

В. В. Авчухов, В. Я. Шаюсте

ЗАДАЧНИК ПО ПРОЦЕССАМ ТЕПЛОМАССООБМЕНА

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по специальности «Промышленная теплоэнергетика»



МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1986

ББК 31.31
А 22
УДК 536.2

Рецензенты: Кафедра теоретических основ теплотехники ЛПИ и доктор техн. наук Н. М. Галин

Авчухов В. В., Паюсте Б. Я.

А 22 Задачник по процессам тепломассообмена
Учеб. пособие для вузов.— М.: Энергоатомиздат
1986.—144 с. ил.

Составлен в соответствии с программой курса «Основы теплотехники». В первой части каждой главы даны краткие теоретические пояснения и основные расчетные формулы, во второй части представлены задачи, снабженные ответами. В приложении содержатся справочные таблицы теплофизических свойств различных веществ, а также диаграммы и номограммы, облегчающие расчеты. Для студентов теплотехнических специальностей вузов. Может быть использован инженерно-техническими работниками различных отраслей промышленности, занимающимися проектированием и расчетом теплотехнических устройств.

2303010000-440
А 051(01)-86 191-86

ББК 31.3

**ВИКТОР ВАСИЛЬЕВИЧ АВЧУХОВ,
БИРУТА ЯНОВНА ПАЮСТЕ**

Задачник по процессам тепломассообмена

Редактор **В. И. Кушнырев**
Редактор издательства **Т. И. Мушинска**
Технический редактор **О. Д. Кузнецова**
Корректор **М. Г. Гулина**
ИБ № 486

Сдано в набор 31.10.85 Подписано в печать 03.02.86 Т.0:285
Формат 84×108^{1/32} Бумага типографская № 2 Гарнитура литературная
Печать высокая Усл. печ. л. 7,56 Усл. кр.-отт. 7,71 Уч.-изд. л. 9,5
Тираж 11000 экз. Заказ 472 Цена 30 к.

Энергоатомиздат. 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова»
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113054, Москва, Бабушкова, 28

© Энергоатомиздат, 1986

Предисловие

Данное учебное пособие содержит не только задачи, но и краткие теоретические сведения, что представляет определенное удобство для самостоятельной работы студентов, а также для проведения практических занятий при изучении таких дисциплин, как теплообмен, теплопередача и т. п.

Главы задачника соответствуют основным разделам дисциплины. Каждая глава состоит из двух частей; в первой части приводятся основные понятия, расчетные зависимости и необходимые пояснения, во второй части представлены задачи. Все задачи снабжены ответами. Включены многовариантные задачи, которые могут быть использованы для групповой самостоятельной работы студентов, а также задачи на анализ характерных зависимостей и практических выводов на основе сравнения вариантов. Распределение задач по главам — в порядке возрастающей сложности, их количество и содержание определено на основе опыта преподавания курса теплообмена на кафедре теплоэнергетики Рижского политехнического института. Некоторые задачи имеют аналогии в ранее изданных известных задачниках по теплообмену.

Приложения включают справочный материал в виде таблиц, диаграмм и номограмм, который призван способствовать приобретению навыков самостоятельного отыскания необходимых величин. Помогая ускорению вычислений, он облегчает пользование задачником. Справочный материал собран в объеме, достаточном для решения задач. В задачнике использована Международная система единиц.

Авторы искренне признательны рецензентам доктору техн. наук Н. М. Галину и канд. техн. наук П. М. Михайлову за ценные советы и предложения, высказанные при подготовке рукописи к изданию.

Все возникающие у читателей пожелания и критические замечания по совершенствованию настоящего задачника авторы примут с благодарностью. Их следует направлять по адресу 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Авторы

Глава первая

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

1.1. Основные понятия и расчетные зависимости

Теплопроводность — перенос теплоты посредством теплового движения микрочастиц в сплошной среде, обусловленный неоднородным распределением температуры. В чистом виде процесс происходит в твердых телах, а в жидкостях и газах — при отсутствии перемещения среды.

Теплопередача — процесс теплообмена между жидкими или газообразными средами, разделенными твердой стенкой.

Стационарным режимом называется тепловой режим, при котором температурное поле не зависит от времени.

Тепловой поток Q , Вт, — количество теплоты, передаваемой в единицу времени ($1 \text{ Дж/с} = 1 \text{ Вт}$).

Поверхностная плотность теплового потока q , Вт/м², — тепловой поток, проходящий через единицу площади F поверхности теплообмена:

$$q = Q/F. \quad (1.1)$$

Линейная плотность теплового потока q_l , Вт/м, — тепловой поток, отнесенный к единице длины l цилиндрической трубы:

$$q_l = Q/l. \quad (1.2)$$

Теплопроводность материала или *коэффициент теплопроводности* λ , Вт/(м·К), — величина, равная отношению поверхностной плотности теплового потока q к модулю температурного градиента:

$$\lambda = q/|\text{grad } T|. \quad (1.3)$$

Среднеинтегральная теплопроводность в диапазоне температур t_{c1} и t_{c2} на поверхностях стенки

$$\bar{\lambda} = \int_{t_{c1}}^{t_{c2}} \lambda_t dt / (t_{c2} - t_{c1}), \quad (1.4)$$

где λ_t — теплопроводность, зависящая от температуры.

Зависимость теплопроводности λ_t от температуры t , °С, приближенно можно выразить в виде линейной функции

$$\lambda_t = \lambda_0(1 + bt), \quad (1.5)$$

где λ_0 — теплопроводность при 0 °С, Вт/(м·К); b — постоянная, зависящая от природы материала и определяемая опытным путем, К⁻¹.

Величина $\bar{\lambda}$ при использовании зависимости (1.5) принимает значение λ_t , определяемое по среднearифметической температуре стенки:

$$\lambda_t = \lambda_0[1 + 0,5b(t_{c1} + t_{c2})]. \quad (1.6)$$

Теплопроводность некоторых материалов ($\lambda = \text{const}$) приведена в табл. 1 приложения.

1.2. Плоская стенка

Температурное поле в однородной неограниченной стенке толщиной δ при $\lambda = \text{const}$

$$t = t_{c1} + (t_{c2} - t_{c1})x/\delta, \quad (1.7)$$

где x — текущая координата плоскости, в которой определяется температура t , $0 \leq x \leq \delta$.

Температурное поле в стенке при линейном законе изменения теплопроводности от температуры (x — расстояние от поверхности стенки, имеющей температуру t_{c1})

$$t = \left[\left(\frac{1}{b} + t_{c1} \right)^2 - \frac{2xq}{\lambda_0 b} \right]^{0,5} - \frac{1}{b}. \quad (1.8)$$

Формула теплопроводности для стенки, составленной из n слоев различных материалов,

$$Q = (t_{c1} - t_{c(n+1)})F \left/ \sum_{i=1}^{i=n} (\delta_i/\lambda_i) \right., \quad (1.9)$$

где t_{c1} и $t_{c(n+1)}$ — температуры на внешних поверхностях многослойной стенки, °С; δ_i — толщина i -го слоя стенки, м; λ_i — теплопроводность материала i -го слоя стенки, Вт/(м·К).

Температура на поверхности плотно соприкасающихся между собой слоев в многослойной стенке

$$t_{c(i+1)} = t_{c1} - \frac{Q}{F} \sum_{k=1}^{k=i} \frac{\delta_k}{\lambda_k}. \quad (1.10)$$

Формула теплопередачи между двумя средами с температурами $t_{ж1}$ и $t_{ж2}$

$$Q = k(t_{ж1} - t_{ж2})F, \quad (1.11)$$

где k — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К), характеризует тепловой поток Q , проходящий через единицу площади F поверхности стенки при разности температур сред, равной 1 К.

Коэффициент теплопередачи для n -слойной стенки

$$k = \left[\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right]^{-1}, \quad (1.12)$$

где α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи на внешних поверхностях стенки, Вт/(м²·К).

В формуле (1.12) представлены следующие термические сопротивления R , м²·К/Вт:

термические сопротивления теплоотдачи на внешних поверхностях стенки

$$\frac{1}{\alpha_1} = R_1 \text{ и } \frac{1}{\alpha_2} = R_2;$$

суммарное сопротивление теплопроводности n слоев стенки

$$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} = R_c;$$

общее сопротивление теплопередачи

$$R_0 = \frac{1}{k} = R_1 + R_c + R_2.$$

Значение R_0 всегда больше наибольшего из отдельных термических сопротивлений, и для интенсификации процесса теплопередачи следует стремиться уменьшить это наибольшее сопротивление. Если отдельные термические сопротивления имеют примерно одинаковые значения, то общее сопротивление будет снижаться при уменьшении каждого из них.

При расчете многослойных стенок можно воспользоваться эквивалентным коэффициентом теплопроводности

$$\lambda_{\text{экв}} = \sum_{i=1}^{i=n} \delta_i \left/ \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right., \quad (1.13)$$

где δ_i — толщина i -го слоя, м; λ_i — теплопроводность материала i -го слоя, Вт/(м·К).

Плотность теплового потока для многослойной стенки

$$q = \lambda_{\text{экв}} (t_{c1} - t_{c(n+1)}) \left/ \sum_{i=1}^{i=n} \delta_i \right. \quad (1.14)$$

1.3. Цилиндрическая стенка

Температурное поле в однородной бесконечной стенке с наружным и внутренним диаметрами соответственно d_2 и d_1 и $\lambda = \text{const}$

$$t = t_{c1} - (t_{c1} - t_{c2}) \ln \frac{d}{d_1} \left/ \ln \frac{d_2}{d_1} \right., \quad (1.15)$$

где t_{c1} и t_{c2} — температуры на внутренней и наружной поверхностях стенки; d — текущий диаметр цилиндрической поверхности, для которой определяется температура t .

Температурное поле в стенке с учетом температурной зависимости теплопроводности $\lambda_t = \lambda_0(1 + bt)$

$$t = \left[\left(\frac{1}{b} + t_{c1} \right)^2 - \frac{Q}{\pi b \lambda_0 l} \ln \frac{d}{d_1} \right]^{0.5} - \frac{1}{b}, \quad (1.16)$$

где l — длина цилиндрической стенки.

Формула теплопроводности для стенки, составленной из n цилиндрических слоев,

$$Q = \pi l (t_{c1} - t_{c(n+1)}) \left/ \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right., \quad (1.17)$$

где t_{c1} и $t_{c(n+1)}$ — температуры на внутренней и внешней поверхностях многослойной стенки соответственно; d_i и d_{i+1} — внутренний и внешний диаметры i -го слоя стенки.

Температура на границе между i -м и $(i+1)$ -м плотно прилегающими слоями многослойной стенки

$$t_{c(i+1)} = t_{c1} - \frac{Q}{\pi l} \sum_{k=1}^{k=i} \frac{1}{2\lambda_k} \ln \frac{d_{k+1}}{d_k}. \quad (1.18)$$

Формула теплопередачи между двумя средами с температурами $t_{ж1}$ и $t_{ж2}$

$$Q = \pi k_l (t_{ж1} - t_{ж2}) l. \quad (1.19)$$

Линейный коэффициент теплопередачи k_l , Вт/(м·К), в формуле (1.19) для n -слойной стенки

$$k_l = \left[\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}} \right]^{-1}, \quad (1.20)$$

где α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи на внутренней и внешней поверхностях стенки соответственно.

Термические сопротивления, представленные в формуле (1.20), R , м·К/Вт:

сопротивления теплоотдачи на внутренней и внешней поверхностях стенки соответственно

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1 d_1} \quad \text{и} \quad R_2 = \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}$$

суммарное сопротивление теплопроводности n слоев стенки

$$R_c = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i};$$

общее сопротивление теплопередачи цилиндрической стенки

$$R_0 = \frac{1}{k_l} = R_1 + R_c + R_2.$$

При расчете многослойных стенок используется эквивалентный коэффициент теплопроводности

$$\lambda_{\text{эКВ}} = \sum_{i=1}^{i=n} \ln \left(\frac{d_{i-1}}{d_i} \right) \left/ \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i-1}}{d_i} \right. \quad (1.21)$$

Проверка пригодности материала изоляции для уменьшения тепловых потерь от трубопровода в окружающую среду производится по критическому диаметру

$$d_{\text{кр}} = 2\lambda_{\text{из}}/\alpha_2, \quad (1.22)$$

где $\lambda_{\text{из}}$ — теплопроводность материала изоляции; α_2 — коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности в окружающую среду

Если $d_{\text{кр}} < d_2$ (d_2 — наружный диаметр неизолированного трубопровода), то покрытие трубопровода такой изоляцией будет снижать теплотери в окружающую среду. Если $d_{\text{кр}} > d_2$, то применение такого теплоизоляционного материала нецелесообразно и следует подобрать другой материал или применить многослойную изоляцию.

Условие выбора теплоизоляционного материала для снижения тепловых потерь от трубопровода, покрытого слоем изоляции:

$$\lambda_{\text{из}} < 0,5\alpha_2 d_2. \quad (1.23)$$

Толщина изоляционного слоя определяется из (1.19), (1.20).

1.4. Шаровая стенка

Температурное поле в однородной стенке при $\lambda = \text{const}$

$$t = t_{c1} - (t_{c1} - t_{c2}) \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d} \right) \left/ \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) \right., \quad (1.24)$$

где t_{c1} и t_{c2} — температуры на внутренней и внешней поверхностях шаровой стенки; d_1 и d_2 — внутренний и наружный диаметры шаровой стенки; d — текущий диаметр сферической поверхности, на которой определяется температура t .

Температурное поле в однородной шаровой стенке при учете температурной зависимости теплопроводности $\lambda_i = \lambda_0(1+bt)$

$$t = \left[\left(\frac{1}{b} + t_{c1} \right)^2 - \frac{Q}{\pi b \lambda_0} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d} \right) \right]^{0,5} - \frac{1}{b}. \quad (1.25)$$

Формула теплопроводности для шаровой стенки, составленной из n слоев,

$$Q = 2\pi(t_{c1} - t_{c(n+1)}) \left/ \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{\lambda_i} \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_{i+1}} \right) \right. \quad (1.26)$$

Теплопередача между двумя средами с температурами $t_{ж1}$ и $t_{ж2}$

$$Q = \pi k_{ш} (t_{ж1} - t_{ж2}). \quad (1.27)$$

Коэффициент теплопередачи для многослойной стенки, Вт/К,

$$k_{ш} = \left[\frac{1}{\alpha_1 d_1^2} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\lambda_i} \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_{i+1}} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}^2} \right]^{-1}, \quad (1.28)$$

или

$$k_{ш} = [R_1 + R_c + R_2]^{-1} = R_0^{-1}, \quad (1.28a)$$

где R_1 и R_2 — термические сопротивления теплоотдачи; R_c — суммарное термическое сопротивление теплопроводности n слоев стенки; R_0 — общее термическое сопротивление теплопередачи, К/Вт.

1.5. Задачи

1.1. Стена из силикатного кирпича толщиной 250 мм имеет с одной стороны температуру -30°C , а с другой — температуру $+20^\circ\text{C}$. Найти плотность теплового потока через стену и глубину ее промерзания до температуры 0°C , считая коэффициент теплопроводности материала стены постоянным.

1.2. Лед на реке имеет толщину 300 мм и покрыт слоем снега толщиной 200 мм. Температура на наружной поверхности снега -15°C , а на поверхности льда, обращенной к воде, 0°C . Найти плотность теплового потока через эти два слоя.

1.3. Плоскую поверхность с температурой 400°C надо изолировать пеношамотом так, чтобы потери теплоты не превышали 450 Вт/м^2 при температуре на внешней поверхности изоляции 43°C . Найти толщину слоя изоляции.

1.4. Оконная рама состоит из двух слоев стекла толщиной по 5 мм каждый. Между стеклами находится слой сухого неподвижного воздуха толщиной 6 мм со средней температурой 0°C . Площадь поверхности окна $4,5 \text{ м}^2$. Определить потерю теплоты теплопроводностью через окно, если разность температур на внешних поверхностях стекол 25°C .

1.5. Стальная труба диаметром $45 \times 2,5 \text{ мм}$ * покрывается снаружи

* Здесь и в последующем — наружный диаметр и толщина стенки трубы.

и внутри слоем эмали толщиной по 0,5 мм [$\lambda_{эм} = 1,05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$]. Во сколько раз увеличится термическое сопротивление стенки после эмалирования? Расчет сделать по формулам для плоской стенки.

1.6. Сосуд, наполненный жидким газом, имеет на наружной поверхности температуру -190°C . Он покрывается слоем шлаковаты толщиной 250 мм. Температура воздуха в помещении 20°C . Какой тепловой поток пройдет через 1 м^2 изоляции, если пренебречь термическим сопротивлением теплоотдачи со стороны воздуха?

1.7. Печь изнутри выложена dinasовым кирпичом, за которым следует слой красного кирпича толщиной 250 мм и, наконец, снаружи — слой силикатного кирпича толщиной 60 мм. На внутренней поверхности печи температура 1150°C , на наружной 60°C . Какова должна быть толщина слоя dinasового кирпича, чтобы температура красного кирпича не превышала 820°C ? Найти температуру на внутренней поверхности слоя силикатного кирпича.

1.8. Стенка опытной установки покрыта снаружи изоляционным слоем толщиной 260 мм. Она обогревается изнутри так, что на наружной поверхности изоляции поддерживается температура 35°C . Для изучения тепловых потерь в изоляцию на глубину 50 мм от наружной поверхности заделана термопара, которая показала 70°C . Определить температуру на поверхности контакта стенки и изоляции.

1.9. Найти эквивалентный коэффициент теплопроводности (в поперечном направлении) для плоского конденсатора, который собран из z листов алюминиевой фольги толщиной 0,02 мм и z листов изоляционной бумаги, имеющей теплопроводность $\lambda_б = 0,18 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ и толщину листа 0,05 мм.

1.10. Для проведения испытаний смонтирована сборка из пяти стальных листов толщиной 0,5 мм каждый. Между листами проложены прокладки изоляционной бумаги толщиной по 0,05 мм и теплопроводностью $\lambda_б = 0,116 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Найти эквивалентную теплопроводность $\lambda_{экв}$ сборки (в поперечном направлении). Как изменится $\lambda_{экв}$, если учесть, что между слоями имеются воздушные зазоры толщиной 0,001 мм (температура воздуха 20°C)?

1.11. Нагреватель и холодильник имеют соответственно температуры 200 и 0°C . Между их поверхностями зажат диск диаметром 150 мм и толщиной 25 мм, сквозь который проходит тепловой поток 60 Вт. Между поверхностями нагревателя, диска и холодильника имеются воздушные зазоры толщиной 0,1 мм. Пренебрегая лучистым теплообменом и потерями теплоты, найти теплопроводность материала диска с учетом и без учета воздушных зазоров. Теплопроводность воздуха в зазорах определить по температурам нагревателя и холодильника.

1.12. Стенка холодильной камеры сделана из пробковой плиты толщиной 100 мм и обшита с обеих сторон сосновыми досками толщиной 15 мм каждая. На внешних поверхностях досок температуры соответственно: $+20$ и -12°C . Определить потери теплоты через 1 м^2 по-

верхности стенки и температуры на обеих поверхностях пробковой плиты. Где в пробковой плите располагается изотермическая поверхность с $t=0^\circ\text{C}$?

1.13. К медному стержню диаметром 20 мм и длиной 200 мм с одного конца через торец подводится теплота. Другой конец охлаждается потоком воды, которая при расходе 0,0167 кг/с нагревается от стержня на 2°C . Найти перепад температур между концами стержня, приняв, что через боковую поверхность стержня тепловые потери отсутствуют.

1.14. Алюминиевый брусок квадратного сечения длиной 180 мм зажат торцами между нагревателем и холодильником, температуры которых соответственно 400 и 10°C . Найти термическое сопротивление и сторону квадратного сечения бруска, если по бруску передается тепловой поток 176,8 Вт, а тепловые потери с боковой поверхности бруска отсутствуют.

1.15. Рассчитать толщину слоя изоляции, имеющего на поверхности температуру соответственно 600 и 40°C , если допустимые тепловые потери 366 Вт/м^2 , а теплопроводность материала изоляции $\lambda_t = (0,11 + 0,000065t) \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Найти температуры в слое изоляции через каждые 50 мм его толщины и построить температурный график.

1.16. Слой изоляции толщиной 0,09 м имеет на поверхностях температуры 570 и 30°C . Найти плотность теплового потока через этот слой, если его теплопроводность, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\lambda_t = 0,12(1 + 0,00123t)$. Найти температуры в слое через 30 мм по его толщине для двух случаев: а) $\lambda_t = f(t)$; б) $\lambda = \text{const}$, определен по средней температуре слоя. Построить графики распределения температур в слое.

1.17. Паропровод с внешним диаметром 80 мм и температурой на наружной поверхности 180°C покрывается слоем минеральной ваты толщиной 50 мм. Найти суточную потерю теплоты паропроводом длиной 30 м, если температура на наружной поверхности изоляции 32°C .

1.18. Паропровод с наружным диаметром 100 мм покрыт слоем изоляции толщиной 80 мм и теплопроводностью, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\lambda_t = (0,14 + 0,00016t)$. На поверхностях слоя температуры 170 и 30°C . Найти потери теплоты через изоляцию, если длина паропровода 15 м.

1.19. Кварцевая трубка диаметром $2,7 \times 1 \text{ мм}$ и длиной 100 мм заполнена жидкостью. Вдоль трубки по центру расположена платиновая нить диаметром 0,1 мм, нагреваемая электрическим током. Измерения показали: температура нити 221°C , на внешней поверхности трубки 206°C , тепловой поток от нагретой нити через слой жидкости 2,5 Вт. Найти теплопроводность и среднюю температуру жидкости в трубке. Теплопроводность кварца принять $1,58 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

1.20. Рассчитать допустимую силу тока по алюминиевому проводу, покрытому резиновой изоляцией толщиной 1 мм, при условии, что снаружи на изоляции температура 50°C , а на внутренней поверхности —

не более 70°C . Диаметр провода 2 мм, удельное электросопротивление алюминия равно $3,28 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

1.21. Трубу покрывают двумя слоями изоляции из разных материалов, но одинаковой толщины. Первый слой, лежащий на трубе, имеет коэффициент теплопроводности в 3 раза больше, чем второй. Наружный диаметр неизолированной трубы в 6 раз больше толщины одного слоя изоляции. В какую сторону и во сколько раз изменятся тепловые потери с 1 м длины трубопровода, если слои изоляции поменять местами?

1.22. Труба диаметром 60×3 мм и длиной 5 м покрыта слоем пробковой плиты толщиной 30 мм и сверху еще слоем совелита толщиной 40 мм. На стенке трубы снаружи температура -110°C , а на наружной поверхности совелита $+10^{\circ}\text{C}$. Определить потерю холода за сутки. Сколько будет потеряно холода, если слои поменять местами? Значения температур и толщин слоев сохранить.

1.23. Стальной паропровод диаметром 150×5 мм имеет на внутренней поверхности температуру 300°C . Его надо покрыть двумя слоями изоляции, причем температура наружной поверхности изоляции не должна превышать 50°C . Для изоляции предлагаются: слой А толщиной 20 мм и теплопроводностью $\lambda_A = 0,037$ Вт/(м·К) и слой Б толщиной 40 мм и теплопроводностью $\lambda_B = 0,14$ Вт/(м·К). В какой последовательности надо расположить эти слои на паропроводе, чтобы получить минимальные тепловые потери?

1.24. Электронагреватель мощностью 1,7 кВт находится внутри фарфоровых труб, диаметр которых 20×3 мм, а общая длина 7 м. На внутренней поверхности труб температура 140°C . Трубы опущены в раствор, температура кипения которого 130°C . Будет ли происходить кипение раствора на поверхности труб?

1.25. По стеклянному трубопроводу диаметром 56×3 мм после тепловой обработки движется молоко со скоростью 0,5 м/с. Теплоемкость молока $3,84$ кДж/(кг·К), плотность 1030 кг/м³. На внутренней поверхности трубы температура $74,5^{\circ}\text{C}$. Определить температуру на наружной поверхности трубы, если на каждые 10 м длины трубопровода температура молока снижается на 1°C .

1.26. Бетонные трубы, имеющие диаметр 150×25 мм, надо проложить в грунте. Температура грунта на внешней поверхности трубы может снизиться до $-1,82^{\circ}\text{C}$. Жидкость в трубах замерзает при температуре $-0,5^{\circ}\text{C}$. Можно ли прокладывать трубы без теплоизоляции, если линейная плотность теплового потока через стенку трубы равна $21,7$ Вт/м?

1.27. Корпус аппарата шаровой формы выполнен из титана и имеет наружный диаметр 1 м и толщину стенки 100 мм. Он покрыт изнутри пенопластом толщиной 8 см. Найти температуры на поверхностях слоя пенопласта, если температурный перепад на двухслойной стенке 120°C ,

тепловой поток проходит внутрь аппарата. Снаружи на титановой стенке температура 5°C .

1.28. Стенка теплообменника из стали толщиной 5 мм покрыта снаружи изоляцией из шлаковаты толщиной 50 мм. В теплообменнике — жидкость с температурой 100°C , а температура наружного воздуха 10°C . Коэффициенты теплоотдачи: со стороны жидкости $\alpha_1 = 240 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, со стороны воздуха $\alpha_2 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Найти температуры на поверхностях стенки и изоляции и проанализировать влияние термических сопротивлений теплопроводности и теплоотдачи на потери теплоты.

1.29. Найти толщину слоя шлаковаты, которым надо изолировать плоскую стенку от окружающей среды, чтобы уменьшить потери теплоты в 2 раза по сравнению с неизолированной стенкой. Температура наружной поверхности стенки после наложения изоляции не изменилась. Коэффициент теплоотдачи в окружающую среду принять в обоих случаях $\alpha = 16 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

1.30. Определить коэффициент теплопередачи в теплообменнике, выполненном из стальных труб диаметром 320×5 мм, для случаев: а) чистая поверхность труб; б) на поверхностях труб ржавчина толщиной 0,5 мм и слой накипи толщиной 2 мм. Коэффициент теплоотдачи с одной стороны стенки $\alpha_1 = 7000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а с другой $\alpha_2 = 10\,000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Решить задачу по формулам для плоской стенки.

1.31. Металлический корпус аппарата имеет на плоской наружной поверхности температуру 500°C . Корпус снаружи покрывается сначала слоем диатомового кирпича толщиной 125 мм, а потом новоасбозуритом. Рассчитать толщину слоя новоасбозурита, необходимую для того, чтобы на наружной поверхности этого слоя температура не превышала 45°C . Температура воздуха в помещении, где находится аппарат, 25°C , а коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха $\alpha_2 = 13 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Найти температуру на поверхности контакта между новоасбозуритом и кирпичом.

1.32. В теплообменнике — стальные трубы с толщиной стенки 8 мм. На поверхностях труб ржавчина толщиной 2 мм и отложение накипи толщиной 3 мм. Если считать, что коэффициенты теплоотдачи с обеих сторон стенки трубы очень велики, чему будет равен наибольший возможный коэффициент теплопередачи?

1.33. В паровом подогревателе на стальных трубках с толщиной стенки 4 мм конденсируется водяной пар давлением 476 кПа. Внутри труб греется вода при средней температуре 30°C . Коэффициенты теплоотдачи: для пара $\alpha_1 = 13\,000$, для воды $\alpha_2 = 3500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. На поверхностях трубок с одной стороны слой накипи толщиной 2 мм, с другой — слой ржавчины толщиной 1 мм. Найти температуры на поверхностях всех слоев и построить температурный график.

1.34. По данным предыдущей задачи найти температуры на поверхностях всех слоев, если вместо воды греется воздух с коэффициентом

том теплоотдачи $\alpha_2=50 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Остальные условия — без изменений. Построить температурный график и сравнить его с графиком предыдущей задачи.

1.35. В газоводяном охладителе коэффициент теплоотдачи со стороны газа $\alpha_1=58$, со стороны воды $\alpha_2=580 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. В выпарном аппарате со стороны греющего пара $\alpha_1=11\,000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, а со стороны кипящего раствора $\alpha_2=2800 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. В обоих теплообменниках стальные трубы с толщиной стенки 3 мм покрываются с одной стороны слоем накипи толщиной 2 мм. Как изменится в этих аппаратах коэффициент теплопередачи по сравнению с чистыми трубами? Расчет сделать по формулам для плоской стенки.

1.36. Как изменится коэффициент теплопередачи, если заменить стальные трубы диаметром $38\times 2,5$ мм на медные такого же размера для следующих теплообменников: а) для воздушно-парового калорифера, в котором коэффициенты теплоотдачи $\alpha_1=11\,000$ и $\alpha_2=40 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; б) для выпарного аппарата, где коэффициенты теплоотдачи $\alpha_1=11\,000$ и $\alpha_2=2300 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$? Расчет произвести по формулам для плоской стенки.

Таблица к задаче 1.37

Вариант	Материал изоляции	$\delta_{\text{из}}, \text{ мм}$	$t_{\text{ж2}}, \text{ }^\circ\text{С}$	$\alpha_2, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$	Вариант	$t_{\text{ж1}}, \text{ }^\circ\text{С}$	$\alpha_1, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$
1	Асбест	100	27	25	а	1500	120
2	Шлаковата	90	30	30	б	1400	130
3	Совелит	60	32	35	в	1300	140
4	Асбозурит	70	35	40	г	1200	150
5	Ньювель	50	25	45	д	1100	160
6	Стекловата	40	20	50	е	1000	170
7	Бетон	110	17	42	ж	1250	180
8	Новоасбозурит	80	15	37	з	1350	110

1.37. В нагревательной печи, где температура газов $t_{\text{ж1}}$, стенка сделана из трех слоев: dinasового кирпича толщиной 60 мм, красного кирпича толщиной 250 мм и снаружи слоя изоляции толщиной $\delta_{\text{из}}$. Воздух в цехе имеет температуру $t_{\text{ж2}}$. Коэффициент теплоотдачи в печи от газов к стенке α_1 , снаружи от изоляции к воздуху α_2 . Найти коэффициент теплопередачи от газов к воздуху, потери теплоты через стенку, температуры на поверхностях всех слоев. Построить график температур в стенке. Данные для решения взять из таблицы.

1.38. Газы при температуре $t_{\text{ж1}}$ передают через стенку площадью F теплоту воде, имеющей температуру $t_{\text{ж2}}$. Коэффициенты теплоотдачи от газов к стенке α_1 и от стенки к воде α_2 . Определить все термические сопротивления, коэффициент теплопередачи и тепловой поток, передаваемый от газов к воде, для случаев: а) стенка чистая толщиной

$\delta_{ст}$ из стали¹; б) стальная стенка покрыта со стороны воды слоем накипи толщиной δ_n и со стороны газов — слоем сажи толщиной δ_c . Найти также для случая б) температуры всех слоев стенки расчетным и графическим способами и нарисовать температурный график. Данные для решения взять из таблицы.

1.39. По чугунному трубопроводу диаметром $60 \times 3,5$ мм движется пар с температурой 325°C . Коэффициент теплоотдачи от пара к трубе $\alpha_1 = 110$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$); Окружающий наружный воздух имеет температуру 20°C Найти тепловые потери: а) если трубопровод не изолирован и охлаждается воздухом с коэффициентом теплоотдачи $\alpha_2 = 25$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$); б) если трубопровод изолирован слоем пеношамота толщиной 70 мм, а α_2 равен 15 Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$).

Таблица к задаче 1.38

Вариант	$t_{ж1}, ^\circ\text{C}$	$F, \text{ м}^2$	$t_{ж2}, ^\circ\text{C}$	Вариант	$\delta_{ст}, \text{ мм}$	$\alpha_1, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$	$\alpha_2, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$	$\delta_n, \text{ мм}$	$\delta_c, \text{ мм}$
1	600	2,0	120	а	16	40	1400	7	2,0
2	500	3,0	130	б	18	50	1600	1	3,0
3	450	4,0	140	в	14	60	1500	2	1,0
4	400	3,5	120	г	12	70	2200	5	0,8
5	350	2,5	130	д	10	80	2400	3	1,2
6	300	5,5	140	е	22	90	1800	8	0,5
7	550	6,0	190	ж	15	100	3500	2	2,5
8	520	7,0	150	з	12	110	4200	4	0,9
9	480	8,0	170	и	14	120	5000	5	1,2
10	330	5,0	160	к	16	130	4600	6	1,5

1.40. В установке для тепловой переработки нефти по титановой трубе диаметром 118×4 мм движутся нефтепродукты со средней температурой 350°C . Снаружи труба греется газом, имеющим температуру 1400°C . Коэффициенты теплоотдачи на поверхностях снаружи и внутри трубы равны соответственно $\alpha_1 = 100$ и $\alpha_2 = 300$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$). Найти линейный коэффициент теплопередачи, линейную плотность теплового потока через стенку трубы, температуры на поверхностях: а) для чистой стенки, б) при условии, что на внутренней поверхности появился слой пористых отложений, пропитанных нефтепродуктами, толщиной 5 мм.

1.41. Для уменьшения потерь теплоты от паропровода диаметром 20×1 мм предлагаются изоляционные материалы: асбест и стекловата. Какой материал целесообразнее принять в качестве изоляции, если от поверхности изоляции к окружающей среде коэффициент теплоотдачи $\alpha_2 = 10$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$)?

1.42. Найти потери теплоты от чугунного паропровода диаметром 100×8 мм, по которому течет пар с температурой 200°C . Коэффициент

¹ Возможны варианты материала стенки — чугун, титан, алюминий

теплоотдачи от пара к стенке $\alpha_1 = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температура наружного воздуха 20°С , а коэффициент теплоотдачи к воздуху $\alpha_2 = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Каковы будут потери теплоты, если паропровод покрыть слоем бетона толщиной 40 мм, а коэффициент теплоотдачи к воздуху оставить прежним? Дать объяснение результатов.

1.43. Паропровод из титана диаметром $57 \times 3,5$ мм и длиной 50 м имеет на внутренней поверхности температуру 160°С . Он покрыт слоем вермикулита толщиной 60 мм с температурой 40°С на наружной поверхности слоя. Найти суточную потерю теплоты паропроводом. Проверить пригодность материала изоляции для уменьшения тепловых потерь, приняв коэффициент теплоотдачи от изоляции к окружающему воздуху равным $\alpha_2 = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

1.44. По условию предыдущей задачи изолированная вермикулитом титановая труба покрывается внутри слоем накипи толщиной 1 мм. Найти суточную потерю теплоты паропроводом и сравнить с ответом предыдущей задачи. Температурный перепад оставить без изменений.

Т а б л и ц а к задаче 1.45

Вариант	Слой изоляции	d_n , мм	l , м	$\bar{t}_{ж1}$, $^\circ\text{С}$	Вариант	δ_A , мм δ_B , мм	$t_{из}$, $^\circ\text{С}$
1	А—асбослюда, Б—бетон	1000	40	500	а	200 250	50
2	А—вермикулит, Б—асбест	1200	90	600	б	300 180	60
3	А—пеношамот, Б—вермикулитовые плиты	1050	80	750	в	250 350	55
4	А—шлаковата, Б—асбест	720	70	700	г	210 310	45
5	А—совелит, Б—вата минеральная	950	60	450	д	180 220	40

1.45. По стальному трубопроводу наружным диаметром d_n и толщиной 25 мм протекает газ со средней температурой $\bar{t}_{ж1}$ и коэффициентом теплоотдачи в трубе $\alpha_1 = 35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Снаружи труба покрыта двумя слоями изоляции: слоем А толщиной δ_A (на поверхности трубы) и слоем Б толщиной δ_B . На внешней поверхности изоляции температура $t_{из}$. Определить потери теплоты трубопроводом длиной l и температуру на поверхности контакта между слоями изоляции. Как изменятся потери теплоты, если слои изоляции поменять местами? Данные для решения задачи взять из таблицы.

1.46. В цех из котельной подают горячую воду по стальной трубе диаметром $58 \times 3,5$ мм со скоростью 1,2 м/с. Вода входит в трубу с температурой 90°C и имеет средний коэффициент теплоотдачи $\alpha_1 = 2000$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$). К наружному воздуху с температурой 2°C теплота от трубы переходит с коэффициентом теплоотдачи $\alpha_2 = 35$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$). Какую теплопроводность должна иметь изоляция на трубе, чтобы при ее толщине 21 мм падение температуры воды от котельной до цеха, между которыми расстояние 120 м, не превышало 2°C ?

1.47. Оголенный электропровод диаметром 2 мм имеет на поверхности температуру 90°C и коэффициент теплоотдачи $\alpha = 22$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$) к свободному потоку воздуха в помещении, температура которого равна 18°C . Когда провод покрыли резиновой изоляцией толщиной 3 мм, коэффициент теплоотдачи уменьшился в 2 раза. Какая температура будет теперь на поверхности провода, если сила тока не изменилась?

1.48. Варочный котел сферической формы с наружным диаметром 1200 мм сделан из нержавеющей стали. Толщина стенки котла 10 мм. Внутри находится жидкость с температурой 140°C ; снаружи котел покрыт слоем асбеста толщиной 60 мм. В цехе температура воздуха 29°C . Коэффициент теплоотдачи внутри и снаружи котла $\alpha_1 = 600$ и $\alpha_2 = 18$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$) соответственно. После включения вентиляции в цехе температура воздуха снизилась до 23°C , а коэффициент теплоотдачи α_2 от наружной поверхности котла увеличился в 1,6 раза. На сколько процентов возросли потери теплоты от котла?

1.49. Стальной трубопровод диаметром 200×8 мм проложен на открытом воздухе, температура которого равна -17°C . Внутри трубы движется вода со средней температурой 93°C , а коэффициент теплоотдачи от воды к трубе $\alpha_1 = 820$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$). Определить потерю теплоты трубопроводом, если его длина 23 м, а коэффициент теплоотдачи от трубы к окружающему воздуху $\alpha_2 = 9$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$).

1.50. По условию задачи 1.49 вычислить тепловые потери, если трубопровод покрывается слоем битума толщиной 50 мм и теплопроводностью $\lambda = 0,1$ Вт/($\text{м} \cdot \text{K}$), а коэффициент теплоотдачи к окружающему воздуху уменьшился до $\alpha_2 = 7$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{K}$). Определить температуры на внешней и внутренней поверхностях изоляции.

Глава вторая

ТЕПЛООБМЕН НА РЕБРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для интенсификации теплопередачи между двумя средами применяют оребрение поверхностей стенки, разделяющей эти среды. Как правило, оребрение осуществляется на той поверхности теплообмена, где имеет место малый коэффициент теплоотдачи (или большое термическое сопротивление).

2.1. Плоская стенка с прямыми ребрами постоянного поперечного сечения

Основные параметры ребристой стенки (рис. 2.1): l, h, δ — длина, высота, толщина ребра; $\Pi=2(l+\delta)$ — периметр ребра; $f=l\delta$ — площадь сечения ребра, b — шаг ребер; B, δ_c — ширина и толщина плоской стенки; $t_{ж1}, t_{ж2}$ — температуры сред, окружающих стенку, $t_{ж1} > t_{ж2}$; α_p, α_r — коэффициенты теплоотдачи от поверхности ребра и от гладкой поверхности стенки к окружающей среде; t_0, t_k — температуры ребра у основания и на его конце

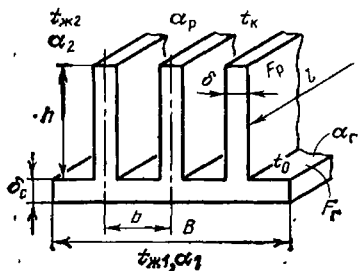


Рис. 2.1. Плоская ребристая стенка

$m = \sqrt{\alpha_p \Pi / \lambda f}$ — параметр, m^{-1} , $\text{th}(mh) = (1 - e^{-2mh}) / (1 + e^{-2mh})$ — тангенс гиперболический; λ — теплопроводность материала ребра, Вт/(м·К).

Тепловой поток Q_r , Вт, с гладкой поверхности F_r стенки в промежутках между ребрами

$$Q_r = \alpha_r (t_0 - t_{ж2}) F_r = \alpha_r (t_0 - t_{ж2}) (1 - n\delta) B l, \quad (2.2)$$

где n — количество ребер на 1 м ширины стенки; l — длина стенки (длина ребра), м.

Суммарный тепловой поток Q_0 при теплоотдаче с оребренной поверхности стенки

$$Q_0 = n B Q_p + Q_r. \quad (2.3)$$

Тепловой поток, обусловленный теплопередачей между двумя средами, разделенными плоской стенкой, имеющей оребрение с одной стороны,

$$Q = \frac{(t_{ж1} - t_{ж2}) F}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_r + \alpha_p E (k_p - 1)}}, \quad (2.4)$$

где F — площадь неоребренной поверхности стенки, m^2 ; α_1 — коэффициент теплоотдачи на неоребренной поверхности стенки, Вт/($m^2 \cdot K$); λ_c — теплопроводность материала стенки, Вт/(м·К); E — коэффициент эффективности ребра; k_p — коэффициент оребрения.

Коэффициент эффективности ребра E является его рабочей характеристикой и представляет собой отношение теплового потока, действительно рассеиваемого ребром в окружающую среду, к тепловому потоку, который ребро могло бы отдать, если бы вся его поверхность находилась при температуре t_0 .

$$E = (\bar{i} - t_{ж2}) / (t_0 - t_{ж2}) \leq 1 \quad (2.5)$$

или, пренебрегая теплоотдачей с торца ребра,

$$E = th(mh) / (mh) \leq 1, \quad (2.5a)$$

где \bar{i} — средняя температура поверхности ребра.

Повышения теплосъема ребра можно добиться при уменьшении th .
Коэффициент оребрения

$$k_p = F_{p.r} / F \geq 1, \quad (2.6)$$

где $F_{p.r}$ — суммарная площадь оребренной поверхности стенки, м².

В формуле (2.4) можно положить $\alpha_r = \alpha_p = \alpha_2$, тогда тепловой поток при теплопередаче через оребренную стенку

$$Q = \frac{(t_{ж1} - t_{ж2})F}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2 [1 + E(k_p - 1)]}}, \quad (2.7)$$

а коэффициент эффективности тонкого ребра (в предположении, что $\delta \ll l$ и $\Pi = 2l$) можно определить из зависимости

$$E = th A / A, \quad (2.8)$$

где $A = h(2\alpha_p / \lambda \delta)^{0,5}$, или из графика рис. 2.2.

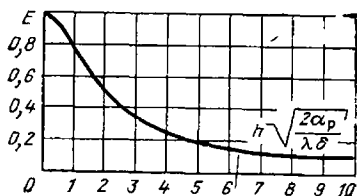


Рис. 2.2. Коэффициент эффективности E ребра

Для учета теплоотдачи с торцевой поверхности ребра необходимо высоту ребра h увеличить на 0,5 δ .

Температура t_k на конце ребра

$$t_k = t_0 / ch(mh) \quad \text{или} \quad (t_k - t_{ж2}) = (t_0 - t_{ж2}) / ch(mh), \quad (2.9)$$

где t_k и t_0 — избыточные температуры на конце ребра и у его основания, К; $ch(mh) = 0,5(e^{mh} + e^{-mh})$ — косинус гиперболический.

2.2. Цилиндрическая стенка с круглым ребром постоянной толщины

Расчет теплопередачи через трубу, оребренную снаружи кольцевыми ребрами (рис. 2.3), можно проводить по формулам (2.7) и (2.8), принимая $h=R-r$ и умножая коэффициент эффективности E на поправочный коэффициент ϵ_k , который определяется по графику рис. 2.4.

Коэффициент эффективности круглого ребра

$$E_k = \epsilon_k \operatorname{th}(mh_{эф}) / (mh_{эф}), \quad (2.10)$$

где ϵ_k — коэффициент, определяемый по графику рис. 2.4 в зависимости от ϑ_k/ϑ_0 и R/r ; $h_{эф} = h + 0,5\delta$ — эффективная высота ребра, м; $\vartheta_k/\vartheta_0 = [\operatorname{ch}(mh_{эф})]^{-1}$ — отношение избыточных температур на конце и у основания ребра.

Параметр m определяется из выражения

$$m = \sqrt{\alpha_p \Pi / (\lambda f)} = \sqrt{\alpha_p \cdot 4\pi R / (\lambda \cdot 2\pi R \delta)} = \sqrt{2\alpha_p / (\lambda \delta)}.$$

2.3. Задачи

2.1. Найти коэффициент эффективности прямого ребра постоянного поперечного сечения толщиной 2 мм и длиной 20 мм на плоской стенке, если ребро выполнено: а) из титана, б) из чугуна, в) из меди. Условия теплообмена одинаковые, коэффициент теплоотдачи с поверхности ребра $100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Высота ребра 6 мм.

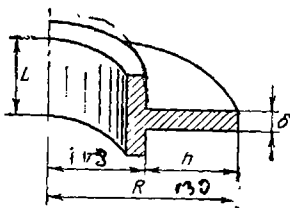


Рис. 2.3. Круглое ребро постоянной толщины

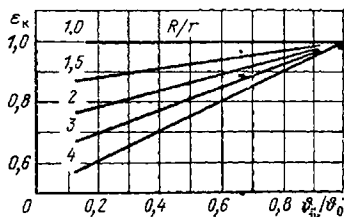


Рис. 2.4. Зависимость $\epsilon_k = \varphi(\vartheta_k/\vartheta_0; R/r)$ для круглого ребра

2.2. На плоской алюминиевой стенке холодильной камеры размером 500×200 мм расположено 20 ребер толщиной 2 мм и высотой 30 мм. Ребра расположены вдоль стенки на всю длину 500 мм. Температура у основания ребра $t_0 = 50^\circ \text{C}$, температура окружающей среды $t_{ж2} = 10^\circ \text{C}$. Коэффициент теплоотдачи от поверхности ребер (и от поверхности стенки между ребрами) к окружающей среде принять $\alpha_2 = 7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Найти температуру на конце ребра и теплоту, отдаваемую ребристой стенкой и стенкой при отсутствии ребер.

2.3. Медное ребро постоянного сечения на плоской стенке имеет толщину 3 мм, высоту 40 мм и длину 1 м. Измерения показали: тем-

пература у основания $t_0=60^\circ\text{C}$, а на конце ребра $t_K=59,5^\circ\text{C}$. Окружающий воздух находится при температуре 20°C . Определить коэффициент теплоотдачи от поверхности ребра.

2.4. Используя условие задачи 2.3, определить тепловой поток, передаваемый в окружающую среду четырьмя боковыми оребренными стенками холодильника. Каждая стенка размером $1\times 0,8$ м имеет 40 ребер. Найти также тепловой поток, который переходил бы в окружающую среду от неоребренных стенок, если считать коэффициенты теплоотдачи от ребер и от поверхности стенки между ребрами одинаковыми.

2.5. Для измерения температуры воздуха в резервуаре (рис. 2.5) ртутный термометр вставляется в круглую стальную гильзу, заполненную маслом. Гильза имеет следующие размеры: длина $l=130$ мм, толщина $\delta=1,5$ мм. Из-за отвода теплоты по гильзе термометр показывает не истинную температуру воздуха в резервуаре, а температуру конца гильзы, равную 80°C . От воздуха в резервуаре к гильзе теплота передается с коэффициентом теплоотдачи, равным 18 Вт/(м²·К). У основания гильзы температура стенки $t_0=35^\circ\text{C}$. Найти действительную температуру воздуха в резервуаре t_d и ошибку Δt в измерении температуры термометром.

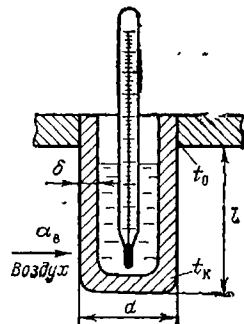


Рис. 2.5. К задаче 2.5

2.6. Используя условие задачи 2.5, установить, какова будет ошибка Δt в измерении действительной температуры: 1) если стальная гильза заменяется на гильзу: а) из латуни; б) из нержавеющей стали; 2) если более тщательно изолируется воздухопровод возле термометра, что приводит к увеличению температуры стенки у основания стальной гильзы до $t_0=60^\circ\text{C}$. Построить графики зависимости ошибок измерений Δt от теплопроводности материала гильзы и температуры у основания гильзы t_0 .

2.7. Нагреватель выполнен в виде алюминиевой трубы диаметром 60×3 мм и длиной 1,5 м. Внутри трубы движется вода со средней температурой 90°C , коэффициент теплоотдачи от воды к стенке 310 Вт/(м²·К). Труба снаружи имеет круглые ребра с постоянной толщиной 2 мм и диаметром 160 мм. На одном метре длины трубы расположено 50 ребер. Окружающий трубу воздух имеет температуру 10°C , а коэффициент теплоотдачи от оребренной поверхности трубы к воздуху 10 Вт/(м²·К). Определить тепловой поток, передаваемый от воды к воздуху.

2.8. По условию задачи 2.7 определить передаваемый тепловой поток от воды к воздуху, если нагреватель выполнен в виде гладкой трубы без ребер. Во сколько раз уменьшится передача теплоты?

2.9. Алюминиевая труба длиной 1 м и диаметром 58×2 мм имеет поперечные круглые ребра толщиной 2 мм и диаметром 120 мм при шаге ребер 13 мм. Внутри трубы движется вода со скоростью 1,5 м/с при средней температуре 70°C . Ребристые трубы собраны в шахматный пучок, который снаружи омывается поперечным потоком воздуха со скоростью в узком сечении 14 м/с и средней температурой 40°C . Определить коэффициент теплопередачи для оребренной трубы (использовать формулы гл. 6).

2.10. Воздух в холодильной камере отдает теплоту охлаждающему устройству из горизонтальных труб с наружным диаметром 14 мм. Температура воздуха в камере -5°C , температура наружной поверхности трубы -10°C . Во сколько раз возрастет тепловой поток от воздуха к трубам, если трубы оребрить поперечными круглыми латунными ребрами с постоянной толщиной 1 мм. Диаметр ребер 38 мм, шаг 12,5 мм. Средний коэффициент теплоотдачи к ребристой поверхности трубы принять $6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

2.11. Охладитель масла сделан из трех латунных труб диаметром 30×1 мм и длиной 500 мм каждая. Внутри труб движется масло со средней температурой 80°C . Снаружи на каждой трубе расположены 40 круглых ребер с постоянной толщиной 1 мм и диаметром 50 мм, которые обдуваются воздухом, имеющим температуру 15°C . Коэффициенты теплоотдачи со стороны воздуха 22, со стороны масла $42 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$. Определить коэффициент теплопередачи и тепловой поток через оребренные трубы.

2.12. Во сколько раз уменьшится тепловой поток, передаваемый от масла к воздуху, если в условиях задачи 2.11 трубы охладителя будут без оребрения? Определить температуру на конце ребра, если принять, что у основания ребра $t_0 = 79^\circ\text{C}$.

2.13. Определить тепловой поток, передаваемый круглым ребром окружающему воздуху, имеющему температуру 5°C . Диаметр ребра 150 мм, толщина 2 мм, шаг 10 мм. Ребро находится на трубе диаметром 80×3 мм. Материал — медь. В трубе движется жидкость со средней температурой 130°C . Коэффициент теплоотдачи со стороны жидкости 170, со стороны воздуха $8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

2.14. Проанализировать зависимость теплового потока, передаваемого через оребренную поверхность к воздуху, от эффективной высоты ребра по условию задачи 2.13. Для анализа принять наружный диаметр трубы равным 20, 50, 120 мм, остальные условия оставить без изменений. Построить график зависимости $Q = f(h_{\text{эф}})$.

2.15. Во сколько раз увеличится отдаваемый тепловой поток, если на поверхности площадью 800×800 мм разместить 24 ребра прямоугольного сечения высотой 35 мм, толщиной 5 мм. Материал — латунь, температура окружающей среды 10°C , температура поверхности у основания ребра 70°C . Принять коэффициент теплоотдачи от гладкой и ребристой поверхностей $8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

ТЕПЛОБМЕН С УЧЕТОМ ВНУТРЕННИХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫ

В определенных условиях в телах могут происходить процессы с выделением (поглощением) теплоты, например джоулево нагревание электропроводника, химические экзо- и эндотермические реакции, ядерные процессы в тепловыделяющих элементах (ТВЭлах) реактора и т. п. Эти процессы характеризуются мощностью внутренних источников теплоты или интенсивностью объемного тепловыделения q_v , Вт/м³.

3.1. Однородная неограниченная пластина

Для плоской пластины ($\lambda = \text{const}$), равномерно охлаждаемой с обеих сторон (рис. 3.1), задана температура поверхности $t_{\text{пов}}$.

Одномерное температурное поле в пластине толщиной 2δ

$$t = t_{\text{пов}} + \frac{q_v}{2\lambda} (\delta^2 - x^2), \quad (3.1)$$

где $0 \leq x \leq \delta$.

В формуле (3.1) при $x=0$ температура в середине толщины пластины

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{пов}} + q_v \delta^2 / 2\lambda. \quad (3.2)$$

Учитывая зависимость $\lambda_t = \lambda_0(1 + bt)$ в условиях больших перепадов температур, температурное поле в пластине можно рассчитать по формуле

$$t = -\frac{1}{b} + \sqrt{\left(t_{\text{ср}} + \frac{1}{b}\right)^2 - \frac{q_v x^2}{\lambda_0 \delta}}. \quad (3.3)$$

Для плоской пластины ($\lambda = \text{const}$), равномерно охлаждаемой с обеих сторон, заданы температура среды $t_{\text{ж}}$ и коэффициент теплоотдачи α .

Одномерное температурное поле в пластине

$$t = t_{\text{ж}} + q_v \frac{\delta}{\alpha} + q_v \frac{(\delta^2 - x^2)}{2\lambda}, \quad (3.4)$$

где $0 \leq x \leq \delta$.

В формуле (3.4):

при $x = \delta$ температура на поверхности пластины

$$t_{\text{пов}} = t_{\text{ж}} + q_v \frac{\delta}{\alpha} \quad (3.5)$$

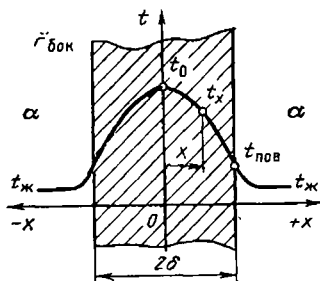


Рис. 3.1. Температурный график в пластине с учетом внутренних источников теплоты

при $x=0$ температура в середине толщины пластины

$$t_{\text{сер}} = t_{\text{ж}} + q_v \delta \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{2\lambda} \right). \quad (3.6)$$

Мощность внутренних источников теплоты для пластины определяется по формулам

$$q_v = \frac{2\lambda}{\delta^2} (t_{\text{сер}} - t_{\text{пов}}); \quad (3.7)$$

$$q_v = \frac{\alpha}{\delta} (t_{\text{пов}} - t_{\text{ж}}); \quad (3.8)$$

$$q_v = (t_{\text{сер}} - t_{\text{ж}}) / \left(\frac{\delta}{\alpha} + \frac{\delta^2}{2\lambda} \right). \quad (3.9)$$

Связь между объемной q_v и поверхностной q_F плотностями тепловыделения используется при определении теплового потока на боковых поверхностях пластины

$$Q = q_F \cdot 2F_{\text{бок}} = q_v F_{\text{бок}} \cdot 2\delta; \quad q_F = q_v \delta. \quad (3.10)$$

3.2. Цилиндрический стержень

Для бесконечного стержня ($\lambda = \text{const}$) задана температура на оси $t_{\text{оси}}$

Температурное поле в стержне диаметром d_0

$$t = t_{\text{оси}} - q_v d_x^2 / 16\lambda, \quad (3.11)$$

где $0 \leq d_x \leq d_0$.

В формуле (3.8) при $d_x = d_0$ температура на поверхности стержня

$$t_{\text{пов}} = t_{\text{оси}} - q_v d_0^2 / 16\lambda. \quad (3.12)$$

С учетом зависимости $\lambda_t = \lambda_0(1 + bt)$ температурное поле в стержне

$$t = -\frac{1}{b} + \sqrt{\left(\frac{1}{b} + t_{\text{оси}} \right)^2 - \frac{q_v d_x^2}{8\lambda_0 b}}. \quad (3.13)$$

Для стержня ($\lambda = \text{const}$), равномерно охлаждаемого средой, заданы ее температура $t_{\text{ж}}$ и коэффициент теплоотдачи α .

Температурное поле в стержне

$$t = t_{\text{ж}} + q_v \frac{d_0}{4\alpha} + q_v \frac{d_0^2 - d_x^2}{16\lambda}. \quad (3.14)$$

В формуле (3.14)

при $d_x = 0$ температура на оси стержня

$$t_{\text{оси}} = t_{\text{ж}} + q_v d_0 \left(\frac{1}{4\alpha} + \frac{1}{16\lambda} \right); \quad (3.15)$$

при $d_x = d_0$ температура на поверхности стержня

$$t_{\text{пов}} = t_{\text{ж}} + q_v \frac{d_0}{4\alpha} \quad (3.16)$$

Мощность внутренних источников теплоты для стержня

$$q_v = \frac{16\lambda}{d_0^2} (t_{\text{осн}} - t_{\text{пов}}); \quad (3.17)$$

$$q_v = \frac{4\alpha}{d_0} (t_{\text{пов}} - t_{\text{ж}}); \quad (3.18)$$

$$q_v = (t_{\text{осн}} - t_{\text{ж}}) \left/ \left(\frac{d_0}{4\alpha} + \frac{d_0^2}{16\lambda} \right) \right. \quad (3.19)$$

3.3. Цилиндрическая труба

Теплота отводится через *внешнюю* поверхность трубы. Температурное поле в стенке трубы с внутренним радиусом r_1 и внешним r_2

$$t = t_1 - \frac{q_v r_1^2}{4\lambda} \left[\left(\frac{r_x}{r_1} \right)^2 - 2 \ln \frac{r_x}{r_1} - 1 \right], \quad (3.20)$$

где $r_1 \leq r_x \leq r_2$, t_1 — температура на внутренней теплоизолированной поверхности трубы.

Подставляя в формулу (3.20) $r_x = r_2$, можно получить расчетное выражение для перепада температуры в стенке

$$t_1 - t_2 = \frac{q_v}{4\lambda} (r_2^2 - r_1^2) \left(1 - \frac{2r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (3.21)$$

и формулу для линейной плотности теплового потока

$$q_l = q_v \pi (r_2^2 - r_1^2) = 4\pi\lambda (t_1 - t_2) \left/ \left(1 - \frac{2r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \right., \quad (3.22)$$

где t_2 — температура на внешней поверхности трубы

Теплота отводится через *внутреннюю* поверхность трубы

Температурное поле в стенке трубы

$$t = t_2 - \frac{q_v r_2^2}{4\lambda} \left[2 \ln \frac{r_2}{r_1} + \left(\frac{r_x}{r_2} \right)^2 - 1 \right]. \quad (3.23)$$

Перепад температур в стенке

$$t_2 - t_1 = \frac{q_v}{4\lambda} (r_2^2 - r_1^2) \left(\frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} - 1 \right). \quad (3.24)$$

Линейная плотность теплового потока

$$q_l = 4\pi\lambda(t_2 - t_1) / \left(\frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} - 1 \right). \quad (3.25)$$

Теплота отводится через обе поверхности трубы.

Перепад температур в стенке

$$t_1 - t_2 = \frac{qv_0^2}{4\lambda} \left[\left(\frac{r_2}{r_0} \right)^2 - \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^2 + 2 \ln \frac{r_0}{r_2} - 2 \ln \frac{r_0}{r_1} \right], \quad (3.26)$$

где r_0 — радиус поверхности, которая имеет наибольшую температуру t_0 , $r_1 < r_0 < r_2$.

Этот радиус определяется из зависимости

$$r_0^2 = [qv(r_2^2 - r_1^2) - 4\lambda(t_1 - t_2)] / 2qv \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (3.27)$$

Наибольшую температуру в стенке трубы можно найти по выражению

$$\left. \begin{aligned} t_0 &= t_2 + \frac{qv_0^2}{4\lambda} \left[\left(\frac{r_2}{r_0} \right)^2 - 2 \ln \frac{r_2}{r_0} - 1 \right], \\ \text{или} \\ t_0 &= t_1 + \frac{qv_0^2}{4\lambda} \left[\left(\frac{r_1}{r_0} \right)^2 + 2 \ln \frac{r_0}{r_1} - 1 \right]. \end{aligned} \right\} \quad (3.28)$$

3.4. Теплообмен в условиях электрического нагрева

При прохождении электрического тока по проводнику цилиндрической формы диаметром d_0 и длиной l температуры рассчитываются по формулам (3.12) и (3.15), в которых qv выражается через электрические параметры: I — силу тока, А; U — напряжение, В; $R_{эл}$ — электрическое сопротивление проводника, Ом:

$$Q = IU = I^2 R_{эл} = U^2 R_{эл}^{-1} = qv \frac{\pi d_0^2}{4} l, \quad (3.29)$$

где $R_{эл} = \rho_{эл} l / f$; $f = \pi d_0^2 / 4$; $\rho_{эл}$ — удельное электрическое сопротивление материала проводника, Ом·м.

3.5. Задачи

3.1. Труба из стали диаметром $8 \times 0,2$ мм включена торцами в электрическую цепь и нагревается постоянным током силой 25 А. Найти мощность внутренних источников теплоты, если удельное электрическое сопротивление трубы принять постоянным и равным $0,9 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

3.2. Тепловыделяющий стержень ядерного реактора имеет теплопроводность 4 Вт/(м·К) и диаметр 12 мм. Найти поверхностную плотность теплового потока для стержня и температуру на его поверхности.

если температура на оси стержня 1000°C , а мощность внутренних источников теплоты $2 \cdot 10^8$ Вт/м³.

3.3. Найти мощность внутренних источников теплоты и температуру на поверхности тепловыделяющего элемента ядерного реактора, если диаметр твэла 10 мм, температура на его оси 1150°C , теплопроводность материала твэла $3,5$ Вт/(м·К). Твэл охлаждается в среде, температура которой 430°C ; коэффициент теплоотдачи равен $25 \cdot 10^3$ Вт/(м²·К).

3.4. Нагреватель выполнен в виде ленты из константана сечением 7×1 мм и длиной 600 мм. По нему проходит электрический ток силой 15 А, падение напряжения на концах ленты 120 В. Определить температуры поверхности ленты и середины по ее толщине, если температура окружающей среды 80°C , а коэффициент теплоотдачи на поверхности ленты 800 Вт/(м²·К).

3.5. Медная шина прямоугольного сечения 30×3 мм находится под током 300 А. По условиям эксплуатации максимально допустимая температура шины не должна превышать 75°C при температуре окружающего воздуха 20°C . Определить мощность внутренних источников теплоты, температуру на поверхности шины и коэффициент теплоотдачи от поверхности шины к воздуху при обеспечении заданных условий эксплуатации. Принять удельное электрическое сопротивление меди $1,62 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

3.6. По никромовому стержню диаметром 5 мм и длиной 400 мм проходит электрический ток при падении напряжения 10 В. Стержень опущен в кипящую воду, находящуюся под давлением $6,18 \cdot 10^5$ Па. От стержня к воде коэффициент теплоотдачи $38\,000$ Вт/(м²·К). Найти мощность внутренних источников теплоты, плотность теплого потока на 1 м² поверхности и на единицу длины стержня, температуры на поверхности и на оси стержня. Принять для никрома теплопроводность 15 Вт/(м·К) и удельное электросопротивление $1,2 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

3.7. Нагревательный элемент выполнен в виде угольной пластины размером $10 \times 70 \times 900$ мм, коэффициент теплопроводности равен 5 Вт/(м·К). К противоположным малым граням приложено напряжение 12 В, пластина равномерно разогрелась и на ее поверхности температура стала 760°C . Найти температуру в центре пластины, если удельное электросопротивление материала равно $31,1 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Принять, что теплота из пластины отводится только через большие грани, а температура в пластине изменяется по нормали к большим граням.

3.8. По титановому стержню диаметром 25 мм и длиной 600 мм проходит электроток силой 15 А и напряжением 36 В. Измерение температуры поверхности стержня показало 216°C . Найти температуры в стержне на радиусах 5 и 10 мм.

3.9. Электропровод диаметром d покрыт изоляцией толщиной δ . По проводу проходит ток силой I . Температура окружающего воздуха t_a , а коэффициент теплоотдачи к воздуху α . Найти температуры на поверхности провода и изоляции, мощность внутренних источников теп-

лоты. Удельное электросопротивление алюминия $2,62 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, меди $1,62 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Данные для решения взять из таблицы.

3.10. Стальная труба диаметром $6 \times 0,2$ мм включена в электрическую цепь. Удельное электросопротивление стали $0,82 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. По трубе пропускается ток силой 250 А, выделяемая теплота отводится через внутреннюю поверхность трубы. Определить мощность внутренних источников теплоты и перепад температур в стенке трубы.

Таблица к задаче 3.9

Вариант	Материал провода	d , мм	α , Вт/(м ² ·К)	Вариант	Материал изоляции	δ , мм	t_B , °С	I , А
1	Алюминий	2,0	10	а	Резина	1,0	20	8
2	Медь	0,5	6	б	Винипласт	1,5	10	6
3	Алюминий	1,0	15	в	Полиэтилен	2,0	5	3
4	Медь	1,0	11	г	Резина	2,0	12	4
5	Алюминий	3,0	8	д	Винипласт	1,0	16	8
6	Медь	5,0	14	е	Полиэтилен	1,0	0	15
7	Алюминий	0,5	16	ж	Резина	1,5	8	11
8	Медь	2,5	12	з	Винипласт	0,5	6	7

3.11. Из нержавеющей стали сделана труба длиной 0,4 м и диаметром $10 \times 0,3$ мм. Она включена в электрическую цепь. Вычислить силу тока, пропускаемого по трубе, если от внешней поверхности трубы отводится тепловой поток 0,9 кВт, а также перепад температур в стенке трубы. Удельное электрическое сопротивление материала трубы $0,85 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Глава четвертая

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Нестационарная теплопроводность характеризуется изменением температурного поля тела во времени и связана с изменением энтальпии тела при его нагреве или охлаждении. Безразмерная температура тела Θ определяется с помощью числа Био $Bi = \alpha l / \lambda$, числа Фурье $Fo = \alpha t / l^2$ и безразмерной координаты, обозначаемой для пластины $X = x / \delta$, а для цилиндра $R = r / r_0$. Охлаждение (нагревание) тел происходит в среде с постоянной температурой t_m , при постоянном коэффициенте теплоотдачи α ; λ и α — теплопроводность и температуропроводность материала тела, l — характерный размер тела ($l = \delta$ для пластины, $l = r_0$ для цилиндра), x и r — текущие координаты соответственно для пластины и цилиндра.

4.1. Тела с одномерным температурным полем

Пластина толщиной 2δ . Безразмерная температура пластины

$$\Theta = (t - t_{ж}) / (t_0 - t_{ж}) = f(\text{Bi}; \text{Fo}; X) = f(\alpha\delta/\lambda; \alpha\tau/\delta^2; x/\delta), \quad (4.1)$$

где t — температура в пластине для момента времени τ в точке с координатой x ; t_0 — температура пластины в начальный момент времени.

Если $\text{Fo} \geq 0,3$, то температура на поверхности пластины ($X=1$)

$$\Theta_{\text{пов}} = (t_{\text{пов}} - t_{ж}) / (t_0 - t_{ж}) = P \exp(-\mu_1^2 \text{Fo}); \quad (4.2)$$

температура на середине толщины пластины ($X=0$)

$$\Theta_{\text{сер}} = \frac{t_{\text{сер}} - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}} = N \exp(-\mu_1^2 \text{Fo}); \quad (4.3)$$

температура внутри пластины на расстоянии x от ее **средней** плоскости

$$\Theta_x = N \cos\left(\mu_1 \frac{x}{\delta}\right) \exp(-\mu_1^2 \text{Fo}), \quad (4.4)$$

где P , N , μ_1 , μ_1^2 определяются по табл. 5 приложения для пластины в зависимости от числа Bi .

Температура $\Theta_{\text{пов}}$ и $\Theta_{\text{сер}}$ можно определить по графикам рис. П.1 и П.2 по известным числам Bi и Fo .

Цилиндр радиусом r_0 . Безразмерная температура цилиндра

$$\Theta = (t - t_{ж}) / (t_0 - t_{ж}) = \varphi(\text{Bi}, \text{Fo}, R) = \varphi(\alpha r_0/\lambda; \alpha\tau/r_0^2; r_x/r_0), \quad (4.5)$$

где t — искомая температура в цилиндре для радиуса r_x и времени τ , $0 \leq r_x \leq r_0$.

Если $\text{Fo} \geq 0,3$, то температура на поверхности цилиндра ($R=1$)

$$\Theta_{\text{пов}} = (t_{\text{пов}} - t_{ж}) / (t_0 - t_{ж}) = P_0 \exp(-\mu_1^2 \text{Fo}); \quad (4.6)$$

температура на оси цилиндра ($R=0$)

$$\Theta_{\text{оси}} = t_{\text{оси}} - t_{ж} / (t_0 - t_{ж}) = N_0 \exp(-\mu_1^2 \text{Fo}); \quad (4.7)$$

температура внутри цилиндра для радиуса r_x

$$\Theta_r = N_0 J_0(\mu_1 r_x / r_0) \exp(-\mu_1^2 \text{Fo}), \quad (4.8)$$

где P_0 , N_0 , μ_1 , μ_1^2 определяются по табл. 6 приложения для цилиндра в зависимости от числа Bi ; $J_0(\mu_1 r_x / r_0)$ — функция Бесселя первого рода нулевого порядка (табл. 19 приложения).

Температуры $\Theta_{\text{пов}}$ и $\Theta_{\text{оси}}$ можно определить по графикам рис. П.3 и П.4 Приложения по известным числам Bi и Fo .

4.2. Тела конечных размеров

Температура определяется на основе теоремы о перемножении решений: безразмерная температура тела конечных размеров при нагревании (охлаждении) равна произведению безразмерных температур тел

с бесконечным размером, при пересечении которых образовано данное конечное тело.

Цилиндр длиной 2δ и радиусом r_0 (рис. 4.1). Он образован пересечением бесконечной пластины толщиной 2δ и бесконечного цилиндра радиусом r_0 .

Безразмерная температуры стержня $\Theta = \Theta_\delta \Theta_r = (t - t_{ж}) / (t_0 - t_{ж})$ равна

$$\Theta = \Theta_\delta \Theta_r = \Phi_1 \left(\frac{\alpha \delta}{\lambda}; \frac{\alpha \tau}{\delta^2}; \frac{x}{\delta} \right) \Phi_2 \left(\frac{\alpha r_0}{\lambda}; \frac{\alpha \tau}{r_0^2}; \frac{r_x}{r_0} \right), \quad (4.9)$$

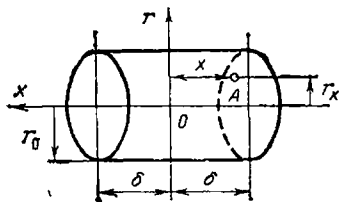


Рис. 4.1. Цилиндрический стержень длиной $l=2\delta$ и радиусом r_0

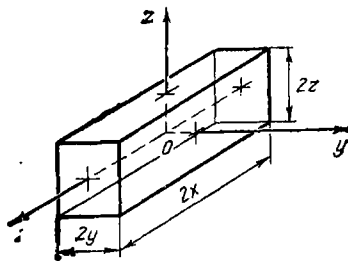


Рис. 4.2. Параллелепипед со сторонами $2x, 2y, 2z$

где Θ_δ (или функция Φ_1) при $Fo \geq 0,3$ определяется по формулам (4.1)–(4.3) и графикам рис. П.1 и П.2 приложения для бесконечной пластины толщиной 2δ ; Θ_r (или функция Φ_2) при $Fo \geq 0,3$ определяется по формулам (4.5)–(4.7) и графикам рис. П.3 и П.4 приложения для бесконечного цилиндрического стержня радиусом r_0 .

При $Fo \geq 0,3$ безразмерная температура внутри цилиндрического стержня в точке с координатами x и r_x будет определяться аналогично, но Θ_δ рассчитывается по формуле (4.4), а Θ_r — по формуле (4.8) с использованием табл. 5 и 6 приложения.

Параллелепипед со сторонами $2\delta_x, 2\delta_y, 2\delta_z$ (рис. 4.2) Безразмерная температура $\Theta = \Theta_x \Theta_y \Theta_z = \frac{t - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}}$ или

$$\Theta = F_1 \left(\frac{\alpha \delta_x}{\lambda}; \frac{\alpha \tau}{\delta_x^2}; \frac{x}{\delta_x} \right) F_2 \left(\frac{\alpha \delta_y}{\lambda}; \frac{\alpha \tau}{\delta_y^2}; \frac{y}{\delta_y} \right) \times \\ \times F_3 \left(\frac{\alpha \delta_z}{\lambda}; \frac{\alpha \tau}{\delta_z^2}; \frac{z}{\delta_z} \right). \quad (4.10)$$

Функции F_1, F_2, F_3 определяются по формулам (4.1)–(4.4), по табл. 5 и по графикам рис. П.1 и П.2 приложения для бесконечной пластины с учетом места расположения интересующей нас точки в параллелепипеде.

4.3. Расчет отданной (воспринятой) телом теплоты

Количество теплоты Q_τ , Дж, отданной (воспринятой) телом за время τ в процессе охлаждения (нагрева), равно

$$Q_\tau = Q_0(1 - \bar{\theta}), \quad (4.11)$$

где Q_0 — количество теплоты, переданной за время полного охлаждения (нагрева), Дж; $\bar{\theta}$ — средняя по объему безразмерная температура тела в момент времени τ .

Для пластины толщиной 2δ и площадью поверхности F теплота, переданная за время полного охлаждения, равна

$$Q_0 = mc(t_0 - t_{ж}) = 2\delta F \rho c(t_0 - t_{ж}), \quad (4.12)$$

где m — масса пластины, кг; c — теплоемкость материала пластины, Дж/(кг·К); ρ — его плотность, кг/м³.

Средняя по объему безразмерная температура пластины в момент времени τ при $Fo \geq 0,3$

$$\bar{\theta} = \frac{2 Bi^2}{\mu_1^2(\mu_1^2 + Bi^2 + Bi)} \exp(-\mu_1^2 Fo). \quad (4.13)$$

Для цилиндра радиусом r_0 и длиной l теплота, отданная за время полного охлаждения, равна

$$Q_0 = \pi r_0^2 l \rho c(t_0 - t_{ж}). \quad (4.14)$$

Средняя по объему безразмерная температура цилиндра в момент времени τ при $Fo \geq 0,3$ равна

$$\bar{\theta} = \frac{4 Bi^2}{\mu_1^2(\mu_1^2 + Bi^2)} \exp(-\mu_1^2 Fo). \quad (4.15)$$

Средняя безразмерная температура цилиндра конечной длины

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}_\delta \bar{\theta}_r = f_1(Bi_\delta, Fo_\delta) f_2(Bi_r, Fo_r), \quad (4.16)$$

где функция f_1 определяется по формуле (4.13), а f_2 — по (4.15).

Для параллелепипеда со сторонами $2\delta_x$, $2\delta_y$, $2\delta_z$ (рис. 4.2) теплота, отданная за время полного охлаждения, равна

$$Q_0 = 8\delta_x \delta_y \delta_z \rho c(t_0 - t_{ж}). \quad (4.17)$$

Средняя безразмерная температура параллелепипеда

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}_x \bar{\theta}_y \bar{\theta}_z = f_1(Bi_x, Fo_x) f_2(Bi_y, Fo_y) f_3(Bi_z, Fo_z), \quad (4.18)$$

где функции f_1 , f_2 , f_3 определяются по формуле (4.13).

Если $Fo < 0,3$, то для вычисления $\bar{\theta}$ используется ряд, члены которого определяются формулами типа (4.13), (4.15), причем величины μ_1 , μ_2 , ..., μ_n определяются по таблицам, приведенным, например, в [12].

4.4. Регулярный режим охлаждения (нагревания) тел

Теорию регулярного режима разработал Г. М. Кондратьев. Процесс охлаждения тела в среде с постоянной температурой $t_{ж}$ и постоянным коэффициентом теплоотдачи α можно разделить на три режима:

1) *неупорядоченный* — на процесс влияет начальное распределение температуры в теле;

2) *регулярный* — в любой точке тела относительная скорость изменения температуры, называемая темпом охлаждения (нагревания), остается постоянной и не зависит от времени;

3) *стационарный* — температура во всех точках тела равна температуре среды (тепловое равновесие).

В регулярном режиме темп охлаждения (нагревания), m , c^{-1} , определенный по двум моментам времени τ_1 и τ_2 , равен

$$m = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_2 - \tau_1} = \text{const.} \quad (4.19)$$

где $\vartheta_1 = t_1 - t_{ж}$ и $\vartheta_2 = t_2 - t_{ж}$ — избыточные температуры в любой точке тела в моменты времени τ_1 и τ_2 .

Темп охлаждения m зависит от физических свойств тела, его размеров и формы, коэффициента теплоотдачи и не зависит от времени и координат.

Первая теорема Г. М. Кондратьева для регулярного режима выражается формулой

$$m = \psi \frac{\alpha F}{\rho c V}, \quad (4.20)$$

где F и V — площадь поверхности и объем тела; ψ — коэффициент неравномерности распределения температуры в теле, определяемый следующим образом:

$$\psi = (B^2 + 1,44B + 1)^{-0,5}, \quad (4.21)$$

где $B = \frac{\alpha}{\lambda} \frac{FK}{V}$ — модифицированная форма числа Би; K — коэффициент формы тела, m^2 .

Коэффициент ψ зависит от условий процесса на поверхности тела: при $Bi < 0,1$ $\psi = 1$ (температуры, усредненные по поверхности и объему тела, одинаковы), при $Bi > 100$ $\psi = 0$ (температура поверхности тела равна температуре среды).

Вторая теорема Г. М. Кондратьева: при высокой интенсивности теплоотдачи темп охлаждения пропорционален коэффициенту температуропроводности материала тела a , m^2/c :

$$m = K^{-1} a \quad (4.22)$$

Коэффициент формы K различных тел:
для шара радиусом r_0

$$K = 0,101 r_0^2; \quad (4.23)$$

для цилиндра длиной l и радиусом r_0

$$K = \left[\left(\frac{2,405}{r_0} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 \right]^{-1}; \quad (4.24)$$

для параллелепипеда со сторонами a, b, c

$$K = \left[\left(\frac{\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{b} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{c} \right)^2 \right]^{-1}. \quad (4.25)$$

4.5. Задачи

4.1. Вермикулитовая плита толщиной 30 мм, имеющая начальную температуру 150 °С, охлаждается в среде, температура которой постоянна и равна 10 °С. Найти температуры в середине толщины плиты, на ее поверхности и на расстоянии 5 мм от поверхности через 0,5 и 1 ч после начала охлаждения. Принять коэффициент температуропроводности $8,2 \cdot 10^{-8}$ м²/с и коэффициент теплоотдачи 60 Вт/(м²·К). Построить график распределения температур в плите.

4.2. Стальной лист толщиной 30 мм [теплоемкость 0,42 кДж/(кг·К), плотность 7900 кг/м³] нагрет до 400 °С и охлаждается в воздухе с температурой 10 °С при коэффициенте теплоотдачи 20 Вт/(м²·К). Через сколько часов температура листа на поверхности будет на 11 °С отличаться от температуры воздуха? Сколько теплоты будет отдано с 1 м² листа за время охлаждения?

4.3. Стенка камеры сгорания толщиной 5 мм в начальный момент имеет температуру 20 °С. Затем с одной стороны (другая поверхность стенки теплоизолирована) стенка стала омываться потоком газа с температурой 2000 °С и коэффициентом теплоотдачи 700 Вт/(м²·К). Считая тепловой поток нормальным к стенке, найти температуры на обеих поверхностях стенки через 20 и 60 с после начала обогрева стенки. Принять для материала стенки теплопроводность 0,35 Вт/(м·К), теплоемкость 1,47 кДж/(кг·К), плотность 1400 кг/м³. Лучистый теплообмен не учитывать.

4.4. Колонна радиусом 0,15 м из бетона с начальной температурой 30 °С охлаждается в воздухе с постоянной температурой -20 °С, коэффициент теплоотдачи равен 4,3 Вт/(м²·К). Найти температуры на поверхности, на оси колонны и на радиусе 10 см через 6 и 12 ч после начала охлаждения. Принять для бетона плотность 1700 кг/м³, теплоемкость 0,7 кДж/(кг·К). Определить количество теплоты, которая будет отдана воздуху 1 м длины колонны за 6 ч процесса охлаждения.

4.5. Труба с водой находится в среде с температурой 13,3 °С. Внезапно температура среды понижается до -20 °С. Подсчитать, через сколько времени вода в трубе начнет замерзать, если диаметр трубы 400×20 мм; теплопроводность материала трубы 100 Вт/(м·К), удельная теплоемкость 0,5 кДж/(кг·К) и плотность 8900 кг/м³. Коэффици-

циент теплоотдачи от трубы к среде $50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Условно рассмотреть как случай бесконечного сплошного цилиндра при $Fo > 0,3$.

4.6. Вал диаметром $0,21 \text{ м}$ и длиной $0,36 \text{ м}$ первоначально имеет температуру 20°C и нагревается в печи, где температура 900°C , а коэффициент теплоотдачи $134 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Теплоемкость материала вала $0,4 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, плотность $6500 \text{ кг}/\text{м}^3$, теплопроводность $20 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Найти с помощью графиков температуру через $1,2 \text{ ч}$ после начала нагрева: а) в центре торца вала, б) в центре вала, в) на поверхности вала в середине его длины, г) на окружности торца. Определить количество теплоты, которая будет передана валу в печи за время нагрева.

4.7. По условию задачи 4.6 найти температуры в центре вала и на окружности торца, если увеличить диаметр и длину вала в 2 раза, оставив все другие условия без изменения.

4.8. Вал диаметром 140 мм с температурой 27°C поместили в нагреватель, где температура постоянна и равна 860°C . Процесс нагрева длился до получения на поверхности вала температуры 520°C . Найти время нагрева и температуру на оси вала, если теплопроводность материала вала $38 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, температуропроводность $6,94 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, а коэффициент теплоотдачи $163 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

4.9. Для детали цилиндрической формы найти температуру в точках с координатами: а) $r=0, x=0$; б) $r=0, x=\delta$; в) $r=r_0, x=0$; г) $r=r_0, x=\delta$ через 40 мин после начала нагрева ее в печи, где газы имеют температуру 640°C и коэффициент теплоотдачи $138 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Диаметр детали $0,24 \text{ м}$, длина $0,4 \text{ м}$, начальная температура 15°C . Материал детали имеет теплоемкость $0,32 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, плотность $6000 \text{ кг}/\text{м}^3$, теплопроводность $23 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

4.10. Брусек металла размером $400 \times 600 \times 700 \text{ мм}$ с начальной температурой 30°C [теплопроводность $35 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, коэффициент температуропроводности $6,25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$] разогревается в печи, где температура 1200°C и коэффициент теплоотдачи $175 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Найти температуру в центре бруска через 2 ч после начала нагрева. Каковы при этом будут температуры в центре каждой грани?

4.11. В экспериментальной установке для определения коэффициента температуропроводности сыпучего материала методом регулярного режима материал находится в цилиндрическом калориметре диаметром 50 мм и высотой 70 мм . Разность температур между материалом и охлаждающей жидкостью $\vartheta = t_M - t_{ж}$. Охлаждение в термостате нагретого калориметра с материалом дало следующие результаты ($Bi > 100$):

Время, мин	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\vartheta = t_M - t_{ж}, ^\circ\text{C}$	242	235	198	151	112	83	61	45	33	25	19

Определить коэффициент температуропроводности материала.

4.12. На основе метода регулярного режима необходимо определить теплопроводность некоторого материала. Из этого материала изготовили калориметр в виде шара диаметром 120 мм с полной теплоемкостью 28,5 Дж/К, охлаждение которого в термостате с высоким коэффициентом теплоотдачи ($Bi > 100$) показало следующие результаты (θ — разность температур между калориметром и охлаждающей средой):

Время, с	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
$\theta = t_m - t_{ж}, ^\circ\text{C}$	61,5	59,7	54,6	47,9	42,1	36,6	32,1	27,9	24,5	21,5

Найти коэффициент теплопроводности материала.

Глава пятая

ТЕОРИЯ ПОДОБИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕПЛОВЫМ ПРОЦЕССАМ

При экспериментальном изучении тепловых процессов принято выражать математическое описание процесса и расчетные уравнения в виде зависимостей между числами (критериями) подобия, представляющими собой безразмерные комплексы.

Уравнения подобия, выражая обобщенную зависимость между величинами, характеризующими процесс, справедливы для всех подобных между собой процессов. Первая теорема подобия: для подобных между собой процессов все одноименные числа подобия численно одинаковы, например $Re = idem$, $Pr = idem$. Согласно второй теореме подобия связь между числами подобия выражается в форме однозначной функциональной зависимости, например $Nu = f(Re, Pr, Gr, \dots)$.

Третья теорема подобия утверждает, что условия подобия физических явлений, заключаются в подобии условий однозначности и равенстве одноименных чисел подобия, составленных из величин, входящих в эти условия.

5.1. Числа теплового и гидромеханического подобия процессов

Нуссельта число — безразмерный коэффициент теплоотдачи

$$Nu = \bar{\alpha}l/\lambda = ql/\bar{\Delta}t\lambda, \quad (5.1)$$

где λ — теплопроводность жидкости; l — характерный линейный размер.

Средний коэффициент теплоотдачи в формуле (5.1)

$$\bar{\alpha} = Q/(\bar{\Delta}tF) = q/\bar{\Delta}t$$

относят к начальному температурному напору

$$\bar{\Delta}t = \bar{\Delta}t_n = t_c - t_{ж'}, \quad (5.2)$$

к среднеарифметическому напору

$$\bar{\Delta t} = \bar{\Delta t}_a = t_c - 0,5 (\bar{t}_{ж}' + \bar{t}_{ж}'') \quad (5.3)$$

или к среднелогарифмическому напору

$$\bar{\Delta t} = \bar{\Delta t}_L = (\bar{t}_{ж}'' - \bar{t}_{ж}') / \ln \frac{t_c - \bar{t}_{ж}'}{t_c - \bar{t}_{ж}''}, \quad (5.4)$$

где t_c — средняя температура стенки; $\bar{t}_{ж}'$ — температура набегающего потока или среднемассовая температура жидкости на входе в трубу, в теплообменник; $\bar{t}_{ж}''$ — среднемассовая температура жидкости на выходе из трубы, теплообменника.

Если $(t_c - \bar{t}_{ж}') / (t_c - \bar{t}_{ж}'') < 2$, то вместо (5.4) можно использовать (5.3), т. е.

$$\bar{\Delta t}_a \approx \bar{\Delta t}_L. \quad (5.5)$$

Прандтля число — безразмерная характеристика теплофизических свойств жидкости

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu}{\rho \alpha} = \frac{\mu c_p}{\lambda}, \quad (5.6)$$

где ν и μ — кинематическая, $\text{м}^2/\text{с}$, и динамическая, $\text{Па} \cdot \text{с}$, вязкости, $\mu = \nu \rho$; ρ и c_p — плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$, и изобарная массовая теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, жидкости; $\alpha = \lambda / (\rho c_p)$ — температуропроводность жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

Пекле число — критерий теплового подобия

$$Pe = \omega l / \alpha = Re Pr, \quad (5.7)$$

где Re — число Рейнольдса; ω — характерная скорость потока, $\text{м}/\text{с}$.

Стантона число — критерий вынужденного конвективного переноса теплоты

$$St = Nu / Pe = \alpha / (\rho \omega c_p). \quad (5.8)$$

Фурье число — критерий тепловой гомохронности

$$Fo = \alpha \tau / l^2, \quad (5.9)$$

где τ — время протекания нестационарного процесса теплопроводности

Био число — критерий краевого подобия

$$Bi = \alpha l / \lambda, \quad (5.10)$$

где l — характерный линейный размер твердого тела; λ — теплопроводность твердого тела.

Тепловой критерий *фазового превращения*

$$K_{\Phi} = r / \Delta t c_p = r / \Delta h, \quad (5.11)$$

где r — теплота испарения (конденсации), $\text{Дж}/\text{кг}$; Δt — разность температур насыщения и перегрева (переохлаждения) фазы; Δh — разность энтальпий фазы в состояниях насыщения и перегрева (переохлаждения).

Галилея число — критерий подобия полей свободного течения

$$Ga = gl^3/\nu^2, \quad (5.12)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с^2 .

Грасгофа число — критерий свободной тепловой конвекции

$$Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta (t_c - t_{ж}) = Ga \beta \Delta t, \quad (5.13)$$

где β — коэффициент объемного расширения, К^{-1} ; для идеальных газов $\beta = T_{ж}^{-1} = (273 + t_{ж})^{-1}$; для капельных жидкостей приближенно $\beta \approx (\rho_c - \rho_{ж}) / [\rho_{ж}(t_{ж} - t_c)]$, где ρ_c и $\rho_{ж}$ — плотности жидкости при t_c и $t_{ж}$. Для воды β можно определить по табл. 3 приложения.

Релея число — критерий теплообмена при свободной конвекции

$$Ra = Gr Pr = gl^3 \beta \Delta t / \nu a. \quad (5.14)$$

Фруда число — критерий гравитационного подобия, характеризует меру отношения сил инерции и тяжести в потоке:

$$Fr = \omega^2 / gl = Re^2 / Ga. \quad (5.15)$$

Рейнольдса число — критерий режима движения жидкости

$$Re = \omega l / \nu = \omega l \rho / \mu = Re / Pr. \quad (5.16)$$

Эйлера число — критерий подобия полей давления

$$Eu = \Delta p / (\rho \omega^2), \quad (5.17)$$

где Δp — перепад давления на участке движения жидкости.

Архимеда число — критерий свободной конвекции

$$Ar = \frac{gl^3}{\nu^2} \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} = Ga \frac{\Delta \rho}{\rho_1}, \quad (5.18)$$

где ρ_1, ρ_2 — плотности жидкости в двух точках потока.

Определяющая температура, по которой выбираются теплофизические свойства жидкости или газа, входящие в числа подобия, указывается нижним индексом возле числа подобия: «ж», «с», «п.с» — соответственно средняя температура жидкости, стенки, пограничного слоя. Например,

$$Nu_{ж} = al/\lambda_{ж}; \quad Nu_c = al/\lambda_c; \quad Nu_{п.с} = al/\lambda_{п.с}.$$

Определяющий геометрический размер также может быть указан нижним индексом возле числа подобия: l и h — длина и высота поверхности, d — диаметр трубы и т. п. Например,

$$Re_d = \omega d / \nu; \quad Nu_h = ah / \lambda.$$

5.2. Задачи

5.1. Определить значения чисел Nu , Re , Gr , Eu , Pe для следующих условий: среда движется по трубе диаметром 24×2 мм и длиной 2 м, ее расход 50 кг/ч. На входе температура среды 80°C , на выходе 40°C , средняя температура стенки трубы 25°C . Сопrotивление движению

среды 400 Па. В качестве среды принять воду и воздух. Определяющие параметры — средняя температура среды и внутренний диаметр трубы.

5.2. Азот при температуре 200 °С и абсолютном давлении 10^6 Па движется в трубе со скоростью 10 м/с. Для исследования гидродинамического процесса построена уменьшенная в 4 раза модель, где движется вода с температурой 20 °С. Определить скорость воды в модели.

5.3. Температурное поле в длинном цилиндре диаметром 200 мм исследуется по истечении 30 и 60 мин с помощью модели. Теплопроводность и температуропроводность материала цилиндра 15 Вт/(м·К) и $20 \cdot 10^{-4}$ м²/с, материала модели 4 Вт/(м·К) и $8 \cdot 10^{-4}$ м²/с. Найти диаметр модели и время, когда в модели следует измерять распределение температур. Принять коэффициент теплоотдачи для цилиндра 9,8 и для модели 35 Вт/(м²·К).

5.4. Найти кинематическую вязкость для жидкости в модели, где изучается теплообмен при вынужденной конвекции, если коэффициент температуропроводности жидкости $0,8 \cdot 10^{-6}$ м²/с. В образце в виде трубы движется воздух с температурой 180 °С и абсолютным давлением 10^5 Па.

5.5. Модель вала изготовлена из материала с теплопроводностью 27,2 Вт/(м·К), теплоемкостью 4 кДж/(кг·К) и плотностью 510 кг/м³. Модель помещена в нагреватель. После 22,4 мин нагрева производится измерение температур в модели, по этим замерам определяется распределение температур в образце — стальном вале — после 2 ч нагрева его в печи. Стальной вал имеет диаметр 400 мм, температуропроводность $11 \cdot 10^{-6}$ м²/с, а коэффициент теплоотдачи в печи 110 Вт/(м²·К). Найти диаметр модели и коэффициент теплоотдачи в нагревателе.

5.6. Шар диаметром 0,4 м с температурой 600 °С должен охлаждаться в масляной ванне, где поддерживается температура 100 °С. Распределение температуры в шаре после охлаждения в течение 10 мин должно быть изучено на бетонной модели диаметром 0,6 м, которая после разогрева до 110 °С охлаждается в воздухе с температурой 10 °С. Через сколько минут следует начать измерение температур в модели? Определить соотношение температур в образце и модели в сходственных точках. Температуропроводность материала шара $13,3 \cdot 10^{-6}$, бетона $5,0 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

5.7. Для измерения расхода газа в трубопровод диаметром 270 мм поставили диафрагму. Ее размеры были определены после испытаний на модели, уменьшенной в 3 раза. Во время испытаний через модель пропускалась вода с температурой 30 °С, при расходе воды более 28 м³/ч наблюдался автомоделный режим. Найти минимальный расход газа для автомоделного режима, а также соответствующие этому расходу скорость газа и гидравлическое сопротивление (сопротивление на модели составило 280 мм рт. ст.). Принять плотность газа 0,9 кг/м³, кинематическую вязкость $14 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

5.8. Теплоотдача в газоходе котла исследовалась на модели в 1/4 натуральной величины. При этом были получены коэффициенты теплоотдачи при различных скоростях воздуха, представленные ниже.

α , Вт/(м ² ·К)	42	76	138
w , м с	4	8	16

Наружный диаметр труб модели 14 мм, на стенке трубы температура 30 °С. Воздух имел температуру 70 °С при 1,013·10⁵ Па. По данным испытаний на модели получить формулу $Nu_{п.сд} = C Re_{п.сд}^n$ и указать пределы ее применимости по Re. Используя полученную формулу, найти для натурального газохода тепловой поток, передаваемый дымовыми газами стенкам труб, если газы движутся со скоростью 10 м/с и имеют на выходе 800 °С, на входе 1000 °С. Температура стенок труб 300 °С, поверхность нагрева 600 м². Состав дымового газа: $\bar{p}_{CO_2} = 0,13$, $\bar{p}_{H_2O} = 0,11$, $\bar{p}_{N_2} = 0,76$.

5.9. При изучении теплообмена на модели в условиях естественной конвекции между горизонтальной трубой с температурой t_c и воздухом получены следующие данные:

t_c , °С	85	125	145
α , Вт/(м ² ·К)	9,34	10,35	10,76

Труба наружным диаметром 45 мм была помещена в воздух с температурой 20 °С. По измерениям на модели найти обобщенную зависимость в виде формулы $Nu_{жа} = C (Gr Pr)_{жа}^n$, используя которую, определить теплоту, передаваемую за 5 ч от горизонтальной трубы диаметром 10 мм и длиной 4 м к воде с температурой 40 °С. Температура поверхности трубы равна 60 °С.

5.10. На воздушной модели котла производилось изучение теплоотдачи при вынужденной конвекции, и при различных скоростях воздуха были получены представленные ниже коэффициенты теплоотдачи:

w , м с	2,0	3,14	4,65	8,8
α , Вт/(м ² ·К)	50,5	68,6	90,7	141,2

В модели средняя температура воздуха 20 °С, трубы имеют диаметр 14 мм. По данным, полученным на модели, определить значения C и n в формуле $Nu_{жа} = C Re_{жа}^n$. Используя полученную формулу, найти поверхность нагрева натурального котла, если скорость дымовых газов в газоходе 8 м/с, а средняя температура газов 800 °С. Трубы диаметром 80 мм имеют на поверхности температуру 300 °С. Передаваемый тепловой поток 1,2 МВт. Состав дымовых газов: $\bar{p}_{CO_2} = 0,13$, $\bar{p}_{H_2O} = 0,11$, $\bar{p}_{N_2} = 0,76$.

5.11. Трубчатый воздухоподогреватель должен работать при средней температуре воздуха t и скорости его движения w . Для исследования процесса течения создана модель в масштабе m , по которой дви-

жестя жидкость с $t_{\text{мод}}=40^\circ \text{C}$. Найти скорость $w_{\text{мод}}$ движения жидкости в модели. Данные для решения задачи взять из таблицы.

5.12. Для изучения процесса теплообмена при свободной конвекции среды в большом объеме около вертикальной поверхности создана экспериментальная установка в виде плиты высотой 290 мм, нагрев которой осуществлялся электрическим током. Температура воздуха вдали

Таблица к задаче 5.11

Вариант	$t, ^\circ\text{C}$	$w, \text{м/с}$	Вариант	m	Род жидкости
1	100	10	а	1/5	Вода
2	400	15	б	5/1	Трансформаторное масло
3	150	12	в	1/10	Вода
4	250	8	г	20/1	Масло МК
5	200	10	д	1/20	Вода

от плиты равна 20°C . Во время экспериментов измерялся температурный напор между поверхностью плиты и воздухом и определялся коэффициент теплоотдачи. Экспериментальные данные приведены ниже:

$\Delta t = t_c - t_{\text{ж}}, ^\circ\text{C}$	20	40	60	80	100
$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	5,6	6,7	7,4	7,9	8,5

Определить уравнение подобия, связывающее числа подобия, характеризующие данный процесс.

Глава шестая

ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ

6.1. Основные положения

Теплоотдачей называется конвективный теплообмен между твердым телом и движущейся средой (жидкостью или газом), который осуществляется совместным действием теплопроводности и конвекции при наличии температурного напора Δt между телом и средой. *Вынужденное* движение среды вызывается различного рода внешними возбудителями (насосами, вентиляторами и т. п.).

Поскольку процесс теплоотдачи связан с движением среды, выделяют два основных режима течения — *ламинарный*, при котором частицы движутся упорядоченно, слои не перемешиваются друг с другом, и *турбулентный*, когда частицы совершают неупорядоченные движения, в результате чего различные слои интенсивно перемешиваются. **Переход**