она выполнена: а) из латуни [ $\lambda = 70 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ]; б) из красного кирпича [ $\lambda = 0,7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ]; в) из пробки [ $\lambda = 0,07 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ ].

**Ответ:**

для латунной стенки  $\Delta t = 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $|\text{grad } t| = 1 \text{ К}/\text{м}$ ;

для кирпичной стенки  $\Delta t = 5 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $|\text{grad } t| = 100 \text{ К}/\text{м}$ ;

для пробковой стенки  $\Delta t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $|\text{grad } t| = 1000 \text{ К}/\text{м}$ .

**1-3.** Определить потерю теплоты  $Q$ , Вт, через стенку из красного кирпича длиной  $l = 5 \text{ м}$ , высотой  $h = 4 \text{ м}$  и толщиной  $\delta = 0,250 \text{ м}$ , если температуры на поверхностях стенки поддерживаются  $t_{c1} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_{c2} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности красного кирпича  $\lambda = 0,70 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

**Ответ:** потери теплоты  $Q = 3920 \text{ Вт}$ .

**1-4.** Определить коэффициент теплопроводности материала стенки, если при толщине ее  $\delta = 40$  мм и разности температур на поверхностях  $\Delta t = 20$  °С плотность теплового потока  $q = 145$  Вт/м<sup>2</sup>.

**Ответ:** коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,29$  Вт/м · К

**1-5.** Плоскую поверхность необходимо изолировать так, чтобы потери теплоты с единицы поверхности в единицу времени не превышали 450 Вт/м<sup>2</sup>. Температура поверхности под изоляцией  $t_{c1} = 450$  °С, температура внешней поверхности изоляции  $t_{c2} = 50$  °С.

Определить толщину изоляции для двух случаев:

а) изоляция выполнена из совелита, для которого

$$\lambda = 0,09 + 0,0000874t;$$

б) изоляция выполнена из асботермита, для которого  $\lambda = 0,109 + 0,000146t$ .

**Ответ:** а)  $\delta = 100$  мм; б)  $\delta = 130$  мм.

**1-6.** Стена из силикатного кирпича толщиной  $\delta = 250$  мм имеет с одной стороны температуру  $t_{c2} = -30$  °С, а с другой -  $t_{c1} = +20$  °С. Найти плотность теплового потока через стену и глубину её промерзания до температуры 0 °С, считая коэффициент теплопроводности материала стены постоянным. Коэффициент теплопроводности силикатного кирпича  $\lambda = 0,82$  Вт/(м · К).

**Ответ:**  $q = 164$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\delta_0 = 0,15$  м.

**1-7.** Плоская стенка бака площадью  $F = 5$  м<sup>2</sup> покрыта двухслойной тепловой изоляцией. Стенка бака стальная, толщиной  $\delta_1 = 8$  мм, с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_1 = 46,5$  Вт/(м · К). Первый слой изоляции выполнен из новоасбозурита толщиной  $\delta_2 = 50$  мм, коэффициент теплопроводности которого определяется уравнением  $\lambda_2 = 0,144 + 0,00014t$ .

Второй слой изоляции толщиной  $\delta_3 = 10$  мм представляет собой штукатурку (известковую), коэффициент теплопроводности которой  $\lambda_3 = 0,698$  Вт/(м·К).

Температуры внутренней поверхности стенки бака  $t_{c1} = 250$  °С и внешней поверхности изоляции  $t_{c4} = 50$  °С.

Вычислить количество теплоты, передаваемой через стенку, температуры на границах слоев изоляции и построить график распределения температуры.

**Ответ:** тепловой поток через стенку  $Q = 3170$  Вт. Температуры на границах слоев изоляции  $t_{c2} = 249,9$  °С и  $t_{c3} = 59$  °С.

**1-8.** Обмуровка печи состоит из слоев шамотного и красного кирпича, между которыми расположена засыпка из диатомита. Толщина шамотного слоя  $\delta_1 = 120$  мм, диатомитовой засыпки  $\delta_2 = 50$  мм и красного кирпича  $\delta_3 = 250$  мм. Коэффициенты теплопроводности материалов соответственно равны:  $\lambda_1 = 0,93$ ;  $\lambda_2 = 0,13$  и  $\lambda_3 = 0,7$  Вт/м·К.

Какой толщины следует сделать слой из красного кирпича  $\delta_3$ , если отказаться от применения засыпки из диатомита, чтобы тепловой поток через обмуровку оставался неизменным?

**Ответ:** толщина слоя красного кирпича равна 500 мм.

**1-9.** Стенка неэкранированной топочной камеры парового котла выполнена из слоя пеношамота толщиной  $\delta_1 = 125$  мм и слоя красного кирпича толщиной  $\delta_2 = 500$  мм. Слои плотно прилегают друг к другу. Температура на внутренней поверхности топочной камеры  $t_{c1} = 1100$  °С, а на наружной  $t_{c3} = 50$  °С. Коэффициент теплопроводности пеношамота  $\lambda_1 = 0,28 + 0,00023t$ , красного кирпича  $\lambda_2 = 0,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ .

Вычислить тепловые потери через  $1 \text{ м}^2$  стенки топочной камеры и температуру в плоскости соприкосновения слоев.

**Ответ:** тепловые потери  $q = 1090 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ . Температура в плоскости соприкосновения слоев  $t_{c2} = 828 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**1-10.** Толщину слоя красного кирпича в стенке топочной камеры, рассмотренной в задаче 1-9, решено уменьшить в 2 раза, а между слоями поместить слой засыпки из диатомитовой крошки, коэффициент теплопроводности которой  $\lambda = 0,113 + 0,00023t$ .

Какую нужно сделать толщину диатомитовой засыпки, чтобы при тех же температурах на внешних поверхностях стенки, что и в задаче 1-9, потери теплоты оставались неизменными?

**Ответ:** толщина диатомитовой засыпки  $\delta = 94 \text{ мм}$ .

**Решение.**

Так как тепловые потери  $q = 1090 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  должны оставаться неизменными, то температуру в плоскости соприкосновения диатомитовой засыпки и красного кирпича найдем по уравнению

$$t_{c3} = t_{c1} + q \frac{\delta_2}{\lambda_2} = 50 + 1090 \frac{0.25}{0.7} = 439^\circ\text{C}$$

Среднее значение коэффициента теплопроводности диатомитовой засыпки найдется из уравнения

$$\lambda_{\text{cp}} = a + b \frac{t_{c3} + t_{c2}}{2} = 0.13 + 0.00023 \frac{828 + 439}{2} = 0.259 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

Тогда толщина засыпки будет равна:

$$\delta = \frac{\Delta t_{\text{зас}}}{q} \lambda_{\text{cp}} = \frac{828 - 439}{1090} \cdot 0.259 = 0.0936 \text{ м} \approx 94 \text{ мм}.$$

**1-11.** Печь изнутри выложена динасовым кирпичом, за которым следует слой красного кирпича толщиной 250 мм, а снаружи слой силикатного кирпича толщиной 60 мм. На внутренней поверхности печи температура  $t_{c1} = 1150 \text{ }^\circ\text{C}$ , на наруж-



ной  $t_{c4} = 60^\circ\text{C}$ . Какова должна быть толщина слоя dinasового кирпича, чтобы температура красного кирпича с внутренней стороны не превышала  $820^\circ\text{C}$ ? Определить температуру на внутренней поверхности силикатного кирпича. Коэффициенты теплопроводности dinasового, красного и силикатного кирпичей –  $\lambda_1 = 0,35 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ,  $\lambda_2 = 0,76 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ,  $\lambda_3 = 0,82 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$  соответственно.

**Ответ:** толщина слоя dinasового кирпича  $\delta_1 = 61 \text{ мм}$ , а температура в плоскости соприкосновения слоев  $t_{c3} = 198^\circ\text{C}$ .

**1-12.** В приборе для определения коэффициента теплопроводности материалов между горячей и холодной поверхностями расположен образец из испытуемого материала (рис. 1-1).

Образец представляет собой диск диаметром  $d = 120 \text{ мм}$  и толщиной  $\delta = 20 \text{ мм}$ .

Температура горячей поверхности  $t_{c1} = 180^\circ\text{C}$ , холодной  $t_{c2} = 30^\circ\text{C}$ . Тепловой поток через образец после установления стационарного процесса  $Q = 50,6 \text{ Вт}$ . Благодаря защитным нагревателям радиальные потоки теплоты отсутствуют.

Вследствие плохой пригонки между холодной и горячей поверхностями и образцом образовались воздушные зазоры толщиной  $\delta_{\text{в}} = 0,1 \text{ мм}$ . Вычислить относительную ошибку в определении коэффициента теплопроводности  $\Delta_\lambda$ , если при обработке результатов измерений не учитывать

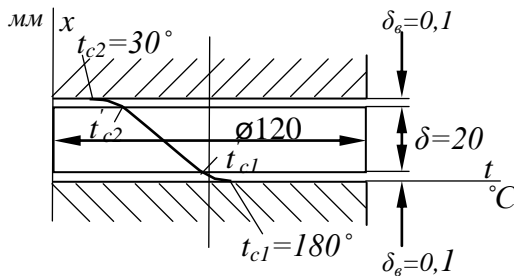


Рис. 1.1. К задаче 1-12

образовавшихся зазоров. Коэффициент теплопроводности воздуха в зазорах отнести к температурам соответствующих поверхностей  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$ .

**Ответ:** относительная ошибка в определении  $\lambda$  оставит  $\Delta_\lambda \approx 21\%$ .

**1-13.** Вычислить потери теплоты через единицу поверхности кирпичной обмуровки парового котла в зоне размещения водяного экономайзера и температуры на поверхностях стенки, если толщина стенки  $\delta = 250$  мм, температура газов  $t_{ж1} = 700$  °С и воздуха в котельной  $t_{ж2} = 30$  °С. Коэффициент теплоотдачи от газов к поверхности стенки  $\alpha_1 = 23$  Вт/м<sup>2</sup> · К и от стенки к воздуху  $\alpha_2 = 12$  Вт/м<sup>2</sup> · К. Коэффициент теплопроводности стенки  $\lambda = 0,7$  Вт/(м · К).

**Ответ:** потери теплоты  $q = 1385$  Вт/м<sup>2</sup>. Температура на поверхностях стенки  $t_{c1}$  Ошибка! Закладка не определена. = 640° С и  $t_{c2}$  Ошибка! Закладка не определена. = 145,5 °С.

**1-14.** Вычислить тепловой поток через 1 м<sup>2</sup> чистой поверхности нагрева парового котла и температуры на поверхностях стенки, если заданы следующие величины: температура дымовых газов  $t_{ж1} = 1000$  °С, кипящей воды  $t_{ж2} = 200$  °С; коэффициенты теплоотдачи от газов к стенке  $\alpha_1 = 100$  Вт/м<sup>2</sup> · К и от стенки к кипящей воде  $\alpha_2 = 5000$  Вт/м<sup>2</sup> · К.

Коэффициент теплопроводности материала стенки  $\lambda = 50$  Вт/(м · К) и толщина стенки  $\delta = 12$  мм.

**Ответ:**  $q = 76500$  Вт/м<sup>2</sup>. Температуры на поверхностях стенки  $t_{c1} = 235$  °С и  $t_{c2} = 215$  °С.

**1-15.** Решить задачу 1-14 при условии, что в процессе эксплуатации поверхность нагрева парового котла со стороны дымовых газов покрылась слоем сажи толщиной  $\delta_c = 1$  мм [ $\lambda_c = 0,08$  Вт/м · К] и со стороны воды слоем накипи толщиной  $\delta_n = 2$  мм [ $\lambda_n = 0,8$  Вт/м · К].

Вычислить плотность теплового потока через  $1 \text{ м}^2$  загрязненной поверхности нагрева и температуры на поверхностях соответствующих слоев  $t_{c1}, t_{c2}, t_{c3}$  и  $t_{c4}$ . Сравнить результаты расчета с ответом задачи 1-14 и определить уменьшение тепловой нагрузки.

**Ответ:** плотность теплового потока  $q = 31500 \text{ Вт/м}^2$ .

Температуры на поверхностях слоев:  $t_{c1} = 685^\circ \text{ C}$ ,  $t_{c2} = 291^\circ \text{ C}$ ,  $t_{c3} = 283^\circ \text{ C}$ ,  $t_{c4} = 206^\circ \text{ C}$ .

Уменьшение тепловой нагрузки поверхности нагрева в результате загрязнения  $\Delta q = 58,9 \%$ .

**1-16.** Обмуровка печи выполнена из слоя шамотного кирпича с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,84(1 + 0,695 - 10^{-3}t) \text{ Вт/м} \cdot \text{ К}$ ; толщина обмуровки  $\delta = 250 \text{ мм}$ .

Определить потери теплоты с одного квадратного метра поверхности  $q, \text{ Вт/м}^2$ , и температуры на внешних поверхностях стены, если температура газов в печи  $t_{ж1} = 1200^\circ \text{ C}$  и воздуха в помещении  $t_{ж2} = 30^\circ \text{ C}$ , коэффициент теплоотдачи от газов к стенке  $\alpha_1 = 30 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ К}$  и от обмуровки к окружающему воздуху  $\alpha_2 = 10 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ К}$ .

**Ответ:**  $q = 3530 \text{ Вт/м}^2$ .

**Решение.**

При заданной зависимости коэффициента теплопроводности шамотного кирпича от температуры потери теплоты можно вычислить методом последовательных приближений. Ниже приводится решение методом последовательных приближений.

Задаемся средней температурой стенки  $\bar{t}_c = 650^\circ \text{ C}$ . При этой температуре коэффициент теплопроводности шамотного кирпича равен  $\lambda_{cp} = 0,84(1 + 0,695 \cdot 10^{-3} \cdot 650) = 1,12 \text{ Вт/м} \cdot \text{ К}$ . Определяем коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{30} + \frac{0,25}{1,25} + \frac{1}{10}} = 2,81 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

и плотность теплового потока

Ошибка! Закладка не определена.  $q = k(t_{ж1} - t_{ж2}) = 2,81(1200 - 30)$   
 $= 3290 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

При полученной плотности теплового потока вычисляем температуры на поверхностях стенки

$$t_{c1} = t_{ж1} - q \frac{1}{\alpha_1} = 1200 - \frac{3290}{30} = 11091^\circ\text{C}$$

$$t_{c2} = t_{ж2} + q \frac{1}{\alpha_2} = 30 + \frac{3290}{10} = 359^\circ\text{C}$$

Определяем среднюю температуру стенки и уточняем значение коэффициента теплопроводности:

$$\bar{t}'_c = 0,5(1091 + 359) = 725^\circ\text{C};$$

$$\lambda_{cp} = 0,84(1 + 0,695 \cdot 10^{-3} \cdot 725) = 1,265 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К};$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{30} + \frac{0,25}{1,265} + \frac{1}{10}} = 3,02 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

При этом плотность теплового потока

$$q = 3,02(1200 - 30) = 3530 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

При новом значении плотности теплового потока вычисляем температуры  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$ :

$$t_{c1} = 1200 - \frac{3530}{30} = 1082^\circ\text{C}$$

$$t_{c2} = 30 + \frac{3530}{10} = 383^\circ\text{C}$$

Определяем средние значения температуры стенки и коэффициент теплопроводности:

$$\bar{t}'_c = 0,5(1082 + 383) = 732^\circ\text{C};$$

$$\lambda_{cp} = 0,84(1 + 0,695 \cdot 10^{-3} \cdot 732) = 1,267 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

Так как полученное среднее значение коэффициента теплопроводности практически совпадает с принятым ранее значением, то дальнейших пересчетов делать не нужно и можно принять  $q = 3530 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

**1-17.** Змеевики пароперегревателя выполнены из труб жароупорной стали диаметром  $d_1/d_2 = 32/42$  мм с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 14$  Вт/(м·К). Температура внешней поверхности трубы  $t_{c2} = 580$  °С и внутренней поверхности  $t_{c1} = 450$  °С.

Вычислить удельный тепловой поток через стенку на единицу длины трубы  $q_l$  Вт/м.

**Ответ:**  $q_l = 42100$  Вт/м.

**1-18.** Паропровод диаметром 150/160 мм покрыт слоем тепловой изоляции толщиной  $\delta_{из} = 100$  мм; коэффициенты теплопроводности стенки трубы  $\lambda_1 = 50$  Вт/м·К и изоляции  $\lambda_2 = 0,08$  Вт/м·К. Температура на внутренней поверхности паропровода  $t_{c1} = 400$  °С и на наружной поверхности изоляции  $t_{c3} = 50$  °С.

Найти тепловые потери с 1 м паропровода и температуру на границе соприкосновения паропровода и изоляции.

**Ответ:** потери теплоты с 1 м паропровода  $q_l = 216$  Вт/м. Температура на границе соприкосновения паропровода и изоляции  $t_{c2} \approx 400$  °С.

**1-19.** Стальной трубопровод диаметром  $d_1/d_2 = 100/110$  мм с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_1 = 50$  Вт/м·К покрыт изоляцией в два слоя одинаковой толщины  $\delta_2 = \delta_3 = 50$  мм. Температура внутренней поверхности трубы  $t_{c1} = 250$  °С и наружной поверхности изоляции  $t_{c4} = 50$  °С.

Определить потери теплоты через изоляцию с 1 м трубопровода и температуру на границе соприкосновения слоев изоляции, если первый слой изоляции, накладываемый на поверхность трубы, выполнен из материала с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_2 = 0,06$  Вт/м·К, а второй слой - из материала с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_3 = 0,12$  Вт/м·К.

**Ответ:** тепловые потери с 1 м трубопровода  $q_l = 89,5 \text{ Вт/м}$ . Температура на границе соприкосновения слоев изоляции  $t_{сз} = 97 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**1-20.** Как изменятся тепловые потери с 1 м трубопровода, рассмотренного в задаче 1-19, если слои изоляции поменять местами, т. е. слой с большим коэффициентом теплопроводности наложить непосредственно на поверхность трубы? Все другие условия оставить без изменений.

**Ответ:** потери теплоты увеличатся и составят  $q_l = 105,5 \text{ Вт/м}$ . Температура на границе соприкосновения слоев изоляции  $t_{сз} = 159 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**1-21.** Вычислить допустимую силу тока для медного провода  $d = 2 \text{ мм}$ , покрытого резиновой изоляцией толщиной  $\delta = 1 \text{ мм}$ , при условии, что максимальная температура изоляции должна быть не выше  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , а на внешней поверхности изоляции  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности резины  $\lambda = 0,15 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ . Электрическое сопротивление медного провода  $R = 0,005 \text{ Ом/м}$ .

**Ответ:** допустимая сила тока  $I = 79,8 \text{ А}$ .

**1-22.** Определить площадь поверхности нагрева конвективного пароперегревателя, выполненного из труб жаростойкой стали диаметром  $d_1/d_2 = 32/40 \text{ мм}$ . Коэффициент теплопроводности стали  $\lambda = 39,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ . Производительность пароперегревателя  $Q = 61,1 \text{ кг/с}$  пара. В пароперегреватель поступает сухой насыщенный пар при давлении  $p = 9,8 \text{ МПа}$ . Температура перегретого пара на выходе  $t_{п} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке  $\alpha_2 = 81,5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ , а от стенки к пару  $\alpha_1 = 1163 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ; средняя температура газов  $t_{ж} = 900 \text{ }^\circ\text{C}$ . Гидравлическим сопротивлением пароперегревателя пренебречь.

**Ответ:** площадь поверхности нагрева пароперегревателя, рассчитанная по наружному диаметру труб,  $F = 1090 \text{ м}^2$ .

**1-23.** Решить задачу (1-22), пренебрегая кривизной стенки (как для плоской стенки). Полученную площадь поверхности нагрева сравнить с результатом, полученным в задаче 1-22.

**Ответ:** площадь поверхности нагрева  $F = 1055 \text{ м}^2$ .

**1-24.** По трубе диаметром  $d_1/d_2 = 18/20$  мм движется сухой насыщенный водяной пар. Для уменьшения тепловых потерь в окружающую среду трубу нужно изолировать. Целесообразно ли для этого использовать асбест с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,11 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , если коэффициент теплоотдачи с внешней поверхности изоляции в окружающую среду  $\alpha = 8 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ?

**Ответ:** так как критический диаметр изоляции больше внешнего диаметра трубы ( $d_{\text{криз}} > d_2$ ), то такую изоляцию использовать нецелесообразно и следует применить изоляцию с меньшим коэффициентом теплопроводности.

**1-25.** Температура воздуха в резервуаре измеряется ртутным термометром, который помещен в гильзу (стальную трубку), заполненную маслом (рис. 1 - 2). Термометр показывает температуру конца гильзы  $t_1 = 84 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Как велика ошибка измерения за счет отвода теплоты по гильзе путем теплопроводности, если температура у основания гильзы  $t_0 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ , длина гильзы  $l = 120 \text{ мм}$ , толщина гильзы  $\delta = 1,5 \text{ мм}$ , коэффициент теплопроводности материала гильзы  $\lambda = 55,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  и коэффициент теплоотдачи от воздуха к гильзе  $\alpha = 23,3 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ .

**Ответ:** истинная температура воздуха  $t_{\text{ж}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{ж}} - t_1 = 16 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Решение.**

Для решения воспользуемся приближенной формулой для стержня конечной длины

$$\frac{\vartheta}{\vartheta_0} = \frac{1}{ch(ml)}$$

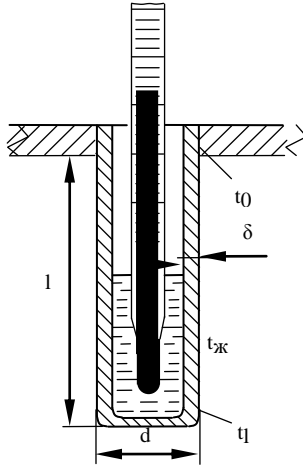


Рис. 1.2. К задаче 1-25

где

$$\frac{\vartheta_1}{\vartheta_0} = \frac{t_{\text{ж}} - t_1}{t_{\text{ж}} - t_0}; m = \sqrt{\frac{\alpha u}{\lambda f}};$$

периметр гильзы  $u = \pi d$ , сечение гильзы  $f = \pi d \delta$ , откуда  $u/f \approx 1/\delta$ , тогда

$$m = \sqrt{\frac{23,3}{55,8 \cdot 0,0015}} = 16,7 \text{ м}^{-1}$$

$$ml = 16,7 \cdot 0,12 = 2$$

Из математических таблиц находим  $ch(2,0) = 3,76$ , следовательно,

$$\frac{t_{\text{ж}} - t_1}{t_{\text{ж}} - t_0} = \frac{1}{3,79} = 0,266$$

и температура воздуха в резервуаре

$$t_{\text{ж}} = \frac{t_1 - 0,266 t_0}{1 - 0,266} = \frac{84 - 0,266 \cdot 40}{0,734} = 100^\circ\text{C}$$

Ошибка измерений  $t_{\text{ж}} - t_1 = 100 - 84 = 16^\circ\text{C}$



**1-26.** Какую температуру будет показывать термометр и на сколько уменьшится ошибка измерения, если в, условиях задачи 1-25 гильзу выполнить из нержавеющей стали с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 23,3 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , длиной  $l = 160 \text{ мм}$ , толщиной  $\delta = 0,8 \text{ мм}$  и за счет улучшения изоляции места заделки гильзы температура у ее основания повысится до  $t_o = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ?

**Ответ:**  $t_1 = 99,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{ж}} - t_1 = 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**1-27.** Для лучшего охлаждения внешней поверхности полупроводникового холодильника внешняя поверхность боковых стенок камеры выполнена ребристой с вертикальными алюминиевыми ребрами (рис. 1 - 3). В плане камера квадратная. Ширина боковых стенок  $b = 800 \text{ мм}$ , высота  $h = 1000 \text{ мм}$ , высота и толщина ребер соответственно  $l = 30 \text{ мм}$  и  $\delta = 3 \text{ мм}$ . Каждая стенка имеет по 40 ребер.

Температура у основания ребра  $t_o = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ ; температура окружающей среды  $t_{\text{ж}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ; коэффициент теплопроводности алюминия  $\lambda = 202 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ; коэффициент теплоотдачи от ребристой стенки к окружающему воздуху  $\alpha = 7 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ .

Вычислить температуру на конце ребра  $t_l$  и количество теплоты, отдаваемое четырьмя боковыми стенками  $Q_{\text{р.с.}}$ . Вычислить также количество теплоты, которое отдавалось бы в окружающую среду неоребренными стенками при тех же условиях,  $Q_{\text{с.}}$

**Ответ:**  $t_l = 29,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $Q_{\text{р.с.}} = 848 \text{ Вт}$ ;  $Q_{\text{с.}} = 223 \text{ Вт}$ .

**1-28.** Нагревательный прибор выполнен в виде вертикальной трубы с продольными стальными ребрами прямоугольного сечения (рис. 1 - 4). Высота трубы  $h = 1200 \text{ мм}$ ; наружный диаметр трубы  $d_2 = 60 \text{ мм}$ ; длина ребер  $l = 50 \text{ мм}$  и толщина ребер  $\delta = 3 \text{ мм}$ . Общее число ребер  $n = 20$ .

Температура у основания ребра  $t_o = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ; температура окружающего воздуха  $t_{\text{ж}} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи от ребер и внешней поверхности трубы к окружающему воздуху

$\alpha = 9,3 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ; коэффициент теплопроводности стенки  
 $\lambda = 55,7 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ .

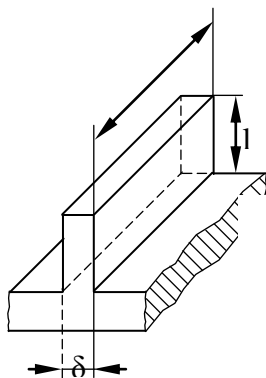


Рис. 1.3. К задаче 1-27

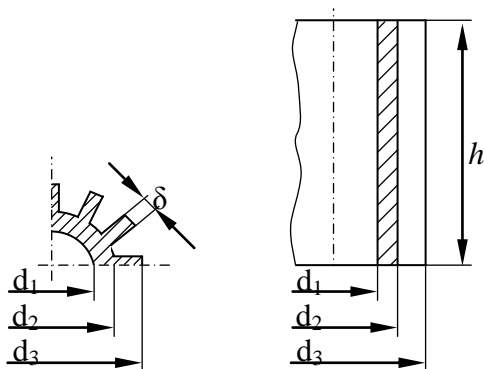


Рис. 1.4. К задаче 1 - 28

Вычислить количество теплоты, отдаваемой ребристой стенкой в окружающую среду.

**Ответ:** количество теплоты, отдаваемой ребрами,  $Q_p = 1270 \text{ Вт}$ . Количество теплоты, отдаваемой гладкой поверхностью между ребрами,  $Q_c = 88 \text{ Вт}$ . Всей ребристой стенкой передается  $Q_{p.c.} = 1358 \text{ Вт}$ .

**1-29.** Водяной экономайзер системы ЦКТИ выполнен из круглых ребристых чугунных труб наружным диаметром  $d = 76 \text{ мм}$ . Диаметр ребер  $D = 200 \text{ мм}$ , их толщина  $\delta = 5 \text{ мм}$ .

Определить количество теплоты, которое будет передаваться от горячих газов к внешней поверхности одной трубы, и температуру на конце ребра, если температура газов  $t_{ж} = 400 \text{ }^\circ\text{С}$ , температура у основания ребер  $t_0 = 180 \text{ }^\circ\text{С}$ , длина обогреваемой части трубы  $l = 3 \text{ м}$  и количество ребер по длине трубы  $n = 150$ . Коэффициент теплоотдачи от газов к ребристой поверхности  $\alpha = 46,5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ; коэффициент теплопроводности чугуна  $\lambda = 52,4 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ .

**Ответ:** количество теплоты, передаваемой ребрами,  $Q_p = 50$  кВт. Количество теплоты, передаваемой гладкой поверхностью между ребрами,  $Q_c = 5,5$  кВт; общее количество передаваемой теплоты  $Q_{pc} = 55,5$  кВт.

**Решение.**

Если пренебречь теплоотдачей с торца ребра, то формулы для избыточной температуры конца ребра и количества теплоты, передаваемой через одно ребро, имеют вид:

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 \frac{l_0(mr_2)K_1(mr_2) + l_1(mr_2)K_0(mr_2)}{l_0(mr_1)K_1(mr_2) + l_1(mr_2)K_0(mr_1)}$$

$$Q_{p1} = 2\pi r_1 \lambda \delta m v_1 \psi$$

где

$$\psi = \frac{l_1(mr_2)K_1(mr_2) - l_1(mr_1)K_0(mr_2)}{l_0(mr_1)K_1(mr_2) + l_1(mr_2)K_0(mr_1)}$$

В нашем случае

$$m = \sqrt{\frac{\alpha u}{\lambda f}} \approx \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda \delta}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 46,5}{52,4 \cdot 0,005}} = 18,9 \text{ м}^{-1}$$

$$r_1 = \frac{d}{2} = \frac{76}{2} = 38 \text{ мм}; r_2 = 100 \text{ мм}$$

$$mr_1 = 18,9 \cdot 0,038 = 0,719; mr'_2 = 18,9 \cdot 0,1025 = 1,94$$

где теплоотдача с торца приближенно учтена увеличением  $r_2$  на половину толщины ребра:  $r'_2 = r_2 + \delta/2 = 0,10 + 0,0025 = 0,1025$  м.

Подставляя полученные значения  $mr_1$  и  $mr'_2$  в выражение для избыточной температуры конца ребра, получаем:

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 \frac{l_0(1,94)K_1(1,94) + l_1(1,94)K_0(1,94)}{l_0(0,719)K_1(1,94) + l_1(1,94)K_0(0,719)} =$$

$$= (400 - 800) \frac{2,1926 \cdot 0,153 + 1,509 \cdot 0,1305}{1,1336 \cdot 0,153 + 1,509 \cdot 0,643} = 102,5$$

откуда температура конца ребра

$$t_l = t_{ж} - \vartheta_2 = 400 - 102,5 = 297,5^\circ\text{C}$$

Для определения количества теплоты, передаваемой одним ребром, подсчитываем функцию

$$\begin{aligned}\psi &= \frac{l_1(1,94)K_1(0,719) - l_1(0,719)K_0(1,94)}{l_0(0,719)K_1(1,94) + l_1(1,94)K_0(0,719)} = \\ &= \frac{1,509 \cdot 1,014 - 0,3836 \cdot 0,153}{1,1336 \cdot 0,153 + 1,569 \cdot 0,643} = 1,295\end{aligned}$$

и

$$Q_{p1} = 2\pi \cdot 0,038 \cdot 52,4 \cdot 18,9 \cdot 0,005 \cdot 220 \cdot 1,295 = 337 \text{ Вт};$$

для 150 ребер  $Q_p = nQ_{p1} = 150 \cdot 337 = 50 \text{ кВт}$ .

Количество теплоты, отдаваемой гладкой поверхностью между ребрами

$$Q_c = \alpha \vartheta_1 2\pi r_1 (l - n\delta) = 5,5 \text{ кВт}.$$

Общее количество передаваемой теплоты

$$Q_{pc} = Q_p + Q_c = 50 + 5,5 = 55,5 \text{ кВт}.$$

**1-30.** Электрический нагреватель выполнен из нихромовой проволоки диаметром  $d = 2 \text{ мм}$  и длиной  $l = 10 \text{ м}$ .

Он обдувается холодным воздухом с температурой  $t_{\text{ж}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Вычислить тепловой поток с 1 м нагревателя, а также температуры на поверхности  $t_c$  и на оси проволоки  $t_0$ , если сила тока, проходящего через нагреватель, составляет 25 А. Удельное электрическое сопротивление нихрома  $\rho = 1,1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ; коэффициент теплопроводности нихрома  $\lambda = 17,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  и коэффициент теплоотдачи от поверхности нагревателя к воздуху  $\alpha = 46,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

**Ответ:**  $q_l = 218,5 \text{ Вт}/\text{м}$ ;  $t_0 = 770 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_c = 769 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Решение.**

Электрическое сопротивление нагревателя

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

Количество теплоты, выделяемой нагревателем,

$$Q = I^2 R = 25^2 \cdot 3,5 = 2185 \text{ Вт.}$$

Тепловой поток на 1 м проволоки

$$q_l = \frac{Q}{l} = \frac{2185}{10} = 218,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

Температура поверхности проволоки определяется из условий теплоотдачи:

$$t_c = t_{\text{ж}} + \frac{q_l}{\pi d \alpha} = 20 + \frac{218,5}{3,14 \cdot 0,002 \cdot 46,5} = 769^\circ\text{C}$$

Температура на оси проволоки определяется из условий теплопроводности при наличии внутренних источников теплоты:

$$t_0 = t_c + \frac{q_l}{4\pi\lambda} = 796 + \frac{218,5}{3,14 \cdot 4 \cdot 17,5} = 770^\circ\text{C}$$

**1-31.** Трубка из нержавеющей стали внутренним диаметром  $d_1 = 7,6$  мм и наружным диаметром  $d_2 = 8$  мм обогревается электрическим током путем непосредственного включения в электрическую цепь.

Вся теплота, выделяемая в стенке трубки, отводится через внутреннюю поверхность трубки.

Вычислить объемную производительность источников теплоты и перепад температур в стенке трубки, если по трубке пропускается ток  $I = 250$  А.

Удельное электрическое сопротивление и коэффициент теплопроводности стали равны соответственно  $\rho = 0,85 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ,  $\lambda = 18,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

**Ответ:**  $q_v = 2,22 \cdot 10^9 \text{ Вт}/\text{м}^3$ ;  $t_{c2} - t_{c1} \approx 2,4^\circ\text{C}$ .

**Решение.**

Электрическое сопротивление на единицу длины трубки

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} = \frac{0,85}{3,14(4^2 - 3,8^2)} = 0,174 \text{ Ом/м.}$$

Тепловой поток на единицу длины

$$q_1 = I^2 R_1 = 250^2 \cdot 0,174 = 10870 \text{ Вт/м}$$

Объемная производительность внутренних источников теплоты

$$q_v = \frac{q_1}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} = \frac{10870}{3,14(4^2 - 3,8^2) \cdot 10^{-6}} = 2,22 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^3$$

Перепад температур в стенке трубки

$$\begin{aligned} t_{c2} - t_{c1} &= \frac{q_1 r_2^2}{4\pi\lambda(r_2^2 - r_1^2)} \left[ 2\ln \frac{r_2}{r_1} + \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 - 1 \right] = \\ &= \frac{q_v r_2^2}{4\lambda} \left[ 2\ln \frac{r_2}{r_1} + \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 - 1 \right] = \\ &= \frac{2,22 \cdot 10^9 \cdot 0,004^2}{4 \cdot 18,6} \left[ 2 \cdot 2,3 \frac{4}{3,8} + \left(\frac{3,8}{4}\right)^2 - 1 \right] \approx 2,4^\circ\text{C} \end{aligned}$$

## 2. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

**2-1.** Резиновая пластина толщиной  $2\delta = 20$  мм, нагретая до температуры  $t_0 = 140$  оС, помещена в воздушную среду с температурой  $t_{ж} = 15$  °С.

Определить температуры в середине и на поверхности пластины через  $\tau = 20$  мин после начала охлаждения.

Коэффициент теплопроводности резины  $\lambda = 0,175$  Вт/(м·К). Коэффициент температуропроводности резины  $a = 0,833 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с.

Коэффициент теплоотдачи от поверхности пластины к окружающему воздуху  $\alpha = 65$  Вт/м<sup>2</sup>·К.

**Ответ:**  $t_{x=0} = 47,5$  °С;  $t_{x=\delta} = 25,4$  °С.

**Решение.**

Температуры в середине и на поверхности безграничной пластины при охлаждении (нагревании) в среде с постоянной температурой можно определить с помощью графиков  $\theta_{x=0} = f_1(Bi, Fo)$  (рис. 2-1) и  $\theta_{x=\delta} = f_2(Bi, Fo)$  (рис. 2-2).

В рассматриваемом случае

$$Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda} = \frac{65 \cdot 0,01}{0,175} = 3,73$$

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{\delta^2} = \frac{0,833 \cdot 10^{-7} \cdot 1200}{0,01^2} = 1,0$$

При этих значениях критериев  $Bi$  и  $Fo$  по графику на рис. 2-1 находим  $\theta_{x=0} = 0,26$  и по графику на рис. 2-2  $\theta_{x=\delta} = 0,083$ .

Безразмерная температура

$$\theta = \frac{t - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}}$$

следовательно,

$$t_{x=0} = t_{ж} + \theta_{x=0}(t_0 - t_{ж}) = 15 + 0,26(140 - 15) = 47,5^{\circ}\text{C}$$

и

$$t_{x=\delta} = t_{ж} + \theta_{x=\delta}(t_0 - t_{ж}) = 15 + 0,083(140 - 15) = 25,4^{\circ}\text{C}$$

**2-2.** Для условий задачи 2-1 определить температуру на расстоянии  $x = \delta/2 = 5$  мм от середины пластины. Определить также безразмерные температуры в середине и на поверхности пластины расчетным путем и сравнить результаты расчета со значениями  $\theta_{x=0}$  и  $\theta_{x=\delta}$ , полученными в задаче 2-1.

**Ответ:**  $t_x = \delta/2 = 41^{\circ}\text{C}$ ;  $\theta_{x=0} = 0,257$ ;  $\theta_{x=\delta} = 0,082$

**Решение.**

Безразмерная температура неограниченной пластины при охлаждении в среде с постоянной температурой выражается уравнением

$$\Theta = \sum_{i=0}^{n\infty} \frac{2\sin\varepsilon_n}{\varepsilon_n + \sin\varepsilon_n \cos\varepsilon_n} \cos(\varepsilon_n \frac{x}{\delta}) \exp(-\varepsilon_n^2 Fo)$$

Так как в рассматриваемом случае критерий  $Fo = 1 > 0,3$  (см. задачу 2-1), то можно ограничиться первым членом ряда, тогда

$$\Theta = N \exp(-\varepsilon_1^2 Fo) \cos(\varepsilon_1 \frac{x}{\delta})$$

и безразмерные температуры в середине и на поверхности пластины будут соответственно равны:

$$\Theta_{x=0} = N \exp(-\varepsilon_1^2 Fo)$$

$$\Theta_{x=\delta} = P \exp(-\varepsilon_1^2 Fo)$$

Значения величин  $N$ ,  $P$ ,  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_1^2$  в зависимости от  $Bi$  приведены в табл. 2-1.

В рассматриваемом случае при  $Bi = 3,73$  из табл. 2-1 находим;

$$N = 1,224; P = 0,390; \varepsilon_1 = 1,248; \varepsilon_1^2 = 1,56.$$

Следовательно, при  $Fo = 1$

$$\Theta_{x=\frac{\delta}{2}} = 1,224 \cos\left(\frac{1,248}{2}\right) \exp(-1,56)$$

$$t_{x=\frac{\delta}{2}} = t_{ж} + \Theta_{x=\frac{\delta}{2}}(t_0 - t_{ж}) = 15 + 0,208 \cdot 125 = 41^\circ\text{C}$$

$$\Theta_{x=0} = 1,224 \exp(-1,56) = 0,257$$

$$\Theta_{x=\delta} = 0,309 \exp(-1,56) = 0,082$$



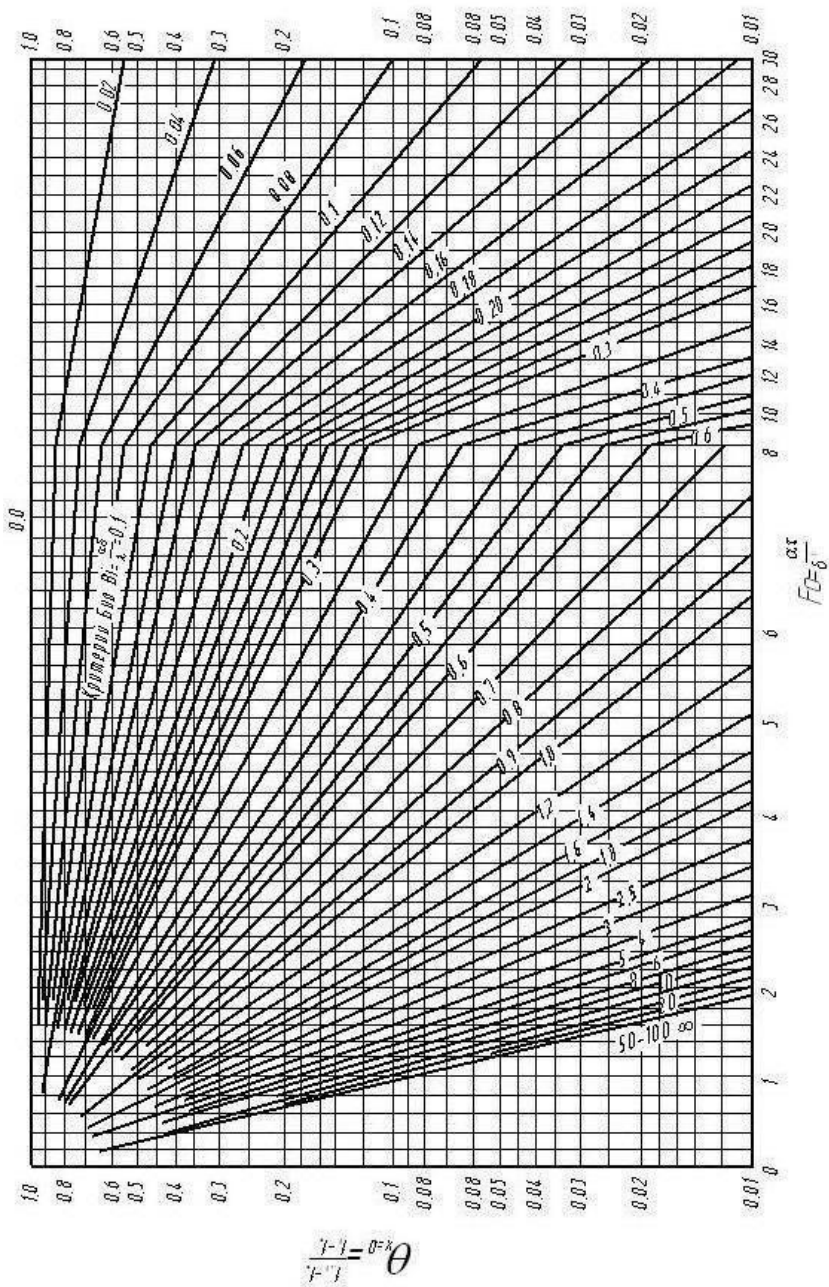


Рис. 2.1. Зависимость  $\theta = f(F_0, Bi)$  для середины тонкой пластины

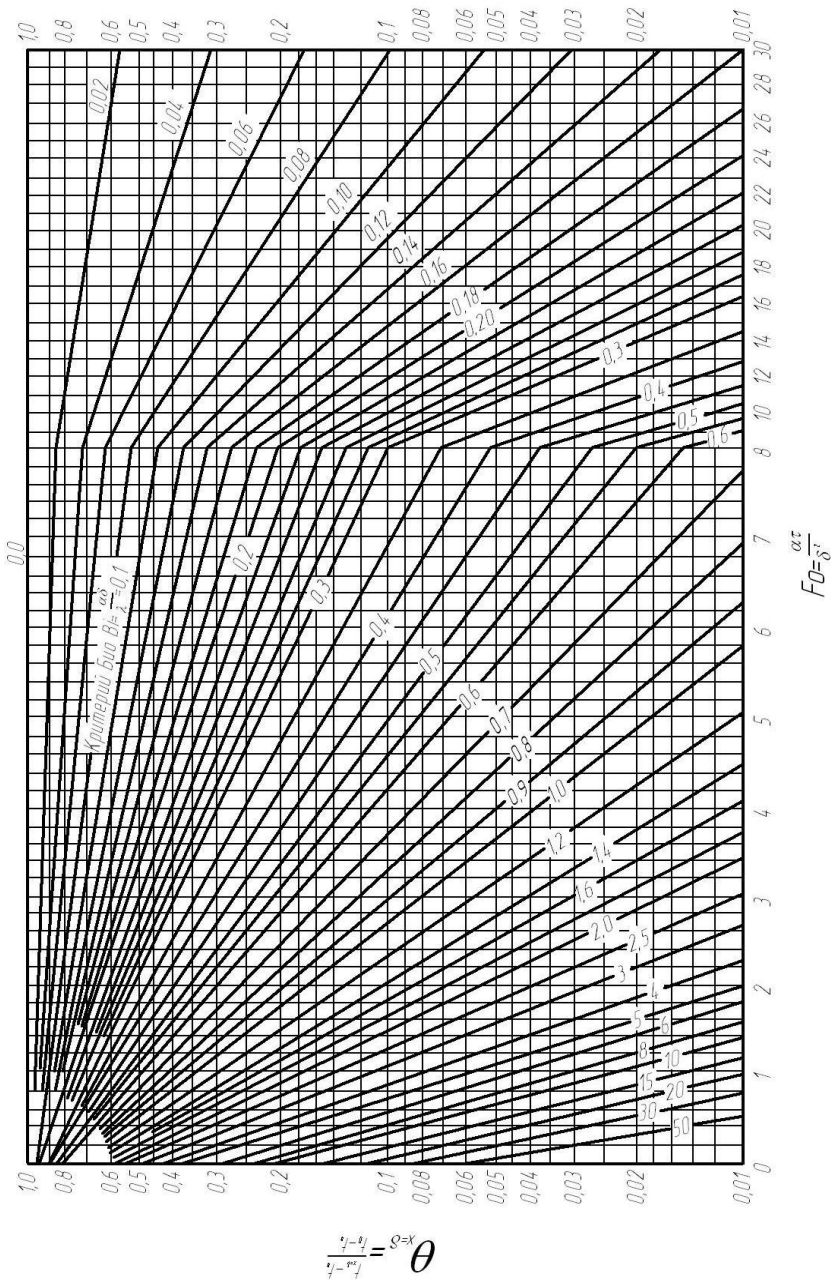


Рис. 2.2. Зависимость  $\theta = f(Fo, Bi)$  для поверхности тонкой пластины

Таблица 2.1

Коэффициенты для расчёта охлаждения (нагрева)  
пластины толщиной  $2\delta$

$Bi = \alpha\delta/\lambda$	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_1^2$	$P_0$	$N_0$
0,00	0,0000	0,0000	1,000	1,000
0,01	0,0998	0,0100	0,997	1,002
0,2	0,1410	0,0199	0,993	1,003
0,04	0,1987	0,0397	0,987	1,006
0,06	0,2425	0,0584	0,981	1,010
0,08	0,2791	0,0778	0,974	1,013
0,10	0,3111	0,0967	0,967	1,016
0,12	0,3397	0,1154	0,960	1,020
0,14	0,3656	0,1337	0,954	1,023
0,16	0,3896	0,1518	0,948	1,026
0,18	0,4119	0,1697	0,942	1,029
0,20	0,4328	0,1874	0,936	1,031
0,22	0,4525	0,2048	0,930	1,034
0,24	0,4712	0,2220	0,924	1,037
0,26	0,4889	0,2390	0,918	1,040
0,28	0,5058	0,2558	0,912	1,042
0,30	0,5218	0,2723	0,906	1,045
0,35	0,5590	0,3125	0,891	1,052
0,40	0,5932	0,3516	0,877	1,058
0,45	0,6240	0,3894	0,863	1,064
0,50	0,6533	0,4264	0,849	1,070
0,55	0,6800	0,462	0,836	1,076
0,60	0,7051	0,497	0,823	1,081
0,70	0,7506	0,564	0,798	1,092
0,80	0,7910	0,626	0,774	1,102
0,90	0,8274	0,684	0,751	1,111
1,00	0,8603	0,740	0,729	1,119
1,20	0,9171	0,841	0,689	1,134
1,40	0,9649	0,931	0,653	1,148
1,60	1,0008	1,016	0,619	1,159

Продолжение табл. 2.1

1,80	1,0440	1,090	0,587	1,169
2,00	1,0769	1,160	0,559	1,179
2,2	1,1054	1,222	0,535	1,186
2,4	1,1300	1,277	0,510	1,193
2,6	1,1541	1,332	0,488	1,200
2,8	1,1747	1,380	0,468	1,205
3,0	1,1925	1,420	0,448	1,210
3,5	1,2330	1,52	0,406	1,221
4,0	1,2646	1,59	0,370	1,229
4,5	1,2880	1,66	0,388	1,235
5,0	1,3138	1,73	0,314	1,240
5,5	1,3340	1,78	0,293	1,244
6,0	1,3496	1,82	0,273	1,248
7,0	1,3766	1,90	0,241	1,254
8,0	1,3978	1,95	0,216	1,257
9,0	1,4149	2,00	0,196	1,260
10	1,4289	2,04	0,180	1,262
12	1,4420	2,08	0,152	1,265
14	1,4560	2,12	0,132	1,267
16	1,4700	2,16	0,116	1,268
18	1,4830	2,20	0,104	1,269
20	1,4961	2,24	0,094	1,270
25	1,5070	2,27	0,076	1,271
30	1,5200	2,30	0,065	1,271
35	1,5260	2,33	0,056	1,272
40	1,5325	2,35	0,050	1,272
50	1,5400	2,37	0,040	1,272
60	1,5451	2,39	0,0333	1,273
70	1,5490	2,40	0,0286	1,273
80	1,5514	2,41	0,0250	1,273
90	1,5520	2,41	0,0222	1,273
100	1,5560	2,42	0,02001	1,273
$\infty$	1,5708	2,467	0,0000	1,273

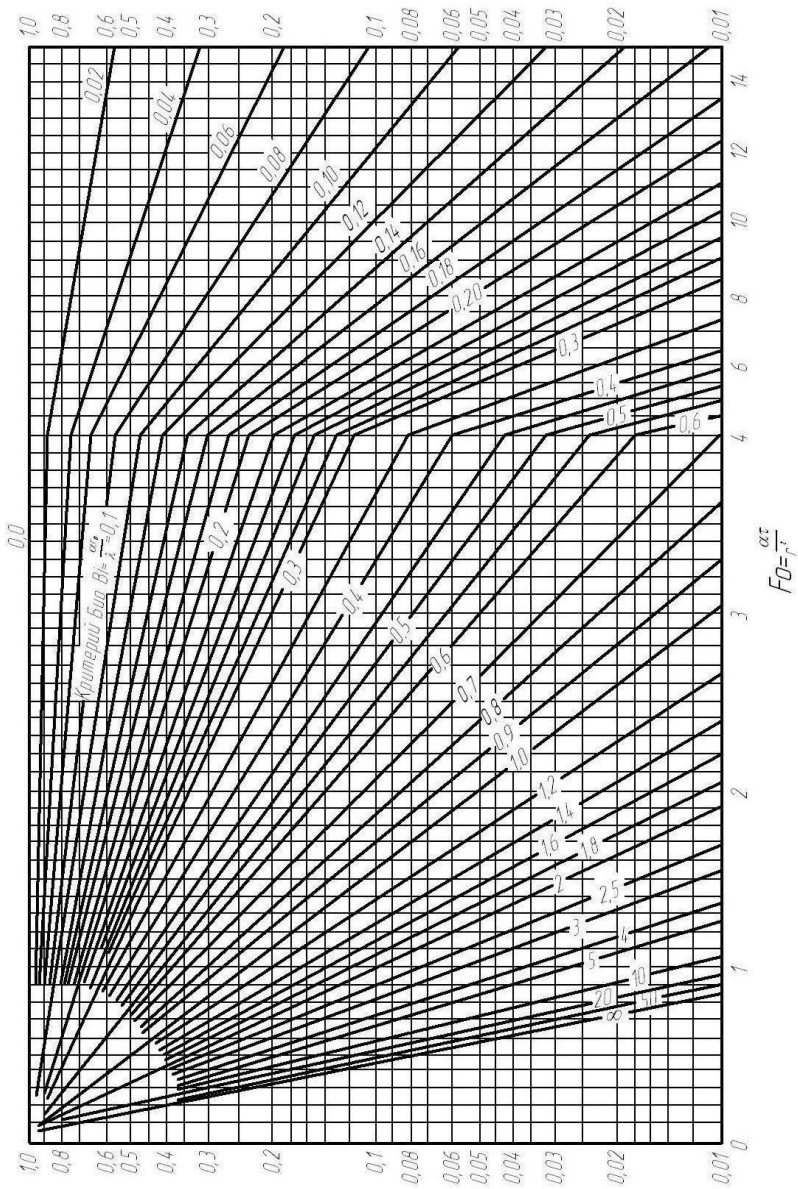


Рис. 2.3. Зависимость  $\theta = f(FO, Bi)$  для оси цилиндра

$$\frac{t_j - t_{\infty}}{t_0 - t_{\infty}} = \theta$$

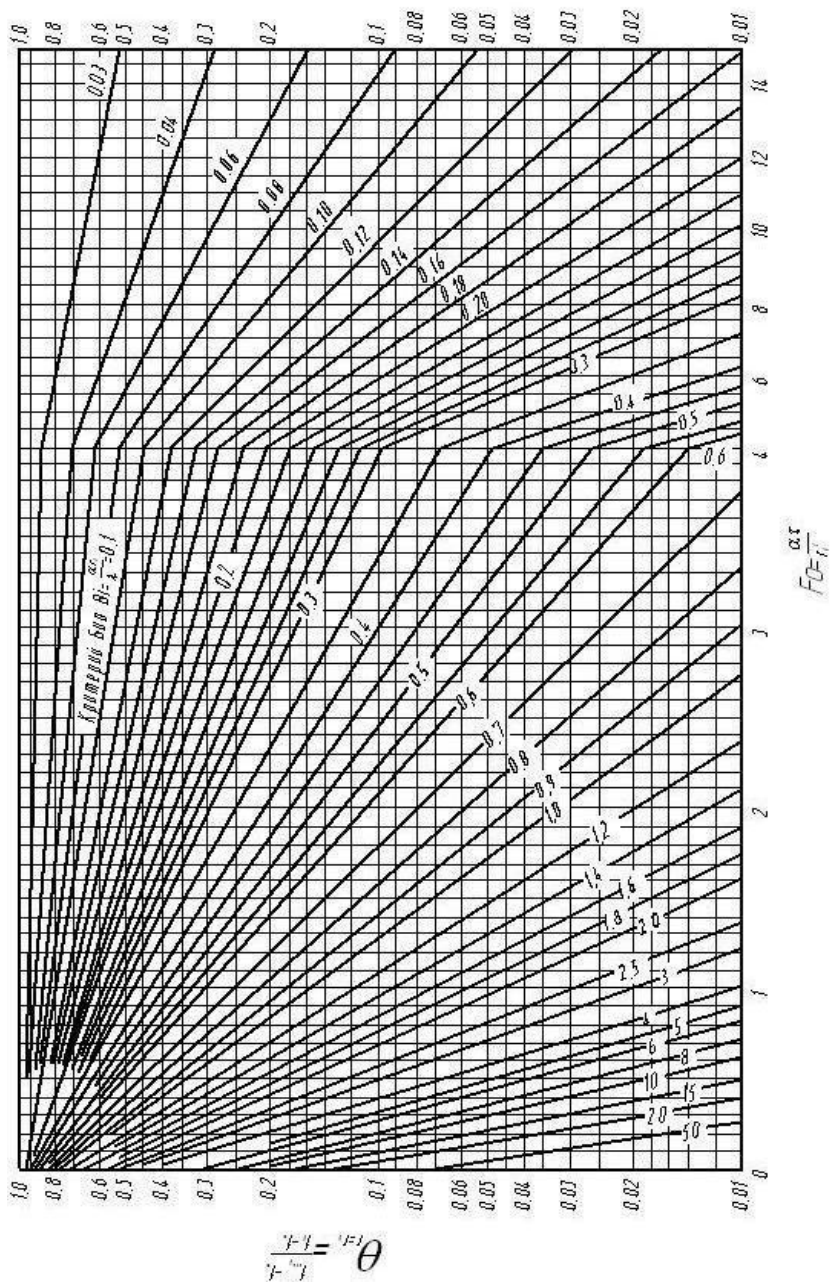


Рис. 2.4. Зависимость  $\theta = f(Fo, Bi)$  для поверхности цилиндра

Таблица 2.2

Коэффициенты для расчёта охлаждения (нагрева)  
длинного цилиндра радиусом  $r_0$

$Bi = ar/\lambda$	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_1^2$	$P_0$	$N_0$
0,00	0,0000	0,0000	1,0000	1,000
0,01	0,1412	1,0200	0,998	1,002
0,2	0,1995	0,0398	0,995	1,005
0,04	0,2814	0,0792	0,990	1,010
0,06	0,3438	0,1183	0,985	1,014
0,08	0,3960	0,1569	0,980	1,019
0,10	0,4417	0,1951	0,975	1,024
0,12	0,4726	0,2329	0,970	1,029
0,14	0,5200	0,2704	0,965	1,034
0,16	0,5545	0,3075	0,960	1,039
0,18	0,5868	0,3443	0,956	1,044
0,20	0,6170	0,3807	0,951	1,048
0,22	0,6455	0,4167	0,946	1,053
0,24	0,6726	0,4524	0,941	1,057
0,26	0,6983	0,4877	0,937	1,062
0,28	0,7229	0,5226	0,932	1,067
0,30	0,7465	0,5572	0,927	1,071
0,35	0,8012	0,6420	0,915	1,082
0,40	0,8516	0,726	0,903	1,093
0,45	0,8978	0,806	0,891	1,103
0,50	0,9408	0,888	0,880	1,114
0,55	0,9808	0,962	0,869	1,124
0,60	1,0184	1,036	0,858	1,134
0,70	1,0873	1,184	0,836	1,154
0,80	1,1490	1,322	0,815	1,172
0,90	1,2048	1,453	0,795	1,190
1,00	1,2558	1,580	0,774	1,208
1,20	1,3450	1,81	0,738	1,239
1,40	1,4250	2,03	0,704	1,268
1,60	1,4900	2,22	0,671	1,295

Продолжение табл. 2.2

1,80	1,5460	2,39	0,639	1,319
2,00	1,5994	2,55	0,610	1,340
2,2	1,6432	2,70	0,584	1,357
2,4	1,6852	2,84	0,558	1,375
2,6	1,7234	2,97	0,534	1,392
2,8	1,7578	3,09	0,513	1,406
3,0	1,7887	3,20	0,492	1,420
3,5	1,8547	3,44	0,446	1,449
4,0	1,9081	3,64	0,407	1,472
4,5	1,9519	3,81	0,374	1,489
5,0	1,9898	3,96	0,345	1,504
5,5	2,0224	4,09	0,320	1,516
6,0	2,0490	4,20	0,299	1,527
7,0	2,0937	4,38	0,262	1,51
8,0	2,1286	4,53	0,234	1,551
9,0	2,1566	4,65	0,210	1,560
10	2,1795	4,75	0,191	1,566
12	2,2181	4,92	0,161	1,575
14	2,2428	5,03	0,137	1,581
16	2,2627	5,12	0,120	1,585
18	2,2760	5,18	0,106	1,588
20	2,2890	5,24	0,095	1,590
25	2,3108	5,34	0,076	1,595
30	2,3261	5,41	0,065	1,598
35	2,3366	5,46	0,056	1,600
40	2,3455	5,50	0,050	1,602
50	2,3572	5,55	0,040	1,603
60	2,3651	5,59	0,0333	1,604
70	2,3707	5,62	0,0286	1,604
80	2,3750	5,64	0,0250	1,605
90	2,3791	5,66	0,0222	1,605
100	2,3809	5,67	0,0200	1,606
$\infty$	2,4048	5,784	0,0000	1,606



**2-3.** Определить промежуток времени, по истечении которого лист стали, прогретый до температуры  $t_0 = 500^\circ\text{C}$ , будучи помещен в воздушную среду, температура которой  $t_{\text{ж}} = 20^\circ\text{C}$ , примет температуру, отличающуюся не более чем на 1 % от температуры окружающей среды.

Толщина листа  $2\delta = 20$  мм, коэффициент теплопроводности стали  $\lambda = 45,5$  Вт/(м·К); теплоемкость стали  $c = 0,46$  кДж/(кг·К), плотность стали  $\rho = 7900$  кг/м<sup>3</sup>. Коэффициент теплоотдачи от поверхности листа к окружающему воздуху  $\alpha = 35$  Вт/м<sup>2</sup>·К.

Указание. Для оценки характера распределения температуры по сечению листа стали подсчитаем значение критерия Био:

$$Bi = \frac{\alpha\delta}{\lambda} = \frac{35 \cdot 0,01}{45,5} = 0,0077 \ll 0,1$$

Так как  $Bi \ll 0,1$ , то можно температуру по сечению пластины считать одинаковой во всех точках и воспользоваться формулой

$$\theta = \exp(-BiFo)$$

**Ответ:** 2 ч 15 мин.

**2-4.** Определить время  $\tau$ , необходимое для нагрева листа стали толщиной  $2\delta = 24$  мм, который имел начальную температуру  $t_0 = 25^\circ\text{C}$ , а затем был помещен в печь с температурой  $t_{\text{ж}} = 600^\circ\text{C}$ . Нагрев считать законченным, когда температура листа достигнет значения  $t = 450^\circ\text{C}$ .

Коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность стали равны соответственно  $\lambda = 45,4$  Вт/м·К;  $c = 0,502$  кДж/кг·К;  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>, а коэффициент теплоотдачи к поверхности листа  $\alpha = 23,3$  Вт/м<sup>2</sup>·К.

**Ответ:**  $\tau = 45$  мин.

**2-5.** Вермикулитовая плита, толщиной 30 мм, имеющая начальную температуру  $150^\circ\text{C}$ , охлаждается в среде, темпера-

тура которой постоянна и равна  $10^\circ\text{C}$ . Найти температуры в середине плиты, на её поверхности и на расстоянии 5 мм от поверхности через 0,5 и 1 час после начала охлаждения.

Коэффициент температуропроводности  $a = 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ ; коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 60 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ .

**Ответ:** 0,5 ч:  $t_{x=0} = 66,7^\circ\text{C}$ ;  $t_{x=1} = 24,7^\circ\text{C}$ ;  $t_5 = 46,5^\circ\text{C}$ ;  
1 ч:  $t_{x=0} = 28,5^\circ\text{C}$ ;  $t_{x=1} = 14,8^\circ\text{C}$ ;  $t_5 = 21,9^\circ\text{C}$ .

**2-6.** Стенка камеры сгорания толщиной 5 мм в начальный момент имеет температуру  $20^\circ\text{C}$ . Затем с одной стороны (другая поверхность стенки теплоизолирована) стенка стала омываться потоком газа с температурой  $2000^\circ\text{C}$  и коэффициентом теплоотдачи  $\alpha = 700 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ . Считая тепловой поток нормальным к стенке, найти температуры на обеих поверхностях стенки через 20 и 60 с после начала обогрева стенки.

Коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность материала стенки равны соответственно  $\lambda = 0,35 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $c = 1,47 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\rho = 1400 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

**Ответ:** учитывая только два первых члена ряда ( $\mu_1 = 1,4289$ ;  $\mu_2 = 4,3058$ , получаем: через 20 с -  $t_1 = 1708^\circ\text{C}$ ;  $t_2 = 170^\circ\text{C}$ ; через 60 с -  $t_1 = 1845^\circ\text{C}$ ;  $t_2 = 913^\circ\text{C}$ .

**2-7.** Длинный стальной вал диаметром  $d = 2r_0 = 120 \text{ мм}$ , который имел температуру  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ , был помещен в печь с температурой  $t_{\text{ж}} = 820^\circ\text{C}$ .

Определить время  $\tau$ , необходимое для нагрева вала, если нагрев считается законченным, когда температура на оси вала  $t_{r=0} = 800^\circ\text{C}$ . Определить также температуру на поверхности вала  $t_{r=r_0}$  в конце нагрева.

Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности стали равны соответственно  $\lambda = 21 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $a = 6,11 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Коэффициент теплоотдачи к поверхности вала  $\alpha = 140 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ .

**Ответ:**  $\tau = 51 \text{ мин}$ ;  $t_{r=r_0} = 804^\circ\text{C}$ .

### Решение.

Температуры на оси и поверхности длинного цилиндра при нагревании (охлаждении) в среде с постоянной температурой можно определить с помощью графиков  $\theta_{r=0} = F_1(Bi, Fo)$  (рис. 2-3) и  $\theta_{r=r_0} = F_2(Bi, Fo)$  (рис. 2-4).

В рассматриваемом случае

$$Bi = \frac{\alpha r_0}{\lambda} = \frac{140 \cdot 0,06}{21} = 0,4$$
$$\theta_{r=0} = \frac{t_{\text{ж}} - t_{r=0}}{t_{\text{ж}} - t_0} = \frac{820 - 800}{820 - 20} = 0,025$$

При этих значениях  $Bi$  и  $\theta_{r=0}$  по графику на рис. 2-3 находим значение критерия  $Fo = 5,2$ . Следовательно, время, необходимое для нагрева вала,

$$\tau = \frac{r_0^2 \cdot Fo}{\alpha} = \frac{60 \cdot 10^{-3} \cdot 5,2}{6,11 \cdot 10^{-3}} = 3060 \text{ с} = 51 \text{ мин}$$

Безразмерную температуру на поверхности вала при  $Bi = 0,4$  и  $Fo = 5,2$  определяем по графику на рис. 2-4:

$$\theta_{r=r_0} = \frac{t_{\text{ж}} - t_{r=r_0}}{t_{\text{ж}} - t_0} = 0,02$$

следовательно,

$$t_{x=r_0} = t_{\text{ж}} - 0,02(t_{\text{ж}} - t_0) = 820 - 0,02(820 - 20) = 804^\circ\text{C}$$

**2-8.** Определить значения температур на поверхности и на оси вала в условиях задачи 2-7 по истечении 20 и 40 мин после загрузки вала в печь.

**Ответ:** при  $\tau = 20$  мин  $t_{r=r} = 656^\circ\text{C}$ ;  $t_{r=0} = 620^\circ\text{C}$ ; при  $\tau = 40$  мин  $t_{r=r_0} = 763^\circ\text{C}$ ;  $t_{r=0} = 755^\circ\text{C}$ .

**2-9.** Для условий задачи 2-7 определить температуру на расстоянии  $r = 0,5r_0$  от оси вала через  $\tau = 20$  мин после начала нагрева.

Определить также расчетным путем температуры на поверхности и оси вала по истечении того же промежутка времени и сравнить результат расчета с ответом к задаче 2-8.

**Ответ:**  $t_{r=0} = 621 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $t_{r=0,5r_0} = 630 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $t_{r=r_0} = 656 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

**Решение.**

Безразмерная температура длинного цилиндра при нагревании (охлаждении) в среде с постоянной температурой выражается уравнением

$$\Theta = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{2J_1(\varepsilon_n)}{\varepsilon_n [J_0^2(\varepsilon_n) + J_1^2(\varepsilon_n)]} J_0\left(\varepsilon_n \frac{r}{r_0}\right) \exp(-\varepsilon_n^2 Fo)$$

где  $J_0(\varepsilon_n)$  и  $J_1(\varepsilon_n)$  — функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков.

Так как в рассматриваемом случае критерий

$$Fo = \frac{\alpha \delta}{r_0^2} = \frac{6,11 \cdot 10^{-6} \cdot 1200}{(60 \cdot 10^{-3})^2} 2,04 > 0,25$$

то можно ограничиться первым членом ряда, тогда

$$\Theta = N_0 J_0\left(\varepsilon_1 \frac{r}{r_0}\right) \exp(-\varepsilon_1^2 Fo)$$

и безразмерная температура на оси цилиндра

$$\Theta_{r=0} = N_0 \exp(-\varepsilon_1^2 Fo)$$

а безразмерная температура на поверхности цилиндра

$$\Theta_{r=r_0} = P_0 \exp(-\varepsilon_1^2 Fo)$$

Значения величин  $N_0$ ,  $P_0$ ,  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_1^2$  в зависимости от  $Bi$  приведены в табл. 2-2.

В рассматриваемом случае при  $Bi = 0,4$  из таблицы находим:  $N_0 = 1,093$ ;  $P_0 = 0,903$ ;  $\varepsilon_1 = 0,8516$ ;  $\varepsilon_1^2 = 0,726$ . Следовательно, при  $Fo = 2,04$

$$\begin{aligned} \Theta_{r=0,5r_0} &= 1,093 J_0\left(\frac{0,8516}{2}\right) \exp(-0,726 \cdot 2,04) = \\ &= 1,093 \cdot 0,9548 \cdot 0,276 = 0,238 \end{aligned}$$

$$t_{r=0,5r_0} = t_{\text{ж}} - \Theta_{r=0,5r_0} (t_{\text{ж}} - t_0) = 820 - 0,238 \cdot 800 = 630^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned}\Theta_{r=0} &= 1,093 \cdot 0,2276 = 0,2485 \\ t_{r=0} &= 820 - 0,2485 \cdot 800 = 621^\circ\text{C} \\ \Theta_{r=r_0} &= 0,903 \cdot 0,2276 = 0,205 \\ t_{r=r_0} &= 820 - 0,205 \cdot 800 = 656^\circ\text{C}\end{aligned}$$

**2-10.** Стальной слиток, имеющий форму параллелепипеда с размерами  $200 \times 400 \times 500$  мм, имел начальную температуру  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ , а затем был помещен в печь с температурой  $t_{\text{ж}} = 1400^\circ\text{C}$ .

Определить температуру  $t_{\text{ц}}$  в центре слитка через  $\tau = 1,5$  ч после загрузки его в печь.

Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности стали соответственно равны  $\lambda = 37,2$  Вт/(м·К),  $a = 6,94 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, а коэффициент теплоотдачи на поверхности слитка  $\alpha = 186$  Вт/м<sup>2</sup>·К.

**Ответ:**  $t_{\text{ц}} = 1282^\circ\text{C}$ .

**Решение.**

Безразмерная температура любой точки параллелепипеда равна произведению безразмерных температур трех безграничных пластин, пересечением которых образован параллелепипед.

Следовательно, температуру в центре параллелепипеда можно найти из уравнения

$$\frac{t_{\text{ж}} - t_{\text{ц}}}{t_{\text{ж}} - t_0} = \frac{t_{\text{ж}} - t_{x=0}}{t_{\text{ж}} - t_0} \cdot \frac{t_{\text{ж}} - t_{y=0}}{t_{\text{ж}} - t_0} \cdot \frac{t_{\text{ж}} - t_{z=0}}{t_{\text{ж}} - t_0}$$

Температуры пластин  $t_{x=0}$ ,  $t_{y=0}$ ,  $t_{z=0}$  можно найти с помощью графика зависимости температуры середины безграничной пластины от критериев  $Bi$  и  $Fo$  (см. рис. 2-1). Для пластины толщиной  $2\delta_x = 200$  мм имеем:

$$Fo_x = \frac{\alpha\tau}{\delta_x^2} = \frac{6,94 \cdot 10^{-6} \cdot 5400}{0,1^2} = 3,75$$

$$Bi_x = \frac{\alpha \delta_x}{\lambda} = \frac{189 \cdot 0,1}{37,2} = 0,5$$

По графику находим, что при  $Fo_x = 3,75$  и  $Bi_x = 0,5$

$$\frac{t_{ж} - t_{x=0}}{t_{ж} - t_0} = 0,22$$

Аналогично для пластины толщиной  $2\delta_y = 400$  мм имеем:  
 $Fo_x = 0,937$ ;  $Bi_y = 1,0$

По графику находим:

$$\frac{t_{ж} - t_{y=0}}{t_{ж} - t_0} = 0,57$$

Для пластины толщиной  $2\delta_z = 500$  мм

$$Fo_z = 0,6; Bi_z = 1,25$$

$$\frac{t_{ж} - t_{z=0}}{t_{ж} - t_0} = 0,68$$

Следовательно,

$$\frac{t_{ж} - t_{ц}}{t_{ж} - t_0} = 0,22 \cdot 0,57 \cdot 0,68 = 0,0852$$

и температура в центре слитка

$$t_{ц} = t_{ж} - 0,0852(t_{ж} - t_0) = 1400 - 0,0852(1400 - 200) = 1282^\circ\text{C}$$

**2-11.** При условиях нагревания слитка, рассмотренных в задаче 2-10, найти температуры в серединах граней размером  $200 \times 400$  мм и  $200 \times 500$  мм.

**Ответ:**  $t_{x=0,y=0,z=\delta z} = 1331^\circ\text{C}$ ;  $t_{x=0,y=\delta y,z=0} = 1323^\circ\text{C}$

**2-12.** Стальная болванка цилиндрической формы диаметром  $d = 80$  мм и длиной  $l = 160$  мм в начальный момент времени была равномерно нагрета до температуры  $t_c = 800^\circ\text{C}$ . Болванка охлаждается на воздухе, который имеет температуру  $t_{ж} = 30^\circ\text{C}$ .

Определить температуру в центре болванки  $t_{x=0;r=0}$  и в середине торцевой поверхности  $t_{r=0;x=l/2}$  через  $\tau = 30$  мин после начала охлаждения.

Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности стали равны соответственно:  $\lambda = 23,3 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $a = 6,11 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Коэффициент теплоотдачи от поверхности болванки  $\alpha = 118 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

**Ответ:**  $t_{x=0;r=0} = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{r=0;x=l/2} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$

**2-13.** При условиях охлаждения стальной болванки рассмотренных в задаче 2-12, определить температуру в центре болванки и в середине торцевой поверхности, если ее размеры увеличены в 2 раза, т. е.  $d = 160$  мм и  $l = 320$  мм, а все остальные условия остаются без изменений.

**Ответ:**  $t_{x=0;r=0} = 211 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{r=0;x=l/2} = 153 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**2-14.** Стальная пластина толщиной  $2\delta = 400$  мм нагревается в печи, имеющей постоянную температуру  $t_{\text{ж}} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температура пластины в момент помещения ее в печь была всюду одинаковой и равной  $t_0 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи к поверхности пластины в процессе нагрева оставался постоянным и равным  $\alpha = 200 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ . Два других размера пластины велики по сравнению с толщиной и температурное поле пластины можно рассматривать как одномерное.

Определить количество теплоты, которое будет подведено к  $1 \text{ м}^2$  пластины в течение 2 ч после начала нагрева. Коэффициент теплопроводности стали  $\lambda = 37,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  и температуропроводности  $a = 7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; плотность  $\rho = 7800 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

**Ответ:**  $\bar{Q}$  ошибка! Закладка не определена. = 0,098;

$Q = 1470 \cdot 103 \text{ кДж}/\text{м}^2$ .

### Решение

Расчет количества теплоты, отданной (воспринятой) пластиной в процессе охлаждения (нагрева) за промежутки

времени от  $\tau = 0$  до  $\tau$ , практически сводится к вычислению средней безразмерной температуры в момент  $\tau$ , т. е. может быть вычислено по формуле

$$Q = Q_{\pi}(1 - \bar{\Theta})$$

Здесь  $Q_{\pi}$  — полное количество теплоты, Дж, которое может быть отдано или воспринято пластиной за время от  $\tau = 0$  до  $\tau = \infty$ :

$$Q_{\pi} = 2\delta f \rho c(t_0 - t_{ж})$$

где  $f$  — площадь поверхности одной стороны пластины.

Средняя безразмерная температура в момент времени  $\tau$  для пластины может быть вычислена по формуле

$$\bar{\Theta} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{2 \sin^2 \varepsilon_n}{\varepsilon_n^2 + \sin \varepsilon_n \cos \varepsilon_n} \exp(-\varepsilon_n^2 Fo)$$

Подставляя соответствующие значения величин, заданных в условиях задачи, получаем:

$$Q_{\pi} = 0,4 \cdot 77800 \cdot 682 \cdot (800 - 30) = 1630 \cdot 10^3 \text{ кДж/м}^2$$

где

$$c = \frac{\lambda}{\rho \alpha} = \frac{37,2}{7800 \cdot 7 \cdot 10^{-6}} = 682 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$$

Вычислим критерии  $Fo$  и  $Bi$

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{\delta^2} = \frac{7 \cdot 10^{-6} \cdot 7200}{0,2^2} = 1,26$$

$$Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda} = \frac{200 \cdot 0,2}{37,2} = 1,075$$

Значение критерия  $Fo > 0,3$ , и для вычислений с достаточной точностью можем воспользоваться первым членом суммы ряда. По значению  $Bi$  из табл. 2-1 находим значение  $\varepsilon_1$ . Подставив значение  $\varepsilon_1$ , найдем:

$$\bar{\Theta} = 0,098$$

Подставив вычисленные значения  $Q_{\pi}$  и  $\bar{\Theta}$ , найдем:

$$Q = 1630 \cdot 10^3(1 - 0,098) = 1472 \cdot 10^3 \text{ кДж/м}^2.$$



### 3. ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ МЕТОДОМ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ

**3-1.** Необходимо опытным путем определить распределение температур в длинном стальном вале диаметром  $d = 400$  мм через  $\tau = 2,5$  ч после загрузки его в печь.

Для стали коэффициенты теплопроводности и температуропроводности равны соответственно:  $\lambda = 42$  Вт/(м·К);  $a = 1,18 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с. Коэффициент теплоотдачи к валу в печи  $\alpha = 116$  Вт/м<sup>2</sup>·К.

Исследование решено проводить в небольшой печи на геометрически подобной модели вала, выполненной из легированной стали. Для модели  $\lambda_m = 16$  Вт/м·К;  $a_m = 0,53 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с;  $\alpha_m = 150$  Вт/м<sup>2</sup>·К

Определить диаметр  $d_m$  модели вала и промежуток времени, через который после загрузки модели в печь необходимо измерить распределение температур в модели.

**Ответ:**  $d_m = 117,5$  мм;  $\tau_m = 1735$  с.

#### Решение.

Подобие температурных полей вала и модели будет иметь место при равенстве критериев для образца и модели:

$$Bi_m = Bi \text{ и } Fo_m = Fo.$$

Критерии Био и Фурье для вала равны:

$$Bi = \frac{\alpha r}{\lambda} = \frac{116 \cdot 0,2}{42} = 0,552$$
$$Fo = \frac{\alpha \tau}{r^2} = \frac{1,18 \cdot 10^{-5} \cdot 9 \cdot 10^3}{0,2^2} = 2,66$$

Из условия  $Bi_m = Bi$  находим диаметр модели вала:

$$d_m = 2r_x = \frac{2\lambda_m}{\alpha_m} Bi = 2 \cdot \frac{16}{150} \cdot 0,552 = 0,1175 \text{ м}$$

Из условия  $Fo_m = Fo$  находим искомый промежуток времени:

$$\tau_m = \frac{r_m^2}{\alpha_m} Fo = \frac{(0,05875)^2}{053 \cdot 10^{-5}} 2,66 = 1733 \text{ с.}$$

**3-2.** Определить диаметр модели вала  $d_m$  и необходимое значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_m$ , при которых в условиях задачи 3-1 подобие температурных полей наступит через  $\tau_m = 15$  мин после загрузки модели в печь.

Определить также соотношения между линейными размерами, временем и температурами для вала и модели, если известно, что их температуры при загрузке и температуры среды в печах были равны соответственно:  $t_0 = 10^\circ \text{C}$ ;  $t_{0m} = 20^\circ \text{C}$ ;  $t_{ж} = 1000^\circ \text{C}$ ;  $t_{жм} = 200^\circ \text{C}$ .

**Ответ:**  $d_m = 85 \text{ мм}$ ;  $\alpha_m = 208 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°K}$ ;  $r/r_m = 4,7$ ;  $\tau/\tau_m = 10$ ;  $t = 5,5t_m - 100$ .

**3-3.** На паропроводе перегретого пара диаметром  $d = 400 \text{ мм}$  установлена измерительная диафрагма, которая должна быть специально протарирована, т. е. должна быть найдена зависимость  $\Delta p = f(G)$ , где  $\Delta p$  – перепад статических давлений в диафрагме, Па;  $G$  – расход пара, кг/с.

Так как по производственным причинам тарировка не могла быть произведена непосредственно на образце, то для этой цели была изготовлена модель в 1/5 натуральной величины.

В результате испытаний модели на воде, температура которой  $t_{жм} = 20^\circ \text{C}$ , были получены значения перепадов давлений на диафрагме при различных расходах воды. Результаты измерений приведены ниже:

$\Delta p, \text{ Па}$ ...	477	1178	4520	18050	72200
$G, \text{ кг/с}$ ...	2,22	4,44	8,88	17,76	35,52

Найти зависимость  $\Delta p = f(G)$  для образца при течении пара в пара в автомоделной области и указать границы ее применения. Давление пара  $p = 98 \text{ кПа}$ . Температура пара  $t_{ж} = 250^\circ \text{C}$ .

**Ответ :**  $\Delta p = 222G^2$  при  $Re > 1,42 \cdot 10^5$

**Решение.**

Произведем обработку опытных данных в критериях подобия и построим зависимость  $Eu = f(Re)$ . Эта зависимость будет действительна и для пара. Поэтому по полученной для модели зависимости  $Eu = f(Re)$  можно найти зависимость  $\Delta p = f(G)$  для случая течения пара в образце.

Для определения зависимости  $Eu = f(Re)$  подсчитываем значения критериев для опытных данных тарировки на модели.

Критерий Эйлера

$$Eu = \frac{\Delta p_M}{\rho_M \cdot \omega_M^2}$$

Учитывая, что скорость

$$\omega_M = \frac{4G_M}{\rho_M \cdot \pi \cdot d_M^2}$$

получаем

$$Eu = \frac{\Delta p_M}{\rho_M} \left( \frac{\rho_M \pi d_M^2}{4G_M} \right)^2$$

При  $t_{ж.м} = 20^\circ\text{C}$  для воды  $\rho_M = 998 \text{ кг/м}^3$ ;  $\nu_M = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Подставляя известные значения величин, находим:

$$Eu = 998 \left( \frac{3,14 \cdot 0,08^2}{4} \right)^2 \frac{\Delta p_M}{G_M^2} = 2,51 \cdot 10^{-2} \frac{\Delta p_M}{G_M^2}$$

Критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega_M d_M}{\nu_M} = \frac{4G_M}{\rho_M \cdot \pi \cdot \nu_M \cdot d_M} = 15930G_M$$

где

$$d_M = \frac{d}{5} = \frac{0,4}{5} = 0,08 \text{ м}$$

Подставляя значения  $G_m$  и  $\Delta p_m$ , полученные при тарировке диафрагмы, подсчитаем соответствующие значения критериев подобия. Результаты этих расчетов представлены в следующей таблице:

Таблица 3.1

$\Delta p_m, \text{Па}$	$G_m, \text{кг/с}$	$W_m, \text{м/с}$	$Eu$	$Re$
477	2,22	0,443	2,44	35400
1 178	4,44	0,886	1,505	70800
4520	8,88	1,772	1,44	141 600
18050	17,76	3,544	1,44	283 200
72200	35,52	7,088	1,44	566 400

По этим данным построена кривая зависимости  $Eu = f(Re)$  (рис. 3-1).

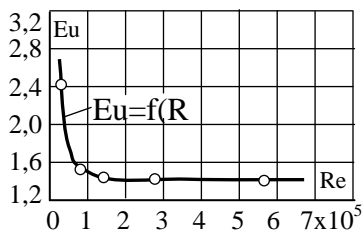


Рис. 3.1. К задаче 3-3

Из таблицы и графика ясно, что при  $Re > 1,42 \cdot 10^5$   $Eu = const = 1,44$  (автомодельная область). Следовательно, при течении пара через образец при  $Re > 1,42 \cdot 10^5$  критерий  $Eu = 1,44$ . Воспользуемся этим соотношением для нахождения искомой зависимости. Для образца при течении пара

$$\Delta p = Eu r \omega^2 = \frac{1,44}{v} \omega^2 = \frac{1,44}{2,452} m^2 = 0,587 \omega^2$$

где при  $p = 98 \text{ кПа}$  и  $t_{\text{ж}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$  удельный объем  $v = 2,452 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Заменяя скорость через расход

$$\omega = \frac{G_v}{0,785d^2}$$

где расход  $G$ , кг/с, получаем:

$$\Delta p = 0,587 \left( \frac{2,452}{0,785 \cdot 0,4^2} \right)^2 G^2$$

откуда

$$\Delta p = 222G^2 \text{ при } Re > 1,42 \cdot 10^5.$$

**3-4.** При ламинарном течении жидкости в прямой круглой трубе постоянного сечения на достаточно большом расстоянии от входа падение давления, Па, на участке длиной  $l$  определяется уравнением

$$\Delta p = \frac{128 \mu V l}{\pi d^4}$$

где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости, Па · с;  
 $V$  – объемный расход, м<sup>3</sup>/с;  $d$  – диаметр трубы, м.

Представить это уравнение в форме зависимости между критериями подобия и в виде зависимости для коэффициента трения:

$$Eu = f(Re) \text{ и } \xi = f_1(Re),$$

где

$$\xi = 2 \frac{\Delta p d}{\rho \omega^2 l}$$

**Ответ:**

$$Eu = \frac{32 l}{Re d}; \xi = \frac{64}{Re}$$

**3-5.** По трубке диаметром  $d = 16$  мм и длиной  $l = 2,1$  м течет горячая вода, отдающая теплоту через стенку трубы среде, омывающей трубку снаружи.

Расход воды через трубку  $G = 0,0091$  кг/с; температура воды на входе  $t_{ж1} = 87,2$  °С; температура воды на выходе  $t_{ж2} = 29$  °С; средняя температура стенки трубки  $t_c = 15,3$  °С.

Вычислить значения критериев  $Nu$ ,  $Re$  и  $Pe$ , приняв в качестве определяющей температуры среднеарифметическую температуру жидкости. Коэффициент теплоотдачи отнести к средней арифметической разности температур между водой и стенкой.

**Ответ:**  $Nu = 11,9$ ;  $Re = 1485$ ;  $Pe = 4600$ .

**3-6.** На воздушной модели парового котла, выполненной в масштабе  $1/8$  натуральной величины, производилось изучение теплоотдачи конвекцией. Для первого газохода модели при различных скоростях воздуха были получены следующие значения коэффициента теплоотдачи:

$W_M, \text{м/с}$	2,0	3,14	4,65	8,8
$\alpha_M, \text{Вт/м} \cdot \text{К}$	50,4	68,6	90,6	141

Средняя температура воздуха, проходящего через модель,  $t_{ж.м.} = 20$  °С. Диаметр трубок модели  $d_M = 12,5$  мм. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_M$  при обработке опытных данных был отнесен к средней арифметической разности температур между жидкостью и стенкой.

На основе данных, полученных на модели, найти формулу для расчета теплоотдачи конвекцией в первом газоходу котла в виде зависимости  $Nu = f(Re)$ .

**Ответ:**  $Nu = 0,15Re^{0,685}$ .

**Решение.**

По данным, полученным на модели, зависимость для теплоотдачи ищем в виде  $Nu = CRe^n$ .

$$Nu_M = \frac{\alpha_M d_M}{\lambda_M}; Re_M = \frac{\omega_M d_M}{\nu_M}$$

$$Nu_i = \frac{\alpha_i d_i}{\lambda_i}; \quad Re_i = \frac{\omega_i d_i}{\nu_i}$$

где при  $t_{ж.м} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  для воздуха  $\lambda_{ж} = 0,026 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$  и  $\nu_{ж} = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Подставив соответствующие значения в выражения для чисел  $Nu$  и  $Re$ , получим:

$$Nu_m = 0,481\alpha_m; \quad Re_m = 830w_m.$$

Результаты вычисления чисел  $Nu_m$  и  $Re_m$  для соответствующих значений  $\alpha_m$  и  $w_m$  сведены в таблицу.

Таблица 3.2

$w_m$ м/с	$\alpha_m$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К	$Re_m$	$Nu_m$
2,0	50,4	1660	24,2
3,14	68,6	2600	33,0
4,65	90,6	3860	43,6
8,8	141	7300	68,0

По этим данным строим зависимость  $Nu_m = f(Re_m)$  в логарифмических координатах (рис. 3-2). По тангенсу угла наклона кривой к оси абсцисс определяем показатель степени  $n$ , а затем, постоянную  $C$  :  $C = Nu_m/Re_m^n$ . Получаем расчетную формулу

$$Nu = 0,15Re^{0,685},$$

действительную в пределах  $1600 < Re < 7300$ .

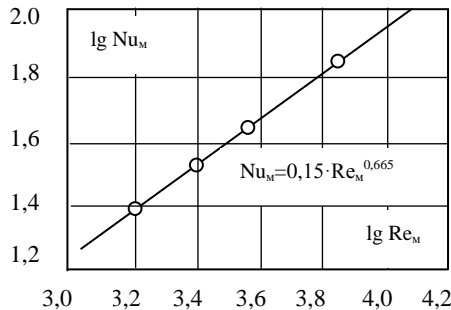


Рис. 3.2. К задаче 3-6

#### 4. ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ПРОДОЛЬНОМ ОБТЕКАНИИ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

**4-1.** Тонкая пластина длиной  $l_0 = 2$  м и шириной  $a = 1,5$  м обтекается продольным потоком воздуха (рис. 4-1). Скорость и температура набегающего потока равны соответственно  $w_0 = 3$  м/с;  $t_0 = 20$  °С. Температура поверхности пластины  $t_c = 90$  °С.

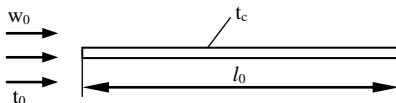


Рис. 4.1. К задаче 4-1

Определить средний по длине пластины коэффициент теплоотдачи и количество теплоты, отдаваемой пластиной воздуху.

**Ответ:**  $\alpha = 4,87$  Вт/м<sup>2</sup>·К;  $Q = 2050$  Вт.

**Решение.**

Для воздуха при  $t_0 = 20$  °С  $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda = 2,59 \cdot 10^{-2}$  Вт/м<sup>2</sup>·К;  $Pr = 0,703$ . Число Рейнольдса

$$Re = \frac{w_0 l_0}{\nu} = \frac{3 \cdot 2}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 3,98 \cdot 10^5 < 5 \cdot 10^5$$

Следовательно, режим течения в пограничном слое ламинарный. В этих условиях средняя по длине теплоотдача может быть рассчитана по формуле

$$Nu = 0,67 Re^{1/2} Pr^{1/3},$$

где

$$Nu = \frac{\alpha l_0}{\lambda}; Re = \frac{w_0 l_0}{\nu}$$



а физические свойства выбираются по температуре набегающего потока  $t_0$ .

В рассматриваемом случае

$$Nu = 0,67(3,98 \cdot 10^5)^{1/2} (0,703)^{1/3} = 375$$

и коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{l_0} = 375 \frac{2,59 \cdot 10^{-2}}{2} = 4,87 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Количество передаваемой теплоты с обеих сторон пластины  $Q = \alpha(t_c - t_0)F = 4,87(90 - 20) \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1,5 = 2050 \text{ Вт}$ .

**4-2.** Вычислить для условий задачи 4-1 толщину гидродинамического пограничного слоя и значения местных коэффициентов теплоотдачи на различных расстояниях от передней кромки пластины  $x = 0,1\ell_0; 0,2\ell_0; 0,5\ell_0$  и  $1,0\ell_0$ . Построить график зависимости толщины гидродинамического пограничного слоя  $\delta_l$  и коэффициента теплоотдачи от относительного расстояния  $x/\ell_0$ .

**Ответ:**

$x/\ell_0$	0,1	0,2	0,5	1,0
$\delta_l, \text{ мм}$	4,66	6,58	10,4	14,7
$\alpha_x, \text{ Вт}/\text{ м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{С}$	7,73	5,65	3,45	2,44

**Решение.**

По условиям задачи 4-1 теплоотдача происходит в условиях ламинарного пограничного слоя. Толщина ламинарного пограничного слоя и местный коэффициент теплоотдачи на расстоянии  $x$  от передней кромки пластины определяются по формулам

$$\delta_l = \frac{4,65 \cdot x}{\sqrt{Re_x}}$$

и

$$Nu_x = 0,335 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$$

где

$$Nu = \frac{\alpha_x \cdot x}{\lambda} \text{ и } Re = \frac{w_0 x}{\nu}$$

На расстоянии  $x = 0,1 \ell_0$

$$Re = \frac{w_0(0,1\ell_0)}{\nu} = \frac{3 \cdot 0,2}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 3,98 \cdot 10^4$$

$$\delta_{л} = \frac{4,65 \cdot 0,2}{\sqrt{3,98 \cdot 10^4}} = 4,66 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$Nu_x = 0,335(3,98 \cdot 10^4)^{(1/2)} (0,703)^{(1/3)} = 59,5;$$

$$\alpha_x = Nu_x \frac{\lambda}{x} = 59,5 \frac{2,59 \cdot 10^{-2}}{0,2} = 7,73 \text{ Вт/М}^2 \cdot \text{К}$$

Аналогичным образом рассчитываются искомые значения величин при других отношениях  $x/\ell_0$ . Результаты расчетов приведены в таблице, помещенной в ответе к задаче, и на рис. 4-2.

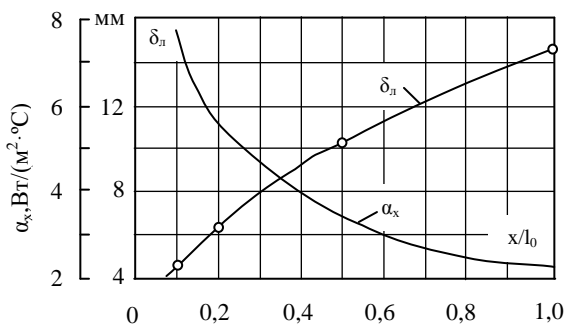


Рис. 4.2. К задаче 4-2

**4-3.** Тонкая пластина длиной  $\ell_0 = 125$  мм обтекается продольным потоком жидкости. Температура набегающего потока  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ .

Вычислить критическую длину  $x_{кр}$ , предельную толщину ламинарного пограничного слоя  $\delta_{л.кр}$ , значения местных коэффициентов теплоотдачи и толщину ламинарного пограничного слоя на расстояниях  $x = 0,1 \ell_0$ ;  $0,2 \ell_0$ ;  $0,5 \ell_0$  и  $1,0 \ell_0$  от передней кромки пластины.

Расчет произвести для двух случаев:

а) пластина обтекается воздухом при скорости набегающего потока  $w_0 = 10 \text{ м/с}$ ;

б) пластина обтекается водой при  $w_0 = 2 \text{ м/с}$ .

При расчете принять  $Re_{x_{кр}} = 5 \cdot 10^5$ .

**Ответ:**

При обтекании воздухом  $x_{кр} = 0,75 \text{ м}$ ,  $\delta_{л.кр} = 4,93 \text{ мм}$ ; при обтекании водой  $x_{кр} = 0,25 \text{ м}$ ,  $\delta_{л.кр} = 1,65 \text{ мм}$ .

$x/\ell_0$	0,1	0,2	0,5	1,0
$\alpha_x, \text{Вт/м}^2\text{К}$ :				
воздух	56,4	39,9	25,1	17,8
вода	4820	3420	2150	1520
$\delta_l, \text{мм}$ :				
воздух	0,635	0,895	1,42	2,00
вода	0,366	0,516	0,822	1,15

**4-4.** Вычислить для условий задачи 4-3 значения среднего коэффициента теплоотдачи и теплового потока на 1 м пластины  $q_l$  для воздуха и воды, если температура поверхности пластины  $t_c = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Ответ:** при обтекании воздухом  $\alpha = 35,7 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ ;  $q_l = 279 \text{ Вт/м}$ ; при обтекании водой  $\alpha = 3050 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ ;  $q_l = 2,3 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}$ .

**4-5.** Тонкая константановая лента сечением  $0,1 \times 5 \text{ мм}$  нагревается электрическим током силой  $I = 20 \text{ А}$ . Электрическое сопротивление 1 м ленты  $R_l = 1,0 \text{ Ом/м}$ .

Лента обтекается продольным потоком воды. Скорость и температура набегающего потока  $w_0 = 0,5 \text{ м/с}$  и  $t_0 = 10^\circ\text{С}$ .

Определить температуру ленты на расстоянии 25 и 200 мм от передней кромки.

**Ответ:** при  $x = 25 \text{ мм}$   $t_c = 35,2^\circ\text{С}$ ; при  $x = 200 \text{ мм}$   $t_c = 81,6^\circ\text{С}$ .

**4-6.** Плоская пластина длиной  $l = 1 \text{ м}$  обтекается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока воздуха  $w_0 = 80 \text{ м/с}$  и  $t_0 = 10^\circ\text{С}$ . Перед пластиной установлена турбулизирующая решетка, вследствие чего движение в пограничном слое на всей длине пластины турбулентное.

Вычислить среднее значение коэффициента теплоотдачи с поверхности пластины и значение местного коэффициента теплоотдачи на задней кромке. Вычислить также толщину гидродинамического пограничного слоя на задней кромке пластины.

**Ответ:** средний коэффициент теплоотдачи  $\alpha = 202 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ . Значение местного коэффициента теплоотдачи при  $x = l_0$   $\alpha_{x=l_0} = 157,5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ; толщина гидродинамического пограничного слоя при  $x = l_0$   $\delta_T = 16,5 \text{ мм}$ .

**Решение.**

При температуре набегающего потока  $t_0 = 10^\circ\text{С}$  физические свойства воздуха:  $\nu = 14,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  
 $\lambda = 2,51 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ .

$$Re = \frac{w_0 l_0}{\nu} = \frac{80 \cdot 1,0}{14,16 \cdot 10^{-6}} = 5,65 \cdot 10^6 > 5 \cdot 10^6$$

Режим движения в пограничном слое на пластине турбулентный.

Среднее значение коэффициента теплоотдачи при обтекании пластины воздухом для турбулентного пограничного слоя можно вычислить по формуле

$$Nu = 0,032Re^{0,8}$$

Подставив полученное значение числа Рейнольдса, получим:

$$Nu = 0,032(5,65 \cdot 10^6)^{0,8} = 8050$$

и

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{l_0} = 8050 \frac{2,51 \cdot 10^{-2}}{1,0} = 202 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Для вычисления местного коэффициента теплоотдачи при обтекании пластины воздухом и турбулентном пограничном слое можно воспользоваться следующей формулой:

$$Nu_x = 0,0255Re_x^{0,8},$$

где  $Nu_x = \alpha_x x / \lambda$  и  $Re_x = w_0 x / \nu$ .

Значение местного коэффициента теплоотдачи на задней кромке пластины найдем, положив  $x = l_0$ ; тогда  $Re_x = 5,65 \cdot 10^6$ ,  $Nu_x = 0,255(5,65 \cdot 10^6)^{0,8} = 6280$  и

$$\alpha_{x=l_0} = Nu_{x=l_0} \frac{\lambda}{l_0} = 6280 \frac{2,51 \cdot 10^{-2}}{1,0} = 157,5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Местную толщину турбулентного гидродинамического пограничного слоя можно вычислить по формуле

$$\delta_T = \frac{0,37x}{\sqrt[5]{Re_x}}$$

Подставив значения известных величин, получаем при  $x = l_0$

$$\delta_T = \frac{0,37 \cdot 1,0}{\sqrt[5]{5,65 \cdot 10^6}} = 0,0265 \text{ м}$$

**4-7.** Вдоль горячей стенки с постоянной температурой  $120\text{ }^\circ\text{C}$  направлен поток воздуха со скоростью  $5\text{ м/с}$ . Определить средний коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху, если длина стенки  $2\text{ м}$ , а температура набегающего воздуха  $10\text{ }^\circ\text{C}$ . Определить местный коэффициент теплоотдачи и толщину гидродинамического пограничного слоя воздуха на расстоянии  $1\text{ м}$  от начала стенки.

**Ответ:**  $\alpha_{\text{ср}} = 19\text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ;  $\alpha_{l=1} = 17,8\text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ;  $\delta = 19\text{ мм}$ .

**4-8.** Пластина длиной  $500\text{ мм}$  и шириной  $0,2\text{ м}$  имеет начальный не обогреваемый участок длиной  $100\text{ мм}$ . На поверхности пластины температура  $30\text{ }^\circ\text{C}$ . Продольный поток воды омывает пластину со скоростью  $0,05\text{ м/с}$ . Температура воды  $70\text{ }^\circ\text{C}$ . Найти тепловой поток к пластине. Сравнить с тепловым потоком для случая, когда пластина обогревается по всей длине.

**Ответ:**  $845\text{ Вт}$ ;  $972\text{ Вт}$ .

**4-9.** Тонкая пластина длиной  $l = 0,2\text{ м}$  обтекается продольным потоком воздуха. Скорость и температура набегающего потока равны соответственно  $w_0 = 150\text{ м/с}$  и  $t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить среднее значение коэффициента теплоотдачи и плотность теплового потока на поверхности пластины при условии, что температура поверхности пластины  $t_c = 50\text{ }^\circ\text{C}$ . Расчет произвести в предположении, что по всей длине пластины режим течения в пограничном слое турбулентный.

**Ответ:**  $\alpha = 454\text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ;  $q = 9080\text{ Вт/м}^2$ .

**Решение.**

При температуре набегающего потока  $t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$  физические свойства воздуха следующие:

$$\nu = 15,06 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}; \lambda = 2,59 \cdot 10^{-2}\text{ Вт/м}\cdot\text{К}; c_p = 1,0\text{ кДж/кг}\cdot\text{К}.$$

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{w_0 l}{\nu} = \frac{150 \cdot 0,2}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 1,99 \cdot 10^6$$

Число Маха

$$M = \frac{w}{a} = \frac{150}{344} = 0,436$$

где скорость звука в воздухе

$$a = 20,1\sqrt{T_0} = 20,1\sqrt{293} = 344$$

Для расчета теплоотдачи пластины в воздушном потоке высокой дозвуковой скорости при  $10^5 < Re < 2 \cdot 10^6$  и  $0,25 < M < 0,8$  формула справедлива при условии, что коэффициент теплоотдачи отнесен к разности температур между температурой стенки и адиабатической температурой стенки  $t_{a.c.}$ :

$$t_{a.c.} = t_0 + r \frac{w_0^2}{2c_p}$$

где коэффициент восстановления для продольно обтекаемой пластины при турбулентном пограничном слое можно принять равным  $r = \sqrt[3]{Pr}$ .

Для воздуха при  $t_0 = 20$  °С,  $r = \sqrt[3]{0,703} = 0,89$ .

В рассматриваемом случае

$$Nu = 0,032Re^{0,8} = 0,032(1,99 \cdot 10^6)^{0,8} = 3500$$

и

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{l} = 3500 \frac{2,59 \cdot 10^{-2}}{0,2} = 454$$

Адиабатическая температура стенки

$$t_{a.c.} = 20 + 0,89 \frac{150^2}{2 \cdot 1 \cdot 10^3} = 30^\circ\text{C}$$

и плотность теплового потока

$$q = \alpha(t_c - t_{a.c.}) = 454(50 - 30) = 9080 \text{ Вт/м}^2$$

**4-10.** Вычислить среднее значение коэффициента теплоотдачи и количество теплоты, отдаваемой с поверхности пластины, омываемой продольным потоком воздуха.

Скорость и температура набегающего потока равны соответственно:  $w_0 = 200$  м/с и  $t_0 = 30$  °С. Температура поверхности пластины  $t_c = 90$  °С. Длина пластины вдоль потока  $l = 120$  мм, а ее ширина  $b = 200$  мм.

Расчет произвести в предположении, что на всей длине пластины пограничный слой является турбулентным.

**Ответ:**  $\alpha = 640$  Вт/м<sup>2</sup>·К;  $Q = 1,3$  кВт.

## 5. ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ В КАНАЛАХ

**5-1.** Вычислить средний коэффициент теплоотдачи при течении трансформаторного масла в трубе диаметром  $d = 8$  мм и длиной  $l = 1$  м, если средняя по длине трубы температура масла  $t_{ж} = 80$  °С, средняя температура стенки трубки  $t_c = 20$  °С и скорость масла  $w = 0,6$  м/с.

**Ответ:**  $\alpha = 138$  Вт/м<sup>2</sup>·К

**Решение.**

Для определения режима движения масла вычисляем значение числа Рейнольдса.

При  $t_{ж} = 80$  °С кинематическая вязкость масла  $\nu_{ж} = 3,66 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с

$$Re_{ж} = \frac{wd}{\nu_{ж}} = \frac{0,6 \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{3,66 \cdot 10^{-6}} = 1310$$

Так как  $Re_{ж} < 2300$ , то режим течения ламинарный.

Для того чтобы установить, оказывает ли влияние на теплоотдачу естественная конвекция, нужно вычислить значение произведения  $Ra_{г}$ , где в качестве определяющей температуры принимается

$$t_{г} = 0,5(t_{ж} + t_c), \text{ а } t_{ж} = 0,5(t_{ж1} + t_{ж2}).$$



В рассматриваемом случае

$$t_r = 0,5(80 + 20) = 50 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

При этой температуре

$$\nu_r = 7,58 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \beta_r = 7,05 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}; \text{Pr}_r = 111;$$

$$(\text{GrPr})_r = g\beta_r \frac{(t_{\text{ж}} - t_c)d^3}{\nu_r^2} \text{Pr}_r = 9,81 \cdot 7,05 \cdot 10^{-4} \frac{(80 - 20)(8 \cdot 10^{-3})^3}{(7,58 \cdot 10^{-6})^2} 111 = 3,6 \cdot 10^5$$

Так как  $\text{Ra}_r < 8 \cdot 10^5$ , то естественная конвекция не оказывает существенного влияния на теплоотдачу и режим течения масла – вязкостный.

Расчет средней теплоотдачи при вязкостном режиме течения жидкости в трубах при постоянной температуре стенки ( $t_c = \text{const}$ ) можно производить по следующей формуле:

$$\text{Nu}_r = 1,55 \left( \text{Pe}_r \frac{d}{l} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_c} \right)^{0,14} \varepsilon$$

где

$$\text{Nu}_r = \frac{\alpha d}{\lambda_r}; \text{Pe}_r \frac{d}{l} = \frac{4GC_{\text{пр}}}{\pi l \lambda_r}; \alpha = \frac{q}{t_{\text{ж}} - t_c};$$

индексы «с» и «ж» означают, что физические свойства жидкости выбираются соответственно при температуре стенки  $t_c$  и температуре  $t_r = 0,5(t_{\text{ж}} + t_c)$ ;  $\varepsilon$  - поправка на участок гидродинамической стабилизации:

$$\varepsilon = 0,6 \left( \frac{1}{\text{Re}_{\text{ж}}} \frac{d}{l} \right)^{1/7} \left( 1 + 2,5 \frac{1}{\text{Re}_{\text{ж}}} \frac{l}{d} \right).$$

Эта поправка вводится, когда перед обогреваемым участком трубы нет участка гидродинамической стабилизации и

$$\frac{1}{\text{Re}_{\text{ж}}} \frac{l}{d} < 0,1$$

Формула справедлива при  $\text{Re}_{\text{ж}} < 2300$ ;

$$\frac{1}{Re_\Gamma} \frac{l}{d} \leq 0,05; Ra_\Gamma \leq 8 \cdot 10^5; 0,07 \leq \frac{\mu_c}{\mu_{ж}} \leq 1500.$$

В рассматриваемом случае  $t_{ж} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_c = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_\Gamma = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ .  
Физические свойства масла:

$$\rho_{ж} = 844 \text{ кг/м}^3; \mu_{ж} = 30,8 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}; \mu_\Gamma = 198,2 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}; \\ \lambda_\Gamma = 0,108 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}; c_{p\Gamma} = 1,846 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К};$$

Расход масла

$$G = \rho_{ж} w \frac{\pi d^2}{4} = 844 \cdot 0,6 \frac{3,14(8 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 2,53 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с}$$

Число

$$Pe_\Gamma \frac{d}{l} = \frac{4GC_{p\Gamma}}{\pi l \lambda_\Gamma} = \frac{4 \cdot 2,53 \cdot 10^{-2} \cdot 1,846 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 1,0} \cdot \frac{1,846 \cdot 10^3}{0,108} = 550$$

$\frac{1}{Re_\Gamma} \frac{l}{d} \leq 0,05$  и, следовательно, формула применима.

Поправка на гидродинамический начальный участок

$$\frac{1}{Re_{ж}} \frac{l}{d} = \frac{1}{1310} \frac{1}{8 \cdot 10^{-3}} = 0,0955 < 0,1$$

и

$$\varepsilon = 0,6(0,0955)^{-(1/7)}(1 + 2,5 \cdot 0,0955) = 1,05.$$

Число

$$Nu_\Gamma = 1,55(550)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{30,8}{198,2} \right)^{0,14} 1,05 = 10,2$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu_\Gamma \frac{\lambda_\Gamma}{d} = 10,2 \frac{0,108}{8 \cdot 10^{-3}} = 138 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

**5-2.** Определить температуры масла на входе и выходе из трубки и падение давления по длине трубки в условиях задачи 5-1.

**Ответ:**  $t_{ж1} = 82 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{ж2} = 78 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\Delta p = 1640 \text{ Па}$ .

### Решение.

При решении задачи 5-1 имеем:  $\alpha = 138 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $t_{\text{ж}} = 80 \text{ }^\circ\text{С}$ ;  $t_{\text{с}} = 20 \text{ }^\circ\text{С}$ ;  $G = 2,53 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с}$ .

Количество передаваемой теплоты

$$Q = \alpha(t_{\text{ж}} - t_{\text{с}})\pi dl = 138(80 - 20)3,14 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0 = 207 \text{ Вт.}$$

Теплоемкость масла при  $t_{\text{ж}} = 80 \text{ }^\circ\text{С}$   $c_{\text{рж}} = 2,03 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$  и изменение температуры масла по длине трубки

$$t_{\text{ж}1} - t_{\text{ж}2} = \frac{Q}{GC_{\text{рж}}} = \frac{207}{2,53 \cdot 10^{-2} \cdot 2,03 \cdot 10^3} = 4 \text{ }^\circ\text{С}$$

а среднее арифметическое значение температуры масла

$$t_{\text{ж}} = 0,5(t_{\text{ж}1} + t_{\text{ж}2}) = 80 \text{ }^\circ\text{С}, \text{ откуда } t_{\text{ж}1} = 82 \text{ }^\circ\text{С} \text{ и } t_{\text{ж}2} = 78 \text{ }^\circ\text{С.}$$

При вязкостном неизотермическом течении жидкости в трубах коэффициент сопротивления трения можно определить по следующей формуле:

$$\xi = \xi_u \left( \frac{\mu_{\text{с}}}{\mu_{\text{ж}1}} \right)^n,$$

где  $\xi_u$  – коэффициент сопротивления трения при изотермическом течении:

$$\xi_u = \frac{64}{Re};$$

$$n = C \left( Pe_1 \frac{d}{l} \right)^m \left( \frac{\mu_{\text{с}}}{\mu_{\text{ж}1}} \right)^{-0,062};$$

при  $Pe_1 \frac{d}{l} \leq 1500$ ;  $C = 2,3$ ;  $m = -0,3$ ;

при  $Pe_1 \frac{d}{l} > 1500$ ;  $C = 0,535$ ;  $m = -0,1$ .

В рассматриваемом случае температура масла на входе  $t_{\text{ж}1} = 82 \text{ }^\circ\text{С}$  и при этой температуре  $c_{\text{рж}1} = 2,04 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$ ;  $\lambda_{\text{ж}1} = 0,105 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ;  $\mu_{\text{ж}1} = 29,7 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ . Из решения задачи 5-1 имеем:  $Re_{\text{ж}} = 1310$  и  $\mu_{\text{с}} = 198,2 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;  $\rho_{\text{ж}} = 844 \text{ кг/м}^3$ ;  $w = 0,6 \text{ м/с}$ , тогда

$$Pe_1 \frac{d}{l} = \frac{4G C_{\text{рж}1}}{\pi l \lambda_{\text{ж}1}} = \frac{4 \cdot 2,53 \cdot 10^{-2} \cdot 2,04 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 1,0 \cdot 0,105} = 625$$

так как  $Pe_1 \frac{d}{l} < 1500$ , то  $C = 2,3$  и  $m = -0,3$ .

Показатель степени  $n$

$$n = 2,3(625)^{-0,3} \left( \frac{198,2}{29,7} \right)^{-0,062} = 0,3.$$

Коэффициент сопротивления трения

$$\xi = \frac{64}{Re} \left( \frac{\mu_c}{\mu_{ж1}} \right)^n = \frac{64}{1310} \left( \frac{198,2}{29,7} \right)^{0,3} = 0,0865$$

Падение давления

$$\Delta p = \xi \frac{\rho_{ж} w^2 l}{2 d} = 0,0865 \frac{844 \cdot 0,6^2}{2} \frac{1}{8 \cdot 10^{-3}} = 1640 \text{ Па.}$$

**5-3.** Как изменится значение среднего коэффициента теплоотдачи в условиях задачи 5-1, если длину трубы уменьшить в 5 раз ( $l/d = 25$  вместо  $l/d = 125$ ), а все остальные условия сохранить без изменения. Результат расчета сравнить с ответом к задаче 5-1.

**Ответ:**  $\alpha' = 262 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ . Средний по длине коэффициент теплоотдачи увеличится в 1,9 раза.

**5-4.** Определить гидравлическое сопротивление в условиях задачи 5-3. Ответ сравнить с результатом задачи 5-2.

**Ответ:**  $\Delta p' = 276 \text{ Па}$ . Гидравлическое сопротивление уменьшится в 5,8 раза.

**5-5.** Как изменится средний коэффициент теплоотдачи при вязкостном режиме течения жидкости в трубе, если скорость жидкости возрастет соответственно в 2 и 4 раза, а диаметр трубы, средняя температура жидкости и температура стенки останутся неизменными.

При расчете изменением значения поправки на участок стабилизации  $\varepsilon$  пренебречь.

**Ответ:** Коэффициент теплоотдачи возрастет соответственно в  $2^{1/3} \approx 1,26$  и  $4^{1/3} \approx 1,59$  раза.

**5-6.** По трубке диаметром  $d = 6$  мм движется вода со скоростью  $w = 0,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Температура стенки трубки  $t_c = 50$  °С. Какую длину должна иметь трубка, чтобы при температуре воды на входе  $t_{ж1} = 10$  °С её температура на выходе из трубки была  $t_{ж2} = 20$  °С.

**Ответ:**  $l = 0,76$  м

**Решение.**

При средней по длине температуре

$$t_{ж} = 0,5(t_{ж1} + t_{ж2}) = 0,5(10 + 20) = 15$$
 °С

кинематическая вязкость воды  $\nu_{ж} = 1,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  и число Рейнольдса

$$Re_{ж} = \frac{w}{\nu_{ж}} = \frac{0,4 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{1,16 \cdot 10^{-6}} = 2065.$$

Режим течения ламинарный. При температуре  $t_{г} = 0,5(t_{ж} + t_c) = 0,5(10 + 50) = 32,5$  °С;  $\nu_{г} = 0,769 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\beta_{г} = 3,37 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ ;  $Pr_{г} = 5,14$ ;

$$Ra = g\beta_{г} \frac{(t_c - t_{ж})d^3}{\nu_{г}^2} Pr_{г} = 9,81 \cdot 3,37 \cdot 10^{-4} \frac{(50 - 15)(6 \cdot 10^{-3})^3}{(0,769 \cdot 10^{-6})^2} 5,14 = 2,17 \cdot 10^5 < 8 \cdot 10^5.$$

Следовательно, режим вязкостный. Так как относительная длина трубки нам неизвестна, задачу решаем методом последовательных приближений.

Задаемся относительной длиной трубки  $l/d = 100$  и, следовательно,  $l = 100 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 0,6$  м.

Физические свойства воды:

при  $t_{ж} = 15$  °С,  $\mu_{ж} = 1155 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,  $\rho_{ж} = 999 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

при  $t_{г} = 32,5$  °С,  $\lambda_{г} = 0,631 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ ,  $c_{пр} = 4,174 \text{ кДж}/\text{кг} \cdot \text{К}$ ;

при  $t_c = 50$  °С  $\mu_c = 549,4 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Расход воды

$$G = \rho_{ж} w \frac{\pi d^2}{4} = 999 \cdot 0,4 \frac{3,14(6 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 0,0113 \text{ кг/с}$$

Критерий Пекле

$$Pe_{ж} \frac{d}{l} = \frac{4G C_{p\Gamma}}{\pi l \lambda_{\Gamma}} = \frac{4 \cdot 0,0113 \cdot 4174}{3,14 \cdot 0,6 \cdot 0,631} = 159$$

Поправка на участок гидродинамической стабилизации

$$\varepsilon = 0,6 \left( \frac{1}{Re_{ж} d} \right)^{-1/7} \left( 1 + 2,5 \frac{1}{Re_{ж} d} \right) = 0,6 \left( \frac{100}{2065} \right)^{-17/7} \left( 1 + 2,5 \frac{100}{2065} \right) \approx 1,04$$

Критерий Нуссельта

$$Nu_{\Gamma} = 1,55 \left( Pe_{\Gamma} \frac{d}{l} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_{ж}}{\mu_{с}} \right)^{0,14} \varepsilon = 1,55 (159)^{1/3} \left( \frac{1155}{549,4} \right)^{0,14} 1,04 = 9,7$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu_{\Gamma} \frac{\lambda_{\Gamma}}{d} = 9,7 \frac{0,631}{6 \cdot 10^{-3}} = 1020 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Количество передаваемой теплоты

$$Q = G \cdot C_{pж} (t_{ж2} - t_{ж1}) = 0,0113 \cdot 4187 \cdot 10 = 473 \text{ Вт,}$$

где  $c_{pж}$  выбирается по средней температуре жидкости  $t_{ж} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . С другой стороны, количество передаваемой теплоты

$$Q = \alpha (t_{с} - t_{ж}) \pi d l.$$

Таким образом, в результате первого приближения находим:

$$l = \frac{Q}{\alpha(t_c - t_{ж})\pi d} = \frac{473}{1020(50 - 15)3,14 \cdot 6 \cdot 10^{-3}} = 0,705 \text{ м}$$

Для второго приближения выбираем  $l = 0,75$  м и повторяем расчет.

Получаем:  $Pe_r \frac{d}{l} = 183$ ;  $\varepsilon = 1,03$ ;  $Nu_r = 8,94$ ;  $\alpha = 940$ .

В результате второго приближения получаем:

$$l = \frac{473}{940 \cdot 35 \cdot 3,14 \cdot 6 \cdot 10^{-3}} = 0,765 \text{ м.}$$

Так как принятая длина трубки с достаточной точностью совпадает с полученной в результате второго приближения, то третьего приближения делать не нужно и можно принять  $l = 0,76$  м.

**5-7.** Вода со скоростью  $w = 0,2$  м/с движется по трубке диаметром  $d = 4$  мм и длиной  $l = 200$  мм. Температура стенки трубы  $t_c = 70$  °С. Какая будет температура воды на выходе из трубки, если на входе она имеет температуру  $t_{ж1} = 10$  °С.

**Ответ:**  $t_{ж2} = 27$  °С.

**5-8.** По трубке диаметром  $d = 10$  мм течет масло марки МК. Температура масла на входе в трубку  $t_{ж1} = 80$  °С. Расход масла  $G = 120$  кг/ч. Какую длину должна иметь трубка, чтобы при температуре стенки  $t_c = 30$  °С температура масла на выходе из трубки  $t_{ж2}$  равнялась  $76$  °С?

**Ответ:**  $l = 1,66$  м.

**5-9.** Определить гидравлическое сопротивление при течении масла по трубке в условиях задачи 5-8. Сравнить результат расчета с гидравлическим сопротивлением при изотермическом течении масла при той же температуре на входе в трубку.

**Ответ:**

Падение давления по длине трубки  $\Delta p = 2,55 \cdot 10^4$  Па.

При изотермическом течении  $\Delta p_{\text{н}} = 1,05 \cdot 10^4 \text{Па}$ , т.е. примерно в 2,5 раза меньше.

**5-10.** По трубкам радиатора диаметром  $d = 5 \text{ мм}$  и длиной  $l = 0,4 \text{ м}$  течет масло марки МС-20 (рис. 5-1). Температура стенок трубок  $t_c = 30 \text{ }^\circ\text{С}$ . Средняя температура масла по длине радиатора  $t_{\text{ж}} = 70 \text{ }^\circ\text{С}$ .

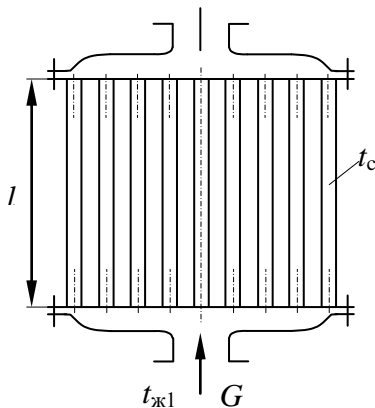


Рис. 5.1. К задаче 5-10

Определить общее количество отдаваемой теплоты, если радиатор имеет  $n = 120$  параллельно включенных трубок, а общий расход масла через радиатор составляет  $G = 2,5 \text{ кг/с}$ .

**Ответ:**  $Q = 9,1 \text{ кВт}$ .

**5-11.** Определить значение коэффициента теплоотдачи и количество передаваемой теплоты при течении воды в горизонтальной трубе диаметром  $d = 10 \text{ мм}$  и длиной  $l = 1,2 \text{ м}$ , если средние по длине температуры воды и стенки трубы равны соответственно  $t_{\text{ж}} = 30 \text{ }^\circ\text{С}$  и  $t_c = 60 \text{ }^\circ\text{С}$ , а расход воды  $G = 7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ .

**Ответ:**  $\alpha = 1065 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $Q = 1200 \text{ Вт}$ .

**Решение.**



Для определения режима движения воды определяем критерий  $Re$ . При  $t_{ж} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$   $\mu_{ж} = 801 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$  и

$$Re_{ж} = \frac{4G}{pd\mu_{ж}} = \frac{4 \cdot 7 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 801 \cdot 10^{-6}} = 1100 < 2300$$

Течение ламинарное.

Для того чтобы установить, оказывает ли влияние на теплоотдачу естественная конвекция, вычисляем произведение  $Ra_{г}$ , где в качестве определяющей температуры принимается температура  $t_{г} = 0,5(t_{с} + t_{ж})$ , а  $t_{ж} = 0,5(t_{ж1} + t_{ж2})$ . Следовательно,  $t_{г} = 0,5(30 + 60) = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

При этой температуре  $\nu_{г} = 0,607 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\beta_{г} = 4,18 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ ;  $Pr_{г} = 3,92$ .

Отсюда:

$$(GrPr)_{г} = g\beta_{г} \frac{(t_{с} - t_{ж})d^3}{\nu_{г}^2} Pr_{г} = 9,81 \cdot 4,18 \cdot 10^{-4} \frac{(60 - 30)(1 \cdot 10^{-2})^3}{(0,607 \cdot 10^{-6})^2} 3,92 = 1,31 \cdot 10^6 > 8 \cdot 10^5$$

Следовательно, естественная конвекция оказывает влияние на теплоотдачу; режим течения вязкостно-гравитационный.

При вязкостно-гравитационном режиме течения в горизонтальных трубах для расчета средней теплоотдачи можно воспользоваться следующей формулой:

$$Nu_{г} = 0,8 \left( Pe_{г} \frac{d}{l} \right)^{0,4} (GrPr)_{г}^{0,1} \left( \frac{\mu_{с}}{\mu_{ж}} \right)^{-0,14}$$

где

$$\alpha = \frac{q}{t_{с} - t_{ж}}; (GrPr)_{г} = g\beta_{г} \frac{(t_{с} - t_{ж})d^3}{\nu_{г}^2} Pr_{г};$$

$$Pe_{г} = \frac{wd}{a_{г}}; t_{ж} = 0,5(t_{ж1} + t_{ж2}).$$

Индексы "с" и "г" означают, что соответствующие физические свойства выбираются по температуре стенки  $t_{с}$  и  $t_{г} = 0,5(t_{с} + t_{ж})$ .

Формула справедлива при

$$Re_{ж} < 3000; 20 \leq Pe_{г} \frac{d}{l} \leq 120;$$

$$10^6 \leq (GrPr)_{г} \leq 13 \cdot 10^6; 2 \leq Pr_{г} \leq 10.$$

В рассматриваемом случае при  $t_{г} = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\alpha_{г} = 1,55 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}; \lambda_{г} = 0,641 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$$

при  $t_{ж} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$   $\rho_{ж} = 990 \text{ кг/м}^3$ ;

при  $t_{с} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$   $\mu_{с} = 470 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Отсюда:

$$w = \frac{4G}{\rho_{ж}\pi d^2} = \frac{4 \cdot 7 \cdot 10^{-3}}{990 \cdot 3,14 \cdot (1 \cdot 10^{-2})^2} = 0,09 \text{ м/с};$$

$$Pe_{г} \frac{d}{l} = \frac{wd}{\alpha_{г} l} = \frac{0,09 \cdot 1 \cdot 10^{-2}}{1,55 \cdot 10^{-7}} \frac{1 \cdot 10^{-2}}{1,2} = 48,4$$

$Ra_{г} = 1,31 \cdot 10^{-6}$  и формула применима.

Подставив полученные значения, найдем:

$$Nu_{г} = 0,8(48,4)^{0,4} (1,31 \cdot 10^6)^{0,1} \left(\frac{470}{801}\right)^{-0,14} = 16,6.$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu_{г} \frac{\lambda_{г}}{d} = 16,6 \frac{0,641}{1 \cdot 10^{-2}} = 1065 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Количество передаваемой теплоты

$$Q = \alpha(t_{с} - t_{ж})\pi dl$$

**5-12.** Трансформаторное масло подогревается от 10 до 30 °С, проходя внутри труб диаметром 20 × 1 мм длиной 3 м. Найти коэффициент теплоотдачи, если средняя температура стенки трубы 40 °С, количество труб 40 шт., а расход масла 18400 кг/ч.

**Ответ:**  $\alpha = 89 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ .

**5-13.** По горизонтальному трубопроводу диаметром 55 × 2,5 мм движется воздух со скоростью 4,6 м/с и температурой 95 °С. Температура стенки трубы 60 °С. Определить коэффициент теплоотдачи от воздуха к трубе. Во сколько раз изменится коэффициент теплоотдачи, если воздух заменить водой, протекающей со скоростью 1,2 м/с, а остальные условия оставить прежними?

**Ответ:**  $\alpha = 18,4 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ . Увеличится примерно в 304 раза.

**5-14.** По трубам вертикального теплообменника снизу вверх течет вода. Внутренний диаметр труб  $d = 16 \text{ мм}$ ; их длина  $l = 1,2 \text{ м}$ . Расход воды через одну трубу  $G = 58 \text{ кг/ч}$ . Температура воды на входе в теплообменник  $t_{ж1} = 30 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Определить количество теплоты, передаваемой от стенки одной трубы к воде, и температуру воды на выходе, если температура стенок труб поддерживается равной  $80 \text{ }^\circ\text{С}$ .

**Ответ:**  $Q = 1450 \text{ Вт}$ ;  $t_{ж2} \approx 52 \text{ }^\circ\text{С}$ .

**Решение.**

Секундный расход воды

$$G = \frac{58}{3600} = 1,61 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с.}$$

При  $t_{ж1} = 30 \text{ }^\circ\text{С}$   $\mu_{ж1} = 801 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$  и

$$Re_{ж1} = \frac{4G}{\pi d \mu_{ж1}} = \frac{4 \cdot 1,61 \cdot 10^{-2}}{3,14 \cdot 16 \cdot 10^{-3} \cdot 801 \cdot 10^{-6}} = 1600 < 2300.$$

Режим течения ламинарный.

Далее необходимо вычислить произведение  $Ra_\Gamma$ . Так как нам неизвестно значение температуры воды на выходе  $t_{ж2}$  и, следовательно, нельзя найти ее среднюю температуру  $t_{ж}$ , то задачу решаем методом последовательных приближений.

Задаемся  $t_{ж2} = 50 \text{ }^\circ\text{С}$ , тогда

$$t_{ж} = 0,5(t_{ж1} + t_{ж2}) = 0,5(30 + 50) = 40 \text{ }^\circ\text{С}$$

$$t_\Gamma = 0,5(t_c + t_{ж}) = 0,5(80 + 40) = 60 \text{ }^\circ\text{С}$$

При этой температуре

$$\beta_\Gamma = 5,11 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}; \nu_\Gamma = 0,478 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; Pr_\Gamma = 2,98;$$

$$(GrPr)_\Gamma = g\beta_\Gamma \frac{(t_c - t_{ж})d^3}{\nu_\Gamma^2} Pr_\Gamma = 9,81 \cdot 5,11 \cdot 10^{-4} \frac{(80 - 40)(16 \cdot 10^{-3})^3}{(0,478 \cdot 10^{-6})^2} 2,98 = 1,07 \cdot 10^7 > 8 \cdot 10^5$$

Режим течения вязкостно-гравитационный.

При вязкостно-гравитационном режиме течения в вертикальных трубах и совпадении направлений вынужденной и свободной конвекций у стенки (охлаждение жидкости и течение сверху вниз или нагревание и течение снизу вверх) для расчета средней теплоотдачи можно воспользоваться следующей формулой:

$$Nu_c = 0,35 \left( Pe_\Gamma \frac{d}{l} \right)^{0,3} \left[ (GrPr)_\Gamma - \frac{d}{l} \right]^{0,18},$$

где коэффициент теплоотдачи отнесен к начальной разности температур  $t_c - t_{ж1}$ ;

$$\alpha = \frac{q}{t_c - t_{ж}}; (GrPr)_\Gamma = g\beta_\Gamma \frac{(t_c - t_{ж})d^3}{\nu_\Gamma^2} Pr_\Gamma;$$

$$Pe_\Gamma = \frac{wd}{a_\Gamma}; t_{ж} = 0,5(t_{ж1} + t_{ж2}).$$

Индексы "с" и "Г" означают, что соответствующие физические свойства выбираются по температуре стенки  $t_c$  и  $t_\Gamma = 0,5(t_c + t_{ж})$ .

Формула справедлива при  $Re < 2300$ :

$$\left( Pe_\Gamma \frac{d}{l} \right)_{a.c.} \leq Pe_\Gamma \frac{d}{l} \leq 110; 20 \leq \frac{l}{d} \leq 130;$$

$$8 \cdot 10^5 \leq (GrPr)_\Gamma \leq 4 \cdot 10^8$$

Здесь асимптотическое значение числа Пекле

$$\left( Pe_\Gamma \frac{d}{l} \right)_{a.c.} \approx 1,5 \left( GrPr \frac{d}{l} \right)_\Gamma^{0,25}$$

В рассматриваемом случае при  $t_\Gamma = 60^\circ\text{C}$   $a_\Gamma = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ; при  $t_c = 80^\circ\text{C}$   $\lambda_c = 0,635 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ; при  $t_{ж} = 40^\circ\text{C}$   $\rho_{ж} = 992 \text{ кг/м}^3$ .

Средняя скорость течения воды

$$w = \frac{4G}{\rho_{\text{ж}} \pi d^2} = \frac{4 \cdot 1,61 \cdot 10^{-3}}{990 \cdot 3,14 \cdot (16 \cdot 10^{-2})^2} = 0,081 \text{ м/с};$$

$$Pe_{\Gamma} \frac{d}{l} = \frac{wd}{a_{\Gamma} l} = \frac{0,081 \cdot 16 \cdot 10^{-2}}{1,6 \cdot 10^{-7}} \frac{16 \cdot 10^{-2}}{1,2} = 108;$$

$$(GrPr)_{\Gamma} \frac{d}{l} = 1,07 \cdot 10^7 \frac{16 \cdot 10^{-3}}{1,2} = 1,43 \cdot 10^5;$$

$$\left( Pe_{\Gamma} \frac{d}{l} \right)_{a.c.} \approx 1,5(1,43 \cdot 10^5)^{0,25} = 29$$

Так как все критерии находятся в указанных выше пределах, то формула применима.

Число

$$Nu_c = 0,35(108)^{0,3}(1,43 \cdot 10^5)^{0,18} = 12,2.$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu_c \frac{\lambda_c}{d} = 12,2 \frac{0,635}{16 \cdot 10^{-3}} = 482 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Количество передаваемой теплоты

$$Q = \alpha(t_c - t_{\text{ж}}) \pi d l = 482(80 - 30) 3,14 \cdot 16 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 = 1450 \text{ Вт}$$

Проверка принятого значения температуры воды на выходе из трубы:

$$t_{\text{ж}2} = t_{\text{ж}1} + \frac{Q}{GC_{p\text{ж}}} = 30 + \frac{1450}{1,61 \cdot 10^{-2} \cdot 4174} = 51,5^{\circ}\text{C}$$

где теплоемкость воды выбрана при  $t_{\text{ж}} = 40^{\circ}\text{C}$ :

$$C_{p\text{ж}} = 4174 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

Таким образом, в результате первого приближения  $t_{\text{ж}2} = 51,5^{\circ}\text{C}$ .

Задавшись для второго приближения  $t_{\text{ж}2} = 52^{\circ}\text{C}$ , получим  $t_{\text{ж}} = 0,5(t_{\text{ж}1} + t_{\text{ж}2}) = 41^{\circ}\text{C}$  и  $t_{\Gamma} = 0,5(t_c + t_{\text{ж}}) = 60,5^{\circ}\text{C}$ . Совпадение достаточно хорошее и дальнейших пересчетов делать не нужно.

**5-15.** Как изменятся количество передаваемой теплоты и температура воды на выходе из теплообменника в условиях

задачи 5-14, если вода будет двигаться не снизу вверх, а сверху вниз, а все остальные условия останутся без изменений?

**Ответ:**  $Q = 1860$  Вт;  $t_{ж2} = 57,6$  °С, т.е.  $Q$  увеличится примерно на 28 %.

**Указание.** Как и в задаче 5-14, режим течения вязкостно-гравитационный.

При вязкостно-гравитационном режиме течения в вертикальных трубах и противоположном направлении вынужденной и свободной конвекций у стенки (охлаждение жидкости и течение снизу вверх или нагревание и течение сверху вниз) для расчета средней теплоотдачи можно воспользоваться следующей формулой:

$$Nu_{ж} = 0,037 Re_{ж}^{0,37} Pr_{ж}^{0,4} \left( \frac{\mu_c}{\mu_{ж}} \right)^n,$$

где при нагревании  $n = -0,11$ ; при охлаждении  $n = -0,25$ .

$$\alpha = \frac{q}{t_{ж} - t_c}; t_{ж} = 0,5(t_{ж1} + t_{ж2})$$

Формула справедлива при

$$250 \leq Re_{ж} \leq 2 \cdot 10^4; 1,5 \cdot 10^6 \leq (GrPr)_{г} \leq 12 \cdot 10^6.$$

Так как в рассматриваемой задаче среднеарифметическое значение температуры воды  $t_{ж}$  неизвестно, то можно задаться температурой воды на выходе  $t_{ж2}$  и провести расчет методом последовательных приближений.

**5-16.** Определить коэффициент теплоотдачи от стенки трубки конденсатора паротурбинной установки к охлаждающей воде, если средняя по длине температура стенки  $t_c = 28$  °С, внутренний диаметр трубки  $d = 16$  мм, температуры воды на входе и выходе из трубки равны соответственно  $t_{ж1} = 10$  °С и  $t_{ж2} = 18$  °С и средняя скорость воды  $w = 2$  м/с.

Определить также количество передаваемой теплоты и длину трубки.

**Ответ:**  $\alpha = 7340 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $Q = 13,5 \text{ кВт}$ ;  $l = 2,7 \text{ м}$ .

**Решение.**

Так как заданы температуры  $t_{ж1}$  и  $t_{ж2}$ , то число  $Re$  можно определить по среднеарифметической температуре жидкости

$$t_{ж} = 0,5(t_{ж1} + t_{ж2}) = 0,5(10 + 18) = 14^\circ\text{С}$$

При этой температуре  $\nu_{ж} = 1,18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  и

$$Re_{ж} = \frac{wd}{\nu_{ж}} = \frac{2 \cdot 16 \cdot 10^{-3}}{1,18 \cdot 10^{-6}} = 2,71 \cdot 10^4 > 1 \cdot 10^4.$$

Режим движения турбулентный.

Расчет теплоотдачи при турбулентном режиме течения в трубах и каналах несжимаемой жидкости с числами  $Pr > 0,7$  можно производить по следующей формуле:

$$Nu_{ж} = 0,021 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \varepsilon_l,$$

где индексы "ж" и "с" означают, что физические свойства жидкости выбираются соответственно по среднеарифметической температуре  $t_{ж}$  и температуре стенки  $t_c$ ;

$$\alpha = \frac{q}{\Delta t_l}; \Delta t_l = \frac{t_{ж2} - t_{ж1}}{\ln \frac{t_c - t_{ж1}}{t_c - t_{ж2}}}$$

$\varepsilon_l$  - поправка на начальный участок; при  $l/d > 50$   $\varepsilon_l = 1$ .  
Значения  $\varepsilon_l$  приведены в таблице.

При значениях  $Re_{ж} > 1 \cdot 10^5$  или  $Pr_{ж} > 5$  более точные результаты дает формула

$$Nu_{ж} = \frac{\xi Re_{ж} Pr_{ж}}{12,7 \sqrt{\xi} \left( Pr_{ж}^{\frac{2}{3}} - 1 \right) + 1,07} \left( \frac{\mu_{ж}}{\mu_c} \right)^n,$$

$l/d$	$Re_{ж}$			
	$1 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$
1	1,65	1,51	1,34	1,28
2	1,50	1,40	1,27	1,22
5	1,34	1,27	1,18	1,15
10	1,23	1,18	1,13	1,10
15	1,17	1,13	1,10	1,08
20	1,13	1,10	1,08	1,06
30	1,07	1,05	1,04	1,03
40	1,03	1,02	1,02	1,02
50	1	1	1	1

где  $\xi = (1,82 \lg Re_{ж} - 1,64)^{-2}$  – коэффициент сопротивления трения при изотермическом турбулентном течении жидкости в гладких трубах. При нагревании жидкости  $n = 0,11$ , при ее охлаждении  $n = 0,25$ .

Расчет для данной задачи проводим по первой формуле.

При  $t_{ж} = 14 \text{ }^\circ\text{C}$  для воды  $Pr_{ж} 8,5$ ;  $\lambda_{ж} = 0,584 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ;  $\rho_{ж} = 999 \text{ кг/м}^3$ ;  $c_{pж} = 4,187 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$ .

При  $t_c = 28 \text{ }^\circ\text{C}$   $Pr_c = 5,7$ .

Так как длина трубы неизвестна, то для первого приближения поправку на начальный участок принимаем  $\varepsilon_l = 1$ .

Подставив известные значения величин в формулу, найдем:

$$Nu_{ж} = 0,021(2,71 \cdot 10^4)^{0,8}(8,5)^{0,43} \left(\frac{8,5}{5,7}\right)^{0,25} = 201.$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu_{ж} \frac{\lambda_{ж}}{d} = 201 \frac{0,584}{16 \cdot 10^{-3}} = 7320 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Расход воды через трубку

$$G = w\rho_{ж} \frac{\pi d^2}{4} = 2 \cdot 999 \frac{3,14(16 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 0,403 \text{ кг/с.}$$

Количество передаваемой теплоты



$$Q = GC_{pж}(t_{ж2} - t_{ж1}) = 0,403 \cdot 4,187 \cdot (18 - 10) = 13,5 \text{ кВт.}$$

Длина трубы

$$l = \frac{Q}{\alpha \Delta t_{л} \pi d'}$$

где среднелогарифмический температурный напор

$$\Delta t_{л} = \frac{t_{ж2} - t_{ж1}}{\ln \frac{t_c - t_{ж1}}{t_c - t_{ж2}}} = \frac{18 - 10}{2,3 \lg \frac{28 - 10}{28 - 18}} = 13,7^\circ\text{C}$$

и

$$l = \frac{13500}{7320 \cdot 13,7 \cdot 3,14 \cdot 16 \cdot 10^{-3}} = 2,68 \text{ м.}$$

При расчете было принято  $\varepsilon_l = 1$ . В результате расчета получено  $l \approx 2,7$  м, следовательно,

$$\frac{l}{d} = \frac{2,7}{16 \cdot 10^{-3}} = 167$$

Так как  $l/d > 50$ , то  $\varepsilon_l = 1$  и уточнять расчет не нужно.

**5-17.** Как изменится коэффициент теплоотдачи при турбулентном режиме течения жидкости в трубе, если скорость жидкости возрастет соответственно в 2 и 4 раза, а диаметр трубы и средние температуры жидкости и стенки останутся неизменными?

**Ответ:** Коэффициент теплоотдачи возрастет соответственно в 1,74 и 3,04 раза.

**5-18.** Как изменится коэффициент теплоотдачи при турбулентном режиме течения жидкости в трубе, если при неизменных средних температурах жидкости и стенки диаметр трубы увеличить соответственно в 2 и 4 раза: а) сохранив скорость движения постоянной; б) сохранив расход жидкости постоянным?

**Ответ:**

а) коэффициент теплоотдачи уменьшится соответственно в 1,15 и 1,32 раза.

б) коэффициент теплоотдачи уменьшится соответственно в 3,5 и 12 раз.

**5-19.** Определить отношение коэффициентов теплоотдачи от стенки трубы к воде  $\alpha_1$  и газу  $\alpha_2$  при турбулентном движении этих жидкостей в трубах одинакового диаметра, равенстве чисел Рейнольдса и примерно одинаковых значениях чисел Прандтля. Каково будет это отношение для воды и воздуха, если температура воды  $t_{ж1} = 250^\circ\text{C}$ , а температура воздуха  $t_{ж2} = 20^\circ\text{C}$ ?

**Ответ:**  $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2}; \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \approx 24.$

**5-20.** В водяной экономайзер парового котла вода поступает с температурой  $t_{ж1} = 165^\circ\text{C}$  и покидает его с температурой  $t_{ж2} = 215^\circ\text{C}$ . Вычислить коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  от стенки трубы экономайзера к потоку воды, если внутренний диаметр труб, по которым движется вода,  $d = 36$  мм, скорость движения воды  $w = 0,6$  м/с и относительная длина труб  $l/d > 50$ .

**Примечание.** Так как коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к воде значительно больше, чем от газов к стенке, то температура внутренней поверхности трубы будет близка к средней температуре воды и отношение  $Pr_{ж}/Pr_c \approx 1$ . Поэтому в условиях рассматриваемой задачи можно принять  $(Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25} = 1$ .

**Ответ:**  $\alpha = 4750 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$

**5-21.** По трубке внутренним диаметром  $d = 8$  мм и длиной  $l > 50d$  движется вода со скоростью  $w = 1,2$  м/с. С наружной стороны трубка обогревается так, что температура ее внутренней поверхности  $t_c = 90^\circ\text{C}$ . Вода нагревается от  $t_{ж1} = 15^\circ\text{C}$  на входе до  $t_{ж2} = 45^\circ\text{C}$  на выходе из трубки.

Определить коэффициент теплоотдачи от стенки трубки к воде и среднюю по длине трубки плотность теплового потока.

**Ответ:**  $\alpha = 7950 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $q = 477 \text{ кВт/м}^2$ .

**5-22.** По соплу реактивной установки движется горячий газ. Сопло в виде трубы с наружным диаметром 120 мм и длиной 4,4 м вложено в другую трубу внутренним диаметром 124 мм. Между трубами вдоль кольцевого канала подаётся охлаждающая жидкость в количестве 3,95 кг/с. Для средней температуры жидкости 46 °С известны параметры: теплоёмкость  $C_p = 1890 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ , плотность  $\rho = 1430 \text{ кг/м}^3$ , теплопроводность  $\lambda = 0,33 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ , динамический коэффициент вязкости  $\mu = 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ . Температура наружной поверхности сопла 680 °С. Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток к жидкости, если  $Pr_c = 1,75$ , а большая труба снаружи теплоизолирована.

**Ответ:**  $\alpha = 11203 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $Q = 477 \text{ МВт}$ .

**5-23.** Как изменится коэффициент теплоотдачи в условиях задачи 5-21, если трубка, по которой движется вода, выполнена в виде змеевика диаметром  $D = 2R = 200 \text{ мм}$  (рис. 5-2).

**Ответ:**  $\alpha_{\text{из}} = 9100 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ , т.е. коэффициент теплоотдачи увеличится на 14,5%.

**Решение.**

При течении жидкости в изогнутых трубах, если  $Re'_{\text{кр}} < Re_{\text{ж}} < Re''_{\text{кр}}$  для расчета коэффициента теплоотдачи можно использовать формулу

$$Nu_{\text{ж}} = 0,021 Re_{\text{ж}}^{0,8} Pr_{\text{ж}}^{0,43} \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_c} \right)^{0,25} \varepsilon_l;$$

$$Re'_{\text{кр}} = \frac{16,4}{\sqrt{d/R}}; Re''_{\text{кр}} = 18500 \left( \frac{d}{2R} \right)^{0,28}$$

где  $d$  - внутренний диаметр трубы;  $R$  - радиус закругления змеевика.

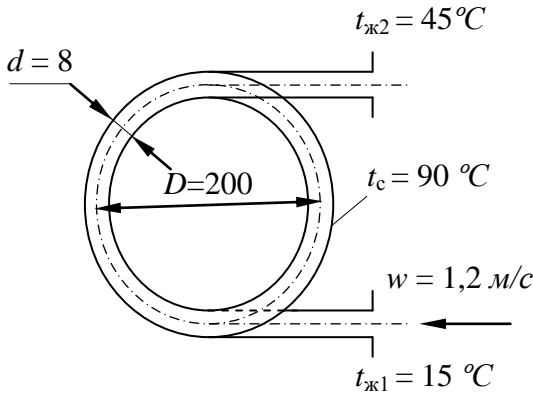


Рис. 5.2. К задаче 5-23

Соотношения справедливы при  $d/R \geq 8 \cdot 10^{-4}$ .

Если  $Re_{\text{ж}} > Re''_{\text{кр}}$ , то расчет можно вести по той же формуле, но полученное значение коэффициента теплоотдачи необходимо умножить на величину  $\varepsilon_R$ , которая для змеевиковых труб определяется по формуле

$$\varepsilon_R = 1 + 1,8 \frac{d}{R}.$$

В рассматриваемом случае (см. задачу 5-21) для воды при  $t_{\text{ж}} = 30^\circ\text{C}$   $\nu_{\text{ж}} = 0,805 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;

$$Re_{\text{ж}} = \frac{wd}{\nu_{\text{ж}}} = \frac{1,2 \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{0,805 \cdot 10^{-6}} = 1,19 \cdot 10^4$$

$$Re''_{\text{кр}} = 18500 \left( \frac{d}{2R} \right)^{0,28} = 18500 \left( \frac{8}{2 \cdot 100} \right)^{0,28} = 7500.$$

Так как  $Re_{\text{ж}} > Re''_{\text{кр}}$ , то расчет ведем с учётом поправки. Из решения задачи 5-21 видно, что коэффициент теплоотдачи для прямой трубы  $\alpha = 7950 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;

$$\varepsilon_R = 1 + 1,8 \frac{8}{100} = 1,145$$

И

$$\alpha_{из} = \alpha \varepsilon_R = 7950 \cdot 1,145 = 9100 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

**5-24.** Определить количество теплоты, которая отводится от воды, движущееся по змеевику с радиусом  $R = 160$  мм, выполненному из трубы диаметром  $d = 18$  мм. Расход воды  $G = 0,24$  кг/с; средняя по длине трубы температура воды  $t_{ж} = 120$  °С; постоянная по длине температура внутренней поверхности трубы  $t_c = 110$  °С. Длина трубы змеевика  $l = 3$  м.

**Ответ:**  $Q = 14$  кВт.

**5-25.** Теплообменное устройство предполагается выполнить из прямых круглых труб диаметром  $d = 30$  мм, внутри которых должна протекать охлаждающая жидкость. Температура внутренней поверхности стенок труб  $t_c$  задана и равна  $120$  °С.

Охлаждающая жидкость имеет среднюю температуру  $t_{ж} = 70$  °С и должна отводить количество теплоты  $Q = 300$  кВт.

Определить поверхность охлаждения, если в качестве охлаждающих жидкостей будут применены: а) вода, б) трансформаторное масло; в) воздух при атмосферном давлении.

Средняя скорость движения воды и масла принята равной  $w = 2$  м/с, воздуха  $w = 10$  м/с.

При расчете во всех трех случаях принять  $l > 50d$  и средний логарифмический температурный напор  $\Delta t_{л} \approx t_c - t_{ж}$ .

**Ответ:**

	$\alpha, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$	$F, \text{м}^2$
Для воды	10700	0,56
Для масла	1140	5,25
Для воздуха	38,4	156

**5-26.** По трубе диаметром  $d = 38$  мм протекает вода со скоростью  $w = 9$  м/с. Температура внутренней поверхности трубы поддерживается  $t_c = 50$  °С, и движущаяся по трубе вода нагревается от температуры на входе  $t_{ж1} = 16$  °С до  $t_{ж2} = 24$  °С.

Определить коэффициент теплоотдачи от стенки к воде и длину трубы.

**Ответ:**  $\alpha = 28400 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $l = 3,35 \text{ м}$ .

**Решение.**

Определяем режим движения воды:

$$t_{\text{ж}} = 0,5(t_{\text{ж1}} + t_{\text{ж2}}) = 0,5(16 + 24) = 20^\circ\text{С};$$

при  $t_{\text{ж}} = 20^\circ\text{С}$  для воды  $\nu_{\text{ж}} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  и

$$Re_{\text{ж}} = \frac{9 \cdot 38 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-6}} = 3,42 \cdot 10^5 > 10^5.$$

Режим турбулентный.

При  $t_{\text{ж}} = 20^\circ\text{С}$   $Pr_{\text{ж}} = 7,02$ ;

$$\mu_{\text{ж}} = 1004 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}; \quad \lambda_{\text{ж}} = 0,599 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С});$$

$$\rho_{\text{ж}} = 998 \text{ кг}/\text{м}^3; \quad c_{\text{рж}} = 4187 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}).$$

При  $t_{\text{с}} = 50^\circ\text{С}$ ;  $\mu_{\text{с}} = 549 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;

$$\xi = (1,82 \lg Re_{\text{ж}} - 1,64)^{-2} = [1,82 \lg(3,42 \cdot 10^5) - 1,64]^{-2} = 0,0141;$$

$$Nu_{\text{ж}} = \frac{\frac{\xi}{8} Re_{\text{ж}} Pr_{\text{ж}}}{12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8}} (Pr_{\text{ж}}^{2/3} - 1) + 1,07} \left( \frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\text{с}}} \right)^n$$

где при нагревании  $n = 0,11$ ; следовательно,

$$Nu_{\text{ж}} = \frac{\frac{0,0141}{8} \cdot 3,42 \cdot 10^5 \cdot 7,02}{12,7 \left( \frac{0,0141}{8} \right)^{0,5} (7,02^{2/3} - 1) + 1,07} \left( \frac{1004}{549} \right)^{0,11} = 1800$$

и коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu_{\text{ж}} \frac{\lambda_{\text{ж}}}{d} = 1800 \frac{0,599}{38 \cdot 10^{-3}} = 28400 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}.$$

Длину трубы определяем из уравнения теплового баланса

$$Q = \alpha(t_{\text{с}} - t_{\text{ж}}) \pi d l = G C_{\text{рж}}(t_{\text{ж2}} - t_{\text{ж1}}).$$

Расход воды и количество теплоты, воспринимаемой водой, равны:

$$G = \rho_{\text{ж}} w \frac{\pi d^2}{4} = 998 \cdot 9 \frac{3,14(38 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 10,15 \text{ кг}/\text{с};$$

$$Q = G C_{\text{рж}}(t_{\text{ж2}} - t_{\text{ж1}}) = 10,15 \cdot 4187 \cdot 8 = 341 \text{ кВт},$$

тогда

$$l = \frac{Q}{\alpha(t_c - t_{ж})\pi d} = \frac{3,41 \cdot 10^5}{2,84 \cdot 10^4 \cdot (50 - 20) \cdot 3,14 \cdot 38 \cdot 10^{-3}} = 3,35 \text{ м}$$

**5-27.** В теплообменном устройстве вода должна подводить теплоту в количестве  $Q = 460$  кВт. Вода движется по прямой трубе внутренним диаметром  $d = 50$  мм. Температура внутренней поверхности трубы поддерживается равной  $20^\circ\text{C}$ . Расход воды  $G = 11$  кг/с, а ее температура на входе в трубу  $t_{ж1} = 75^\circ\text{C}$ .

Определить необходимую длину трубы.

**Ответ:**  $l = 3,1$  м.

**5-28.** Определить значения коэффициента теплоотдачи и плотности теплового потока на внутренней поверхности трубы диаметром  $d = 12$  мм, по которой движется вода со скоростью  $w = 6,5$  м/с, если средняя температура воды  $t_{ж} = 160^\circ\text{C}$ , а температура внутренней поверхности трубы  $t_c$  поддерживается равной  $185^\circ\text{C}$ .

**Ответ:**  $\alpha = 4 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}$ ;  $q = 1 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ .

**5-29.** С какой скоростью следует прокачивать воду, имеющую среднюю арифметическую температуру  $t_{ж} = 150^\circ\text{C}$ , по трубе диаметром  $d = 20$  мм и длиной  $l = 2,3$  м, чтобы при турбулентном режиме течения и температуре внутренней поверхности трубы  $t_c = 170^\circ\text{C}$  количество отводимой теплоты равнялось  $9$  кВт.

Определить также температуры воды на входе и выходе из трубы.

**Примечание.** При расчете учесть, что коэффициент теплоотдачи отнесен к среднелогарифмической разности температур между стенкой и жидкостью.

**Ответ:**  $w = 0,36$  м/с;  $t_{ж1} = 140^\circ\text{C}$ ;  $t_{ж2} = 160^\circ\text{C}$ .

**Решение.**

Найдем необходимое значение коэффициента теплоотдачи, приняв в первом приближении, что  $\Delta t_{л} = (t_c - t_{ж})$ :

$$\alpha = \frac{Q}{\alpha(t_c - t_{ж})\pi dl} = \frac{9000}{3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 2,3(170 - 150)} = 3100 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

При  $t_{ж} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$   $\nu_{ж} = 0,202 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\rho_{ж} = 917 \text{ кг/м}^3$ ;  $\lambda_{ж} = 0,685 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ;  $c_{рж} = 4313 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ ;  $Pr_{ж} = 1,17$ .

При  $t_c = 170 \text{ }^\circ\text{C}$   $Pr_c = 1,05$ .

Определяем значение числа  $Nu_{ж}$  и необходимое значение числа Рейнольдса по формуле:

$$Nu_{ж} = \frac{\alpha d}{\lambda_{ж}} = \frac{3100 \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{0,696} = 90,5$$

$$Re_{ж}^{0,8} = \frac{Nu_{ж}}{0,021 Pr_{ж}^{0,43} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c}\right)^{0,25}} = \frac{90,5}{0,021(1,17)^{0,43} \left(\frac{1,17}{1,05}\right)^{0,25}} = 3930,$$

откуда

$$Re_{ж} = 3,11 \cdot 10^4.$$

Определяем в первом приближении требуемую скорость воды:

$$w = Re_{ж} \frac{\nu_{ж}}{d} = 3,11 \cdot 10^4 \frac{0,202 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-2}} = 0,314 \text{ м/с.}$$

Расход воды

$$G = \rho_{ж} w \frac{\pi d^2}{4} = 917 \cdot 0,314 \frac{3,14(2 \cdot 10^{-2})^2}{4} = 0,0903 \text{ кг/с}$$

и перепад температур по длине трубы

$$\delta t = \frac{Q}{GC_{рж}} = \frac{9000}{0,0903 \cdot 4313} = 23^\circ\text{C}$$

Следовательно, начальная и конечная температуры воды равны:

$$t_{ж1} = t_{ж} - 0,5 \delta t = 150 - 11,5 = 138,5 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{ж2} = t_{ж} + 0,5 \delta t = 150 + 11,5 = 161,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Среднеарифметическая разность температур

$$\Delta t_{л} = \frac{t_{ж2} - t_{ж1}}{2,3 \lg \frac{t_c - t_{ж1}}{t_c - t_{ж2}}} = \frac{23}{2,3 \lg \frac{31,5}{8,5}} = 17,6^\circ\text{C}$$

Производим второе приближение, приняв  $\Delta t_{л} = 17,6 \text{ }^\circ\text{C}$ :



$$\alpha = \frac{9000}{3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 2,3 \cdot 17,6} = 3530 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К};$$

$$Re_{\text{ж}}^{0,8} = 3930 \frac{3530}{3100} = 4470;$$

$$Re_{\text{ж}} = 3,66 \cdot 10^4; w = 0,37 \text{ м/с};$$

$$G = 0,106 \text{ кг/с}; \delta t = 19,7^\circ\text{С}; \text{ тогда } t_{\text{ж1}} = 140,2^\circ\text{С}; t_{\text{ж2}} = 159,8^\circ\text{С};$$

$$\Delta t_{\text{л}} = 18,2^\circ\text{С}$$

В третьем приближении принимаем  $\Delta t_{\text{л}} = 18,2^\circ\text{С}$ ;  $\alpha = 3420 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $Re_{\text{ж}} = 3,55 \cdot 10^4$  и  $w = 0,36 \text{ м/с}$ .

При этом  $\delta t = 20^\circ\text{С}$ ;  $t_{\text{ж1}} = 140^\circ\text{С}$ ;  $t_{\text{ж2}} = 160^\circ\text{С}$  и  $\Delta t_{\text{л}} = 18,2^\circ\text{С}$ , что совпадает с ранее принятым значением.

**5-30.** Вода с температурой  $t_{\text{ж1}} = 30^\circ\text{С}$  поступает в трубу диаметром  $d = 12 \text{ мм}$  и длиной  $l = 2,2 \text{ м}$ .

Определить температуру воды на выходе из трубы, если известно, что расход воды  $G = 0,083 \text{ кг/с}$  и температура внутренней поверхности трубы  $t_c = 60^\circ\text{С}$ .

**Ответ:**  $t_{\text{ж2}} = 50^\circ\text{С}$ .

**Решение.**

Для расчета теплоотдачи необходимо знать среднюю по длине трубы температуру жидкости. Так как температура воды на выходе из трубы неизвестна, то задачу решаем методом последовательных приближений.

Задаемся температурой воды на выходе из трубы  $t_{\text{ж2}} = 40^\circ\text{С}$ , тогда  $t_{\text{ж}} = 0,5(t_{\text{ж1}} + t_{\text{ж2}}) = 0,5(30 + 40) = 35^\circ\text{С}$ . При этой температуре  $\mu_{\text{ж}} = 7,28 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;

$$Re_{\text{ж}} = \frac{4G}{\pi d \mu_{\text{ж}}} = \frac{4 \cdot 8,3 \cdot 10^{-2}}{3,14 \cdot 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot 7,28 \cdot 10^{-4}} = 12100 > 10^4$$

Режим движения воды турбулентный.

При  $t_{\text{ж}} = 35^\circ\text{С}$   $\lambda_{\text{ж}} = 0,626 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $Pr_{\text{ж}} = 4,85$ ; при  $t_c = 60^\circ\text{С}$ ;  $Pr_c = 3,00$ .

Найдем значения числа  $Nu_{\text{ж}}$  и коэффициента теплоотдачи:

$$Nu_{ж} = 0,021 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} = 0,021 (1,21 \cdot 10^4)^{0,8} 4,85^{0,43} \left( \frac{4,85}{3,00} \right)^{0,25} = 86$$

$$\alpha = Nu_{ж} \frac{\lambda_{ж}}{d} = 86 \frac{0,636}{1,2 \cdot 10^{-2}} = 4490 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Температуру воды на выходе находим из уравнения теплового баланса:

$$\alpha(t_c - t_{ж})\pi dl = GC_{пж}(t_{ж2} - t_{ж1}).$$

Учитывая, что

$$\Delta t_{л} = \frac{t_{ж2} - t_{ж1}}{2,3 \lg \frac{t_c - t_{ж1}}{t_c - t_{ж2}}},$$

получаем:

$$\lg(t_c - t_{ж2}) = \lg(t_{ж2} - t_{ж1}) - \frac{\alpha \pi dl}{2,3 GC_{пж}};$$

$$\lg(60 - t_{ж2}) = \lg(60 - 30) - \frac{4490 \cdot 3,14 \cdot 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot 2,2}{2,3 \cdot 0,083 \cdot 4187},$$

откуда  $t_{ж2} = 49,7 \text{ }^\circ\text{C}$ .

В качестве второго приближения задаемся  $t_{ж2} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

тогда

$$t_{ж} = 40 \text{ }^\circ\text{C}; \mu_{ж} = 6,54 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}; \lambda_{ж} = 0,634 \text{ Вт/м} \cdot \text{К};$$

$$Pr_{ж} = 4,30; Re_{ж} = 13500; Nu_{ж} = 87 \text{ и } \alpha = 4600 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Температура воды на выходе (второе приближение)

$$\lg(60 - t_{ж2}) = \lg(60 - 30) - \frac{4600 \cdot 3,14 \cdot 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot 2,2}{2,3 \cdot 0,083 \cdot 4187}$$

$$t_{ж2} = 50 \text{ }^\circ\text{C}.$$

## 6. ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРА И ПУЧКА ТРУБ

**6-1.** Медный шинопровод круглого сечения диаметром  $d = 15 \text{ мм}$  охлаждается поперечным потоком сухого воздуха.

Скорость и температура набегающего потока воздуха равны соответственно:  $w = 1 \text{ м/с}$ ;  $t_{\text{ж}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Вычислить коэффициент теплоотдачи от поверхности шинпровода к воздуху и допустимую силу тока в шинпроводе при условии, что температура его поверхности не должна превышать  $t_c = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Удельное электрическое сопротивление меди  $\rho = 0,0175 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ .

**Ответ:**  $\alpha = 23,8 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ;  $I = 825 \text{ А}$ .

**Решение.**

При температуре  $t_{\text{ж}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  физические свойства воздуха следующие:  $\nu_{\text{ж}} = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda_{\text{ж}} = 2,59 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ .

Число Рейнольдса

$$Re_{\text{ж}} = \frac{wd}{\nu_{\text{ж}}} = \frac{1 \cdot 0,015}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 995.$$

Расчет теплоотдачи при поперечном обтекании одиночного цилиндра воздухом можно производить по следующим формулам:

при  $10 \leq Re_{\text{ж}} \leq 1 \cdot 10^3$

$$Nu_{\text{ж}} = 0,44 Re^{0,5}$$

при  $1 \cdot 10^3 \leq Re_{\text{ж}} \leq 2 \cdot 10^5$

$$Nu_{\text{ж}} = 0,22 Re^{0,6}$$

где за определяющий размер принимается диаметр цилиндра, а за определяющую температуру – температура набегающего потока воздуха  $t_{\text{ж}}$ .

В рассматриваемом случае

$$Nu_{\text{ж}} = 0,44(995)^{0,5} = 13,8,$$

следовательно, коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu_{ж} \frac{\lambda_{ж}}{d} = 19,8 \frac{2,59 \cdot 10^{-2}}{1,5 \cdot 10^{-2}} = 23,8 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Допустимую силу тока определяем из уравнения баланса энергии

$$\alpha(t_c - t_{ж})\pi dl = I^2 R,$$

где

$$R = \frac{\rho l}{\frac{\pi d^2}{4}},$$

откуда выражение для силы тока имеет вид:

$$I = 10^3 \pi d \sqrt{\frac{\alpha \Delta t d}{4\rho}},$$

Подставляя известные значения величин, получаем:

$$I = 10^3 \cdot 3,14 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{23,8(80 - 20) \cdot 1,15 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 0,0175}} = 825 \text{ А.}$$

**6-2.** Как изменяется коэффициент теплоотдачи от поверхности шинпровода и допустимая сила тока, если скорость набегающего потока воздуха уменьшится в 2 раза, а все другие условия останутся теми же, что в задаче 6-1?

**Ответ:**  $\alpha = 36,3 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $I = 692 \text{ А}$ , т.е. коэффициент теплоотдачи уменьшится в  $\sqrt{2} \approx 1,4$  раза, а допустимая сила тока в  $\sqrt[4]{2} \approx 1,2$  раза.

**6-3.** Как изменяется коэффициент теплоотдачи от поверхности шинпровода и допустимая сила тока, если диаметр шинпровода уменьшится в 2 раза, а все другие условия оставить теми же, что и в задаче 6-1.

**Ответ:**  $\alpha = 34 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $I = 348 \text{ А}$ .

**6-4.** Водяной калориметр, имеющий форму трубки с наружным диаметром  $d = 15$  мм, помещен в поперечный поток воздуха. Воздух имеет скорость  $w = 2$  м/с, направленную под углом  $90^\circ$  к оси калориметра, и среднюю температуру  $t_{\text{ж}} = 20$  °С. При стационарном тепловом режиме на внешней поверхности калориметра устанавливается постоянная средняя температура  $t_c = 80$  °С.

Вычислить коэффициент теплоотдачи от трубки к воздуху и тепловой поток на единицу длины калориметра.

**Ответ:**  $\alpha = 16,9$  Вт/м<sup>2</sup>·К;  $q_l = 102$  Вт/м.

**Решение.**

Физические свойства воздуха при температуре  $t_{\text{ж}} = 20$  °С;  $\nu_{\text{ж}} = 15,06 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_{\text{ж}} = 2,59 \cdot 10^{-2}$  Вт/м·К.

Число Рейнольдса

$$Re_{\text{ж}} = \frac{wd}{\nu_{\text{ж}}} = \frac{2 \cdot 15 \cdot 10^{-3}}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 1990$$

Так как  $1 \cdot 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$ , то  $Nu_{\text{ж}} = 0,22 Re_{\text{ж}}^{0,6}$ , тогда  $Nu_{\text{ж}} = 0,22(1,99 \cdot 10^3)^{0,6} = 21$ ,  
и коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu_{\text{ж}} \frac{\lambda_{\text{ж}}}{d} = \frac{21 \cdot 2,59 \cdot 10^{-2}}{1,5 \cdot 10^{-2}} = 36,3 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Тепловой поток на единицу длины

$$q_l = \alpha(t_c - t_{\text{ж}})\pi d = 36,3(80 - 20)3,14 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} = 102 \text{ Вт/м.}$$

**6-5.** Как изменится коэффициент теплоотдачи в условиях задачи 6-4, если скорость воздуха увеличивать в 2 и 4 раза?

**Ответ:** коэффициент теплоотдачи увеличится соответственно в 1,51 и 2,3 раза.

**6-6.** Как изменится коэффициент теплоотдачи в условиях задачи 6-4, если воздух омывает трубку под углом атаки  $\psi = 60^\circ$  (рис. 6-1), а все другие условия останутся без изменений?

**Ответ:**  $\alpha_\psi = 60^\circ = 33,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ .

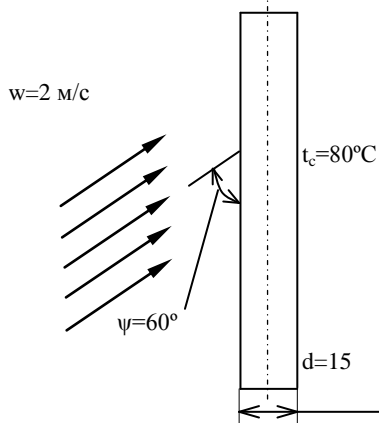


Рис. 6.1. К задаче 6-6

**Решение.**

При обтекании одиночного цилиндра под углом атаки, не равным  $90^\circ$ ,

$$\alpha_\psi = \varepsilon_\psi \alpha,$$

где  $\alpha_\psi$  и  $\alpha$  – коэффициенты теплоотдачи при данном угле атаки и при угле атаки  $90^\circ$ ;  $\varepsilon_\psi$  – поправка на угол атаки  $\psi$ , значения которой в зависимости от величины углы  $\psi$  даны ниже:

$\psi^\circ$	90	80	70	60	50	40	30
$\varepsilon_\psi$	1	1	0,99	0,93	0,87	0,76	0,66

В рассматриваемом случае при  $\psi = 60^\circ \varepsilon_\psi = 0,93$  и, следовательно:

$$\alpha_\psi = 60^\circ = 0,93 \cdot 36,3 = 33,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

**6-7.** Цилиндрическая трубка диаметром  $d = 20$  мм охлаждается поперечным потоком воды. Скорость потока  $w = 1$  м/с.

Средняя температура воды  $t_{\text{ж}} = 10$  °С и температура поверхности трубки  $t_c = 50$  °С.

Определить коэффициент теплоотдачи от поверхности трубки и охлаждающей воде.

**Ответ:**  $\alpha = 7050$  Вт/м<sup>2</sup>·К.

**Решение.**

При температуре воды  $t_{\text{ж}} = 10$  °С  $\nu_{\text{ж}} = 1,3 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

Число Рейнольдса

$$Re_{\text{ж}} = \frac{wd}{\nu_{\text{ж}}} = \frac{1 \cdot 0,02}{1,3 \cdot 10^{-6}} = 1,54 \cdot 10^4.$$

Расчет теплоотдачи при поперечном обтекании одиночного цилиндра капельной жидкостью можно производить по следующим формулам:

при  $8 < Re_{\text{ж}} < 1 \cdot 10^3$

$$Nu_{\text{ж}} = 0,50 Re_{\text{ж}}^{0,5} Pr_{\text{ж}}^{0,38} \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_c} \right)^{0,25};$$

при  $1 \cdot 10^3 < Re_{\text{ж}} < 2 \cdot 10^5$

$$Nu_{\text{ж}} = 0,25 Re_{\text{ж}}^{0,6} Pr_{\text{ж}}^{0,38} \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_c} \right)^{0,25},$$

где за определяющий размер берется диаметр цилиндра, а индексы «ж» и «с» означают, что соответствующие физические свойства выбираются по температуре набегающего потока жидкости  $t_{\text{ж}}$  и температуре жидкости у стенки  $t_c$ . В рассматриваемом случае  $1 \cdot 10^3 < Re_{\text{ж}} < 2 \cdot 10^5$ ; расчет производим по второй формуле.

9,5 При  $t_{ж} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\nu_{ж} = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda_{ж} = 0,574 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ;  $Pr_{ж} =$

При температуре  $t_c = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $Pr_c = 3,55$ , следовательно,

$$Nu_{ж} = 0,25(1,54 \cdot 10^4)^{0,69} 9,5^{0,38} \left(\frac{9,5}{3,55}\right)^{0,25} = 246,$$

и коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu_{ж} \frac{\lambda_{ж}}{d} = 246 \frac{0,574}{0,02} = 7050 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

**6-8.** Сравнить коэффициенты теплоотдачи от стенки трубы к воздуху:

а) при движении воздуха внутри длинной трубы внутренним диаметром  $d_{в} = 50 \text{ мм}$ ;

б) при внешнем поперечно обтекании одиночной трубы наружным диаметром  $d_{н} = 50 \text{ мм}$ .

Среднюю температуру воздуха во всех случаях принять равной  $t_{ж} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  а скорость  $w = 5 \text{ м/с}$ .

**Ответ:**  $\alpha_{н}/\alpha_{в} = 1,8$

**6-9.** Труба с внешним диаметром  $d = 25 \text{ мм}$  охлаждается поперечным потоком трансформаторного масла. Скорость движения и средняя температура масла равны соответственно:  $w = 1 \text{ м/с}$  и  $t_{ж} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить, какую температуру поверхности трубы необходимо поддерживать, чтобы плотность теплового потока составляла  $q = 4,5 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ , и каково при этом будет значение коэффициента теплоотдачи.

**Ответ:**  $t_c = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\alpha = 925 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ .

**Решение.**

Определяем режим движения трансформаторного масла. При  $t_{ж} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$   $\nu_{ж} = 22,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;



$$Re_{\text{ж}} = \frac{wd}{\nu_{\text{ж}}} = \frac{1 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2}}{22,5 \cdot 10^{-6}} = 1,11 \cdot 10^3.$$

Так как число Рейнольдса находится в пределах  $1 \cdot 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$ , то имеем:

$$Nu_{\text{ж}} = 0,25 Re_{\text{ж}}^{0,6} Pr_{\text{ж}}^{0,38} \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_c} \right)^{0,25}.$$

В формулу входит число Прандтля для масла, взятое при температуре стенки. Поэтому задачу приходится решать либо методом последовательных приближений, либо графическим методом. Используем последний.

Зададимся тремя значениями температуры стенки:  $t_{c1} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{c2} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_{c3} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ , вычислим плотность теплового потока при этих температурах и построим график  $q = f(t_c)$ .

Задавшись  $t_{c1} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ , по указанной выше формуле рассчитаем коэффициент теплоотдачи.

При  $t_{\text{ж}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\nu_{\text{ж}} = 22,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda_{\text{ж}} = 0,1106 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ;  
 $Pr_{\text{ж}} = 298$ .

При температуре  $t_{c1} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $Pr_{c1} = 146$ ;

$$Nu_1 = 0,25(1,11 \cdot 10^3)^{0,6}(298)^{0,38} \left( \frac{298}{146} \right)^{0,25} = 175;$$

$$\alpha = Nu_{\text{ж}} \frac{\lambda_{\text{ж}}}{d} = 175 \frac{0,1106}{0,025} = 775 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Плотность теплового потока при  $t_{c1} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

$$q_1 = \alpha_1 \Delta t_1 = 775(40 - 20) = 15500 \text{ Вт/м}^2.$$

При температуре  $t_{c2} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$  значение коэффициента теплоотдачи будет отличаться от  $\alpha_1$  только в связи с изменением  $Pr_c$ , поэтому

$$\alpha_2 = \alpha_1 \left( \frac{Pr_{c1}}{Pr_{c2}} \right)^{0,25} \quad \text{и} \quad q_2 = q_1 \left( \frac{Pr_{c1}}{Pr_{c2}} \right)^{0,25} \frac{t_{c2} - t_{\text{ж}}}{t_{c1} - t_{\text{ж}}}$$

При  $t_{c2} = 60 \text{ }^\circ\text{C}; Pr_{c2} = 87,8$  и

$$q_2 = 1,55 \cdot 10^4 \left( \frac{146}{87,8} \right)^{0,25} \cdot \frac{60 - 20}{40 - 20} = 3,51 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$$

При  $t_{c3} = 80 \text{ }^\circ\text{C}; Pr_{c3} = 59,6$  и

$$q_2 = 1,55 \cdot 10^4 \left( \frac{146}{59,3} \right)^{0,25} \cdot \frac{80 - 20}{40 - 20} = 5,78 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$$

По вычисленным значениям  $q$  строим график  $q = f(t_c)$  (рис. 6-2).

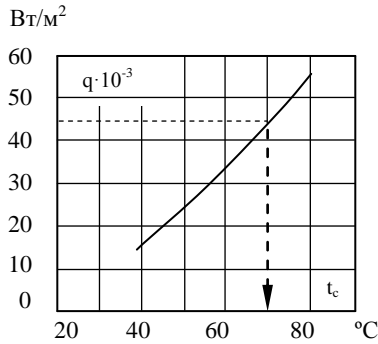


Рис. 6.2. К задаче 6-9

По графику находим, что при заданном значении  $q = 4,5 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$  температура стенки  $t_c = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ .

При найденной температуре  $t_c = 70 \text{ }^\circ\text{C}$  вычисляем коэффициент теплоотдачи. При  $t_c = 70 \text{ }^\circ\text{C}; Pr_c = 71,3$  тогда

$$Nu_{ж} = Nu_1 \left( \frac{Pr_{c1}}{Pr_{c2}} \right)^{0,25} = 175 \left( \frac{146}{71,3} \right)^{0,25} = 209$$

$$\alpha = Nu_{ж} \frac{\lambda_{ж}}{d} = 209 \frac{0,1106}{0,025} = 925 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}$$

**6-10.** Охлаждение трубы поперечным потоком трансформаторного масла осуществляется при тех же условиях, что и в задаче 6-9. Однако по условиям охлаждения необходимо, чтобы плотность теплового потока на поверхности трубки не превышала  $3,5 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ .

Какая при этом должна быть температура поверхности трубы и какое значение иметь коэффициент теплоотдачи?

**Ответ:**  $t_c = 62 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\alpha = 890 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ .

**6-11.** В теплообменнике шахматный пучок труб обтекается поперечным потоком трансформаторного масла. Внешний диаметр труб в пучке  $d = 20 \text{ мм}$ . Поперечный шаг  $s_1 = 2,5d$ , продольный шаг  $s_2 = 1,5d$ . Средняя скорость в узком сечении пучка и средняя температура масла соответственно равны:  $w = 0,6 \text{ м/с}$  и  $t_{\text{ж}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Найти коэффициент теплоотдачи от поверхности труб к маслу для третьего ряда труб пучка при условии, что температура поверхности труб  $t_c = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Вычисления произвести для двух случаев:

а) поток обтекает трубы под углом атаки  $\psi = 90^\circ$ ;

б) поток обтекает трубы под углом атаки  $\psi = 60^\circ$ .

**Ответ:**  $\alpha_{\psi=90^\circ} = 1130 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $\alpha_{\psi=60^\circ} = 1060 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ .

**Решение.**

Расчет теплоотдачи при поперечном обтекании пучков труб капельной жидкостью можно производить по формуле

$$Nu_{\text{ж}} = C Re_{\text{ж}}^n Pr_{\text{ж}}^{0,43} \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_c} \right)^{0,25} \varepsilon_s,$$

где  $Pr_c$  — число  $Pr$  для жидкости при температуре стенки.

В рассматриваемом случае при  $t_{\text{ж}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$   $\nu_{\text{ж}} = 10,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda_{\text{ж}} = 0,109 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ;  $Pr_{\text{ж}} = 146$ ; при  $t_c = 90 \text{ }^\circ\text{C}$   $Pr_c = 50,5$ .

Число Рейнольдса

$$Re_{\text{ж}} = \frac{wd}{\nu_{\text{ж}}} = \frac{0,6 \cdot 0,02}{10,3 \cdot 10^{-6}} = 1165 > 10^3$$

и формула применима.

Так как  $\frac{s_1}{s_2} = 2,5/1,5 = 1,66 < 2$ ,

то

$$\varepsilon_s = (s_1/s_2)^{1/6} = 1,66^{1/6} = 1,08$$

тогда для третьего ряда шахматного пучка

$$Nu_{ж} = 0,41 Re_{ж}^{0,5} Pr_{ж}^{0,33} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \varepsilon_s = 0,41(1165)^{0,5}(146)^{0,33} \left( \frac{146}{50,5} \right)^{0,25} 1,08 = 208$$

Коэффициент теплоотдачи при  $\psi = 90^\circ$

$$\alpha = Nu_{ж} \frac{\lambda_{ж}}{d} = 208 \frac{0,109}{0,02} = 1130 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

При обтекании пучков труб под углом атаки  $\psi$ , не равным  $90^\circ$ ,

$$\alpha_\psi = \varepsilon_\psi \alpha,$$

где  $\varepsilon_\psi$  — поправка на угол атаки, значения которой в зависимости от  $\psi$  приведены ниже:

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

В рассматриваемом случае при  $\psi = 60^\circ$   $\varepsilon_\psi = 0,94$  и

$$\alpha_{\psi=60^\circ} = 0,94 \cdot 1130 = 1060 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

**6-12.** Как изменится коэффициент теплоотдачи для третьего ряда труб в условиях задачи 6-11, если пучок труб будет обтекаться поперечным потоком воды, а все остальные условия останутся без изменений ( $d = 20$  мм;  $w = 0,6$  м/с;  $t_{ж} = 40^\circ\text{C}$ ;  $t_c = 90^\circ\text{C}$ )?

Сравнение произвести при тех же углах атаки, т. е. при  $\psi = 90$  и  $60^\circ$ .

**Ответ:**  $\alpha_{\psi=90^\circ} = 9950 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $\alpha_{\psi=60^\circ} = 9350 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$

**6-13.** Как изменится коэффициент теплоотдачи третьего ряда труб при поперечном обтекании шахматного пучка трансформаторным маслом и водой в условиях задач 6-11 и 6-

12, если вместо нагревания будет происходить охлаждение жидкости при том же температурном напоре, что и в задаче 6-11, т. е. при средней температуре потока  $t_{ж} = 90^\circ\text{C}$  и средней температуре стенки  $t_c = 40^\circ\text{C}$ ? Остальные величины останутся без изменений ( $d = 20\text{ мм}$ ;  $w = 0,6\text{ м/с}$ ). Сравнение произвести для угла атаки  $\psi = 90^\circ$ .

**Ответ:** При охлаждении трансформаторного масла  $\alpha = 921\text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}$ , т. е. коэффициент теплоотдачи уменьшится примерно на 18%. При охлаждении воды  $\alpha = 8400\text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}$ , т. е. уменьшится примерно на 15%.

**6-14.** Трубчатый воздухоподогреватель предполагается выполнить из труб диаметром  $d = 38\text{ мм}$ , расположенных в коридорном порядке с поперечным и продольным шагами  $s_1 = s_2 = 2,5d$ .

Число труб в одном ряду поперек потока выбрано  $m = 8$ , число рядов  $n = 5$ .

Температуры воздуха, поступающего в подогреватель,  $t_{ж1} = 20^\circ\text{C}$  и на выходе из подогревателя  $t_{ж2} = 80^\circ\text{C}$ . Температура наружной поверхности труб задана и равна  $t_c = 150^\circ\text{C}$ .

Какой длины должны быть трубы, чтобы при скорости воздуха в узком сечении пучка  $w = 10\text{ м/с}$  количество теплоты, передаваемой воздуху, составило  $Q = 125\text{ кВт}$ .

**Ответ:**  $l = 3\text{ м}$ .

**Решение.**

Средняя температура воздуха

$$t_{ж} = 0,5(t_{ж1} + t_{ж2}) = 0,5(20 + 80) = 50^\circ\text{C}$$

При  $t_{ж} = 50^\circ\text{C}$ ;  $\nu_{ж} = 17,95 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda_{ж} = 2,83 \cdot 10^{-2}\text{ Вт/м} \cdot \text{K}$

и

$$Re_{ж} = \frac{wd}{\nu_{ж}} = \frac{10 \cdot 3,8 \cdot 10^{-2}}{17,95 \cdot 10^{-6}} = 2,12 \cdot 10^4.$$

При  $10^3 \leq Re_{ж} \leq 10^5$  для труб третьего ряда коридорного пучка

$$Nu_{ж} = 0,26Re_{ж}^{0,65}Pr_{ж}^{0,33}\varepsilon_s$$

Для воздуха  $Pr_{ж} \approx 0,70$ , и формула принимает вид:

$$Nu_{ж} = 0,23Re_{ж}^{0,65}\varepsilon_s,$$
где  $\varepsilon_s = (s_2/d)^{-0,15} = (2,5)^{-0,15} = 0,87$ .

Подставляя найденные значения, получаем:

$$Nu_{ж} = 0,23(2,12 \cdot 10^4)^{0,65}0,87 = 130.$$

Коэффициент теплоотдачи для третьего ряда

$$\alpha_3 = Nu_{ж} \frac{\lambda_{ж}}{d} = 130 \frac{2,83 \cdot 10^{-2}}{3,8 \cdot 10^{-2}} = 96,8 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Средний коэффициент теплоотдачи коридорного пучка при  $n \geq 3$

$$\bar{\alpha} = \alpha_3 \left(1 - \frac{0,5}{n}\right) = 96,8 \left(1 - \frac{0,5}{5}\right) = 87,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Плотность теплового потока и требуемая площадь поверхности нагрева равны:

$$q = \bar{\alpha}(t_c - t_{ж}) = 87,2(150 - 50) = 8720 \text{ Вт/м}^2$$

и

$$F = \frac{Q}{q} = \frac{125 \cdot 10^3}{8,72 \cdot 10^3} = 14,3 \text{ м}^2.$$

Необходимая длина труб

$$l = \frac{F}{\pi d m n} = \frac{14,3}{3,14 \cdot 0,038 \cdot 8 \cdot 5} = 3 \text{ м}.$$

**6-15.** Какой длины необходимо будет выполнять трубы в условиях задачи 6-14, если коридорное расположение будет заменено шахматным и скорость в узком сечении пучка будет увеличена до 14 м/с? Все остальные условия оставить без изменений.

**Ответ:**  $l = 2,3 \text{ м}$ .

**6-16.** В теплообменнике шахматный пучок труб обтекается поперечным потоком натрия. Внешний диаметр труб

$d = 20$  мм. Средняя скорость набегающего потока и средняя температура натрия соответственно равны:  $w = 1$  м/с,  $t_{\text{ж}} = 250$  °С.

Определить средний коэффициент теплоотдачи от труб к натрию и среднее значение плотности теплового потока на поверхности труб при условии, что средняя температура наружной поверхности труб  $t_c = 256$  °С.

**Ответ:**  $\alpha = 1,34 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> · К;  $q = 8 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>.

**Решение.**

Расчет среднего коэффициента теплоотдачи при поперечном обтекании шахматных и коридорных пучков труб натрием можно производить по следующей формуле:

$$Nu_{\text{ж}} = 2Re_{\text{ж}}^{0,5},$$

где за определяющий размер принимается диаметр трубы. Формула справедлива при  $100 \leq Pe_{\text{ж}} \leq 1000$ .

В рассматриваемом случае при  $t_{\text{ж}} = 250$  °С физические свойства натрия соответственно равны:

$$\nu_{\text{ж}} = 45 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}; \lambda_{\text{ж}} = 76,1 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}; Pr = 0,69 \cdot 10^{-2}.$$

Числа Рейнольдса и Пекле соответственно равны:

$$Re_{\text{ж}} = \frac{wd}{\nu_{\text{ж}}} = \frac{1 \cdot 20 \cdot 10^{-2}}{45 \cdot 10^{-8}} = 4,44 \cdot 10^4$$

$$Pe_{\text{ж}} = Re_{\text{ж}} Pr_{\text{ж}} = 4,44 \cdot 10^4 \cdot 0,69 \cdot 10^{-2} = 306.$$

Число Нуссельта и коэффициент теплоотдачи

$$Nu_{\text{ж}} = 2(306)^{0,5} = 35;$$

$$\alpha = Nu_{\text{ж}} \frac{\lambda_{\text{ж}}}{d} = 35 \frac{76,1}{0,02} = 1,34 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Отсюда

$$q = \alpha(t_c - t_{\text{ж}}) = 1,34 \cdot 10^5 (256 - 250) = 8 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$$

**6-17.** Определить коэффициент теплоотдачи от поверхности труб к натрию в теплообменнике, рассмотренном в задаче 6-16, если скорость набегающего потока и средняя температура натрия соответственно равны:  $w = 0,8$  м/с;  $t_{\text{ж}} = 300$  °С. Найти также количество теплоты, воспринимаемой натрием,

если средняя температура поверхности труб  $t_c = 305 \text{ }^\circ\text{C}$  и пучок состоит из  $n = 56$  труб длиной  $l = 1 \text{ м}$ .

**Ответ:**  $\alpha = 1,14 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $Q = 2 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$ .

## 7. ТЕПЛОТДАЧА ПРИ СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ

**7-1.** Вычислить потери теплоты в единицу времени с  $1 \text{ м}^2$  поверхности горизонтального теплообменника, корпус которого имеет цилиндрическую форму и охлаждается свободным потоком воздуха. Наружный диаметр корпуса теплообменника  $d = 400 \text{ мм}$ , температура поверхности  $t_c = 200 \text{ }^\circ\text{C}$  и температура воздуха в помещении  $t_{\text{ж}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 7-1).

**Ответ:**  $\alpha = 5,9 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $q = 1000 \text{ Вт/м}^2$ .

**Решение.**

Плотность теплового потока на наружной поверхности теплообменника  $q = \alpha (t_c - t_{\text{ж}}) \text{ Вт/м}^2$ .

При заданных значениях температур поверхности стенки и окружающей среды вдали от стенки решение задачи сводится к определению коэффициента теплоотдачи.

Зависимость для вычисления среднего коэффициента теплоотдачи при свободном движении жидкости имеет вид:

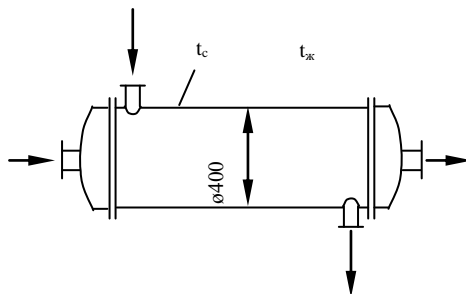


Рис. 7.1. К задаче 7-1



$$Nu_{\text{ж}} = C(GrPr)_{\text{ж}}^n \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_c} \right)^{0,25},$$

где постоянные  $C$  и  $n$  зависят от режима свободного движения и условий обтекания поверхности. Они являются функциями  $GrPr$  и определяются из следующей таблицы:

$(CrPr)_{\text{ж}}$	$C$	$n$	Условия движения
$1 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^9$ $\geq 6 \cdot 10^{10}$	0,75 0,15	0,25 1/3	Вдоль вертикальной стенки
$1 \cdot 10^3 \div 1 \cdot 10^9$	0,50	0,25	На горизонтальной трубе

По формуле индексы «ж» и «с» означают, что физические свойства жидкости выбираются соответственно при температуре жидкости  $t_{\text{ж}}$  вдали от поверхности теплообмена и температуре стенки  $t_c$ . При движении вдоль вертикальной стенки за определяющий размер принимается высота поверхности теплообмена, а для горизонтального цилиндра — его наружный диаметр.

В рассматриваемом случае определяющая температура  $t_{\text{ж}} = 30$  °С.

При этой температуре для воздуха

$$\nu_{\text{ж}} = 16,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \lambda_{\text{ж}} = 2,67 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$$

$$\beta_{\text{ж}} = \frac{1}{t_{\text{ж}} + 273} = \frac{1}{303} \text{ К}^{-1}; Pr_{\text{ж}} = 0,701$$

Вычисляем значения комплекса:

$$(GrPr)_{\text{ж}} = g\beta_{\text{ж}} \frac{\Delta t d^3}{\nu_{\text{ж}}^2} Pr_{\text{ж}} = \frac{9,81 \cdot (200 - 30) \cdot 0,4^3}{303 \cdot (16 \cdot 10^{-6})^2} \cdot 0,701 = 9,75 \cdot 10^8$$

Из таблицы находим, что при вычисленном значении комплекса  $(GrPr)_{\text{ж}}$  постоянные в расчетном уравнении  $C = 0,5$  и  $n = 0,25$ .

Число Нуссельта

$$Nu_{ж} = 0,50(9,75 \cdot 10^8)^{0,25} = 88,2,$$

откуда

$$\alpha = Nu_{ж} \frac{\lambda_{ж}}{d} = 88,2 \frac{2,67 \cdot 10^{-2}}{0,4} = 5,9 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Потери теплоты в единицу времени с единицы поверхности теплообменника

$$q = 5,9(200 - 30) = 1000 \text{ Вт/м}^2$$

**7-2.** В целях уменьшения тепловых потерь в условиях задачи 7-1 корпус теплообменника покрыт слоем тепловой изоляции.

Найти тепловые потери  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, с поверхности теплообменника, если после наложения слоя тепловой изоляции толщиной 50 мм температура на внешней поверхности изоляции установилась  $t_c = 50$  °С, а температура в помещении осталась прежней, т. е.  $t_{ж} = 30$  °С.

**Ответ:**  $q = 65$  Вт/м<sup>2</sup>.

**7-3.** В котельной проложены два горизонтальных паропровода диаметрами  $d_1 = 50$  мм и  $d_2 = 150$  мм. Оба паропровода имеют одинаковую температуру поверхности  $t_c = 450$  °С. Температура окружающего воздуха  $t_{ж} = 50$  °С. Паропроводы проложены друг от друга на расстоянии, исключающем взаимное тепловое влияние.

Найти отношения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_1/\alpha_2$  и потерь теплоты с 1 м  $q_{l1}/q_{l2}$  и паропроводов.

**Ответ:**  $\alpha_1/\alpha_2 = 1,315$ ;  $q_{l1}/q_{l2} = 0,438$ .

**7-4.** Решить задачу 7-3 при условии, что после покрытия паропроводов тепловой изоляцией на наружных поверхностях установилась температура  $t_c = 70$  °С. Наружный диаметр изоляции первого паропровода  $d_1 = 100$  мм и второго  $d_2 = 350$  мм. Температура окружающего воздуха остается, как и в задаче 7-3,  $t_{ж} = 50$  °С.

**Ответ:**  $\alpha_1/\alpha_2 = 1,37; q_{l1}/q_{l2} = 0,382$ .

**7-5.** Определить коэффициент теплоотдачи от вертикальной плиты высотой  $H = 2$  м к окружающему спокойному воздуху, если известно, что температура поверхности плиты  $t_c = 100$  °С, температура окружающего воздуха вдали от поверхности  $t_{\text{ж}} = 20$  °С.

**Ответ:**  $\alpha = 7,92$  Вт/м<sup>2</sup> · К.

**Решение.**

Теплоотдачу при естественной конвекции у поверхности вертикальной плиты можно определить по формуле:

$$Nu_{\text{ж}} = C(GrPr)_{\text{ж}}^n \left( \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_c} \right)^{0,25}$$

где за определяющий размер принимается высота плиты  $H$ .

При  $t_{\text{ж}} = 20$  °С физические свойства воздуха следующие:

$$\lambda_{\text{ж}} = 2,59 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м} \cdot \text{К}; \nu_{\text{ж}} = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

При этих условиях значение комплекса

$$Pr_{\text{ж}} = 0,703; \beta_{\text{ж}} = \frac{1}{t_{\text{ж}} + 273} = \frac{1}{293} \text{ К}^{-1}.$$

При этих условиях значение комплекса

$$(GrPr)_{\text{ж}} = g\beta_{\text{ж}} \frac{\Delta t H^3}{\nu_{\text{ж}}^2} Pr_{\text{ж}} = \frac{9,81 \cdot 80 \cdot 2^3}{293 \cdot (16 \cdot 10^{-6})^2} 0,703 = 6,64 \cdot 10^{10}.$$

При полученном значении  $(GrPr)_{\text{ж}}$  по таблице находим  $C = 0,15; n = 1,3$ , тогда

$$Nu_{\text{ж}} = 0,15(6,64 \cdot 10^{10})^{1/3} = 610;$$
$$\alpha = Nu_{\text{ж}} \frac{\lambda_{\text{ж}}}{H} = 610 \frac{2,59 \cdot 10^{-2}}{2} = 7,92 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

**7-6.** Как изменится коэффициент теплоотдачи от вертикальной плиты к окружающему воздуху в условиях задачи 7-5, если высоту плиты увеличить в 2 раза, а все другие условия оставить без изменений.

**Ответ:**  $\alpha_2/\alpha_1 = 1$ .

**7-7.** Определить коэффициент теплоотдачи от горизонтальной плиты, обращенной теплоотдающей поверхностью кверху, с размерами  $a \times b = 2 \times 3 \text{ м}^2$ , к окружающему спокойному воздуху, если известно, что температура поверхности плиты  $t_c = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  и температура окружающего воздуха вдали от плиты  $t_{\text{ж}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Ответ:**  $\alpha = 10,3 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ .

**Решение:**

Теплоотдачу горизонтальных плит можно приближенно рассчитывать по формуле из предыдущих задач, когда за определяющий размер берется меньшая сторона плиты. При этом если теплоотдающая поверхность обращена кверху, то полученное из формулы значение коэффициента теплоотдачи увеличивается на 30%; если книзу — уменьшается на 30%.

В рассматриваемом случае  $t_{\text{ж}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , при этой температуре для воздуха  $\nu_{\text{ж}} = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ :

$$\lambda_{\text{ж}} = 2,59 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м} \cdot \text{К}; Pr_{\text{ж}} = 0,703.$$

Определяющим размером будет меньшая сторона плиты, т. е.  $a = 2 \text{ м}$ , тогда комплекс

$$(GrPr)_{\text{ж}} = g\beta_{\text{ж}} \frac{\Delta t a^3}{\nu_{\text{ж}}^2} Pr_{\text{ж}} = \frac{9,81 \cdot 80 \cdot 2^3}{293 \cdot (15,06 \cdot 10^{-6})^2} 0,703 = 6,64 \cdot 10^{10}.$$

По полученному значению  $(GrPr)$  из таблицы находим:  $C = 0,15$  и  $n = 1/3$ , тогда

$$Nu_{\text{ж}} = 0,15(6,64 \cdot 10^{10})^{1/3} = 610,$$

откуда

$$\alpha' = Nu_{\text{ж}} \frac{\lambda_{\text{ж}}}{a} = 610 \frac{2,59 \cdot 10^{-2}}{2} = 7,9 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

и

$$\alpha = 1,3\alpha' = 1,3 \cdot 7,9 = 10,3 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

**7-8.** Как изменится коэффициент теплоотдачи в условиях задачи 7-7, если плиту расположить теплоотдающей поверхностью книзу, а все другие условия оставить без изменений?

**Ответ:**  $\alpha_2 = 5,5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $\alpha/\alpha_2 = 1,88$ .

**7-9.** В масляном баке температура масла марки МС поддерживается постоянной с помощью горизонтальных обогревающих труб диаметром  $d = 20 \text{ мм}$ .

Определить коэффициент теплоотдачи от поверхности труб к маслу, если температура масла  $t_{\text{ж}} = 60 \text{ }^\circ\text{С}$ , а температура поверхности труб  $t_{\text{с}} = 90 \text{ }^\circ\text{С}$ . Расстояние между трубами относительно велико, и расчет теплоотдачи можно производить как для одиночного цилиндра.

**Ответ:**  $\alpha = 96,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ .

**7-10.** Определить коэффициент теплоотдачи в условиях задачи 7-12, если при той же температуре масла и том же температурном напоре тепловой поток направлен от масла к стенкам труб, при этом  $t_{\text{ж}} = 60 \text{ }^\circ\text{С}$  и  $t_{\text{с}} = 30 \text{ }^\circ\text{С}$ .

**Ответ:**  $\alpha = 47,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ , т. е. коэффициент теплоотдачи примерно в 2 раза меньше

**7-11.** Определить эквивалентный коэффициент теплопроводности и плотность теплового потока  $q, \text{ Вт/м}^2$ , через вертикальную щель толщиной  $\delta = 20 \text{ мм}$ , заполненную воздухом. Температура горячей поверхности  $t_{\text{с1}} = 200 \text{ }^\circ\text{С}$  и холодной  $t_{\text{с2}} = 80 \text{ }^\circ\text{С}$  (рис. 7-2).

**Ответ:**  $\lambda_3 = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ;  $q = 448 \text{ Вт/м}^2$ .

**Решение.**

Эквивалентный коэффициент теплопроводности может быть вычислен по формуле

$$\lambda_3 = \lambda \varepsilon_{\text{к}}$$

где  $\lambda$  — действительный коэффициент теплопроводности жидкости;

$\varepsilon_{\text{к}}$  — коэффициент конвекции, являющийся функцией  $GrPr$ , может быть приближенно вычислен по формуле

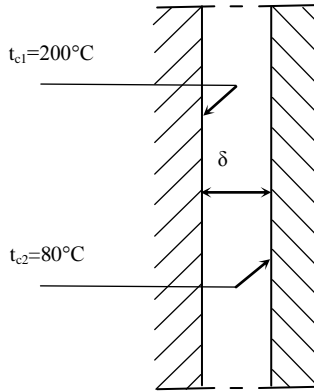


Рис. 7.2. К задаче 7-11

$$\varepsilon_k = 0,18(GrPr)_{c.r.}^{0,25}.$$

Здесь все физические параметры выбираются при определяющей температуре  $t_{c.r} = 0,5(t_{c1} + t_{c2})$ .

За определяющий размер принимается ширина щели  $\delta$ , за расчетную разность температур - величина  $\Delta t = t_{c1} - t_{c2}$ .

В рассматриваемом случае  $t_{c.r} = 0,5(200 + 80) = 140$  °С. При этой температуре  $\nu_{c.r} = 27,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda_{c.r} = 0,0349 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ;  $Pr_{c.r} = 0,684$ ;

$$\beta_{c.r.} = \frac{1}{t_{c.r.} + 273} = \frac{1}{413} \text{ К}^{-1}.$$

Вычисляем произведение

$$(GrPr)_{c.r.} = g\beta_{c.r.} \frac{\Delta t d^3}{\nu_{c.r.}^2} Pr_{c.r.} = \frac{9,81 \cdot 120 \cdot (2 \cdot 10^{-2})^3}{413 \cdot (27,8 \cdot 10^{-6})^2} 0,684 = 2,02 \cdot 10^4$$

Коэффициент конвекции

$$\varepsilon_k = 0,18(2,02 \cdot 10^4)^{0,25} = 2,14,$$

тогда

$$\lambda_3 = 3,49 \cdot 10^{-2} \cdot 2,14 = 7,47 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м} \cdot \text{К}.$$

Плотность теплового потока через воздушную прослойку

$$q = \frac{\lambda_3}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}) = \frac{7,47 \cdot 10^{-2}}{0,02} 120 = 448 \text{ Вт/м}^2.$$

**7-12.** Как изменятся эквивалентный коэффициент теплопроводности и плотность теплового потока в условиях задачи 7-11, если щель между плоскими стенками заполнить водой под давлением, а все другие условия оставить без изменений?

**Ответ:**  $\lambda_3 = 15,5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ;  $q = 92\,600 \text{ Вт/м}^2$ .

**7-13.** Как изменится эквивалентный коэффициент теплопроводности, если толщину щели уменьшить в 2 раза, а все другие условия оставить такими, как в задаче 7-11.

**Ответ:**  $\lambda_3$  уменьшится в 1,68 раза.

**7-14.** В контуре для изучения гидродинамики и теплоотдачи жидкометаллических теплоносителей металл в заборном баке нагревается при помощи горизонтального электрического нагревателя, имеющего форму цилиндра диаметром 50 мм.

Вычислить коэффициент теплоотдачи от поверхности нагревателя к металлу для случая, когда контур заполнен натрием с температурой  $t_{\text{ж}} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ , а температура поверхности нагревателя  $t_c = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Ответ:**  $\alpha = 15\,750 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ .

**Решение.**

Теплоотдача при свободном движении жидких металлов может быть вычислена по формуле

$$Nu_{\Gamma} = C Gr_{\Gamma}^n Pr_{\Gamma}^{0,4}.$$

В этом уравнении  $C$  и  $n$  находятся в зависимости от значений числа Грасгофа:

при  $Gr_{\Gamma} = 10^2 \div 10^9$   $C = 0,52$  и  $n = 0,25$ ;

при  $Gr_{\Gamma} = 10^9 \div 10^{13}$   $C = 0,106$  и  $n = 0,33$ .

Физические свойства выбираются при температуре  $t_r = 0,5(t_c + t_{ж})$ .

Для рассматриваемого случая  $t_r = 0,5(200 + 400) = 300$  °С. При этой температуре физические свойства натрия имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} \nu_r &= 39,4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \lambda_r = 71 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}; \\ Pr_r &= 0,63 \cdot 10^{-2}; \\ \beta_r &\approx \frac{\rho_{ж} - \rho_c}{\rho_{ж}(\rho_c - \rho_{ж})} = \frac{903 - 854}{903(400 - 200)} = 2,71 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}; \end{aligned}$$

$$(Gr)_r = g\beta_r \frac{\Delta t d^3}{\nu_r^2} = \frac{9,81 \cdot 2,71 \cdot 10^{-4} \cdot 200 \cdot (5 \cdot 10^{-2})^3}{(39,4 \cdot 10^{-8})^2} = 4,28 \cdot 10^8.$$

При этом значении числа Грасгофа  
 $C = 0,52$  и  $n = 0,25$ ;

тогда

$$Nu_r = 0,52(4,28 \cdot 10^8)^{0,25} (6,3 \cdot 10^{-3})^{0,4} = 11,1,$$

откуда

$$\alpha = Nu_r \frac{\lambda_r}{d} = 11,1 \frac{71}{5 \cdot 10^{-2}} = 15750 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

**7-15.** Как изменится коэффициент теплоотдачи от поверхности нагревателя к теплоносителю, если в задаче 7-14 контур заполнить:

- а) литием  $Li$ ;
- б) сплавом (эвтектика) 25%  $Na$  + 75%  $K$ .

Температуры теплоносителей и поверхности нагревателя остаются как в задаче 7-14.

**Ответ:** а)  $\alpha = 10\,500 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ; б)  $\alpha = 6370 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ .

## 8. ТЕПЛОТДАЧА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА

**8-1.** На наружной поверхности горизонтальной трубы диаметром  $d = 20$  мм и длиной  $l = 2$  м конденсируется сухой насыщенный водяной пар при давлении  $p = 1 \cdot 10^5$  Па. Температура поверхности трубы  $t_c = 94,5$  °С.



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

**Ответ:**  $\alpha = 15\,600 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $G = 15,9 \text{ кг/ч}$ .

**Решение:**

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

$$Re = 3,25Z^{0,75} \quad (8-1)$$

где

$$Re = \alpha \Delta t \pi R \frac{4}{rv\rho};$$

$$Z = \Delta t \pi R \left(\frac{g}{v^2}\right)^{1/3} \frac{\lambda}{rv\rho},$$

$\Delta t = t_s - t_c$  – температурный напор;  $R$  – радиус трубы;  $\lambda, v$  и  $\rho$  – коэффициент теплопроводности, кинематический коэффициент вязкости и плотность конденсата при температуре насыщения  $t_s$ ;  $r$  – теплота парообразования при  $t_s$ .

Формула справедлива при  $d < 20(\sigma/\rho g)^{0,5}$  ( $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения) и ламинарном течении пленки конденсата, что определяется условием  $Z < 3900$ . Для встречающихся на практике случаев эти два условия обычно выполняются.

Формулу (8-1) можно записать следующим образом:

$$\alpha = 3,25 \frac{A^{0,75}}{B} \frac{1}{(\Delta t \pi R)^{0,25}}, \quad (8-2)$$

где

$$A = \left(\frac{g}{v^2}\right)^{1/3} \frac{\lambda}{rv\rho}, 1/\text{м} \cdot \text{К};$$

$$B = \frac{4}{rv\rho}, \text{м/Вт}.$$

Значения комплексов А и В зависят только от рода жидкости и температуры насыщения. Для воды значения этих комплексов в зависимости от  $t_s$  приведены в таблице.

Таблица 8-1.

Значения А и В для воды

$t_s, ^\circ\text{C}$	A, 1/(м · К)	$B \cdot 10^3, \text{ м/Вт}$	$t_s, ^\circ\text{C}$	A, 1/(м · К)	$B \cdot 10^3, \text{ м/Вт}$
20	5,16	1,62	170	136	12,04
30	7,88	2,06	180	150	12,90
40	11,4	2,54	190	167	14,02
50	15,6	3,06	200	182	15,05
60	20,9	3,62	210	197	16,08
70	27,1	4,22	220	218	17,63
80	34,5	4,88	230	227	18,40
90	42,7	5,57	240	246	19,78
100	51,5	6,28	250	264	21,32
110	60,7	6,95	260	278	22,70
120	70,3	7,65	270	296	24,42
130	82,0	8,47	280	312	26,31
140	94,0	9,29	290	336	28,72
150	107	10,15	300	354	31,21
160	122	11,09			

В рассматриваемой задаче при  $p = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$   $t_s = 99,6 ^\circ\text{C}$  и по табл. 8-1 находим:

$$A = 51,2 \text{ 1/м} \cdot \text{К}; \quad B = 6,25 \cdot 10^{-3} \text{ м/Вт.}$$

Температурный напор

$$\Delta t = t_s - t_c = 99,6 - 94,5 = 5,1 ^\circ\text{C.}$$

Подставив найденные значения в формулу (8-2), получим:

$$\alpha = 3,25 \frac{51,2^{0,75}}{6,25 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1}{(3,14 \cdot 0,01 \cdot 5,1)^{0,25}} = 15600 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Из уравнения теплового баланса находим количество конденсирующего пара:

$$G \cdot r = \alpha \Delta t F,$$

где  $F = \pi dl, \text{ м}^2$  — площадь поверхности трубы.

При  $t_s = 99,6^\circ\text{С}$  теплота парообразования  $r = 2258 \text{ кДж/кг}$ , следовательно,

$$G = \pi dl \frac{\alpha \Delta t}{r} = 3,14 \cdot 0,02 \cdot 2 \frac{15600 \cdot 5,1}{2258 \cdot 10^3} = 4,43 \text{ кг/с},$$

или  $G = 4,43 \cdot 10^{-3} \cdot 3600 = 15,9 \text{ кг/ч}$ .

**8-2.** Решить задачу 8-1 при условии, что давление пара  $p = 2 \times 10^5 \text{ Па}$ , а все остальные данные остались без изменений. Результаты расчета сравнить с ответом к задаче 8-1.

**Ответ:**  $\alpha = 10\,800 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $G = 57 \text{ кг/ч}$ .

**8-3.** Определить количество сухого насыщенного водяного пара  $G, \text{ кг/ч}$ , которое конденсируется на поверхности горизонтальной трубы диаметром  $d = 16 \text{ мм}$  и длиной  $l = 1,5 \text{ м}$ , если давление пара  $p = 1,2 \text{ МПа}$ , а температура поверхности трубы  $t_c = 180^\circ\text{С}$ .

**Ответ:**  $G = 99 \text{ кг/ч}$ .

**8-4.** Как изменятся коэффициент теплоотдачи и количество сухого насыщенного водяного пара, конденсирующегося в единицу времени на поверхности горизонтальной трубы, если диаметр трубы увеличить в 4 раза, а давление пара, температурный напор и длину трубы сохранить без изменений?

**Ответ:** Коэффициент теплоотдачи уменьшится в  $\sqrt{2} \approx 1,41$  раза; количество пара, конденсирующегося в единицу времени, увеличится в  $2^{3/2} = 2,84$  раза.

**8-5.** Какую температуру стенки  $t_c$  необходимо обеспечить, чтобы при пленочной конденсации сухого насыщенного водяного пара на поверхности горизонтальной трубы диамет-

ром  $d = 16$  мм и длиной  $l = 2,4$  м конденсировалось  $G = 6,5 \cdot 10^{-3}$  кг/с пара. Давление пара  $p = 5 \cdot 10^5$  Па.

Определить также значение коэффициента теплоотдачи в этих условиях.

**Ответ:**  $t_c = 145$  °С;  $\alpha = 16\,600$  Вт/м<sup>2</sup> · К.

**Решение.**

Из уравнения теплового баланса имеем:

$$\alpha = \frac{G \cdot r}{\Delta t 2\pi R l}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

С другой стороны, коэффициент теплоотдачи согласно формуле (8-2)

$$\alpha = 3,25 \frac{A^{0,75}}{B} \frac{1}{(\Delta t \pi R)^{0,25}}$$

Приравняв правые части этих двух уравнений, получим выражение для температурного напора:

$$\Delta t^{0,75} = \frac{G \cdot r}{6,5(\pi R)^{0,75} l A^{0,75}} \frac{B}{1}$$

В рассматриваемой задаче при  $p = 5 \cdot 10^5$  Па температура насыщения  $t_s = 151,8$  °С. При этой температуре  $r = 2109$  кДж/кг, и по табл. 8-1  $A = 109,71$  /м · К;  $B = 10,3 \cdot 10^{-3}$  м/Вт, следовательно,

$$\Delta t^{0,75} = \frac{6,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2109 \cdot 10^3}{6,5(3,14 \cdot 8 \cdot 10^{-3})^{0,75} \cdot 2,4} \frac{10,3 \cdot 10^{-3}}{109,7^{0,75}} = 4,22,$$

откуда температурный напор

$$\Delta t = (4,22)^{4/3} = 6,8 \text{ °С}$$

и необходимая температура стенки

$$t_c = t_s - \Delta t = 151,8 - 6,8 = 145 \text{ °С.}$$

Значение коэффициента теплоотдачи находим по формуле (8-4):

$$\alpha = 3,25 \frac{109,7^{0,75}}{10,3 \cdot 10^{-3}} \frac{1}{(3,14 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 6,8)^{0,25}} = 16600.$$

**8-6.** Какой температурный напор  $\Delta t = t_s - t_c$  необходимо обеспечить, чтобы при пленочной конденсации сухого насы-

ценного водяного пара на поверхности горизонтальной трубы диаметром  $d = 34$  мм плотность теплового потока была  $q = 5,8 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>. Давление пара  $p = 1 \cdot 10^5$  Па. Определить также значение коэффициента теплоотдачи в этих условиях.

**Ответ:**  $\Delta t = 4$  °С;  $\alpha = 14\,500$  Вт/м<sup>2</sup> · К.

**8-7.** На поверхности горизонтальной латунной трубки диаметром  $d_2/d_1 = 20/18$  мм конденсируется сухой насыщенный водяной пар с давлением  $p = 2,4 \cdot 10^5$  Па. Внутри трубки протекает охлаждающая вода. Расход и средняя температура воды равны соответственно:  $G_1 = 400$  кг/ч;  $t_{ж1} = 40$  °С.

Определить количество пара, конденсирующегося за 1 ч на 1 м поверхности трубки  $G_2$  кг/м · ч.

**Ответ:**  $G_2 = 20,8$  кг/м · ч.

**Решение.**

Так как значения коэффициентов теплоотдачи со стороны пара и воды зависят от температур соответствующих поверхностей трубки, а эти температуры нам неизвестны, то расчет можно провести либо методом последовательных приближений, задаваясь соответствующими температурами, либо графоаналитическим методом. Решим задачу графоаналитическим методом.

Определим значения двух тепловых потоков, отнесенных к 1 м трубки, от внутренней поверхности трубки к воде ( $q_{l1}$ , Вт/м) — проходящего через стенку трубки ( $q_{lc}$ , Вт/м) и передаваемого от конденсирующего пара к поверхности трубки ( $q_{l2}$ , Вт/м), — в зависимости от соответствующих температурных напоров  $\Delta t_1 = t_{c1} - t_{ж1}$ ;  $\Delta t_c = t_{c2} - t_{c1}$  и  $\Delta t_{c2} = t_s - t_{c2}$ .

Для определения  $q_{l1} = f_1(\Delta t_1)$  зададимся тремя значениями  $\Delta t_1$ : 65, 70 и 75 °С. Тогда  $t_{c1} = \Delta t_1 + t_{ж1}$  будет равно 105, 110 и 115 °С. При температуре охлаждающей воды  $t_{ж1} = 40$  °С  $\mu_{ж1} = 653 \cdot 10^{-6}$  Па · с;  $\lambda_{ж1} = 0,635$  Вт/м · К;  $Pr_{ж1} = 4,31$ , число Рейнольдса

$$Re_{ж1} = \frac{4G_1}{\pi d_1 \mu_{ж1}} = \frac{4 \cdot 400}{3,14 \cdot 18 \cdot 10^{-3} \cdot 3600 \cdot 653 \cdot 10^{-6}} = 1,2 \cdot 10^4$$

Режим течения охлаждающей воды турбулентный, и коэффициент теплоотдачи определяем по формуле (5-7):

$$Nu_{ж1} = 0,021 Re_{ж1}^{0,8} Pr_{ж1}^{0,43} \left( \frac{Pr_{ж1}}{Pr_c} \right)^{0,25} = 0,021 (1,2 \cdot 10^4)^{0,8} 4,31^{0,43} \left( \frac{Pr_{ж1}}{Pr_c} \right)^{0,25} =$$

$$= 73 \left( \frac{Pr_{ж1}}{Pr_c} \right)^{0,25}$$

отсюда при  $t_{c1} = 105 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $Pr_{c1} = 1,67$ ) находим:

$$Nu_{ж1} = 73 \left( \frac{4,31}{1,67} \right)^{0,25} = 92,5.$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_1 = Nu_{ж1} \frac{\lambda_{ж1}}{d} = 92,5 \frac{0,635}{18 \cdot 10^{-3}} = 3260 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

$$q_{l1} = \alpha_1 \Delta t_1 \pi d_1 = 3260 \cdot 65 \cdot 3,14 \cdot 18 \cdot 10^{-3} = 12000 \text{ Вт/м};$$

При  $t_{c1} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$  получим соответственно:

$$Nu_{ж1} = 93,5; \alpha_1 = 3300 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}; q_{l1} = 13000 \text{ Вт/м}.$$

При  $t_{c1} = 115 \text{ }^\circ\text{C}$   $Nu_{ж1} = 94,8; \alpha_1 = 3340 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К};$

$$q_{l1} = 14200 \text{ Вт/м}.$$

Соответствующая зависимость  $q_{l1} = f(\Delta t_1)$  показана на графике рис. 8-3.

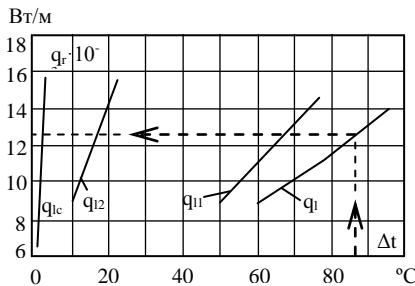


Рис. 8.1. К задаче 8-7

Так как коэффициент теплопроводности латуни  $\lambda_c \approx 110 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$  можно в условиях данной задачи принять не

зависящим от температуры, то функция  $q_{lc} = f(\Delta t_c)$  будет линейной:

$$q_{lc} = (t_c - t_{c1}) \frac{2\pi\lambda}{2,3lg \frac{d_2}{d_1}}.$$

При  $\Delta t_c = t_{c2} - t_{c1} = 2^\circ\text{C}$

$$q_{lc} = 2 \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 110}{2,3lg \frac{20}{18}} = 13000 \text{ Вт/м}$$

Зависимость  $q_{lc} = f(\Delta t_c)$  также приведена на рис. 8-1.

Зависимость  $q_{l2} = f(\Delta t_{c2})$  находим, исходя из формулы для коэффициента теплоотдачи от конденсирующегося пара к стенке трубки (8-2):

$$\alpha_2 = 3,25 \frac{A^{0,75}}{B} \frac{1}{(\Delta t_2 \pi R_2)^{0,25}},$$

тогда тепловой поток на 1 м

$$q_{l2} = \alpha_2 \Delta t_2 \pi d_2 = 3,25 \frac{A^{0,75}}{B} \frac{2 \Delta t_2 \pi R_2}{(\Delta t_2 \pi R_2)^{0,25}}$$

и

$$q_{l2} = 6,5 \frac{(A \Delta t_2 \pi R_2)^{0,75}}{B}.$$

$q_{l2} = 6,5 \frac{(\pi A R_2 \Delta t_2)^{0,75}}{B}$ . При  $p = 2,4 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  $t_s = 126,1^\circ\text{C}$  и по табл. 8-1

$A = 77,41/\text{м} \cdot \text{К}$ ;  $B = 8,15 \cdot 10^{-3} \text{ м/Вт}$ , следовательно,

$$q_{l2} = 6,5 \frac{(3,14 \cdot 77,4 \cdot 10^{-2})^{0,75}}{8,15 \cdot 10^{-3}} \Delta t_2^{0,75} = 1540 \Delta t_2^{0,75}.$$

Задавшись  $\Delta t_2 = 10, 15$  и  $20^\circ\text{C}$ , получим соответственно  $q_{l2} = 8650, 11700$  и  $14600 \text{ Вт/м}$ . Зависимость  $q_{l2} = f(\Delta t_2)$  также нанесена на график (рис. 8-1).

Для нахождения зависимости теплового потока от суммарного температурного напора  $\Delta t = t_s - t_{ж1}$  просуммируем

три найденные зависимости. Результирующая кривая  $q_l = f(t_s - t_{ж1})$ , на рис. 8-1 выделена более жирной линией.

Отложив по оси абсцисс заданное значение общего температурного напора  $\Delta t = t_s - t_{ж1} = 126,1 - 40 = 86,1 \text{ }^\circ\text{C}$  и проведя вертикаль до пересечения с кривой  $q_l = f(t_s - t_{ж1})$ , на оси ординат находим искомое значение теплового потока (рис. 8-1):  $q_l = 12\,600 \text{ Вт/м}$ .

При  $t_s = 126,1 \text{ }^\circ\text{C}$  теплота парообразования  $r = 2185 \text{ кДж/кг}$  и, следовательно, расход конденсата

$$G_1 = \frac{q_l}{r} = \frac{1,26 \cdot 10^4}{2185 \cdot 10^3} \cdot 3600 = 20,8 \text{ кг/м} \cdot \text{ч}$$

**8-8.** Определить значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_2, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{K}$  от конденсирующегося водяного пара к наружной поверхности горизонтальной латунной трубки диаметром  $d_2/d_1 = 18/16 \text{ мм}$ , температуры наружной и внутренней поверхностей стенки трубки  $t_{c2}$  и  $t_{c1}$  и количество пара  $G_2, \text{кг/(м} \cdot \text{ч)}$ , конденсирующегося на наружной поверхности трубки.

Пар сухой насыщенный под давлением  $p = 700 \text{ кПа}$ . Внутри трубки со скоростью  $w = 1,0 \text{ м/с}$  протекает охлаждающая вода, имеющая среднюю температуру  $t_{ж1} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Ответ:**  $\alpha_2 = 7600 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}$ ;  $t_{c2} \approx 110 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t_{c1} \approx 106 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 $G_2 = 41 \text{ кг/м} \cdot \text{ч}$ .

**8-9.** Как изменится количество конденсирующегося пара  $G_2, \text{кг/м} \cdot \text{ч}$ , в условиях задачи 8-8, если скорость охлаждающей воды увеличить в 2 раза (с  $w = 1 \text{ м/с}$  до  $w = 2 \text{ м/с}$ ), а все остальные условия оставить без изменений?

**Ответ:** Количество конденсирующегося пара увеличится примерно на 10%;  $G_2 = 45 \text{ кг/м} \cdot \text{ч}$ .

**8-10.** На наружной поверхности вертикальной трубы диаметром  $d = 20 \text{ мм}$  и высотой  $H = 2 \text{ м}$  конденсируется сухой



насыщенный водяной пар при давлении  $p = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$  (рис. 8-2). Температура поверхности трубы  $t_c = 94,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить средний по высоте коэффициент теплоотдачи от пара к трубе и количество пара  $G$ , кг/ч, которое конденсируется на поверхности трубы.

Сравнить результаты расчета с ответом к задаче 8-1, где рассматривается теплообмен в тех же условиях для горизонтальной трубы.

**Ответ:**  $\alpha = 7840 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $G = 8 \text{ кг/ч}$ .

При тех же условиях, но при горизонтальном расположении трубы (задача 8-1)  $\alpha = 15\,600 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $G = 15,9 \text{ кг/ч}$ .

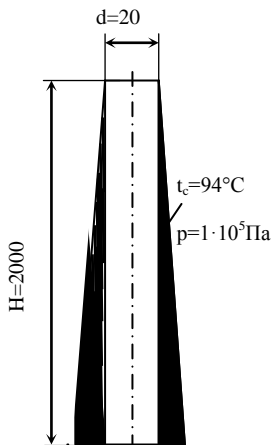


Рис. 8.2. К задаче 8-10.

### Решение.

При пленочной конденсации сухого насыщенного пара и ламинарном режиме течения пленки конденсата на вертикальных поверхностях и трубах средний по длине коэффициент теплоотдачи можно определить по следующей формуле:

$$Re = 3,8Z^{0,78} \quad (8 - 3)$$

где

$$Re = \alpha \Delta t H \frac{4}{rv\rho};$$

$$Z = \Delta t H \left(\frac{g}{v^2}\right)^{1/3} \frac{\lambda}{rv\rho}$$

Здесь  $Z$  – приведенная длина трубы;  $H$  – высота вертикальной поверхности или трубы.

Остальные обозначения те же, что и в формуле (8-2).

Формула справедлива при ламинарном течении пленки конденсата, т. е. при  $Re < 1600$  и соответственно  $Z < 2300$ .

Значения комплексов физических свойств, входящих в выражения для  $Re$  и  $Z$ ,

$$\frac{4}{rv\rho} = B$$

и

$$\left(\frac{g}{v^2}\right)^{1/3} \frac{\lambda}{rv\rho} = A$$

для случая конденсации водяного пара в зависимости от  $t_s$  приведены в табл. 8-1.

В рассматриваемой задаче при  $p = 1 \cdot 10^5$  Па  $t_s = 99,6$  °С; по табл. 8-1 находим:

$$A = 51,21/\text{м} \cdot \text{К}; \quad B = 6,25 \cdot 10^{-3} \text{м}/\text{Вт};$$

температурным напор

$$\Delta t = t_s - t_c = 99,6 - 94,5 = 5,1 \text{ °С};$$

приведенная длина трубы .

$$Z = \Delta t H A = 5,1 \cdot 2 \cdot 51,2 = 522 < 2300.$$

Следовательно, режим течения конденсата по всей высоте трубы ламинарный, и расчет теплоотдачи можно вести по формуле (8-3).

Число

$$Re = 3,8Z^{0,78} = 3,8(522)^{0,78} = 500.$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{Re}{\Delta t H B} = \frac{500}{5,1 \cdot 2 \cdot 6,25 \cdot 10^{-3}} = 7840 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$$

При  $t_s = 99,6$  теплота парообразования  $r = 2258$  кДж/кг и количество пара, которое конденсируется на поверхности трубы,

$$G = \pi dH \frac{\alpha \Delta t}{r} = 3,14 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \frac{7840 \cdot 5,1}{2258 \cdot 10^3} = 2,22 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с},$$

или

$$G = 2,22 \cdot 10^{-3} \cdot 3600 = 8 \text{ кг/ч}.$$

Сравнение полученных значений  $\alpha$  и  $G$  с ответом к задаче 8-1 показывает, что коэффициент теплоотдачи и количество конденсирующегося пара будут примерно в 2 раза меньше, чем при горизонтальном расположении трубы.

**8-11.** На горизонтальной трубе диаметром  $d = 16$  мм и длиной  $l = 1,2$  м происходит пленочная конденсация сухого насыщенного водяного пара при давлении  $p = 3$  МПа. Температура поверхности трубы  $t_c = 227$  °С.

Как изменится средний коэффициент теплоотдачи от пара к трубе, если трубу расположить вертикально, а все другие условия оставить без изменения?

**Ответ:**  $\alpha_{\text{верт}} \approx 0,55\alpha_{\text{гор}}$ .

**8-12.** Пароводяной теплообменник выполнен из  $n = 218$  вертикально расположенных труб диаметром  $d = 16$  мм и высотой  $H = 1,5$  м.

Трубы изнутри охлаждаются водой, так что средняя температура их наружной поверхности  $t_c = 173$  °С. Сухой насыщенный водяной пар под давлением  $p = 1$  МПа конденсируется на наружной поверхности труб.

Определить коэффициент теплоотдачи от пара к поверхности труб и количество теплоты  $Q$ , кВт, передаваемое воде в теплообменнике.

**Ответ:**  $\alpha = 8800 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $Q = 1 \text{ МВт}$ .

**8-13.** На вертикальной трубе водонагревателя конденсируется сухой насыщенный водяной пар. Давление пара  $p = 8,6$  МПа. Температура наружной поверхности трубы  $t_c = 287$  °С, Высота трубы  $H = 1,8$  м.

Определить средний коэффициент теплоотдачи от пара к стенке трубы.

**Ответ:**  $\alpha = 8100$  Вт/м<sup>2</sup> · К.

**Решение.**

При  $p = 8,6$  МПа  $t_s = 300$  °С; по табл. 8-1 находим:  $A = 354$  1/(м · К);  $B = 31,21 \cdot 10^{-3}$  м/Вт.

Температурный напор  $\Delta t = t - s - t_c = 300 - 287 = 13$  °С, следовательно, приведенная длина трубы

$$Z = \Delta tNA = 13 \cdot 1,8 \cdot 354 = 8380 > 2300.$$

Так как значение приведенной длины больше критического, то режим течения пленки конденсата в нижней части трубы турбулентный.

При пленочной конденсации сухого насыщенного пара и смешанном режиме течения пленки конденсата средний по длине коэффициент теплоотдачи можно определить по следующей формуле:

$$Re = \left[ 253 + 0,69 \left( \frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25} \cdot Pr^{0,5} (Z - 2300) \right]^{4/3} \quad (8-4)$$

где  $Pr$  и  $Pr_c$  — числа Прандтля для конденсата соответственно при температурах  $t_s$  и  $t_c$ . Остальные обозначения те же, что в формуле (8-3).

Формула (8-4) справедлива при  $Z > 2300$ .

В рассматриваемой задаче при  $t_s = 300$  °С  $Pr = 0,97$ ; при  $t_c = 287$  °С

$Pr_c = 0,921$ . По формуле (8-4) имеем:

$$Re = \left[ 253 + 0,69 \left( \frac{0,97}{0,921} \right)^{0,25} \cdot 0,97^{0,5} (8380 - 2300) \right]^{4/3} = 5930.$$

Учитывая, что  $Re = \alpha \Delta tNB$  находим:

$$\alpha = \frac{Re}{\Delta tNB} = \frac{5930}{3,14 \cdot 1,8 \cdot 31,21 \cdot 10^{-3}} = 8100 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

**8-14.** В вертикальном водоподогревателе нагреваемая вода движется по трубам, на наружной поверхности которых конденсируется сухой насыщенный водяной пар под давлением  $p = 5,6$  МПа. Температура наружной поверхности труб  $t_c = 260$  °С.

Определить количество теплоты  $Q$ , кВт, передаваемое воде, если водоподогреватель выполнен из  $n = 112$  труб наружным диаметром  $d = 16$  мм и высотой  $H = 2$  м.

**Ответ:**  $Q = 1$  МВт.

## 9. ТЕПЛОТДАЧА ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ

**9-1.** Определить коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубки испарителя к кипящей воде, если тепловая нагрузка поверхности нагрева  $q = 2 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>, режим кипения пузырьковый и вода находится под давлением  $p = 2 \cdot 10^5$  Па.

**Ответ:**  $\alpha = 18\,400$  Вт/м<sup>2</sup> · К.

**Решение.**

При пузырьковом кипении жидкости в большом объеме коэффициент теплоотдачи может быть подсчитан по формуле:

при  $Re_* \geq 10^{-2}$

$$Nu_* = 0,125 Re_*^{0,65} Pr^{1/3}; \quad (9 - 1a)$$

при  $Re_* \leq 10^{-2}$

$$Nu_* = 0,0625 Re_*^{0,5} Pr^{1/3}, \quad (9 - 16)$$

где

$$Re_* = \frac{ql_*}{r\rho''v}$$

$$Nu_* = \frac{\alpha l_*}{\lambda};$$

$$Pr = \frac{c_p \rho' \alpha}{\lambda};$$

$$l_* = \frac{C_p \rho' \sigma T_s}{(r\rho'')^2}, \text{ м};$$

$v, C_p, r, \lambda, \alpha$  и  $\sigma$  — кинематический коэффициент вязкости, теплоемкость, теплота парообразования, коэффициенты теплопро-

водности, температуропроводности и поверхностного натяжения жидкости при температуре насыщения  $t_s$ ;  $\rho'$  и  $\rho''$  — плотности жидкости и пара при температуре  $t_s$ ;  $T_s$  — температура насыщения, К.

Формулы (9-1а) и (9-1б) справедливы при  $0,86 \leq Pr \leq 7,6$ ;  $10^{-5} \leq Re_* \leq 10^4$  и давлении от  $45 \cdot 10^2$  до  $175 \cdot 10^5$  Па,

Для воды значения  $l_*$  и  $l_*/r\rho''\nu$  в зависимости от температуры приведены в табл. 9-1.

В рассматриваемом случае при  $p = 2 \cdot 10^5$  Па температура насыщения  $t_s = 120,2$  °С;  $\lambda = 0,686$  Вт/м · К;  $Pr = 1,47$ . По табл. 9-1 находим:

$$l_* = 14,08 \cdot 10^{-6} \text{ и } l_*/r\rho''\nu = 22,56 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{Вт}.$$

Число

$$Re_* = \frac{ql_*}{r\rho''\nu} = 2 \cdot 10^5 \cdot 22,56 \cdot 10^{-6} = 4,51.$$

Так как  $Re_* > 10^{-2}$ , то расчет ведем по формуле (9-1а). Подставив значения  $Re_*$  и  $Pr$  в эту формулу, найдем:

$$Nu_* 0,125 \cdot (4,51)^{0,65} (1,47)^{1/3} = 0,378.$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu_* \frac{\lambda}{l_*} = 0,378 \frac{0,686}{14,08 \cdot 10^{-6}} = 18400 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

**9-2.** Решить задачу 9-1 при условии, что вода находится под давлением  $p$ , равным 5 МПа. Определить также разность температур между поверхностью нагрева и кипящей водой  $\Delta t = t_c - t_s$ , при этих давлениях.

**Ответ:**  $p = 5$  МПа  $\alpha = 40\,000$  Вт/м<sup>2</sup> · К и  $\Delta t \approx 5$  °С.

**9-3.** Определить коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубки испарителя, рассмотренного в задаче 9-1, при условии, что тепловая нагрузка  $q = 3 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>, а остальные условия сохранены без изменений.

**Ответ:**  $q = 3 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha = 24\,200$  Вт/м<sup>2</sup> · К.

Таблица 9-1.

Значения величин в формулах (9-1) и (9-2)

$t_s,$ °C	$l_* \cdot 10^6,$ м	$\frac{l_*}{r\rho''v} 10^6,$ м <sup>2</sup> /Вт	$\frac{\lambda}{r\rho''} 10^2,$ 1/К
30	16450	276870	1040
40	5950	73345	782
50	2305	20894	587
60	960	6543	450
70	423	2201	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	140,7	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
270	0,0224	0,00373	9,8
280	0,0158	0,00243	8,8
290	0,0114	0,00153	7,47
300	0,00800	0,000911	6,16
310	0,00565	0,000609	5,64

Продолжение табл. 9-1

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

**9-4.** Определить тепловую нагрузку поверхности нагрева парогенератора при пузырьковом кипении воды в большом объеме, если вода находится под давлением  $p = 6,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , а температура поверхности нагрева  $t_c = 175^\circ\text{С}$ .

**Ответ:**  $q = 790 \text{ кВт/м}^2$ .

**Решение.**

При  $p = 6,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$   $t_s = 160^\circ\text{С}$ ;  $Pr = 1,1$ ;  $\lambda = 0,683 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ; по табл. 9-1 находим:

$$\lambda/r\rho''v = 0,526 \text{ 1/К}; \quad l_* = 1,73 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

При

$$\frac{\lambda\Delta t}{r\rho''v} Pr^{1/3} \geq 1,6$$

$$Nu_* = 2,63 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\lambda\Delta t}{r\rho''v} \right)^{1,86} Pr^{0,952}; \quad (9 - 2a)$$

При

$$\frac{\lambda\Delta t}{r\rho''v} Pr^{1/3} < 1,6$$

$$Nu_* = 3,91 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\lambda\Delta t}{r\rho''v} \right) Pr^{2/3}; \quad (9 - 2б)$$

Формулы (9 – 2a) и (9 – 2б) применимы в тех же пределах чисел  $Pr, Re_*$  давлений, что и (9 – 1a) и (9 – 1б), и при условии

$$0,05 \leq \frac{\lambda\Delta t}{r\rho''v} Pr^{1/3} \leq 200$$

Для воды значения комплекса  $(\lambda\Delta t/r\rho''v) Pr^{1/3} \text{ 1/К}$  в зависимости от температуры приведены в табл. 9-1

Температурный напор  $\Delta t = t_c - t_s = 175 - 160 = 15^\circ\text{С}$ , тогда



$$\frac{\lambda \Delta t}{r \rho'' v} = 0,526 \cdot 15 = 7,9$$

и

$$\frac{\lambda \Delta t}{r \rho'' v} Pr^{1/3} = 7,9(1,1)^{1/3} = 8,15.$$

Так как

$$\frac{\lambda \Delta t}{r \rho'' v} Pr^{1/3} > 1,6,$$

то расчет ведем по формуле:

$$Nu_* = 2,63 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\lambda \Delta t}{r \rho'' v} \right)^{1,86} Pr^{0,952} = 2,63 \cdot 10^{-3} (7,9)^{1,86} (1,1)^{0,952} = 0,134$$

Коэффициент теплоотдачи и тепловая нагрузка:

$$\alpha = Nu_* \frac{\lambda_*}{l_*} = 0,134 \frac{0,683}{1,73 \cdot 10^{-6}} = 52800 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

и

$$q = \alpha \Delta t = 52800 \cdot 15 = 7,9 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2.$$

**9-5.** Определить коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубы котла к кипящей воде, находящейся под давлением  $p = 4,7$  МПа, при температурах поверхности трубы  $t_c$ , равных 265 и 275 °С. Определить также плотности теплового потока в этих условиях.

**Ответ:**

При  $t_c = 265$  °С  $\alpha = 38\,400 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $q = 192 \text{ кВт/м}^2$ ;

При  $t_c = 275$  °С  $\alpha = 123\,000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;  $q = 1850 \text{ кВт/м}^2$ .

**9-6.** Определить критическую тепловую нагрузку при кипении воды в большом объеме под давлением  $p = 1 \cdot 10^5$  Па.

**Ответ:**  $q_{\text{кр}} = 1,4 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$

**Решение.**

Критическая тепловая нагрузка при кипении жидкости в большом объеме может быть подсчитана по формуле

$$Re_{*\text{кр}} = 68 Ar_*^{4/9} Pr^{-1/3}, \quad (9 - 3)$$

где

$$Re_{*кр} = \frac{q_{кр} l_*}{r \rho'' \nu};$$

$$Ar_* = g \frac{l_*^3 (\rho' - \rho'')}{\nu^2 \rho'}.$$

Обозначения всех величин те же, что и в формулах (9 – 1а) и (9 – 1б). Формула применима при  $0,86 \leq Pr \leq 13,1$  и давлениях  $1 \cdot 10^5 \leq p \leq 185 \cdot 10^5$  Па.

В рассматриваемом случае при  $p = 1 \cdot 10^5$  Па  $t_s = 99,6$  °С;  $\nu = 0,296 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $Pr = 1,76$ ;  $\rho' = 960$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho'' = 0,59$  кг/м<sup>3</sup>.

По табл. 9-1 находим:

$$l_* = 50,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad l_*/r \rho'' \nu = 130 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{Вт},$$

Число Архимеда

$$Ar_* = g \frac{l_*^3 (\rho' - \rho'')}{\nu^2 \rho'} = 9,81 \frac{(5,06 \cdot 10^{-5})^3 (960 - 0,59)}{(2,96 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 960} = 14,4.$$

По формуле (9-3) находим:

$$Re_{*кр} = 68 Ar_*^{4/9} Pr^{-1/3} = 68 (14,4)^{4/9} (1,76)^{-1/3} = 184$$

и

$$q_{кр} = Re_{*кр} \frac{\kappa \rho'' \nu}{l_*} = 184 \frac{1}{130 \cdot 10^{-6}} = 1,41 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2.$$

**9-7.** Определить критическую тепловую нагрузку при кипении воды в большом объеме, если вода находится под давлением  $p = 7,5$  и  $15$  МПа. Сравнить результаты расчета с ответом к задаче 9-6.

**Ответ:** при  $p = 7,5 \cdot 10^5$  Па  $q_{кр} = 4,1 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>;

при  $p = 150 \cdot 10^5$  Па  $q_{кр} = 3 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.

**9-8.** На поверхности трубы с наружным диаметром  $d = 38$  мм и длиной  $l = 0,5$  м кипит вода под давлением  $p = 4,9 \cdot 10^5$  Па. Труба с внутренней стороны обогревается электронагревателем. Мощность, затрачиваемая на обогрев,  $W = 7$  кВт.

Определить температуру наружной поверхности трубы.

**Ответ:**  $t_c = 159 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**9-9.** Определить необходимую площадь поверхности нагрева котла производительностью  $G = 4 \text{ т/ч}$  пара при давлении  $p = 15,7 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Предполагаемый температурный напор  $\Delta t = t_c - t_s = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Ответ:**  $F = 6 \text{ м}^2$ .

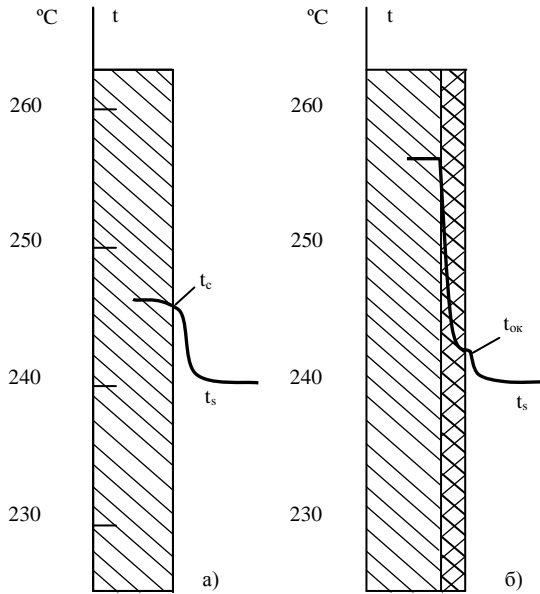
**9-10.** Какой температурный напор необходимо обеспечить в условиях задачи 9-9, для того чтобы увеличить производительность котла в 2,5 раза при той же площади поверхности нагрева  $F = 6 \text{ м}^2$ .

**Ответ:**  $\Delta t = 13,8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Увеличение температурного напора с 10 до  $13,8 \text{ }^\circ\text{C}$  приводит к возрастанию паропроизводительности с 4 до  $10 \text{ т/ч}$ .

**9-11.** На наружной поверхности трубы кипит вода под давлением  $p = 3,3 \text{ МПа}$ . Плотность теплового потока на поверхности трубы  $q = 1,75 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ .

Определить температуру поверхности трубы; а) если поверхность чистая; б) если поверхность трубы покрыта оксидной пленкой, термическое сопротивление которой  $R = 7,75 \cdot 10^{-5} \text{ К} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$ . При расчете принять, что за счет шероховатости оксидной пленки коэффициент теплоотдачи на ее поверхности возрастает в 2,5 раза по сравнению с кипением на чистой поверхности.

**Ответ:** при кипении на чистой поверхности  $t_c = 245 \text{ }^\circ\text{C}$ . При наличии оксидной пленки  $t_c \approx 255 \text{ }^\circ\text{C}$ , Соответствующие распределения температур показаны на рисунке.



К задаче 9-11

**Решение.**

а) Если поверхность трубы чистая, то разность температур между стенкой и кипящей жидкостью  $t_c - t_s \approx q/\alpha$  и коэффициент теплоотдачи, входящий в это соотношение, определяем по формуле (9-1а) или (9-1б).

При  $p = 3,3 \text{ МПа}$   $t_s = 239,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $l_* = 0,0699 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ;  $l_*/r\rho''\nu = 0,0163 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{Вт}$ ;  $\lambda = 0,629 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ;  $Pr = 0,87$ .

Число

$$Re_* = \frac{ql_*}{r\rho''\nu} = 1,75 \cdot 10^5 \cdot 0,0163 \cdot 10^{-6} = 2,86 \cdot 10^{-3}.$$

Так как  $Re_* < 10^{-2}$ , то число  $Nu_*$  определяем по (9-1б):

$$Nu_* = 0,0625 Re_*^{0,5} Pr^{1/3} = 0,0625 (2,86 \cdot 10^{-3})^{0,5} 0,87^{1/3} = 3,19 \cdot 10^{-3}.$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu_* \frac{\lambda}{l_*} = 3,19 \cdot 10^{-3} \frac{0,629}{0,0669 \cdot 10^{-6}} = 3 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

и искомый температурный напор

$$t_c - t_s = \frac{q}{\alpha} = \frac{1,75 \cdot 10^5}{3 \cdot 10^4} = 5,83^\circ\text{C}$$

откуда

$$t_c = 5,83 + 239,2 \approx 245^\circ\text{C}.$$

б) С учетом дополнительного термического сопротивления оксидной пленки  $t_c - t_s = q/k$ , где, приближенно принимаемая как для плоской стенки

$$k \approx \frac{1}{\frac{1}{\alpha'} + R}$$

$$k \approx \frac{1}{\frac{1}{\alpha'} + R}$$

и используя условия задачи

$$\alpha' = 2,5\alpha = 2,5 \cdot 3 \cdot 10^4 = 7,5 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}; \text{ получаем:}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{7,5 \cdot 10^4} + 7,75 \cdot 10^{-5}} = 1,1 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К};$$

$$t_c - t_s = \frac{q}{k} = \frac{1,75 \cdot 10^5}{1,1 \cdot 10^4} = 15,9^\circ\text{C};$$

$$t_c = 15,9 + 239,2 \approx 255^\circ\text{C}.$$

**9-12.** Решить задачу 9-11 при условии, что плотность теплового потока на поверхности трубы увеличилась в 2 раза ( $q = 3,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ ), а все остальные данные остались без изменения.

**Ответ:** при кипении на чистой поверхности температурный напор увеличится в  $\sqrt{2}$  раз и  $t_c \approx 247,4^\circ\text{C}$ . При наличии оксидной пленки  $t_c \approx 270^\circ\text{C}$ .

**9-13.** В трубе внутренним диаметром  $d = 18$  мм движется кипящая вода со скоростью  $w = 1$  м/с. Вода находится под давлением  $p = 8 \cdot 10^5$  Па.

Определить значение коэффициента теплоотдачи от стенки к кипящей воде, если температура внутренней поверхности трубы  $t_c = 173$  °С.

**Ответ:**  $\alpha = \alpha_w = 8040$  Вт/м<sup>2</sup> · К;

**Решение.**

При вынужденном движении кипящей жидкости в трубах в условиях, когда жидкость нагрева до температуры насыщения, коэффициент теплоотдачи, может быть, подсчитанной по следующим формулам:

при

$$\frac{\alpha_k}{\alpha_w} < 0,5$$

$$\alpha = \alpha_w; \quad (9 - 4a)$$

при

$$\frac{\alpha_k}{\alpha_w} \geq 2$$

$$\alpha = \alpha_k; \quad (9 - 4б)$$

при

$$0,5 \leq \frac{\alpha_k}{\alpha_w} < 2$$

$$\frac{\alpha}{\alpha_w} = \frac{4\alpha_w + \alpha_k}{5\alpha_w - \alpha_k}; \quad (9 - 4в)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи при вынужденном движении кипящей жидкости в трубах;  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи при развитом пузырьковом кипении в большом объеме, определяемый формулами (9-1а) и (9-1б);  $\alpha_w$  – коэффициент теплоотдачи при турбулентном движении однофазной жидкости в трубах. Формулы (9-4а) - (9-4в) справедливы для воды при давлениях от  $1 \cdot 10^5$  до  $86 \cdot 10^5$  Па, скоростях от 0,2 до 6,7 м/с и при объемном паросодержании  $\beta < 70$  %.

Определяем значение коэффициента теплоотдачи при движении однофазной жидкости  $\alpha_w$ . При  $p = 8 \cdot 10^5$  Па;  $t_s = 170,4$ °С;  $\nu_* = 0,181 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_{ж} = 0,679$  Вт/м · К;  $Pr_{ж} = 1,05$ .

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

$$Re_{ж} = \frac{wd}{\nu_{ж}} = \frac{1 \cdot 18 \cdot 10^{-3}}{0,6181 \cdot 10^{-6}} = 99400.$$

Находим:

$$\begin{aligned} Nu_{ж} &= 0,021 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} = \\ &= 0,021 (9,94 \cdot 10^4)^{0,8} (1,05)^{0,43} \left( \frac{1,05}{1,04} \right)^{0,25} = 213; \end{aligned}$$

следовательно, коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_w = Nu_{ж} \frac{\lambda_{ж}}{d} = 213 \frac{0,679}{18 \cdot 10^{-3}} = 8040 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}$$

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

При  $t_s = 170,4^\circ\text{C}$  по табл. 9-1 находим:

$$\begin{aligned} l_* &= 1,07 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \frac{\lambda}{r\rho''\nu} = 44,2 \cdot 10^{-2} \text{ 1/K}; \\ \Delta t &= t_c - t_s = 173 - 170,4 = 2,6^\circ\text{C}; \\ \frac{\lambda\Delta t}{r\rho''\nu} &= 44,2 \cdot 10^{-2} \cdot 2,6 = 1,15; \\ \frac{\lambda\Delta t}{r\rho''\nu} Pr^{1/3} &= 1,15 \cdot (1,05)^{1/3} = 1,17 < 1,6. \end{aligned}$$

Затем

$$Nu_* = 3,91 \cdot 10^{-3} \frac{\lambda\Delta t}{r\rho''\nu} Pr^{2/3} = 3,91 \cdot 10^{-3} \cdot 1,15 (1,05)^{2/3} = 4,67 \cdot 10^{-3}.$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_k = Nu_* \frac{\lambda}{l_*} = 4,67 \cdot 10^{-3} \frac{0,679}{1,07 \cdot 10^{-6}} = 2960 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}$$

Определяем отношение коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_k/\alpha_w$ :

$$\frac{\alpha_k}{\alpha_w} = \frac{2960}{8040} = 0,368.$$

Так как  $\alpha_k/\alpha_w < 0,5$ , то по (9-4а) интенсивность теплообмена определяется целиком вынужденным движением и  $\alpha = \alpha_w = 8040 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ .

**9-14.** Определить значение коэффициента теплоотдачи при движении кипящей воды в трубе в условиях задачи 9-13, если температуры внутренней поверхности стенки трубы равны соответственно  $t_c = 175$  и  $180$  °С.

**Ответ:** при  $t_c = 175$  °С  $\alpha = 9150 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ;

при  $t_c = 180$  °С  $\alpha = 25\,200 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ .

**Решение.**

а)  $t_c = 175$  °С. При различных температурах стенки коэффициент теплоотдачи при движении однофазной жидкости изменяется только за счет различного изменения свойств жидкости по сечению потока, что учитывается поправкой  $(Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25}$ . При  $t_c = 175$  °С  $Pr_c = 1,03$  и, так же как в условиях задачи 9-13,  $(Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25} \approx 1$ . Из решения задачи 9-13 имеем:

$$\alpha_w = 8040 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Определяем значение коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении в большом объеме:

$$\Delta t = t_c - t_s = 175 - 170,4 = 4,6^\circ\text{C}$$

$$\frac{\lambda \Delta t}{r \rho^{0,7}} = 44,2 \cdot 10^{-2} \cdot 4,6 = 2,03$$

Так как  $\frac{\lambda \Delta t}{r \rho^{0,7}} > 1,6$  расчет ведем по формуле:

$$Nu_* = 2,63 \cdot 10^{-3} \left( \frac{\lambda \Delta t}{r \rho^{0,7}} \right)^{1,86} Pr^{0,952} = 2,63 \cdot 10^{-3} (2,03)^{1,86} (1,05)^{0,952} =$$

$$= 1,017 \cdot 10^{-2};$$

$$\alpha_k = Nu_* \frac{\lambda}{l_*} = 1,017 \cdot 10^{-2} \frac{0,679}{1,07 \cdot 10^{-6}} = 6450 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Отношение

$$\frac{\alpha_k}{\alpha_w} = \frac{6450}{8040} = 0,8.$$



Так как  $0,5 < \alpha_k / \alpha_w < 2$ , то согласно (9-4в) интенсивность теплообмена определяется как вынужденным движением жидкости, так и процессом кипения и

$$\frac{\alpha}{\alpha_w} = \frac{4\alpha_w + \alpha_k}{5\alpha_w - \alpha_k} = \frac{4 + 0,8}{5 - 0,8} = 1,14;$$

следовательно,

$$\alpha = 1,14 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}; \quad \alpha_w = 1,14 \cdot 8040 = 9150 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

б) При  $t_c = 180^\circ\text{C}$   $Pr_c = 1,00$  и, так же как в случае «а», можно принять:

$$\alpha_w = 8040 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Определяем значение коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении в большом объеме

$$\Delta t = t_c - t_s = 180 - 170,4 = 9,6^\circ\text{C}$$

и, так же как в случае «а»,

$$\frac{\lambda \Delta t}{r \rho'' \nu} Pr^{1/3} > 1,6,$$

поэтому

$$\alpha_k = \alpha_{k,a} \left( \frac{\Delta t_b}{\Delta t_a} \right)^{1,86} = 6450 \left( \frac{9,6}{4,6} \right)^{1,86} = 25200 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Отношение

$$\frac{\alpha_k}{\alpha_w} = \frac{25200}{8040} \approx 3,14 > 2.$$

Согласно (9-4б) интенсивность теплообмена в этом случае определяется целиком процессом кипения и

$$\alpha = \alpha_k = 25200 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

**9-15.** В трубе внутренним диаметром  $d = 38$  мм движется кипящая вода со скоростью  $w = 1$  м/с. Вода находится под давлением  $p = 2,8$  МПа.

Определить тепловую нагрузку  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, и коэффициент теплоотдачи от стенки к кипящей воде, если температура внутренней поверхности трубы  $t_c = 236,9$  °С.

**Ответ:**  $q = 2 \cdot 105$  Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha = \alpha_k = 2,9 \cdot 104$  Вт/м<sup>2</sup> · К.

## 10. ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ

**10-1.** Определить излучательную способность поверхности Солнца, если известно, что ее температура равна  $5700\text{ }^\circ\text{C}$  и условия излучения близки к излучению абсолютно черного тела. Вычислить также длину волны, при которой будет наблюдаться максимум спектральной интенсивности излучения и общее количество лучистой энергии, испускаемой Солнцем в единицу времени, если диаметр Солнца можно принять равным  $1,391 \cdot 10^6\text{ м}$ .

**Ответ:**  $E_0 = 72,2 \cdot 10^6\text{ Вт/м}^2$ ;  $\lambda_{\text{макс}} = 0,485\text{ мкм}$ ;  $Q = 4,38 \cdot 10^{26}\text{ Вт}$ .

**10-2.** Поверхность стального изделия имеет температуру  $t_c = 727\text{ }^\circ\text{C}$  и степень черноты  $\varepsilon_c = 0,7$ . Излучающую поверхность можно считать серой.

Вычислить плотность собственного излучения поверхности изделия и длину волны, которой будет соответствовать максимальное значение спектральной интенсивности излучения.

**Ответ:**  $E = 3,97 \cdot 10^4\text{ Вт/м}^2$ ;  $\lambda_{\text{макс}} = 2,898\text{ мкм}$ .

**10-3.** Определить плотность солнечного лучистого потока, падающего на плоскость, нормальную к лучам Солнца и расположенную за пределами атмосферы Земли. Известно, что излучение Солнца близко к излучению абсолютно черного тела с температурой  $t_0 = 5700\text{ }^\circ\text{C}$ . Диаметр Солнца  $D = 1,391 \cdot 10^6\text{ км}$ , расстояние от Земли до Солнца  $l = 149,5 \cdot 10^6\text{ км}$ .

**Ответ:**  $E_{\text{пад}} = 1550\text{ Вт/м}^2$ .

**Решение.**

Плотность падающего солнечного лучистого потока определяется по формуле

$$E_{\text{пад}} = B d\omega,$$

где  $B$  — яркость солнечного излучения;  $d\omega$  — телесный угол, под которым единичная площадка «видит» Солнце.

Яркость солнечного излучения

$$B = \frac{E_0}{\pi} = \frac{C_0 \left(\frac{T_0}{100}\right)^4}{\pi}$$

Телесный угол

$$d\omega = \frac{\pi D^2}{l^2}.$$

С учетом этих соотношений

$$E_{\text{пад}} = \frac{C_0 \left(\frac{T_0}{100}\right)^4 \pi D^2}{4\pi l^2} = \frac{5,67(59,73)^4 \cdot 1,391^2}{4 \cdot 149,4^2} = 1550 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

**10-4.** Искусственный спутник облетает Землю, находясь на ее дневной стороне. Спутник имеет форму шара. Поглощательная способность поверхности спутника для падающего солнечного излучения  $A$ , а ее степень черноты  $\varepsilon$ .

Определить температуру поверхности спутника.

Принять, что внутри спутника источники теплоты отсутствуют, а температура поверхности всюду одинакова. Отраженное от Земли солнечное излучение и собственное излучение Земли не учитывать.

**Ответ:**  $T = 288 \sqrt[4]{\frac{A}{\varepsilon}}, \text{ К}; t = 288 \sqrt[4]{\frac{A}{\varepsilon}} - 273, \text{ }^\circ\text{C}$

**Решение.**

При установившемся состоянии количество лучистой энергии, поглощенной спутником, и количество энергии, излучаемой спутником в пространство, равны, т. е.

$$AE_{\text{пад}}F_N = \varepsilon FC_0 \left(\frac{T_0}{100}\right)^4,$$

где  $F_N$  — проекция облучаемой поверхности спутника на плоскость, нормальную к падающему излучению;  $F$  — площадь поверхности спутника. Для шара

$$\frac{F_N}{F} = \frac{\pi d^2}{4\pi d^2} = \frac{1}{4}.$$

Плотность падающего лучистого потока  $E_{\text{пад}} = 1550 \text{ Вт/м}^2$  (см. задачу 10-11). Окончательно температура спутника

$$T = 100 \sqrt[4]{\frac{AE_{\text{пад}}F_N}{\varepsilon FC_0}} = 100 \sqrt[4]{\frac{A \cdot 1550}{\varepsilon \cdot 5,67 \cdot 4}} = 288 \sqrt[4]{\frac{A}{\varepsilon}}.$$

**10-5.** Решить задачу 10-4, приняв, что поверхность выполнена из металла, для которого  $A = 0,2$  и  $\varepsilon = 0,1$ .

**Ответ:**  $t = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**10-6.** Найти температуру поверхности спутника в условиях задачи 10-4, предположив, что эта поверхность абсолютно серая.

**Ответ:**  $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**10-7.** Найти, каким должно быть отношение поглощательной способности поверхности спутника для падающего солнечного излучения к степени черноты в условиях задачи 10-4, чтобы температура поверхности была равна  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Ответ:**  $A/\varepsilon = 1,225$

**10-8.** Космический корабль, стартовавший с Земли, направляется к Венере. Расстояние от Венеры до Солнца  $108,1 \cdot 10^6 \text{ км}$ , а от Земли до Солнца  $149,5 \cdot 10^6 \text{ км}$ . Температура поверхности корабля вблизи Земли равна  $t_1, \text{ }^\circ\text{C}$ .

Как изменится температура поверхности космического корабля, когда он станет приближаться к Венере, если считать, что степень черноты поверхности при изменении температуры корабля не изменяется?

**Ответ:**  $t_2 = (1,18t_1 + 48), \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Решение.**

Температуры поверхности корабля вблизи Земли и вблизи Венеры определяются из уравнений:

$$AE_{\text{пад1}}F_N = \varepsilon FC_0 \left( \frac{T_1}{100} \right)^4;$$

$$AE_{\text{пад2}}F_N = \varepsilon FC_0 \left( \frac{T_2}{100} \right)^4$$

откуда

$$\left( \frac{T_2}{T_1} \right)^4 = \frac{E_{\text{пад2}}}{E_{\text{пад1}}} = \left( \frac{l_1}{l_2} \right)^2.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \frac{T_2}{T_1} &= \sqrt{\frac{149,5}{108,1}} = 1,18; \\ t_2 + 273 &= (t_1 + 273)1,18; \\ t_2 &= (1,18t_1 + 48), \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

**10-9.** Обмуровка топочной камеры парового котла выполнена из шамотного кирпича, а внешняя обшивка - из листовой стали. Расстояние между обшивкой и кирпичной кладкой равно 30 мм, и можно считать его малым по сравнению с размерами стен топки.

Вычислить потери теплоты в окружающую среду с единицы поверхности в единицу времени в условиях стационарного режима за счет лучистого теплообмена между поверхностями обмуровки и обшивки. Температура внешней поверхности обмуровки  $t_1 = 127^\circ\text{C}$ , а температура стальной обшивки  $t_2 = 50^\circ\text{C}$ . Степень черноты шамота  $\varepsilon_{\text{ш}} = 0,8$  и листовой стали  $\varepsilon_c = 0,6$ .

**Ответ:**  $E_{p1} = q_{1,2} = 435 \text{ Вт/м}^2$ .

**Решение.**

Обшивку и кирпичную кладку можно рассматривать как две безграничные плоскопараллельные поверхности, разделенные прозрачной средой. Для такой системы тел результирующее излучение вычисляется по формуле

$$E_{p1} = q_{1,2} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (10 - 1)$$

где приведенная степень черноты

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,6} - 1} = 0,522.$$

Тогда

$$E_{p1} = 0,522 \cdot 5,67 \cdot \left[ \left( \frac{127 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{50 + 273}{100} \right)^4 \right] = 435 \text{ Вт/м}^2.$$

**10-10.** Вычислить значения собственного, эффективно-го, отраженного и падающего излучений для поверхности шамотной кладки и стальной обшивки в условиях задачи 10-9.

**Ответ:**

$$\begin{aligned} E_{\text{соб1}} &= 1161 \text{ Вт/м}^2, & E_{\text{соб2}} &= 370 \text{ Вт/м}^2; \\ E_{\text{эф1}} &= 1342 \text{ Вт/м}^2, & E_{\text{эф2}} &= 907 \text{ Вт/м}^2; \\ E_{\text{отр1}} &= 181 \text{ Вт/м}^2, & E_{\text{отр2}} &= 537 \text{ Вт/м}^2; \\ E_{\text{пад1}} &= 907 \text{ Вт/м}^2, & E_{\text{пад2}} &= 1342 \text{ Вт/м}^2. \end{aligned}$$

**Решение.**

Собственное излучение вычислим на основании закона Стефана – Больцмана:

$$E_{\text{соб}} = \varepsilon C_0 \left( \frac{T_0}{100} \right)^4.$$

Для шамотной стенки

$$E_{\text{соб1}} = 0,8 \cdot 5,67 \left( \frac{127 + 273}{100} \right)^4 = 1161 \text{ Вт/м}^2$$

Для стальной обшивки

$$E_{\text{соб2}} = 0,6 \cdot 5,67 \left( \frac{50 + 273}{100} \right)^4 = 370 \text{ Вт/м}^2.$$

Эффективное излучение

$$E_{\text{эф}} = \frac{1}{A} [E_{\text{соб}} - (1 - A)E_p].$$

На основании стационарного процесса  $E_{p1} = E_{p2}$ . Из решения задачи 10-9  $E_{p1} = 435 \text{ Вт/м}^2$ . Тогда

$$E_{\text{эф1}} = \frac{E_{\text{соб1}}}{\varepsilon_1} - \left( \frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) E_{p1} = \frac{1161}{0,8} - \left( \frac{1}{0,8} - 1 \right) 435 = 1342 \text{ Вт/м}^2;$$

$$E_{\text{эф}2} = \frac{E_{\text{сoб}2}}{\varepsilon_2} - \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) E_{p1} = \frac{370}{0,6} + \left(\frac{1}{0,6} - 1\right) 435 = 907 \text{ Вт/м}^2;$$

Для рассматриваемой системы

$$E_{\text{пад}1} = E_{\text{эф}2} = 907 \text{ Вт/м}^2; \quad E_{\text{пад}2} = E_{\text{эф}1} = 1342 \text{ Вт/м}^2.$$

Отраженное излучение

$$E_{\text{отр}} = (1 - A)E_{\text{пад}}.$$

Подставляя соответствующие значения, получаем:

$$E_{\text{отр}1} = (1 - A_1)E_{\text{пад}1} = (1 - 0,8)907 = 181 \text{ Вт/м}^2;$$

$$E_{\text{отр}2} = (1 - A_2)E_{\text{пад}2} = (1 - 0,6)1342 = 537 \text{ Вт/м}^2;$$

**10-11.** Как изменятся тепловые потери  $q_l$ , Вт/м<sup>2</sup>, в окружающую среду и эффективный лучистый поток  $E_{\text{эф}1}$ , Вт/м<sup>2</sup>, если между обмуровкой и обшивкой топочной камеры, рассмотренной в задаче 10-9, установить стальной экран, имеющий степень черноты  $\varepsilon_{\text{эк}} = 0,6$ ?

**Ответ:**  $E_{p1} = q_{l1} = 196 \text{ Вт/м}^2$ ;  $E_{\text{эф}1} = 1400 \text{ Вт/м}^2$ .

**Решение.**

При наличии  $n$  защитных экранов от теплового излучения в общем случае тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>

$$q_l = \frac{C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{A_1} + 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{A_{\text{эки}}} + \frac{1}{A_2} - (n + 1)} \quad (10 - 2)$$

При наличии одного экрана ( $n = 1$ )

$$q_l = \frac{C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} + 2 \left( \frac{1}{A_{\text{эк}}} - 1 \right)}$$

Подставив сюда данные из условий задачи и приняв  $A = \varepsilon$ , получим:

$$q_l = \frac{5,67 \left[ \left( \frac{127 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{50 + 273}{100} \right)^4 \right]}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,6} + 2 \left( \frac{1}{0,6} - 1 \right)} = 196 \text{ Вт/м}^2.$$

Эффективное излучение найдется из условия  $q_l = E_{p1}$  (по условию задачи):

$$E_{\text{эф1}} = \frac{1}{A_1} [E_{\text{собр}} - (1 - A_1)E_{p1}] = \frac{1161}{0,8} - \left(\frac{1}{0,8} - 1\right) \cdot 196 = 1400 \text{ Вт/м}^2.$$

**10-12.** Какой должна быть степень черноты экрана для того, чтобы при наличии одного защитного экрана между обмуровкой и стальной обшивкой тепловые потери в окружающую среду за счет излучения не превышали  $60 \text{ Вт/м}^2$ ? Все другие условия сохраняются, как в задаче 10-9.

**Ответ:**  $\varepsilon_{\text{эк}} = 0,143$ .

**10-12.** Определить коэффициент ослабления луча слоем двуокси углерода толщиной 30 мм, если известно, что после прохождения этого слоя спектральная интенсивность луча уменьшилась на 90%.

**Ответ**

$$\chi_{\lambda} = 76,7 \text{ 1/м.}$$

**Решение**

Коэффициент ослабления луча в поглощающей среде  $\chi_{\lambda}$  можно найти из закона Бугера:

$$J_{\lambda,x} = J_{\lambda,x=0} e^{-\chi_{\lambda} x},$$

откуда

$$\chi_{\lambda} = -\frac{1}{x} \ln \frac{J_{\lambda,x}}{J_{\lambda,x=0}}.$$

Из условий задачи имеем:

$$\frac{J_{\lambda,x}}{J_{\lambda,x=0}} = 0,1.$$

Подставив численные значения величин из условий задачи в уравнение (10-2), получим:

$$\chi_{\lambda} = -\frac{1}{3 \cdot 10^{-2}} 2,3 \lg 0,1 = 76,1 \text{ 1/м.}$$

**10-13.** Поглощательная способность слоя газа толщиной  $\ell_1$  при парциальном давлении  $p_1$  равна  $A_{\lambda 1}$ .

Определить поглощательную способность газа при одновременном изменении толщины слоя и парциального давления до величин соответственно  $\ell_2$  и  $p_2$ . Считать, что для данно-



го газа справедлив закон Бугера, а температура газа в любых случаях одна и та же.

**Ответ**

$$A_{\lambda 2} = 1 - (1 - A_{\lambda 1})^{\frac{p_2 l_2}{p_1 l_1}}.$$

**Решение**

По закону Бугера поглощательная способность газа, находящегося при неизменной температуре, является функцией величины  $pl$ :

$$A_{\lambda} = 1 - e^{-k(pl)}.$$

Запишем последнее равенство применительно к условиям задачи:

$$A_{\lambda 1} = 1 - e^{-k(p_1 l_1)}$$

$$A_{\lambda 2} = 1 - e^{-k(p_2 l_2)}$$

Исключая  $k$  из уравнений, получаем:

$$A_{\lambda 2} = 1 - (1 - A_{\lambda 1})^{\frac{p_2 l_2}{p_1 l_1}}.$$

**10-14.** В закрытой с обеих сторон трубе диаметром 200 мм и длиной 1 м находится смесь сухого воздуха и двуокиси углерода. Полное давление и температура смеси равны соответственно 98,1 кПа и 800 °С. Парциальное давление двуокиси углерода равна 9 кПа.

Найти степень черноты находящейся в трубе смеси газов.

**Ответ:**  $\varepsilon = 0,06$ .

**10-15.** В нагревательной печи температура газов по всему объему постоянна и равна 1200 °С. Объем печи  $V = 12 \text{ м}^3$ , и полная поверхность ограждения  $F = 28 \text{ м}^2$ .

Общее давление продуктов сгорания  $p = 98,1 \text{ кПа}$ , парциальное давление водяных паров  $p_{\text{H}_2\text{O}} = 8 \text{ кПа}$  и углекислоты  $p_{\text{CO}_2} = 12 \text{ кПа}$ .

Вычислить степень черноты излучающей газовой смеси и собственное излучение продуктов сгорания.

**Ответ:**  $\varepsilon_{\text{г}} = 0,215$ ;  $E_{\text{соб.г}} = 57400 \text{ Вт/м}^2$ .

## Решение

Средняя длина пути луча для газового слоя в объеме печи вычисляется по формуле:

$$l = 3,6 \frac{V}{F} = 3,6 \frac{12}{28} = 1,54 \text{ м.}$$

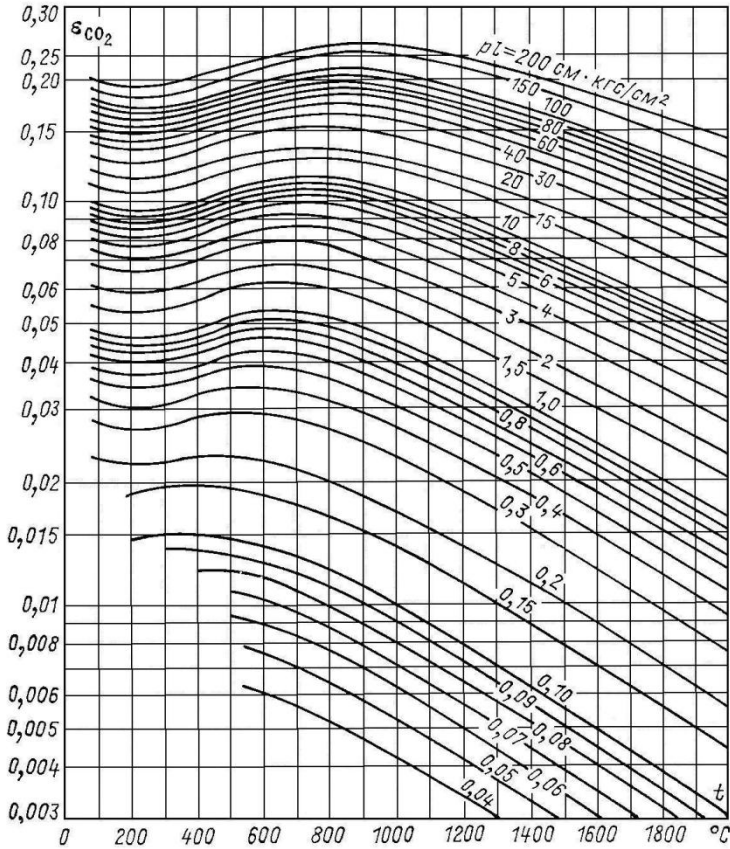


Рис. 10.1. Степень черноты двуокиси углерода  $\epsilon_{CO_2} = f_1(t, pl)$

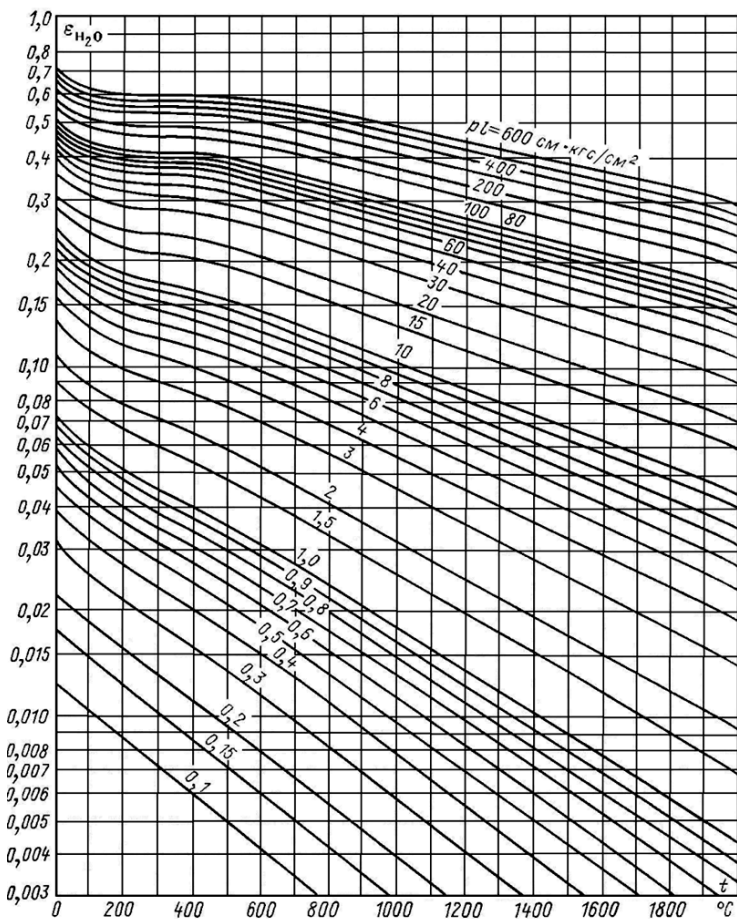


Рис. 11.2. Степень черноты водяного пара  $\varepsilon_{H_2O} = f_2(t, pl)$ .

Произведение парциального давления двуокиси углерода и водяных паров на длину пути луча равны:

$$p_{H_2O} \ell = 1,2 \cdot 10^4 \cdot 1,54 = 1,85 \cdot 10^4 \text{ м} \cdot \text{Па} = 18,9 \text{ см} \cdot \text{кгс/см}^2.$$

$$p_{CO_2} \ell = 0,8 \cdot 10^4 \cdot 1,54 = 1,23 \cdot 10^4 \text{ м} \cdot \text{Па} = 12,5 \text{ см} \cdot \text{кгс/см}^2.$$

Степень черноты  $CO_2$  и  $H_2O$  при температуре газов  $t_2 = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$  найдем по графикам рис. 10-1 и 10-2:

$$\varepsilon_{H_2O} = 0,10; \varepsilon_{CO_2} = 0,11.$$

Степень черноты газовой смеси

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{CO_2} + \beta \varepsilon_{H_2O}.$$

Из графиков рис. 11-3 находим поправку  $\beta = 1,05$ , тогда  $\varepsilon_r = 0,11 + 1,05 \cdot 0,10 = 0,215$ .

Собственное излучение продуктов сгорания

$$E_{\text{соб.г}} = \varepsilon_r C_0 \left( \frac{T_r}{100} \right)^4 = 0,215 \cdot 5,67 \left( \frac{1473}{100} \right)^4 = 57400 \text{ Вт/м}^2$$

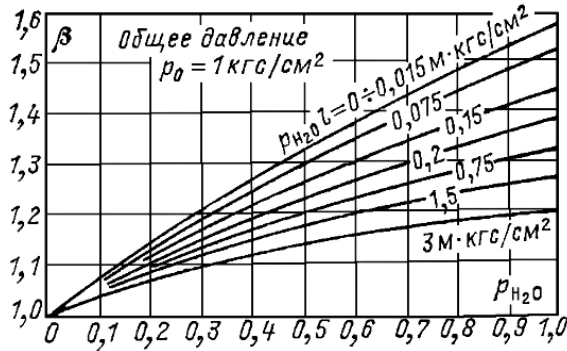


Рис. 10.3. Поправочный коэффициент  $\beta$  на парциальное давление для водяного пара

**10-16.** Вычислить степень черноты и собственное излучение смеси, если средняя температура газов снизилась до  $1000^\circ\text{C}$ , а все другие условия оставались теми же, что и в задаче 10-15.

**Ответ:**  $\varepsilon_r = 0,6256; E_{\text{соб.г}} = 38200 \text{ Вт/м}^2$ .

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Данное учебное пособие содержит большое количество решённых задач, что удобно для самостоятельной работы студентов, а также для проведения практических занятий при изучении дисциплины «Тепломассообмен».

# ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П-1

## Международная система единиц (СИ)

Величина	Единица измерения	Обозначение единиц
Основные единицы		
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А
Термодинамическая температура Кельвина	кельвин	К*
Количество вещества	моль	моль
Сила света	кандела	кд
Некоторые производные единицы		
Площадь	квадратный метр	м <sup>2</sup>
Объем	кубический метр	м <sup>3</sup>
Скорость	метр в секунду	м/с
Ускорение	метр на секунду в квадрате	м/с <sup>2</sup>
Плотность	килограмм на кубический метр	кг/м <sup>3</sup>
Сила	ньютон	Н; (кг·м/с <sup>2</sup> )
Давление	паскаль	Па; (Н/м <sup>2</sup> )
Динамическая вязкость	паскаль-секунда	Па·с; (Н·с/м <sup>2</sup> )
Кинематическая вязкость	квадратный метр на секунду	м <sup>2</sup> /с
Работа, энергия, количество теплоты	джоуль	Дж; (Н·м)
Мощность, тепловой поток	ватт	Вт; (Дж/с)
Удельная теплоемкость	джоуль на килограмм-кельвин	Дж/(кг·К)*
Теплота фазового превращения, энтальпия	джоуль на килограмм	Дж/кг
Плотность теплового потока	ватт на квадратный метр	Вт/м <sup>2</sup>
Коэффициент теплопроводности	ватт на метр-кельвин	Вт/(м·К)*
Коэффициент теплоотдачи, теплопередачи	ватт на квадратный метр-кельвин	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)*
Коэффициент излучения	ватт на квадратный метр-кельвин в четвертой степени	Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )
* Наравне с термодинамической температурой Кельвина (К) допускается к применению международная практическая температура Цельсия (°С).		

Таблица П-2

Соотношение между единицами измерения системы МКГСС  
и международной системы единиц (СИ)

Энергия	1 ккал=4,187 кДж
Сила	1 кгс=9,81 Н
Удельный вес	1 кгс/м <sup>3</sup> =9,81 Н/м <sup>3</sup>
Плотность	1 кгс·с <sup>2</sup> /м <sup>4</sup> =9,81 кг/м <sup>3</sup>
Давление	1 кгс/см <sup>2</sup> =0,981·10 <sup>5</sup> Па
Коэффициент динамической вязкости	1 кгс·с/м <sup>2</sup> =9,81 Па·с
Теплоемкость	1 ккал/(кгс·°С)=4,187 кДж/(кг·К)
Энтальпия, теплота фазового превращения	1 ккал/кгс=4,187 кДж/кг
Тепловой поток	1 ккал/ч=1,163 Вт
Плотность теплового потока	1 ккал/(м <sup>2</sup> ·ч)=1,163 Вт/м <sup>2</sup>
Объемная плотность теплового потока	1 ккал/(м <sup>3</sup> ·ч)=1,163 Вт/м <sup>3</sup>
Коэффициент теплопроводности	1 ккал/(м·ч·°С)=1,163 Вт/(м·К)
Коэффициент теплоотдачи теплопередачи	1 ккал/(м <sup>2</sup> ·ч·°С)=1,163 Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
Коэффициент излучения	1 ккал/(м <sup>2</sup> ·ч·К <sup>4</sup> )=1,163 Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )

Таблица П-3

Плотность  $\rho$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda$  и теплоемкость строительных, теплоизоляционных и других материалов

Материалы	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$t^*$ , °С	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c$ , кДж/ (кг·К)
Альфон при толщине воздушных слоев 10 мм	—	—	0,032+0,85·10 <sup>-4</sup> $t$	—
Асбест распушенный				
3-й сорт	340	—	0,087+0,24·10 <sup>-3</sup> $t$	0,816
6-й сорт	650	—	0,11+0,19·10 <sup>-3</sup> $t$	0,816
Асбестовый картон	900	—	0,16-0,17·10 <sup>-3</sup> $t$	0,816
Асбестовый шнур	800	—	0,13-0,15·10 <sup>-3</sup> $t$	0,816
Асбошифер:				
с высоким содержанием асбеста	1800	20	0,17—0,35	—
с 10-15% асбеста (сухой)	1800	20	0,64—0,52	—
Асфальт	2120	0-30	0,60—0,74	1,67
Бетон с каменным щебнем	2000	0	1,28	0,84
То же сухой	1600	0	0,84	—
Железобетон набивной	2200	0	1,55	0,84
Шлакобетон	1500	0	0,70	0,80
Бумага обыкновенная	—	20	0,14	1,51
Вата хлопчатобумажная	80	30	0,042	—
Гипс (формованный сухой)	1250	20	0,43	0,8-0,92
Глина	2000-1600	20	0,9—0,7	0,84
Глина огнеупорная	1845	450	1,04	1,09
Гравий	1840	20	0,36	—

Продолжение табл. П-3

Материалы	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$t^*$ , °С	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c$ , кДж/ (кг·К)
Дельта-древесина	—	35-70	0,21	—
Дерево:				
дуб поперек волокон	825	0-15	0,20—0,21	2,39
дуб вдоль волокон	819	12-50	0,35—0,43	2,39
сосна поперек волокон	546	0-50	0,14—0,16	2,72
сосна вдоль волокон	—	20-25	0,35—0,72	2,72
Каменный уголь:				
газовый	1420	20-100	3,6—4,0	—
обыкновенный твердый	1200-1350	20	0,24—0,27	—
Каменноугольная пыль	730	30-150	0,12—0,13	—
Картон	—	20	0,14—0,35	1,51
Кембрик (лакированный)	—	38	0,157	—
Кирпич:				
красный машинной формовки	1800	0	0,77	0,88
красный ручной формовки	1700	0	0,70	0,88
силикатный	1900	0	0,81	0,84
Кладка из красного кирпича:				
на холодном растворе	1700	0	0,81	0,88
на теплом растворе	1600	0	0,67	0,84
Кладка из силикатного кирпича:				
на холодном растворе	1900	0	0,87	0,84
на теплом растворе	1700	0	0,76	0,80
Кладка бутовая из камней средней плотности	2000	0	1,28	0,88
Карболит черный	1150	50	0,231	—
Кожа	—	20	0,14-0,16	—
Кокс порошкообразный	449	100	0,191	1,21
Котельная накипь:				
богатая гипсом	2000-2700	100	0,7-2,3	—
богатая известью	1000-2500	100	0,15-2,3	—
богатая силикатом	300-1200	100	0,08-0,23	—
Кварц кристаллический:				
поперек оси	—	0	0,72	—
вдоль оси	—	0	1,94	—
Ламповая сажа	165	40	0,07-0,12	—
Лед	917	0	2,2	2,26
Лед	928	-100	3,5	1,17
Льняная ткань	—	—	0,088	—
Магnezия в форме сегментов для изоляции труб	266	50-200	0,073-0,084	—
Мел	2000	50	0,9	0,88
Миканит	—	20	0,21-0,41	—
Мрамор	2800	0	3,5	0,92
Парафин	920	20	0,27	—
Песок речной мелкий (сухой)	1520	0-160	0,30-0,38	0,80
Песок речной мелкий (влажный)	1650	20	1,13	2,09
Прессшпан	—	20-50	0,26-0,22	—
Плексиглас	—	20	0,184	—
Пробковые плиты сухие	148-198	80	0,042-0,053	1,76



Продолжение табл. П-3

Материалы	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$t^*$ , °С	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c$ , кДж/ (кг·К)
Пробковая мелочь, величина куска 4–5 мм	85	0,60	0,044–0,058	1,76
Резина:				
твердая обыкновенная	1200	0–100	0,157–0,160	1,38
мягкая	—	20	0,13–0,16	1,38
Сахарный песок	1600	0	0,58	1,26
Сера ромбическая	—	21	0,28	0,762
Слюда (поперек слоев)	2600–3200	20	0,49–0,58	—
Снег:				
свежевыпавший	200	—	0,10	2,09
уплотненный	400	—	0,46	2,09
Стекло:				
зеркальное	2550	0–100	0,78–0,88	0,779
обыкновенное	2500	20	0,74	0,67
термометрическое	2590	20	0,96	—
пирекс	—	0	1,04	—
то же	—	400	1,55	—
кварцевое	—	400	1,76	—
то же	—	800	2,40	—
то же	—	1200	3,05	—
Стекловолоконная вата	154–206	88	0,051–0,059	—
Текстолит	1300–1400	20	0,23–0,34	1,46–1,51
Фарфор	2400	95	1,04	1,09
То же	2400	1055	1,96	1,09
Фибра красная	1290	20–100	0,46–0,50	—
Фибронит	360–440	80	0,073–0,128	—
Целлюлоид	1400	30	0,21	—
Шелк	100	0-93	0,043-0,06	—
Эбонит	1200	20	0,157-0,17	—
Шлак:				
котельный	1000	0	0,29	0,75
доменный гранулированный	500	0	0,15	0,75
Штукатурка:				
известковая	1600	0	0,70	0,84
цементно-песчаная	1800	0	1,2	0,84
Фанера клееная	600	0	0,15	2,51
Древесный уголь кусковой	190	80	0,074	—

\* Температура, для которой даны свойства

Таблица П-4

Плотность  $\rho$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda$  и теплоемкость  $c$  и максимальная рабочая температура  $t$  для основных огнеупорных изделий

Наименование огнеупора	$\rho \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c$ , кДж/(кг·К)	$t$ , °С
Шамотный кирпич	1,8-1,9	0,84+0,0006 $t$	0,88+0,00230 $t$	1350-1450
Пеношамот	0,95	0,28+0,00023 $t$	—	1350
Пеношамот	0,6	0,10+0,000145 $t$	—	1300

Продолжение табл. П 4

Кирпич: динасовый магнезитовый хромомagneзитовый хромитовый	0,9-1,95	0,9+0,0007 <i>t</i>	0,8+0,00025 <i>t</i>	1700
	2,6-2,8	4,65-0,0017 <i>t</i>	1,05+0,0003 <i>t</i>	1650-1700
	2,75-2,85	1,86-1,98 (0-600°C)	—	1700
	3,0-3,1	1,3+0,00041 <i>t</i>	0,8+0,0003 <i>t</i>	1650-1700
Изделия: силлиманитовые (муллитовые) корундовые (алундовые) циркониевые карборундовые (карбофакс) угольные графитовые	2,2-2,4	1,69+0,00023 <i>t</i>	0,8+0,00025 <i>t</i>	1650
	2,3-2,6	2,09+0,0019 <i>t</i>	0,80+0,0004 <i>t</i>	1600-1700
	3,3	1,30+0,00064 <i>t</i>	0,54-0,00012 <i>t</i>	1750-1800
	2,3-2,6	21-0,010 <i>t</i>	0,96+0,000146 <i>t</i>	1400-1500
	1,35-1,6	23+0,035 <i>t</i> (до 1000 °С)	<i>t</i>	2000
1,6	163-0,041 <i>t</i>	0,8	2000	

Таблица П-5

Плотность  $\rho$ , коэффициент теплопроводности конструкций  $\lambda$  и предельная температура применения  $t$  основных изоляционных материалов и изделий

Наименование материала или изделия	$\rho, \text{кг/м}^3$		$\lambda, \text{Вт/(м·К)}$	$t, \text{°C}$
	в порошке	в мастичной конструкции		
<b>Изоляционные материалы</b>				
Асбест пушенный 6 сорта	800	—	0,130+0,00019 <i>t</i>	700
Асбозонит	350	500-550	0,143+0,00019 <i>t</i>	700
Асбозуриг	450	700	0,1622+0,000169 <i>t</i>	200-300
Асбослюда	400-500	580-650	0,120+0,000148 <i>t</i>	600
Асботермит	400-430	550-570	0,109+0,000145 <i>t</i>	500-550
Диатомит молотый	400-500	—	0,091+0,00028 <i>t</i>	800
Зонолит (вермикулит)	150-250	—	0,072+0,00262 <i>t</i>	900-1100
Минеральная вата	180-250	—	0,046-0,058 при 50 °С	500
Новоасбозуриг	400-450	580-650	0,144+0,00014 <i>t</i>	250
Ньювель	180-200	405-465	0,87+0,000064 <i>t</i>	325-370
Совелит	230-250	440-520	0,0901+0,000087 <i>t</i>	400-450
Торфяная крошка	200-350	—	0,06-0,08	100
Ферригис (паста феррон)	—	400-550	0,07-0,08	650
Шлаковая вата (сорт 0)	170-200	—	0,06+0,000145 <i>t</i>	750
<b>Изоляционные изделия</b>				
Вермикулитовые плиты	—	350-380	0,081+0,00015 <i>t</i>	700-750

Продолжение табл. П 5

Вулканитовые плиты	—	400	0,080+0,00021 t	550-600
Войлок строительный	—	300	0,05 при 0 °С	90
Диатомовый кирпич	—	500-600	0,113+0,00023 t	850
Диатомовые скорлупы и сегменты	—	500-600	0,113+0,00023 t	850
Изделия «Новоизоль»	—	400-450	0,073+0,00028 t	400
Камышитовые плиты	—	260-360	0,10 при 0 °С	100
Минеральный войлок	—	250-300	0,058-0,076 при 50 °С	—
Пенобетонные блоки	—	400-500	0,099-0,122 при 50 °С	300
Пенодиатомовый кирпич	—	230-430	0,07-0,09 при 70 °С	600-800
Пеностекло (газостекло)	—	290-450	0,124+0,160 при 70 °С	600-800
Плиты «оргизоль»	—	280-350	0,078+0,00012 t	600
Пробковые плиты	—	250	0,07 при 0 °С	120
Совелитовые плиты	—	400-450	0,079+0,00019 t	450-500
Соломитовые маты	—	260-360	0,10 при 0 °С	100
Торфоплиты	—	170-250	0,046+0,00014 t	100-120
Шлаковая и минеральная пробка	—	270-350	0,064-0,081 при 50 °С	150

Таблица П-6  
Коэффициенты теплопроводности сталей  $\lambda$ , Вт/(м·К),  
в зависимости от температуры

Наименование и марка стали	Температура, °С								
	100	200	300	400	500	600	700	800	900
Углеродистая 15	54,4	50,2	46,0	41,9	37,7	33,5	—	—	—
Углеродистая 30	50,2	46,0	41,9	37,7	33,5	29,3	—	—	—
Хромомолибденовая X10C2M (ЭИ107)	18,4	—	21,7	—	—	24,6	25,5	—	—
Хромоникель-вольфрамовая 4X14HВ2М (ЭИ69)	15,5	16,9	19,2	20,2	21,2	22,0	—	—	—
Хромоникелевая 1X18H9T (ЭЯ1Т)	16,0	17,6	19,2	20,8	22,3	23,8	25,5	27,6	—
Хромоникелевая X25H20C2 (ЭИ283)	14,6	—	—	—	21,6	23,5	25,1	27,1	28,8
Хромистая нержавеющая:									
1X13 (Ж <sub>1</sub> )	24,0	23,6	23,3	23,3	23,7	24,4	—	—	—
2X13 (Ж <sub>2</sub> )	24,3	25,8	26,3	26,4	26,6	26,4	26,2	26,7	27,6
3X13 (Ж <sub>3</sub> )	25,1	25,6	25,6	25,6	25,6	25,6	24,6	—	—
4X13 (Ж <sub>4</sub> )	28,0	29,1	29,3	29,2	28,8	28,4	28,0	—	—
X17 (Ж <sub>17</sub> )	24,4	—	—	—	—	—	—	—	—
X28 (Ж <sub>27</sub> )	20,9	21,7	22,7	23,4	24,3	25,0	—	—	—

\* Значения  $\lambda$  для различных образцов стали 1X18H9T изменяются в пределах  $\pm 20\%$ . Здесь приведены средние значения  $\lambda$ .

Таблица П-7

**Коэффициент теплопроводности сталей  $\lambda$ , Вт/(м·К),  
металлов и сплавов в зависимости от температуры**

Наименование металла или сплава	Температура, °С							
	0	20	100	200	300	400	500	600
Алюминий	202	—	206	229	272	319	371	422
Алюминиевые сплавы: 92% Al, 8% Mg 80% Al, 20% Si	102 158	106 160	123 169	148 174	— —	— —	— —	— —
Дюралюминий: 94-96% Al, 3-5% Cu, 0,5% Mg	159	165	181	194	—	—	—	—
Латунь: 90% Cu, 10% Zn 70% Cu, 30% Zn 67% Cu, 33% Zn 60% Cu, 40% Zn	102 106 100 106	— — — —	117 109 107 120	134 110 113 137	149 114 121 152	166 116 128 169	180 120 135 186	195 121 151 200
Медь (99,9%)	393	—	385	378	371	365	359	354
Монель-металл: 29% Cu, 67% Ni, 2% Fe	—	22,1	24,4	27,6	30	34	—	—
Наименование металла или сплава	Температура, °С							
	0	20	100	200	300	400	500	600
Нейзильбер: 62% Cu, 15% Ni, 22% Zn	—	25,0	31	40	45	49	—	—
Нихром: 90% Ni, 10% Cr, 80% Ni, 20% Cr	17,1 12,2	17,4 13,6	19,0 13,8	20,9 15,6	22,8 17,2	24,6 19,0	— —	— 22,6
Нихром железистый: 61% Ni, 15% Cr, 20% Fe, 4% Mn 61% Ni, 16% Cr, 23% Fe	— 11,9	11,6 12,1	11,9 13,2	12,2 14,6	12,4 16,0	12,7 17,4	— —	13,1 —
Сталь мягкая	63	—	57	52	46	42	36	31

Таблица П-8

**Коэффициенты теплопроводности сплавов**

Сплав	t, °С	$\lambda$ , Вт/(м·К)
Алюминиевая бронза: 95% Cu, 5% Al	20	82
Бронза: 90% Cu, 10% Sn 75% Cu, 25% Sn 88% Cu, 10% Sn, 2% Zn	20 20 20	42 26 48
Бронза фосфористая: 92,8% Cu, 5% Sn, 0,15% P, 2% Zn 91,7% Cu, 8% Sn, 0,3% P 87,2% Cu, 12,4% Sn, 0,4% P	20 20 20	79 45 36

Продолжение табл. П-8

Сплав	t, °C	λ, Вт/(м·К)
Никелевые сплавы:		
70% Ni, 28% Cu, 2% Fe	20	35
62% Ni, 12% Cu, 26% Fe	20	13,5
Никелевое серебро	0	29,3
То же	100	37
Платиноиридий: 90% Pt, 10% Ir	0-100	30,9-31
Электрон: 93% Mg, 4% Zn, 0,5% Cu	20	116
Платинородий: 90% Pt, 10% Rh	0-100	30-30,6
Инвар: 35% Ni, 65% Fe	20	11,0
Константан:		
60% Cu, 40% Ni	20	22,7
60% Cu, 40% Ni	100	25,6
Манганин:		
84% Cu, 4% Ni, 12% Mn	20	21,3
84% Cu, 4% Ni, 12% Mn	100	26,4
Магниеые сплавы:		
92% Mg, 8% Al	20-200	62-79
88% Mg, 10% Al, 2% Si	20-200	58-76
92% Mg, 8% Cu	20-200	126-132
Медные сплавы:		
70% Cu, 30% Mg	20	13
90% Cu, 10% Ni	20-100	58-76
80% Cu, 20% Ni	20-100	34-41
40% Cu, 60% Ni	20-100	22-26
Металл Розе: 50% Bi, 25% Pb, 25% Sn	20	16
Металл Вуда: 48% Bi, 26% Pb, 13% Sn, 13% Cd	20	13

Таблица П-9

Физические свойства сухого воздуха  
( $B = 760$  мм 148Т. ст.  $\approx 1,01 \cdot 10^5$  Па)

t, °C	ρ, кг/м <sup>3</sup>	c <sub>p</sub> , кДж/(кг·К)	λ · 10 <sup>2</sup> , Вт/(м·К)	α · 10 <sup>6</sup> , м <sup>2</sup> /с	μ · 10 <sup>6</sup> , Па·с	ν · 10 <sup>6</sup> , м <sup>2</sup> /с	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	26,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686

Продолжение табл. П-9

140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

Таблица П-10

Температура кипения воды в зависимости от давления

$p \cdot 10^{-5}$ , Па	$t_s$ , °C	$p \cdot 10^{-5}$ , Па	$t_s$ , °C	$p \cdot 10^{-5}$ , Па	$t_s$ , °C	$p \cdot 10^{-5}$ , Па	$t_s$ , °C	$p \cdot 10^{-5}$ , Па	$t_s$ , °C
1	99,64	28	230,04	80	294,98	134	333,18	188	360,56
2	120,23	29	231,96	82	296,71	136	334,34	190	361,44
3	133,54	30	233,83	84	298,40	138	335,49	192	362,31
4	143,62	32	237,44	86	300,07	140	336,63	194	363,17
5	151,84	34	240,88	88	301,71	142	337,75	196	364,02
6	158,84	36	244,16	90	303,32	144	338,86	198	364,87
7	164,96	38	247,31	92	304,90	146	339,96	200	365,71
8	170,42	40	250,33	94	306,45	148	341,04	202	366,54
9	175,35	42	253,24	96	307,98	150	342,11	204	367,37
10	179,88	44	256,05	98	309,49	152	343,18	206	368,18
11	184,05	46	258,75	100	310,96	154	344,23	208	368,99
12	187,95	48	261,37	102	312,42	156	345,27	210	369,79
13	191,60	50	263,91	104	313,86	158	346,30	212	370,58
14	195,04	52	266,38	106	315,28	160	347,32	214	371,4
15	198,28	54	268,77	108	316,67	162	348,33	216	372,2
16	201,36	56	271,10	110	318,04	164	349,32	218	372,9
17	204,30	58	273,36	112	319,39	166	350,31	220	373,7
18	207,10	60	275,56	114	320,73	168	351,29	Критическое состояние	
19	209,78	62	277,71	116	322,05	170	352,26		
20	212,37	64	279,80	118	323,35	172	353,21		
21	214,84	66	281,85	120	324,63	174	354,17	221,29	374,15
22	217,24	68	283,85	122	325,90	176	355,11		
23	219,55	70	285,80	124	327,15	178	356,04		
24	221,77	72	287,71	126	328,39	180	356,96		
25	223,93	74	289,58	128	329,61	182	357,87		
26	226,03	76	291,41	130	330,81	184	358,78		
27	228,06	78	293,22	132	332,00	186	359,67		

Таблица П-11

## Физические свойства воды на линии насыщения

$t$ , °C	$p \cdot 10^5$ , Па	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\Gamma$ , кДж/кг	$c_p$ , кДж/ (кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^4$ , К <sup>-1</sup>	$\sigma \cdot 10^4$ , Н/м	Pr
0	1,013	999,9	0,00	4,212	55,1	13,1	1788	1,789	-0,63	756,4	13,67
10	1,013	999,7	42,04	4,191	57,4	13,7	1306	1,306	+0,70	741,6	9,52
20	1,013	998,2	83,91	4,183	59,9	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,02
30	1,013	995,7	125,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805	3,21	712,2	5,42
40	1,013	992,2	167,5	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659	3,87	696,5	4,31
50	1,013	988,1	209,3	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556	4,49	676,9	3,54
60	1,013	983,2	251,1	4,179	65,9	16,0	469,9	0,478	5,11	662,2	2,98
70	1,013	977,8	293,0	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415	5,70	643,5	2,55
80	1,013	971,8	335,0	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365	6,32	625,9	2,21
90	1,013	965,3	377,0	4,208	68,0	16,8	314,9	0,326	6,95	607,2	1,95
100	1,013	958,4	419,1	4,220	68,3	16,9	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	68,5	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,98	943,1	503,7	4,250	68,6	17,1	237,4	0,252	8,64	548,4	1,47
130	2,70	934,8	546,4	4,266	68,6	17,2	217,8	0,233	9,19	528,4	1,36
140	3,61	926,1	589,1	4,287	68,5	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,76	917,0	632,2	4,313	68,4	17,3	186,4	0,203	10,3	486,2	1,17
160	6,18	907,4	675,4	4,346	68,3	17,3	173,6	0,191	10,7	466,0	1,10
170	7,92	897,3	719,3	4,380	67,9	17,3	162,8	0,181	11,3	434,4	1,05
180	10,03	886,9	763,3	4,417	67,4	17,2	153,0	0,173	11,9	422,8	1,00
190	12,55	876,0	807,8	4,459	67,0	17,1	144,2	0,165	12,6	400,2	0,96
200	15,55	863,0	852,5	4,505	66,3	17,0	136,4	0,158	13,3	376,7	0,93
210	19,08	852,8	897,7	4,555	65,5	16,9	130,5	0,153	14,1	354,1	0,91
220	23,20	840,3	943,7	4,614	64,5	16,6	124,6	0,148	14,8	331,6	0,89
230	27,98	827,3	990,2	4,681	63,7	16,4	119,7	0,145	15,9	310,0	0,88
240	33,48	813,6	1037,5	4,766	62,8	16,2	114,8	0,141	16,8	285,5	0,87
250	39,78	799,0	1085,7	4,844	61,8	15,9	109,9	0,137	18,1	261,9	0,86
260	46,94	784,0	1135,1	4,949	60,5	15,6	105,9	0,135	19,1	237,4	0,87
270	55,05	767,9	1185,3	5,070	59,0	15,1	102,0	0,133	21,6	214,8	0,88
280	64,19	750,7	1236,8	5,230	57,4	14,6	98,1	0,131	23,7	191,3	0,90
290	74,45	732,3	1290,0	5,485	55,8	13,9	94,2	0,129	26,2	168,7	0,93
300	85,92	712,5	1344,9	5,736	54,0	13,2	91,2	0,128	29,2	144,2	0,97
310	98,70	691,1	1402,2	6,071	52,3	12,5	88,3	0,128	32,9	120,7	1,03
320	112,90	667,1	1462,1	6,574	50,6	11,5	85,3	0,128	38,2	98,10	1,11
330	128,65	640,2	1526,2	7,244	48,4	10,4	81,4	0,127	43,3	76,71	1,22
340	146,08	610,1	1594,8	8,165	45,7	9,17	77,5	0,127	53,4	56,70	1,39
350	165,37	574,4	1671,4	9,504	43,0	7,88	72,6	0,126	66,8	38,16	1,60
360	186,74	528,0	1761,5	13,984	39,5	5,36	66,7	0,126	109	20,21	2,35
370	210,53	450,5	1892,5	40,321	33,7	1,86	56,9	0,126	264	4,709	6,79

Таблица П-12

## Физические свойства водяного пара на линии насыщения

$t$ , °C	$p \cdot 10^5$ , Па	$\rho_v$ , кг/м <sup>3</sup>	$\Gamma'$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$c_p$ , кДж/ (кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
100	1,013	0,598	2675,9	2256,8	2,135	2,372	18,58	11,97	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2691,4	2230,0	2,177	2,489	13,83	12,46	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2706,5	2202,8	2,206	2,593	10,50	12,85	11,46	1,09
130	2,70	1,496	2720,7	2174,3	2,257	2,686	7,972	13,24	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2734,1	2145,0	2,315	2,791	6,130	13,54	6,89	1,12

Продолжение табл. П-12

$t$ , °C	$p \cdot 10^{-5}$ , Па	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho'$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$c_p$ , кДж/(кг·K)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·K)	$a \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
150	4,76	2,547	2746,7	2114,4	2,395	2,884	4,728	13,93	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2758,0	2082,6	2,479	3,012	3,722	14,32	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2768,9	2049,5	2,583	3,128	2,939	14,72	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2778,5	2015,2	2,709	3,268	2,339	15,11	2,93	1,25
190	12,55	6,394	2786,4	1978,8	2,856	3,419	1,872	15,60	2,44	1,30
200	15,55	7,862	2793,1	1940,7	3,023	3,547	1,492	15,99	2,03	1,36
210	19,08	9,588	2798,2	1900,5	3,199	3,722	1,214	16,38	1,71	1,41
220	23,20	11,62	2801,5	1857,8	3,408	3,896	0,983	16,87	1,45	1,47
230	27,98	13,99	2803,2	1813,0	3,634	4,094	0,806	17,36	1,24	1,54
240	33,48	16,76	2803,2	1765,6	3,881	4,291	0,658	17,76	1,06	1,61
250	39,78	19,98	2801,1	1715,8	4,158	4,512	0,544	18,25	0,913	1,68
260	46,94	23,72	2796,5	1661,4	4,468	4,803	0,453	18,84	0,794	1,75
270	55,05	28,09	2789,8	1604,4	4,815	5,106	0,378	19,32	0,688	1,82
280	64,19	33,19	2779,7	1542,9	5,234	5,489	0,317	19,91	0,600	1,90
290	74,45	39,15	2766,4	1476,3	5,694	5,827	0,261	20,60	0,526	2,01
300	85,92	46,21	2749,2	1404,3	6,280	6,268	0,216	21,29	0,461	2,13
310	98,70	54,58	2727,4	1325,2	7,118	6,838	0,176	21,97	0,403	2,29
320	112,90	64,72	2700,2	1238,1	8,206	7,513	0,141	22,86	0,353	2,50
330	128,65	77,10	2665,9	1139,7	9,881	8,257	0,108	23,94	0,310	2,86
340	146,08	92,76	2621,9	1027,1	12,35	9,304	0,0811	25,21	0,272	3,35
350	165,37	113,6	2564,5	893,1	16,24	10,70	0,0580	26,58	0,234	4,03
360	186,74	144,0	2481,2	719,7	23,03	12,79	0,0386	29,14	0,202	5,23
370	210,53	203,0	2330,9	438,4	56,52	17,10	0,0150	33,75	0,166	11,10

Таблица П-13

Физические свойства воды при давлении  $p = 240 \cdot 10^5$  Па\*

$t$ , °C	$\nu \cdot 10^{-3}$ , м <sup>2</sup> /кг	$i$ , кДж/кг	$c_p$ , кДж/(кг·K)	$\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м·K)	$\mu \cdot 10^7$ , Па·с	Pr
350	1,611	1630	7,16	471	750	1,14
351	1,620	1637	7,25	468	746	1,16
352	1,629	1645	7,34	465	741	1,17
353	1,639	1652	7,44	462	736	1,18
354	1,648	1660	7,55	459	731	1,19
355	1,658	1667	7,67	456	726	1,21
356	1,669	1675	7,79	453	721	1,24
357	1,680	1683	7,93	450	716	1,26
358	1,691	1691	8,07	447	711	1,28
359	1,703	1699	8,23	443	705	1,31
360	1,716	1707	8,42	440	700	1,34
361	1,729	1715	8,60	436	694	1,37
362	1,742	1724	8,81	433	688	1,40
363	1,757	1733	9,04	429	682	1,44
364	1,772	1743	9,30	425	676	1,48
365	1,788	1752	9,58	421	670	1,52
366	1,805	1762	9,91	416	663	1,58
367	1,824	1772	10,28	412	656	1,64
368	1,844	1782	10,71	407	649	1,71
369	1,865	1793	11,20	402	642	1,79
370	1,889	1805	11,79	396	634	1,89
371	1,915	1817	12,79	390	625	2,00
372	1,944	1830	13,33	383	616	2,14



Продолжение табл. П-13

$t$ , °C	$\nu \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$i$ , кДж/кг	$c_p$ , кДж/(кг·K)	$\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м·K)	$\mu \cdot 10^7$ , Па·с	Pr
373	1,976	1844	14,37	376	606	2,32
374	2,014	1859	15,72	367	596	2,55
375	2,057	1875	17,44	358	576	2,80
376	2,109	1894	19,84	346	564	3,23
377	2,174	1915	23,40	332	549	3,87
378	2,259	1942	29,26	314	532	4,96
379	2,389	1976	40,71	293	509	7,07
380	2,596	2028	68,38	269	468	11,90
381	3,068	2125	119,36	242	426	21,01
382	3,698	2234	86,59	219	383	15,14
383	4,134	2302	56,17	204	363	9,90
384	4,458	2349	41,57	194	351	7,52
385	4,718	2386	33,38	187	343	6,12
386	4,940	2416	28,17	181	338	5,26
387	5,136	2443	24,56	176	333	4,65
390	5,619	2505	18,21	165	324	3,58
391	5,758	2523	16,87	162	322	3,35
392	5,888	2539	15,76	160	320	3,15
393	6,011	2554	14,81	157	318	3,00
394	6,128	2569	14,00	155	317	2,86
395	6,240	2582	13,29	153	316	2,74
396	6,347	2595	12,66	151	314	2,63
397	6,450	2608	12,11	149	313	2,54
398	6,550	2620	11,62	148	312	2,45
399	6,646	2631	11,17	146	312	2,39
400	6,738	2642	10,76	144	311	2,31
401	6,828	2653	10,40	143	310	2,26
402	6,916	2663	10,06	142	310	2,20
403	7,001	2673	9,75	140	309	2,15
404	7,084	2682	9,46	139	308	2,10
405	7,165	2692	9,20	138	308	2,06
406	7,244	2701	8,95	136	308	2,02
407	7,322	2710	8,72	135	307	1,98
408	7,397	2718	8,50	134	307	1,94
409	7,471	2727	8,30	133	306	1,91
410	7,544	2735	8,12	132	306	1,88
411	7,615	2743	7,94	131	306	1,85
412	7,685	2751	7,77	130	306	1,83
413	7,754	2758	7,61	129	306	1,80
414	7,821	2766	7,46	128	305	1,78
415	7,888	2773	7,32	127	305	1,75
416	7,953	2781	7,19	126	305	1,73
417	8,017	2787	7,06	126	305	1,72
418	8,081	2795	6,94	125	305	1,70
419	8,143	2802	6,82	124	305	1,68
420	8,205	2808	6,71	123	305	1,66
422	8,326	2821	6,50	122	304	1,63
424	8,443	2834	6,31	120	304	1,60
426	8,558	2847	6,14	119	304	1,58
428	8,670	2859	5,98	117	304	1,55
430	8,779	2871	5,83	116	301	1,53
432	8,886	2882	5,69	11 5	305	1,51
434	8,991	2893	5, 50	113	305	1,49
436	9,094	2904	5, 41	112	305	1,48
438	9,195	2915	5,32	111	305	1,47
440	9,294	2926	5,22	110	305	1,45

Продолжение табл. П-13

442	9,392	2936	5,12	109	306	1,43
444	9,488	2916	5,02	108	306	1,42
446	9,582	2956	4,93	108	306	1,40
448	9,675	2966	4,85	107	3,07	1,39
450	9,766	2976	4,77	106	307	1,37
452	9,857	2985	4,70	106	307	1,36
454	9,946	2994	4,62	106	308	1,35
456	10,03	3004	4,56	105	308	1,34
458	10,12	3013	4,49	105	308	1,32
460	10,21	3022	4,13	104	309	1,31
465	10,41	3043	4,23	103	310	1,29
470	10,62	3061	4,16	103	311	1,26
475	10,82	3085	4,05	102	312	1,24
480	11,01	3105	3,95	102	314	1,22
485	11,20	3125	3,85	101	315	1,20
490	11,38	3144	3,77	101	316	1,18
495	11,56	3162	3,69	101	318	1,16
500	11,74	3181	3,62	101	319	1,15

\* $p_k = 221,2 \cdot 10^5$  Па;  $t_k = 374,1^\circ\text{C}$ . При  $p = 240 \cdot 10^5$  Па  $t_m = 380,7^\circ\text{C}$ .

Таблица П-14

Физические свойства воды при давлении  $p = 300 \cdot 10^5$  Па\*

$t$ , °C	$v \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	$i$ , кДж/кг	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^3$ , Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^7$ , Па·с	Pr
350	1,554	1611	6,44	494	778	1,01
352	1,568	1624	6,54	489	770	1,03
354	1,582	1637	6,64	484	762	1,05
356	1,597	1651	6,76	478	751	1,06
358	1,612	1664	6,88	473	746	1,08
360	1,629	1679	7,02	467	737	1,11
362	1,646	1693	7,17	462	729	1,13
364	1,665	1707	7,34	456	720	1,16
366	1,684	1722	7,53	450	711	1,19
368	1,705	1737	7,75	444	701	1,22
370	1,727	1753	7,99	437	692	1,26
372	1,751	1769	8,26	430	682	1,31
374	1,777	1786	8,59	423	671	1,36
376	1,806	1804	8,95	415	651	1,41
378	1,837	1822	9,39	407	643	1,48
380	1,872	1841	9,90	398	632	1,57
381	1,891	1851	10,19	393	626	1,62
382	1,911	1862	10,51	388	620	1,68
383	1,932	1872	10,86	383	614	1,74
384	1,955	1884	11,25	378	608	1,81
385	1,980	1895	11,67	372	601	1,89
386	2,006	1907	12,14	366	594	1,97
387	2,034	1919	12,66	359	587	2,07
388	2,065	1932	13,23	352	580	2,18
389	2,098	1946	13,86	345	572	2,30
390	2,135	1960	14,59	338	563	2,43
391	2,175	1975	15,40	330	555	2,59
392	2,219	1991	16,30	322	546	2,76
393	2,268	2008	17,32	315	536	2,95
394	2,322	2026	18,46	307	526	3,17

Продолжение табл. П-14

395	2,383	2045	19,68	299	516	3,40
396	2,450	2065	20,90	291	505	3,62
397	2,526	2086	22,24	284	494	3,88
398	2,610	2109	23,55	276	483	4,12
399	2,703	2133	24,79	269	471	4,34
400	2,804	2159	25,71	262	460	4,52
401	2,914	2185	26,48	255	448	4,66
402	3,031	2212	26,69	248	438	4,70
403	3,152	2238	26,43	242	428	4,67
404	3,276	2264	25,79	236	418	4,58
405	3,400	2290	24,89	230	410	4,43
406	3,523	2314	23,84	225	403	4,29
407	3,644	2337	22,74	220	396	4,10
408	3,762	2360	21,63	215	390	3,92
409	3,876	2381	20,56	211	385	3,76
410	3,986	2401	19,54	206	380	3,60
411	4,094	2420	18,58	202	376	3,45
412	4,198	2438	17,70	199	372	3,31
413	4,298	2455	16,88	196	368	3,18
414	4,395	2472	16,12	192	365	3,06
415	4,489	2487	15,43	190	363	2,95
416	4,580	2503	14,79	187	360	2,85
417	4,669	2517	14,20	184	358	2,76
418	4,755	2531	13,66	182	356	2,67
419	4,838	2544	13,16	179	354	2,60
420	4,920	2557	12,69	177	352	2,52
422	5,076	5282	11,86	173	349	2,39
424	5,225	2605	11,15	169	346	2,28
426	5,367	2626	10,52	166	344	2,18
428	5,503	2647	9,98	163	342	2,10
430	5,634	2666	9,49	160	340	2,02
432	5,759	2685	9,06	157	338	1,95
434	5,880	2703	8,67	154	337	1,89
436	5,998	2720	8,33	152	336	1,84
438	6,111	2736	8,01	150	335	1,79
440	6,222	2752	7,73	148	334	1,75
442	6,329	2767	7,47	146	333	1,71
444	6,433	2782	7,23	144	333	1,67
446	6,535	2796	7,01	142	332	1,64
448	6,634	2810	6,81	140	332	1,61
450	6,731	2823	6,62	139	331	1,58
452	6,826	2836	6,45	137	331	1,56
454	6,918	2849	6,29	136	331	1,53
456	7,009	2861	6,14	134	330	1,51
458	7,098	2874	6,00	133	330	1,49
460	7,185	2885	5,87	131	330	1,48
462	7,271	2897	5,74	130	330	1,46
464	7,355	2908	5,63	129	330	1,44
466	7,438	2920	5,52	127	330	1,43
468	7,520	2930	5,42	126	330	1,42
470	7,600	2941	5,32	125	330	1,40
475	7,795	2967	4,10	122	330	1,38
480	7,983	2992	4,90	121	331	1,34
485	8,165	3016	4,73	119	331	1,32
490	8,342	3040	4,58	118	332	1,29
495	8,514	3062	4,44	117	333	1,26
500	8,681	3084	4,32	116	334	1,24

\* $p_0 = 221,2 \cdot 10^5$  Па;  $t_0 = 374,1^\circ\text{C}$ . При  $\rho = 300 \cdot 10^5$  Па  $t_0 = 401,6^\circ\text{C}$ .

Таблица П-15

Физические свойства двуокиси углерода при давлении  
 $p = 100 \cdot 10^5 \text{ Па}^*$

T, К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$i$ , кДж/кг	$c_p$ , кДж/ (кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^5$ , Па·с	$\beta \cdot 10^4$ , К <sup>-1</sup>	Pr
275	964,6	502,0	2,20	11,9	5,59	11,1	52,9	2,06
280	938,1	513,1	2,28	11,3	5,31	10,3	58,4	2,07
285	909,6	524,8	2,38	10,8	5,01	9,52	65,6	2,09
290	878,2	537,0	2,51	10,3	4,67	8,76	75,4	2,14
295	843,0	550,0	2,70	9,77	4,30	8,00	89,4	2,21
300	802,1	564,1	2,99	9,23	3,85	7,23	111	2,34
301	793,0	567,1	3,06	9,11	3,75	7,07	117	2,38
302	783,6	570,2	3,15	9,00	3,65	6,91	123	2,42
303	773,7	573,4	3,24	9,88	3,55	6,75	131	2,46
304	763,3	576,7	3,35	8,76	3,43	6,58	139	2,51
305	752,4	580,1	3,47	8,64	3,31	6,41	149	2,57
306	740,9	583,7	3,61	8,52	3,19	6,24	160	2,64
307	728,7	587,3	3,76	8,39	3,06	6,06	173	2,72
308	715,7	591,2	3,95	8,26	2,92	5,88	188	2,81
309	701,8	595,3	4,17	8,12	2,77	5,69	206	2,92
310	686,7	599,5	4,23	7,97	2,62	5,50	228	3,05
311	670,4	604,1	4,74	7,81	2,46	5,29	254	3,21
312	652,5	609,0	5,11	7,65	2,29	5,08	286	3,39
313	632,9	614,4	5,55	7,47	2,12	4,86	326	3,61
314	611,2	620,2	6,08	7,27	1,96	4,63	373	3,87
315	587,2	626,6	6,68	7,05	1,80	4,38	428	4,15
316	561,0	633,5	7,28	6,81	1,67	4,13	487	4,42
317	532,9	641,1	7,79	6,54	1,58	3,89	538	4,63
318	504,0	649,0	8,05	6,26	1,54	3,65	571	4,69
319	475,9	657,1	7,98	5,98	1,57	3,44	575	4,57
320	449,7	664,9	7,63	5,71	1,66	3,25	553	4,35
321	426,2	672,2	7,10	5,46	1,80	3,10	516	4,03
322	405,7	679,1	6,52	5,24	1,98	2,97	472	3,70
323	387,9	685,3	5,96	5,04	2,18	2,87	429	3,39
324	372,3	691,0	5,46	4,87	2,40	2,78	389	3,12
325	358,8	696,2	5,01	4,72	2,62	2,71	354	2,88
326	346,8	701,1	4,63	4,59	2,86	2,66	324	2,68
327	336,3	705,5	4,30	4,47	3,09	2,61	297	2,51
328	326,8	709,7	4,02	4,37	3,33	2,56	275	2,36
329	318,3	713,6	3,77	4,28	3,56	2,53	255	2,23
330	310,5	717,2	3,56	4,19	3,80	2,50	238	2,12
331	303,4	720,7	3,37	4,12	4,03	2,47	223	2,02
332	296,9	724,0	3,21	4,05	4,25	2,44	210	1,94
333	290,9	727,1	3,07	3,99	4,47	2,42	198	1,86
334	285,4	730,1	2,94	3,94	4,70	2,40	188	1,79
335	280,2	733,0	2,82	3,88	4,91	2,39	179	1,73
336	275,4	735,8	2,72	3,84	5,12	2,37	170	1,68
337	270,8	738,4	2,63	3,79	5,33	2,36	163	1,63
338	266,5	741,0	2,54	3,75	5,54	2,34	156	1,59
339	262,5	743,5	2,47	3,71	5,74	2,33	150	1,55
340	258,7	746,0	2,40	3,68	5,94	2,32	144	1,51
341	255,1	748,3	2,33	3,65	6,13	2,31	139	1,48
342	251,6	750,6	2,27	3,62	6,33	2,30	134	1,45

Продолжение табл. П-15

T, К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$l$ , кДж/кг	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^5$ , Па·с	$\beta \cdot 10^4$ , К <sup>-1</sup>	Pr
343	248,3	752,9	2,22	3,59	6,51	2,30	128	1,42
344	245,2	755,1	2,17	3,56	6,70	2,29	125	1,39
345	242,2	757,2	2,12	3,54	6,90	2,28	121	1,37
346	239,3	759,3	2,08	3,51	7,07	2,28	118	1,35
347	236,6	761,4	2,04	3,49	7,25	2,27	114	1,33
348	233,9	763,4	2,00	3,47	7,43	2,27	111	1,31
349	231,4	765,3	1,96	3,45	7,60	2,26	108	1,29
350	228,9	767,3	1,93	3,43	7,77	2,26	105	1,27
352	224,3	771,1	1,87	3,40	8,11	2,25	100	1,24
354	219,9	774,8	1,82	3,37	8,44	2,25	95,5	1,21
356	215,9	778,4	1,77	3,35	8,76	2,24	91,3	1,19
358	212,0	781,9	1,73	3,32	9,08	2,24	87,6	1,16
360	208,4	785,3	1,69	3,30	9,39	2,24	84,2	1,14
370	193,0	801,4	1,54	3,23	10,9	2,24	71,0	1,07
380	180,6	816,2	1,44	3,20	12,3	2,25	61,8	1,02
390	170,4	830,3	1,38	3,19	13,6	2,27	55,0	0,979
400	161,7	843,8	1,33	3,20	14,9	2,29	49,7	0,950
450	131,7	906,6	1,21	3,39	21,3	2,44	34,6	0,871
500	113,1	965,8	1,17	3,69	27,9	2,62	27,2	0,830
550	99,9	1024	1,16	4,04	34,5	2,80	22,7	0,803
600	89,9	1082	1,16	4,40	42,2	2,97	19,6	0,784
650	82,0	1140	1,17	4,77	49,8	3,15	17,4	0,770
700	75,5	1199	1,18	5,14	57,8	3,31	15,7	0,760
750	70,0	1258	1,19	5,51	66,0	3,47	14,3	0,752
800	65,4	1318	1,21	5,87	74,5	3,63	13,2	0,746

\* $p_c = 73,9 \cdot 10^5$  Па;  $T_c = 304$  К. При  $\rho = 100 \cdot 10^5$  Па  $T_m \approx 318$  К.

Таблица П-16

Физические свойства дымовых газов

( $B=760$  мм рт. ст.  $\approx 1,01 \cdot 10^5$  Па;  $\bar{p}_{CO_2} = 0,13$ ;  $\bar{p}_{H_2O} = 0,11$ ;  $\bar{p}_{N_2} = 0,76$ )

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

Таблица П-17

## Физические свойства трансформаторного масла

$t$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·K)	$\lambda$ , Вт/(м·K)	$\mu \cdot 10^4$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\alpha \cdot 10^8$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^4$ , K <sup>-1</sup>	Pr
0,0	892,5	1,549	0,1123	629,8	70,5	8,14	6,80	866
10	886,4	1,620	0,1115	335,5	37,9	7,83	6,85	484
20	880,3	1,666	0,1106	198,2	22,5	7,56	6,90	298
30	874,2	1,729	0,1008	128,5	14,7	7,28	6,95	202
40	868,2	1,788	0,1090	89,4	10,3	7,03	7,00	146
50	862,1	1,846	0,1082	65,3	7,58	6,80	7,05	111
60	856,0	1,905	0,1072	49,5	5,78	6,58	7,10	87,8
70	850,0	1,964	0,1064	38,6	4,54	6,36	7,15	71,3
80	843,9	2,026	0,1056	30,8	3,66	6,17	7,20	59,3
90	837,8	2,085	0,1047	25,4	3,03	6,00	7,25	50,5
100	831,8	2,144	0,1038	21,3	2,56	5,83	7,30	43,9
110	825,7	2,202	0,1030	18,1	2,20	5,67	7,35	38,8
120	819,6	2,261	0,1022	15,7	1,92	5,50	7,40	34,9

Таблица П-18

## Физические свойства масла МС-20

$t$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·K)	$\lambda$ , Вт/(м·K)	$\mu \cdot 10^4$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\alpha \cdot 10^8$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^4$ , K <sup>-1</sup>	Pr
-10	990,3	1,951	0,136	—	—	7,75	6,24	—
0	903,6	1,980	0,135	—	—	7,58	6,24	—
+10	897,9	2,010	0,135	—	—	7,44	6,31	—
20	892,3	2,043	0,134	10026	1125	7,30	6,35	15400
30	886,6	2,072	0,132	4670	526	7,19	6,38	7310
40	881,0	2,106	0,131	2433	276	7,08	6,42	3890
50	875,3	2,135	0,130	1334	153	7,00	6,46	2180
60	869,6	2,165	0,129	798,5	91,9	6,86	6,51	1340
70	864,0	2,198	0,128	498,3	58,4	6,75	6,55	865
80	858,3	2,227	0,127	336,5	39,2	6,67	6,60	588
90	852,7	2,261	0,126	234,4	27,5	6,56	6,64	420
100	847,0	2,290	0,126	171,7	20,3	6,44	6,69	315
110	841,3	2,320	0,124	132,4	15,7	6,36	6,73	247
120	835,7	2,353	0,123	101,0	12,1	6,25	6,77	193
130	830,0	2,382	0,122	79,76	9,61	6,17	6,82	156
140	824,4	2,420	0,121	61,80	7,50	6,08	6,87	123
150	818,7	2,445	0,120	53,17	6,50	6,00	6,92	108

Таблица П-19

## Физические свойства масла МК

$t$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·K)	$\lambda$ , Вт/(м·K)	$\mu \cdot 10^4$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\alpha \cdot 10^8$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^4$ , K <sup>-1</sup>	Pr
10	911,0	1,645	0,1510	35414	3883	9,94	8,56	39 000
20	903,0	1,712	0,1485	18560	1514	9,58	8,64	15 800
30	894,5	1,758	0,1461	6180	691,2	9,28	8,71	7450
40	887,5	1,804	0,1437	3031	342,0	8,97	8,79	3810

Продолжение табл. П-19

50	879,0	1,851	0,1413	1638	186,2	8,69	8,86	2140
60	871,5	1,897	0,1389	961,4	110,6	8,39	8,95	1320
70	864,0	1,943	0,1363	603,3	69,3	8,14	9,03	858
80	856,0	1,989	0,1340	399,3	46,6	7,89	9,12	591
90	848,2	2,035	0,1314	273,7	32,3	7,61	9,20	424
100	840,7	2,081	0,1290	202,1	24,0	7,33	9,28	327
110	838,0	2,127	0,1264	145,2	17,4	7,11	9,37	245
120	825,0	2,173	0,1240	110,4	13,4	6,92	9,46	193,5
130	817,0	2,219	0,1214	87,31	10,7	6,69	9,54	160,0
140	809,2	2,265	0,1188	70,34	8,70	6,53	9,65	133,3
150	801,6	2,311	0,1168	56,90	7,10	6,25	9,73	113,5

Таблица П-20

Физические свойства ртути и некоторых расплавленных металлов

Металл	$t$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$C_p$ , кДж/(кг·К)	$\alpha \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$Pr \cdot 10^2$
Ртуть Hg $t_{пл} = -38,9^\circ\text{C}$ ; $t_{кип} = 357^\circ\text{C}$ ; $r_{пл} = 11,72$ кДж/кг; $r_{ис} = 291,8$ кДж/кг	20	13550	7,90	0,1390	4,36	11,4	2,72
	100	13350	8,95	0,1373	4,89	9,4	1,92
	150	13230	6,35	0,1373	5,30	8,6	1,62
	200	13120	10,3	0,1373	5,72	8,0	1,40
	300	12280	11,7	0,1373	6,64	7,1	1,07
Олово Sn $t_{пл} = 231,9^\circ\text{C}$ ; $t_{кип} = 2270^\circ\text{C}$ ; $r_{пл} = 58,2$ кДж/кг; $r_{ис} = 3015$ кДж/кг	250	6980	34,1	0,255	19,2	27,0	1,41
	300	6940	33,7	0,255	19,0	24,0	1,26
	400	6865	33,1	0,255	18,9	20,0	1,06
	500	6790	32,6	0,255	18,8	17,3	0,92
Висмут Вi $t_{пл} = 271^\circ\text{C}$ ; $t_{кип} = 1477^\circ\text{C}$ ; $r_{пл} = 50,2$ кДж/кг; $r_{ис} = 855,4$ кДж/кг	300	10030	13,0	0,151	8,61	17,1	1,98
	400	9910	14,4	0,151	9,72	14,2	1,46
	500	9785	15,8	0,151	10,8	12,2	1,13
	600	9660	17,2	0,151	11,9	10,8	0,91
Литий Li $t_{пл} = 179^\circ\text{C}$ ; $t_{кип} = 1317^\circ\text{C}$ ; $r_{пл} = 661,5$ кДж/кг; $r_{ис} = 19595$ кДж/кг	200	515	37,2	4,187	17,2	111,0	6,43
	300	5050	39,0	4,187	18,3	92,7	5,03
	400	495	41,9	4,187	20,3	81,7	4,04
	500	484	45,3	4,187	22,3	73,4	3,28
Сплав 56,5% Вi+ +43,5% Рb; $t_{пл} = 123,5^\circ\text{C}$ ; $t_{кип} = 1670^\circ\text{C}$ ;	150	10550	9,8	0,146	6,39	28,9	4,50
	200	10490	10,3	0,146	6,67	24,3	3,64
	300	10360	11,4	0,146	7,50	18,7	2,50
	400	10240	12,6	0,146	8,33	15,7	1,87
	500	10120	14,0	0,146	9,44	13,6	1,44
Сплав 25% Na+ +75% K; $t_{пл} = -11^\circ\text{C}$ ; $t_{кип} = 784^\circ\text{C}$ ;	100	852	23,2	1,143	23,9	60,7	2,51
	200	828	24,5	1,072	27,6	45,2	1,64
	300	808	25,8	1,038	31,0	36,6	1,18
	400	778	27,1	1,005	34,7	30,8	0,89
	500	753	28,4	0,967	39,0	26,7	0,69
	600	729	29,6	0,934	43,6	23,7	0,54
	700	704	30,9	0,900	48,8	21,4	0,44

Продолжение табл. П-20

Натрий Na	150	916	84,9	1,356	68,3	59,4	0,87
$t_{пл}=97,8^{\circ}\text{C}$ ;	200	903	81,4	1,327	67,8	50,6	0,75
$t_{кип}=883^{\circ}\text{C}$ ;	300	878	70,9	1,281	63,0	39,4	0,63
$r_{пл}=113,26$ кДж/кг;	400	854	63,9	1,273	58,9	33,0	0,56
$r_{ис}=4208$ кДж/кг	500	829	57,0	1,273	54,2	28,9	0,53

Таблица П-21

Степень черноты полного излучения различных материалов

Материал и характер поверхности	$t, ^{\circ}\text{C}$	$\epsilon$
<b>Металлы</b>		
Алюминий:		
полированный	225-575	0,039-0,057
шероховатый	26	0,055
окисленный при $600^{\circ}\text{C}$	200-600	0,11-0,19
Вольфрам	230-2230	0,053-0,31
Вольфрамовая нить	3300	0,39
Железо:		
электролитное, тщательно полированное	175-225	0,052-0,064
сварочное, тщательно полированное	40-250	0,28
полированное	425-1020	0,144-0,377
свежеобработанное наждаком	20	0,242
литое необработанное	925-1115	0,87-0,95
Стальное литье, полированное	770-1040	0,52-0,56
Сталь:		
листовая шлифованная	940-1100	0,52-0,61
окисленная при $600^{\circ}\text{C}$	200-600	0,79
окисленная шероховатая	40-370	0,94-0,97
Чугун:		
полированный	200	0,21
обточенный	830-990	0,60-0,70
окисленный при $600^{\circ}\text{C}$	200-600	0,64-0,78
шероховатый, сильно окисленный	40-250	0,96
Золото, тщательно полированное	225-625	0,018-0,035
Латунь:		
тщательно полированная, состав (по массе) 73,2% Cu, 26,7% Zn	245-355	0,028-0,031
прокатная с естественной поверхностью	22	0,06
тусклая	50-350	0,22
окисленная при нагреве до $600^{\circ}\text{C}$	200-600	0,61-0,59
Медь:		
тщательно полированная электролитная	80	0,018
полированная	115	0,023
продолжительно нагревавшаяся, покрытая толстым слоем окиси	25	0,78
окисленная при нагреве до $600^{\circ}\text{C}$	200-600	0,57-0,55
Платина чистая полированная	225-625	0,054-0,105
Платиновые:		
лента	925-1115	0,12-0,17
нить	25-1230	0,036-0,192
проволока	225-1375	0,073-0,182
Хром	38-538	0,08-0,26





Продолжение табл. П-22

5	Четыре поверхности, образующие замкнутую систему	<p>Поверхности <math>F_3</math> и <math>F_4</math> соединены поверхностями <math>F_1</math> и <math>F_2</math> и образуют четырехугольник криволинейными сторонами. <math>F_1, F_2, F_3</math> и <math>F_4</math> представляют собой длинные цилиндрические поверхности с параллельными образующими. Схемы при этом следует рассматривать как поперечное сечение поверхностей, а <math>F_1, F_2, F_3</math> и <math>F_4</math> относить к 1м длины системы;</p> $H_{12} = \frac{1}{2}(D_1 + D_2 - F_3 - F_4); H_{13} = \frac{1}{2}(F_1 + F_2 - D_1);$ $H_{14} = \frac{1}{2}(F_1 + F_4 - D_2);$ <p><math>D_1</math> и <math>D_2</math> – диагонали четырехугольника. Поверхности <math>F_1</math> и <math>F_2</math> расположены друг напротив друга</p>
6	Две параллельные полосы бесконечной длины и конечной ширины	$H = \sqrt{\frac{1}{4}(a_2 + a_1)^2 + h^2} - \sqrt{\frac{1}{4}(a_2 - a_1)^2 + h^2},$ <p>здесь <math>a_1</math> и <math>a_2</math> – ширина полос (<math>a_2 &gt; a_1</math>), расстояние между полосами <math>h</math> и <math>H</math> – на 1м длины полосы</p>
7	Два параллельных круга с центрами на одной общей нормали к их плоскостям	$H = \frac{\pi}{4} \left[ \sqrt{\left(\frac{d_2 + d_1}{2}\right)^2 + h^2} - \sqrt{\left(\frac{d_2 - d_1}{2}\right)^2 + h^2} \right]^2;$ <p>при <math>d_1 = d_2</math> <math>H = \frac{\pi}{4} \sqrt{(d^2 + h^2 - h^2)^2}</math>,</p> <p>здесь <math>d_1</math> и <math>d_2</math> – диаметры дисков, <math>h</math> – расстояние между ними</p>
8	Два одинаковых прямоугольника, расположенных в параллельных плоскостях друг против друга	<p>«<math>a</math>» и «<math>b</math>» - размеры сторон прямоугольников, «<math>h</math>» - расстояние между ними:</p> $\varphi_{12} = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{1}{a} \sqrt{a^2 + h^2} \arctg \frac{b}{\sqrt{a^2 + h^2}} + \frac{a}{b} \sqrt{b^2 + h^2} \arctg \frac{a}{\sqrt{b^2 + h^2}} - \frac{h}{a} \arctg \left( \frac{b}{h} \right) - \frac{h}{b} \arctg \left( \frac{a}{h} \right) + \frac{h^2}{2ab} \ln \frac{(a^2 + h^2)(b^2 + h^2)}{(a^2 + b^2 + h^2)h^2} \right].$ <p>Если <math>a=b</math> (т. е. для квадратов), то</p> $\varphi_{12} = \frac{2}{\pi} \left[ \frac{2}{a} \sqrt{a^2 + h^2} \arctg \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}} - 2 \frac{h}{a} \arctg \left( \frac{a}{h} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^2 \ln \frac{(a^2 + h^2)^2}{h^2(2a^2 + h^2)} \right]$

Продолжение табл. П-22

9	Две взаимно перпендикулярных прямоугольника, имеющих общую грань	<p>а – ширина общей грани; b – высота первого прямоугольника; с – высота второго прямоугольника; угол между прямоугольниками равен <math>\pi/2</math>;</p> $\varphi_{12} = \frac{1}{\pi} \left[ \arctg \frac{a}{b} + \frac{c}{b} \arctg \frac{a}{c} - \sqrt{\left(\frac{c}{a}\right)^2 - 1} \arctg \frac{a}{\sqrt{b^2+c^2}} + \right.$ $\left. c^2 4ablna^2+b^2+c^2c2a^2+c2b^2+c^2+b4ablna^2+b^2+c2b2a^2+b2b^2+c^2-a4blna^2+b^2+c2a2a^2+b2a^2+c^2 \right]$
10	Два параллельных цилиндра одинакового диаметра	<p><math>d</math> – диаметр цилиндров; <math>s</math> – расстояние между осями первого и второго цилиндров;</p> $\varphi_{12} = \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{d}{s} + \sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2 - 1} - \frac{s}{d};$ $H = \sqrt{s^2 - d^2} + d \arcsin \frac{d}{s} - s,$ <p>здесь <math>H</math> – на один м длины цилиндров</p>
11	Неограниченная плоскость и однорядный пучок труб	<p><math>d</math> – диаметр труб, <math>s</math> – расстояние между осями труб. Неограниченная плоскость – первое тело, параллельный плоскости ряд труб – второе;</p> $\varphi'_{12} = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{s}\right)^2} + \frac{d}{s} \arctg \sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2 - 1};$ $\varphi'_{21} = \frac{1}{\pi} \left[ \left(\frac{s}{d}\right) - \sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2 - 1} + \arctg \sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2 - 1} \right];$ $H = \varphi'_{12} S = \varphi'_{21} \pi d,$ <p>здесь <math>H</math> отнесено к одной трубе и 1м длины трубы</p>
12	Неограниченная плоскость 1 и $n$ -рядный пучок 2	<p><math>d</math> – диаметр труб; <math>s</math> – расстояние между осями труб; трубы расположены в коридорном порядке;</p> $\bar{\varphi}_{12} = 1 - (1 - \varphi'_{12})^n; H = \bar{\varphi}_{12} s;$ <p><math>\varphi'_{12}</math> – коэффициент облучения поверхности на однородный пучок (см. п. 11); <math>n</math> – число рядов в пучке</p>
13	Замкнутая поверхность, состоящая из поверхностей 1 и 2, через которые подводится и отводится теплота, и отражающей поверхности $R$ , не проводящей теплоты	<p>Тела 1, 2 и <math>R</math> представляют собой длинные цилиндрические поверхности с параллельными образующими. Схему при этом следует рассматривать как поперечное сечение цилиндрических поверхностей 1, 2 и <math>R</math> и относить к 1м длины системы;</p> $\bar{\varphi}_{12} = \varphi_{12} + \frac{1}{\frac{1}{\varphi_{1R}} + \frac{F_1}{F_2} \frac{1}{\varphi_{2R}}}; \bar{H} = F_1 \bar{\varphi}_{12},$ <p><math>\varphi_{12}</math>, <math>\varphi_{1R}</math>, <math>\varphi_{2R}</math> подсчитываются для соответствующих случаев по предыдущим формулам</p>

Окончание табл. П-22

14	Неограниченная излучающая плоскость $F_1$ и одно- или двухрядный пучок труб $F_2$ при наличии отражающей поверхности $R$ , расположенной за пучком	$d$ – диаметр труб и $s$ – расстояние между осями труб в пучке; $\bar{\varphi}_{12} = \varphi_{12}(2 - \varphi_{12})$ ; $\bar{H} = \bar{F}_1 \bar{\varphi}_{12} = F_2 \varphi_{21}$ . Для однорядного пучка $\varphi_{12}$ вычисляется по формуле п. 11 ( $\varphi_{12} = \varphi'_{12}$ ); для двурядного - по формуле п. 12 ( $n=2$ )
15	Поверхности $F_1$ и $F_2$ , через которые подводится и отводится теплота, не имеют выгнутостей, и замыкающая их отражающая поверхность $R$	$\bar{\varphi}_{12} = \frac{F_2 - F_1 \varphi_{12}^2}{F_1 + F_2 - 2F_1 \varphi_{12}}; \bar{H} = F_1 \bar{\varphi}_{12}$
16	Поверхности $F_1$ и $F_2$ , через которые подводится и отводится теплота, равны и параллельны (диски, квадраты, прямоугольники и т. п.), и замыкающая их отражающая поверхность $R$	$\bar{\varphi}_{12} = \frac{1 + \varphi_{12}}{2}; \bar{H} = F_1 \bar{\varphi}_{12}$

Таблица П-23

Функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка

$J_0(x)$  и  $J_1(x)$

$x$	$J_0(x)$	$J_1(x)$	$x$	$J_0(x)$	$J_1(x)$
0.0	1.0000	0.0000	7.6	0,2516	0,1592
0.1	0,9975	0,0499	7.7	0,2346	0,1813
0.2	0,9900	0,0995	7.8	0,2154	0,2014
0.3	0,9776	0,1483	7.9	0,1944	0,2192
0.4	0,9604	0,1960	8.0	0,1716	0,2346
0.5	0,9385	0,2423	8.1	0,1475	0,2476
0.6	0,9120	0,2867	8.2	0,1220	0,2580
0.7	0,8812	0,3290	8.3	0,0960	0,2657
0.8	0,8463	0,3688	8.4	0,0692	0,2708
0.9	0,8075	0,4059	8.5	0,0419	0,2731
1.0	0,7652	0,4400	8.6	0,0146	0,2728
1.1	0,7196	0,4709	8.7	-0,0125	0,2697
1.2	0,6711	0,4983	8.8	-0,0392	0,2641
1.3	0,6201	0,5220	8.9	-0,0652	0,2559
1.4	0,5669	0,5419	9.0	-0,0903	0,2453
1.5	0,5118	0,5579	9.1	-0,1142	0,2324
1.6	0,4554	0,5699	9.2	-0,1368	0,2174
1.7	0,3980	0,5778	9.3	-0,1577	0,2004
1.8	0,3400	0,5815	9.4	-0,1768	0,1816
1.9	0,2818	0,5812	9.5	-0,1939	0,1613
2.0	0,2239	0,5767	9.6	-0,2090	0,1395
2.1	0,1666	0,5683	9.7	-0,2218	0,1116
2.2	0,1104	0,5560	9.8	-0,2323	0,0928
2.3	0,0555	0,5399	9.9	-0,2403	0,0684
2.4	0,0025	0,5202	10.0	-0,2459	0,0435
2.5	-0,0484	0,4971	10.1	-0,2490	0,0184
2.6	-0,0968	0,4708	10.2	-0,2496	-0,0066
2.7	-0,1424	0,4416	10.3	-0,2477	-0,0313
2.8	-0,1850	0,4097	10.4	-0,2434	-0,0555
2.9	-0,2243	0,3754	10.5	-0,2366	-0,0788

Продолжение табл. П-23

3.0	-0.2600	0,3391	10,6	-0.2276	-0.1012
3.1	-0.2921	0,3009	10,7	-0.2164	-0.1224
3.2	-0.3202	0,2613	10,8	-0.2032	-0.1422
3.3	-0.3443	0,2207	10,9	-0.1881	-0.1604
3.4	-0.3643	0,1792	11,0	-0.1712	-0.1768
3.5	-0.3801	0,1374	11,1	-0.1528	-0.1913
3.6	-0.3918	0,0955	11,2	-0.1330	-0.2038
3.7	-0.3992	0,0538	11,3	-0.1121	-0.2143
3.8	-0.4026	0,0128	11,4	-0.0902	-0.2224
3.9	-0.4018	-0.0272	11,5	-0.0677	-0.2284
4.0	-0.3971	-0.0660	11,6	-0.0446	-0.2320
4.1	-0.3887	-0.1033	11,7	-0.0213	-0.2333
4.2	-0.3766	-0.1386	11,8	0,0020	-0.2323
4.3	-0.3610	-0.1719	11,9	0,0250	-0.2290
4.4	-0.3423	-0.2028	12,0	0,0477	-0.2234
4.5	-0.3205	-0.2311	12,1	0,0697	-0.2158
4.6	-0.2961	-0.2666	12,2	0,0908	-0.2060
4.7	-0.2693	-0.2791	12,3	0,1108	-0.1943
4.8	-0.2404	-0.2985	12,4	0,1296	-0.1807
4.9	-0.2097	-0.3147	12,5	0,1469	-0.1655
5.0	-0.1776	-0.3276	12,6	0,1626	-0.1487
5.1	-0.1443	-0.3371	12,7	0,1766	-0.1307
5.2	-0.1103	-0.3432	12,8	0,1887	-0.1114
5.3	-0.0758	-0.3460	12,9	0,1988	-0.0912
5.5	-0.0068	-0.3414	13,0	0,2069	-0.0703
5.6	0,0270	-0.3343	13,1	0,2129	-0.0488
5.7	0,0599	-0.3241	13,2	0,2167	-0.0271
5.8	0,0917	-0.3110	13,3	0,2183	-0.0052
5.9	0,1220	-0.2951	13,4	0,2177	0,0166
6.0	0,1506	-0.2767	13,5	0,2150	0,0380
6.1	0,1773	-0.2559	13,6	0,2101	0,0590
6.2	0,2017	-0.2329	13,7	0,2032	0,0791
6.3	0,2238	-0.2081	13,8	0,1943	0,0984
5.5	-0.0068	-0.3414	13,9	0,1836	0,1165
5.6	0,0270	-0.3343	14,0	0,1711	0,1334
5.7	0,0599	-0.3241	14,1	0,1570	0,1488
6.4	0,2433	-0.1816	14,2	0,1414	0,1626
6.5	0,2601	-0.1538	14,3	0,1245	0,1747
6.6	0,2740	-0.1250	14,4	0,1065	0,1850
6.7	0,2851	-0.0953	14,5	0,0875	0,1934
6.8	0,2931	-0.0652	14,6	0,0679	0,1989
6.9	0,2981	-0.0349	14,7	0,0476	0,2043
7.0	0,3001	-0.0047	14,8	0,0271	0,2066
7.1	0,2991	0,0252	14,9	0,0064	0,2069
7.2	0,2951	0,0543	15,0	-0.0142	0,2051
7.3	0,2882	0,0826			
7.4	0,2786	0,1096			
7.5	0,2663	0,1352			

Таблица П-24

Модифицированные функции Бесселя первого рода нулевого  
и первого порядка  $I_0(x)$  и  $I_1(x)$

x	$I_0(x)$	$I_1(x)$	x	$I_0(x)$	$I_1(x)$
0,0	1,0000	0,0000	3,0	4,881	3,953
0,1	1,0025	0,0501	3,1	5,294	4,326
0,2	1,0100	0,1005	3,2	5,747	4,734
0,3	1,0226	0,1517	3,3	6,243	5,181
0,4	1,0404	0,2040	3,4	6,785	5,670
0,5	1,0635	0,2579	3,5	7,378	6,206
0,6	1,0920	0,3137	3,6	8,028	6,793
0,7	1,1263	0,3719	3,7	8,739	7,436
0,8	1,1665	0,4329	3,8	9,517	8,140
0,9	1,2130	0,4971	3,9	10,37	8,913
1,0	1,2661	0,5652	4,0	11,30	9,76
1,1	1,3262	0,6375	4,1	12,32	10,69
1,2	1,3937	0,7174	4,2	13,44	11,71
1,3	1,4693	0,7973	4,3	14,67	12,82
1,4	1,5534	0,8861	4,4	16,01	14,05
1,5	1,6467	0,9817	4,5	17,48	15,39
1,6	1,7500	1,0848	4,6	19,09	16,86
1,7	1,8640	1,1963	4,7	20,86	18,48
1,8	1,9896	1,3172	4,8	22,79	20,25
1,9	2,1277	1,4482	4,9	24,91	22,20
2,0	2,280	1,591	5,0	27,24	24,34
2,1	2,446	1,746	5,1	29,79	26,68
2,2	2,629	1,914	5,2	32,58	29,25
2,3	2,830	2,098	5,3	35,65	32,08
2,4	3,049	2,298	5,4	39,01	35,18
2,5	3,290	2,517	5,5	42,70	38,59
2,6	3,553	2,755	5,6	46,74	42,33
2,7	3,842	3,016	5,7	51,17	46,44
2,8	4,157	3,301	5,8	56,04	50,95
2,9	4,503	3,613	5,9	61,38	55,90

Таблица П-25

Модифицированные функции Бесселя второго рода нулевого  
и первого порядка  $K_0(x)$  и  $K_1(x)$

x	$K_0(x)$	$K_1(x)$	x	$K_0(x)$	$K_1(x)$
0,1	2,447	9,854	2,2	0,089	0,108
0,2	1,753	4,776	2,3	0,078	0,0942
0,3	1,373	3,056	2,4	0,071	0,0832
0,4	1,115	2,184	2,5	0,062	0,0739
0,5	0,924	1,656	2,6	0,055	0,0660
0,6	0,775	1,303	2,7	0,049	0,0581
0,7	0,661	1,050	2,8	0,044	0,0503

Продолжение табл. П-25

0,8	0,565	0,862	2,9	0,039	0,0456
0,9	0,487	0,717	3,0	0,0347	0,0402
1,0	0,421	0,602	3,1	0,0314	0,0351
1,1	0,366	0,509	3,2	0,0283	0,0314
1,2	0,318	0,435	3,3	0,0251	0,0283
1,3	0,278	0,372	3,4	0,0220	0,0251
1,4	0,244	0,320	3,5	0,0196	0,0222
1,5	0,214	0,278	3,6	0,0173	0,0204
1,6	0,188	0,241	3,7	0,0157	0,0173
1,7	0,165	0,209	3,8	0,0141	0,0157
1,8	0,146	0,183	3,9	0,0126	0,0141
1,9	0,129	0,160	4,0	0,0112	0,0125
2,0	0,114	0,140	4,5	0,0064	0,00708
2,1	0,100	0,122	5,0	0,0037	0,00404

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Краснощёков Е.А. Задачник по теплопередаче. / Е.А. Краснощёков, А.С. Сукомел. 4-е изд. М.: Энергия, 1980. 288 с.
2. Авчухов В.В. Задачник по процессам тепломассообмена: учеб. пособие для вузов / В.В. Авчухов, Б.Я. Паюсте. М.: Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
3. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. 3-е изд., перераб. и доп.– М.: Энергия, 1975. 488 с.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Теплопроводность при стационарном режиме.....	4
2. Теплопроводность при нестационарном режиме .....	21
3. Обработка опытных данных методом теории подобия....	40
4. Теплоотдача при вынужденном продольном обтекании плоской поверхности.....	47
5. Теплоотдача при вынужденном течении жидкости в каналах.....	55
6. Теплоотдача при вынужденном поперечном обтекании цилиндра и пучка труб.....	81
7. Теплоотдача при свободном движении жидкости.....	95
8. Теплоотдача при конденсации пара.....	103
9. Теплоотдача при кипении жидкости.....	116
10. Теплообмен излучением.....	127
Заключение.....	139
Приложение.....	140
Библиографический список.....	165

Учебное издание

Дахин Сергей Викторович

ТЕПЛООБМЕН. ЗАДАЧНИК

В авторской редакции

Подписано в печать 15.05.2008.

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 10,4. Уч.-изд. л. 8,7. Тираж 250 экз.

Зак. № .

ГОУ ВПО «Воронежский государственный технический  
университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14