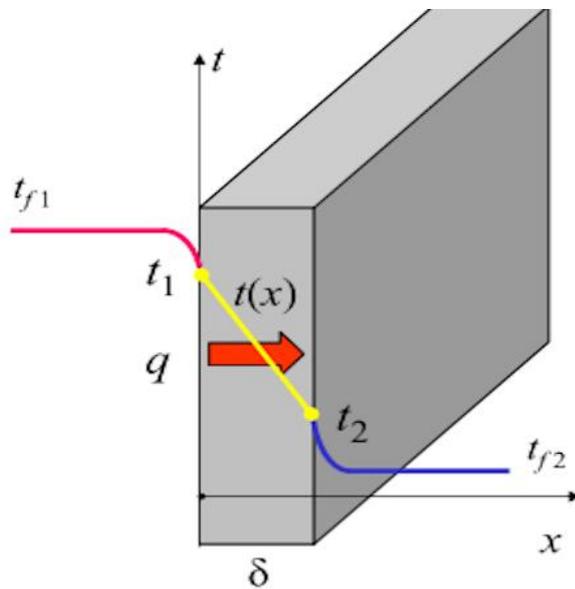


ІІТМО

В.В. Митропов, Р.А. Уваров

СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ПРОЦЕССАМ ТЕПЛООБМЕНА Ч.1



Санкт-Петербург
2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

В.В. Митропов, Р.А. Уваров
СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ПРОЦЕССАМ
ТЕПЛООБМЕНА Ч.1

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ
ИТМО

по направлению подготовки 15.04.02, 15.04.04, 16.04.01, 16.04.03,
18.04.02, 20.04.01

в качестве Учебно-методическое пособие для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
магистратуры

ИТМО

Санкт-Петербург
2024

Митропов В.В., Уваров Р.А., Сборник задач по процессам теплообмена ч.1– СПб: Университет ИТМО, 2024. – 82 с.

Рецензент(ы):

Баранов Игорь Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор (квалификационная категория "ординарный профессор") образовательного центра "Энергоэффективные инженерные системы", Университета ИТМО.

В учебном пособии приведены задачи по теплопроводности и теплопередаче в различных процессах, устройствах и оборудовании, применяемых в холодильной и криогенной технике, кондиционировании воздуха, пищевой, мясной и молочной промышленности. Книга предназначена для студентов машиностроительных и технологических специальностей вузов.

The logo of ITMO University, consisting of the letters 'ITMO' in a bold, black, sans-serif font.

ИТМО (Санкт-Петербург) — национальный исследовательский университет, научно-образовательная корпорация. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию. Приоритетные направления: IT и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication.

Лидер федеральной программы «Приоритет-2030», в рамках которой реализуется программа «Университет открытого кода». С 2022 ИТМО работает в рамках новой модели развития — научно-образовательной корпорации. В ее основе академическая свобода, поддержка начинаний студентов и сотрудников, распределенная система управления, приверженность открытому коду, бизнес-подходы к организации работы. Образование в университете основано на выборе индивидуальной траектории для каждого студента.

ИТМО пять лет подряд — в сотне лучших в области Automation & Control (кибернетика) Шанхайского рейтинга. По версии SuperJob занимает первое место в Петербурге и второе в России по уровню зарплат выпускников в сфере IT. Университет в топе международных рейтингов среди российских вузов. Входит в топ-5 российских университетов по качеству приема на бюджетные места. Рекордсмен по поступлению олимпиадников в Петербурге. С 2019 года ИТМО самостоятельно присуждает ученые степени кандидата и доктора наук.

© Университет ИТМО, 2024

© Митропов В.В., Уваров Р.А., 2024

СПИСОК ОСНОВНЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

a	– коэффициент температуропроводности;
c	– массовая теплоемкость;
M	– масса, кг;
d	– диаметр труб, влагосодержание в воздухе;
f	– площадь поперечного сечения, площадь живого сечения;
F	– площадь поверхности теплообмена;
T	– температура по шкале Кельвина;
t	– температура по шкале Цельсия;
H, h	– высота, энтальпия;
I	– сила тока;
k	– коэффициент теплопередачи;
k_i	– линейный коэффициент теплопередачи цилиндрической стенки;
$k_{ш}$	– коэффициент теплопередачи шаровой стенки;
Q	– тепловой поток;
Q_{τ}	– количество теплоты;
q	– плотность теплового потока;
q_l	– линейная плотность теплового потока;
$q_{кр}$	– критическая плотность теплового потока;
w	– скорость, м/с;
α	– коэффициент теплоотдачи;
β	– коэффициент объемного расширения, коэффициент массоотдачи, коэффициент оребрения;
δ	– толщина;
ε	– степень черноты, поправочный коэффициент, коэффициент конвекции;
Θ	– температурный напор, безразмерная избыточная температура;
λ	– коэффициент теплопроводности;
μ	– динамический коэффициент вязкости;
ν	– кинематический коэффициент вязкости;
ξ	– концентрация;
ρ	– плотность;
τ	– время;
φ	– относительная влажность воздуха.

Индексы

а	– агент;
в	– воздух;
вн	– внутренняя;
ж	– жидкость, среда;
з	– замерзание;
кн	– конечное;
кр	– критическое;
кр	– критический;
н	– насыщенный;
нч	– начальный;
рс	– рассол;
ср	– средний;
0	– нулевое, наружная поверхность трубы;
<i>t</i>	– среднее значение;
<i>тах</i>	– максимальное;
<i>i</i>	– множитель подобного преобразования;
‘	– насыщенная жидкость;
“	– сухой насыщенный пар.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое учебное пособие содержит ряд императивных задач, решение и разбор которых существенно облегчает закрепление курса тепломассообмена для магистров по направлениям подготовки 15.04.02, 15.04.04, 16.04.01, 16.04.03, 18.04.02, 20.04.01.

Главы задачника соответствуют основным разделам дисциплины. Каждая глава состоит из двух частей: в первой части главы приводятся основные понятия и теоретические зависимости [1– 4, 10]; во второй части – представлены практические примеры, наиболее познавательные из которых приведены с подробным решением.

Приложения содержат реальный справочный материал в форме таблиц для лучшей трансформации познания и приобретения активных практических навыков самостоятельного поиска студентами необходимых в будущем данных. Таблицы [3 – 9] приведены в объеме, достаточном для решения предлагаемых задач.

Отдельные ретроспективные задачи имеют свои прототипы в таком общепризнанно позитивном полезном издании как сборник задач [5], подготовленный Г. Н. Даниловой, В. Н. Филаткиным, Н. А. Бучко и М. Г. Щербовым в 1986 г.

ГЛАВА 1. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Основные понятия и расчетные зависимости

Теплообмен – обмен энергией между телами (или областями одного тела), имеющими различную температуру.

Теплопроводностью, или кондукцией, – называют процесс теплообмена между непосредственно соприкасающимися телами или частями тела, имеющими различную температуру.

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

Количество теплоты Q_τ , [Дж] – общее количество теплоты, переданное в процессе теплообмена через изотермическую поверхность в течении заданного отрезка времени.

Тепловой поток Q , [Вт] – количество теплоты, передаваемое через рассматриваемую поверхность в процессе теплообмена, отнесенное к продолжительности процесса.

Плотность теплового потока q , [Вт/м²] – тепловой поток, отнесенный к площади изотермической поверхности

$$q = \frac{Q}{F}. \quad (1)$$

Коэффициент теплопроводности λ , [Вт/(м·К)] – величина, численно равная количеству теплоты, передаваемой в единицу времени через единичную изотермическую поверхность тела при единичном температурном градиенте

$$|\lambda| = \frac{q}{\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right)}. \quad (2)$$

Среднеинтегральная теплопроводность в диапазоне температур $t_{ст1}$ и $t_{ст2}$ на поверхности стенки

$$\bar{\lambda} = \int_{t_{ct2}}^{t_{ct1}} \frac{\lambda_t dt}{(t_{ct2} - t_{ct1})}, \quad (3)$$

где λ_t – теплопроводность, зависящая от температуры.

Зависимость теплопроводности λ_t от температуры t , [°C], приближенно можно выразить в виде линейной функции

$$\lambda_t = \lambda_0 (1 + bt), \quad (4)$$

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

Величина $\bar{\lambda}$ при использовании зависимости (4) принимает значение λ_t , определяемое по среднеарифметической температуре стенки

$$\lambda_t = \lambda_0 (1 + 0,5b(t_{ct1} + t_{ct2})). \quad (5)$$

Перенос теплоты через плоскую стенку

		граничные условия I рода ($t_{cr1} > t_{cr2}$)	граничные условия III рода ($t_{ж1} > t_{ж2}$)
однослойная стенка	термическое сопротивление теплопроводности, (м ² ·К)/Вт	$R_\lambda = \frac{\delta}{\lambda}$	$R_\lambda = \frac{\delta}{\lambda}$
	термическое сопротивление теплоотдачи, (м ² ·К)/Вт	–	$R_\alpha = \frac{1}{\alpha}$
	коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К)	$k = \frac{1}{\frac{\delta}{\lambda}}$	$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$
	плотность теплового потока, Вт/м ²	$q = \frac{\lambda}{\delta}(t_{cr1} - t_{cr2}) = \frac{t_{cr1} - t_{cr2}}{R_\lambda}$	$q = k(t_{ж1} - t_{ж2}) = \frac{(t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$
	тепловой поток, Вт	$Q = qF$	$Q = qF$
многослойная стенка	коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К)	$k = \frac{1}{\sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}$	$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$
	плотность теплового потока, Вт/м ²	$q = k(t_{cr1} - t_{cr2}) = \frac{t_{cr1} - t_{cr2}}{\sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}$	$q = k(t_{ж1} - t_{ж2}) = \frac{(t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$
	тепловой поток, Вт	$Q = qF$	$Q = qF$

Перенос теплоты через цилиндрическую стенку

		граничные условия I рода ($t_{сr1} > t_{сr2}$)	граничные условия III рода ($t_{ж1} > t_{ж2}$)
однослойная стенка	линейное термическое сопротивление теплопроводности, (м·К)/Вт	$R_{\lambda,l} = \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}$	$R_{\lambda,l} = \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}$
	линейное термическое сопротивление теплоотдачи, (м·К)/Вт	-	$R_{\alpha} = \frac{1}{\alpha d}$
	линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К)	$k_l = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}$	$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}$
	линейная плотность теплового потока, Вт/м ²	$q_l = \frac{Q}{l} = \frac{\pi(t_{сr1} - t_{сr2})}{R_{\lambda,l}} = \frac{\pi(t_{сr1} - t_{сr2})}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}$	$q = k(t_{ж1} - t_{ж2}) = \frac{(t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$
	тепловой поток, Вт	$Q = q_l l$	$Q = q_l l$
многослойная стенка	линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К)	$k_l = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}$	$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}}$
	плотность теплового потока, Вт/м ²	$q_l = k_l \pi (t_{сr1} - t_{сr_{n+1}}) = \frac{\pi(t_{сr1} - t_{сr_{n+1}})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}$	$q_l = k_l \pi (t_{ж1} - t_{ж2}) = \frac{\pi(t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}}$
	тепловой поток, Вт	$Q = q_l l$	$Q = q_l l$

Перенос теплоты через шаровую стенку

		граничные условия I рода ($t_{сr1} > t_{сr2}$)	граничные условия III рода ($t_{ж1} > t_{ж2}$)
однослойная стенка	термическое сопротивление теплопроводности, (м²·К)/Вт	$R_{\lambda_{ш}} = \frac{1}{2\lambda} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right)$	$R_{\lambda_{ш}} = \frac{1}{2\lambda} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right)$
	термическое сопротивление теплоотдачи, (м²·К)/Вт	-	$R_{\alpha_{ш}} = \frac{1}{\alpha d^2}$
	коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К)	$k_i = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right)}$	$k_{ш} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1^2} + \frac{1}{2\lambda} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_2^2}}$
	тепловой поток, Вт	$Q = \frac{\pi(t_{сr1} - t_{сr2})}{\frac{1}{2\lambda} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right)}$	$Q = \frac{\pi(t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1^2} + \frac{1}{2\lambda} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_2^2}}$
многослойная стенка	коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К)	$k = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}$	$k_{ш} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1^2} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_{i+1}} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_{i+1}^2}}$
	тепловой поток, Вт	$Q = \frac{\pi(t_{сr1} - t_{сr_{n+1}})}{\frac{1}{2\lambda_1} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) + \frac{1}{2\lambda_2} \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_3} \right) + \dots + \frac{1}{2\lambda_n} \left(\frac{1}{d_n} - \frac{1}{d_{n+1}} \right)}$	$Q = \frac{\pi(t_{сr1} - t_{сr_{n+1}})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1^2} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \left(\frac{1}{d_i} - \frac{1}{d_{i+1}} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_{i+1}^2}}$

Критический диаметр изоляции многослойной стенки

цилиндрической	$d_{\text{кр}} = \frac{2\lambda_{\text{из}}}{\alpha_2}$
шаровой	$d_{\text{кр}} = \frac{4\lambda_{\text{из}}}{\alpha_2}$

Задачи

1.1. Размеры стенки из шлакобетона [$\lambda = 0,93 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$]: длина 20 м, высота 3,5 м, толщина 0,5 м, температура на внутренней поверхности стенки 15 °С, на наружной –10 °С.

Определить количество теплоты, проникающей через стенку в сутки.

Ответ: $Q_{\tau} = 281 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ (78,1 кВт·ч)

1.2. Рефрижераторный бак, заполняемый охлажденным соляным раствором, можно выполнить из углеродистой стали [$\lambda = 45,4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$] или из нержавеющей стали [$\lambda = 17,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$]; в обоих случаях толщина стенки бака одинакова 6 мм. Известно, что плотность теплового потока от окружающего воздуха к баку 525 Вт/м².

Сравнить разности между температурами внутренней и наружной поверхности стенки для двух вариантов конструкции.

<p>Дано: $q=525 \text{ Вт}/\text{м}^2$ $\delta=6 \text{ мм}$ $\lambda_{\text{у.с}}=45,4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ $\lambda_{\text{н.с}}=17,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ $t=32 \text{ °С}$</p>	<p>Решение: По формуле определения плотности теплового потока для однослойной плоской стенки определяют разность температур внутренней t^I и наружной t^{II} поверхностей стенки для бака из углеродистой стали</p> $q = \frac{\lambda}{\delta} (t^I - t^{II})$ $\Delta t = t^I - t^{II} = q \frac{\delta}{\lambda} = 525 \cdot \frac{0,006}{45,4} = 0,07 \text{ °С}$ <p>для бака из нержавеющей стали при том же подводе теплоты и толщине стенки</p> $\Delta t = 525 \cdot \frac{0,006}{17,5} = 0,18 \text{ °С}$ <p>т.е. при равных условиях – плотности теплового потока и толщине стенки – разности температур обратно пропорциональны теплопроводностям стенок.</p>
<p>$\Delta t_{\text{у.с}}, \Delta t_{\text{н.с}} - ?$</p>	

1.3. Через плоскую стенку из нержавеющей стали Х18Н9Т поверхностью 5 м² проникает тепловой поток 15100 Вт. При этом температура снижается на 0,2 °С на каждом 1 мм толщины стенки.

Определить коэффициент теплопроводности стали. Результаты расчета сравнить с табличными данными при 20 °С.

Ответ: $\lambda = 15,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$

1.4. Для экспериментального определения теплопроводности изоляционного материала методом пластины через слой материала, имеющего форму диска диаметром 300 мм и толщиной 50 мм, пропускают тепловой поток 2 Вт. Температура на обогреваемой поверхности диска 60 °С, на охлаждаемой 10 °С. Рассчитать теплопроводность материала.

Ответ: $\lambda = 0,028 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

1.5. В сушильную камеру со стенками толщиной 250 мм из строительного кирпича $\left[\lambda = 0,29 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right]$ с горячим воздухом подводится тепловой поток 500 кВт; 95% этого количества теплоты используется для сушки и затем отводится с рециркулирующим воздухом, а остальное теряется через стенки камеры с поверхностью 200 м². Температура на наружной поверхности камеры 40 °С. Найти температуру на внутренней поверхности камеры.

Ответ: 147,8 °С.

1.6. Температура верхней поверхности льда на озере равна –15 °С; плотность теплового потока через лед 30 Вт/м², а теплопроводность льда 2,1 Вт/(м·К). Определить максимальную толщину слоя льда, который может образоваться в этих условиях.

<p>Дано: $q=30 \text{ Вт/м}^2$ $t^I=0 \text{ }^\circ\text{C}$ $t^{II}=-15 \text{ }^\circ\text{C}$ $\lambda=2,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$</p>	<p>Решение: При наступлении холодов толщина слоя льда будет постепенно увеличиваться путем намерзания воды с нижней его поверхности до тех пор, пока на этой поверхности не установится температура 0°С, поэтому $t^I = 0^\circ\text{C}$.</p> <p>При этих условиях из уравнения $q = \frac{\lambda}{\delta_{\max}} (t^I - t^{II})$</p> $\delta_{\max} = \frac{\lambda(t^I - t^{II})}{q} = \frac{2,1 \cdot 15}{30} = 1 \text{ м}$
<p>$\delta_{\max} - ?$</p>	

1.7. Безопасная глубина промерзания воды в садках для рыбы на колхозном рыбозаводе не более 1,5 м, теплопроводность льда $[\lambda=2,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}]$, отвод тепла от поверхности льда в окружающий воздух может достигать 30 Вт/м². Рассчитать какую наиболее низкую температуру на верхней поверхности льда, не покрытого снегом, можно допустить, чтобы рыба не могла погибнуть.

Ответ: $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при дальнейшем понижении температуры воздуха поверхность льда должна быть укрыта снегом.)

1.8. В Арктике и Антарктиде применяют постройки из льда [$\lambda=2,1\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$] и снега [$\lambda=0,46\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$].

Какую толщину должна иметь стенка продуктового склада из льда, чтобы при плотности теплового потока $130\text{ Вт}/\text{м}^2$ и температуре на наружной поверхности $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ можно было бы обеспечить температуру на внутренней поверхности $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$? Как изменится толщина стенки склада, если в условиях прежних температур и того же теплового потока лед заменить снегом?

<p>Дано: $q=130\text{ Вт}/\text{м}^2$ $t''=-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t'=-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\lambda_{\text{л}}=2,1\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ $\lambda_{\text{сн}}=0,46\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$</p>	<p>Решение: 1. Используя уравнение (1), определяют толщину стенки склада из льда</p> $q = \frac{\lambda}{\delta_{\text{л}}}(t' - t''); \text{ т. е. } \delta_{\text{л}} = \frac{\lambda}{q}(t' - t''),$ <p>отсюда</p>
<p>$\delta_{\text{л}}, \frac{\delta_{\text{л}}}{\delta_{\text{сн}} - ?$</p>	$\delta_{\text{л}} = \frac{2,1 \cdot 39}{130} = 0,63\text{ м.}$ <p>2. В случае замены льда снегом при том же тепловом потоке и разности температур</p> $\frac{\delta_{\text{л}}}{\delta_{\text{сн}}} = \frac{\lambda_{\text{л}}}{\lambda_{\text{сн}}} \text{ или } \frac{\delta_{\text{л}}}{\delta_{\text{сн}}} = \frac{2,1}{0,46} = 4,57.$ <p>т.е. при замене льда снегом толщину стенки можно уменьшить почти в 5 раз, а именно до</p> $\frac{0,63}{4,57} = 0,138\text{ м.}$

1.9. Стенка дома сложена из ледяных блоков [$\lambda=2,25\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$]; толщина стенки $0,9\text{ м}$, плотность теплового потока $116,3\text{ Вт}/\text{м}^2$; на наружной поверхности стенки сохраняется постоянная температура $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Какой физический процесс будет происходить с внутренней поверхностью стенки? До каких пределов будет продолжаться этот процесс? Какая температура установится на внутренней поверхности?

Ответ: Лед на внутренней поверхности стенки будет таять до тех пор, пока толщина стенки не станет $0,774\text{ м}$. Температура на внутренней поверхности стенки установится $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.10. Температура на внутренней поверхности стенки топки парового котла $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, на глубине 90 мм от наружной поверхности $152\text{ }^{\circ}\text{C}$; толщина стенки 510 мм . Материал – строительный кирпич [$\lambda=0,29\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$].

Определить аналитическим и графическим способами температуры в толщине стенки на глубине 60 и 210 мм от наружной поверхности.

Ответ: $t_{60} = 123,6^\circ\text{C}$; $t_{210} = 265,7^\circ\text{C}$.

1.11. Теплопроводность жира в твердом состоянии определяют методом пластины, при котором через плоский слой исследуемого материала пропускают стационарный тепловой поток. Опытный образец продукта имеет форму диска диаметром 150 мм, толщиной 13 мм. Температура охлаждаемой поверхности диска 0°C . Точка плавления жира 27°C . Напряжение на клеммах электронагревателя 12 В. Ожидаемая величина теплопроводности жира $0,198 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Определить, в пределах какой максимальной силы тока можно регулировать реостат электронагревателя, чтобы таяние жира было исключено. Устройство прибора обеспечивает прохождение всего выделяемого нагревателем тепла через исследуемый материал в направлении, перпендикулярном его поверхности.

<p>Дано: $d=150 \text{ мм}$ $\delta=13 \text{ мм}$ $\lambda = 0,198 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ $t_1 = 27^\circ\text{C}$ $t_2 = 0^\circ\text{C}$ $U=12 \text{ В}$</p>	<p>Решение: Для плоской однослойной стенки</p> $Q = \frac{\lambda \cdot \Delta t \cdot F}{\delta},$ <p>где $Q = I \cdot U$; $F = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь охлаждаемой поверхности следовательно</p>
<p>$I - ?$</p>	<p>откуда</p> $I \cdot U = \frac{\lambda \cdot \Delta t \cdot F}{\delta},$ $I = \frac{\lambda \cdot \Delta t \cdot F}{U \cdot \delta} = \frac{0,198 \cdot 27 \cdot 3,14 \cdot 0,15^2}{12 \cdot 0,013 \cdot 4} \approx 0,61 \text{ А.}$

1.12. Мощность холодильной установки позволяет компенсировать приток тепла через поверхности ограждений холодильной камеры в пределах плотности теплового потока $14 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Стенки камеры выполнены из строительного кирпича [$\lambda=0,81 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\delta=38 \text{ см}$], изнутри слоем теплоизоляции [$\lambda=0,043 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\delta=12 \text{ см}$] и слоем штукатурки [$\lambda=0,78 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $\delta=2 \text{ см}$].

Определить какая разность температур будет поддерживаться на поверхностях ограждений камеры. Влияние заполненных раствором швов в стенке не учитывать.

<p>Дано: $q=14 \text{ Вт}/\text{м}^2$ $\lambda_{\text{к}} = 0,81 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ $\delta_{\text{к}}=38 \text{ см}$</p>	<p>Решение: Для трехслойной плоской стенки</p>
---	--

$\lambda_{\text{тп}} = 0,043 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ $\delta_{\text{тп}} = 12 \text{ см}$ $\lambda_{\text{шт}} = 0,78 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ $\delta_{\text{шт}} = 2 \text{ см}$	$q = \frac{\Delta t}{\frac{\delta_{\text{к}}}{\lambda_{\text{к}}} + \frac{\delta_{\text{тп}}}{\lambda_{\text{тп}}} + \frac{\delta_{\text{шт}}}{\lambda_{\text{шт}}}};$ $\Delta t = q \left(\frac{\delta_{\text{к}}}{\lambda_{\text{к}}} + \frac{\delta_{\text{тп}}}{\lambda_{\text{тп}}} + \frac{\delta_{\text{шт}}}{\lambda_{\text{шт}}} \right);$
$\delta_{\text{max}} - ?$	откуда $\Delta t = 14 \cdot (0,4691 + 2,79 + 0,0256) = 46 \text{ К}.$

1.13. Наружная поверхность вакуум-аппарата для сгущения растворов 15 м^2 . Температура внутренней поверхности алюминиевой стенки аппарата $60 \text{ }^\circ\text{C}$ [$\lambda_{\text{ал}} = 204 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\delta_{\text{ал}} = 12 \text{ мм}$], а наружной $59,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Аппарат изолируют слоем асбестового волокна [$\lambda_{\text{ас}} = 0,11 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\delta_{\text{ас}} = 60 \text{ мм}$] с обшивкой из сосновых досок [$\lambda_{\text{д}} = 0,107 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\delta_{\text{д}} = 18,5 \text{ мм}$]. После изоляции стенки температура ее внутренней поверхности $60,5 \text{ }^\circ\text{C}$, на наружной поверхности деревянной обшивки $43 \text{ }^\circ\text{C}$.

Рассчитать тепловой поток через неизолированную стенку аппарата в окружающий воздух, а также определить, во сколько раз уменьшаются потери тепла аппарата в результате изоляции. Стенку аппарата условно считать плоской.

$$\text{Ответ: } Q_1 = 25,86 \text{ кВт}, \frac{Q_1}{Q_2} = 70,8.$$

1.14. Поверхность теплообменного аппарата $11,5 \text{ м}^2$. Стенка состоит из листовой нержавеющей стали [$\lambda_{\text{нс}} = 15,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\delta_{\text{нс}} = 8 \text{ мм}$], слоя стекляной ваты [$\lambda_{\text{св}} = 0,037 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\delta_{\text{св}} = 60 \text{ мм}$], деревянной обшивки из сосновых досок [$\lambda_{\text{д}} = 0,107 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\delta_{\text{д}} = 20 \text{ мм}$] и слоя масляной краски [$\lambda_{\text{кр}} = 0,29 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\delta_{\text{кр}} = 1 \text{ мм}$]. Температура внутренней поверхности аппарата $t^I = 180 \text{ }^\circ\text{C}$, наружной поверхности изоляции (под обшивкой) $82 \text{ }^\circ\text{C}$.

Определить тепловой поток от поверхности аппарата в окружающий воздух, а также неизвестные температуры на поверхностях соприкосновения слоев его четырехслойной стенки.

$$\text{Ответ: } Q = 694,6 \text{ Вт}, t^{II} = 180^\circ\text{C}, t^{IV} = 68,9^\circ\text{C}.$$

1.15. При реконструкции термокамер необходимо заменить изоляцию из торфоплит [$\lambda_{\text{т}} = 0,082 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\delta_{\text{т}} = 40 \text{ см}$] с деревянной обшивкой [$\lambda_{\text{д}} = 0,107 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\delta_{\text{д}} = 2 \text{ см}$] другой изоляцией, состоящей из пенобетона [$\lambda_{\text{пб}} = 0,1168 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$] и минеральной шерсти [$\lambda_{\text{мш}} = 0,047 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$] со слоем штукатурки [$\lambda_{\text{шт}} = 0,78 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\delta_{\text{шт}} = 2 \text{ см}$].

Определить толщину слоев пенобетона и минеральной шерсти, чтобы новая конструкция обеспечивала тот же теплоизоляционный эффект при общей толщине в 1,25 раза меньше прежней.

$$\text{Ответ: Толщина слоя пенобетона } 0,165 \text{ м, слоя минеральной шерсти } 0,171 \text{ м}.$$

1.16. Плоская стальная стенка [$\lambda_{ст}=45,4$ Вт/(м·К), $\delta_{ст}=2,5$ мм] изолирована слоем листового асбеста [$\lambda_{ас}=0,12$ Вт/(м·К), $\delta_{ас}=100$ мм] и слоем стеклянной ваты [$\lambda_{св}=0,047$ Вт/(м·К), $\delta_{св}=100$ мм].

Рассчитать толщину слоя минеральной ваты [$\lambda_{мв}=0,064$ Вт/(м·К)], который необходимо положить вместо асбеста и стеклянной ваты, чтобы изолирующее действие конструкций осталось без изменений (*a*), изолирующее действие улучшилось в 1,5 раза (*b*). Определить долю стальной стенки в изолирующем действии конструкции для варианта *a*.

Ответ: 0,189 м (*a*); 0,284 м (*b*); доля стальной стенки 0,0019%.

1.17. Конструкцию многослойной плоской стенки изменяют так, что при той же разности температур на внешних поверхностях эквивалентная теплопроводность стенки $\lambda_{эkv}$ увеличивается в 1,5 раза (вариант I). Как изменяются при этом тепловой поток, проникающий через стенку, и его плотность? А если разность температур одновременно уменьшится в 2,2 раза (вариант II)? По какой закономерности происходит изменение теплового потока с увеличением толщины стенки при постоянных величинах $\lambda_{эkv}$ и Δt ?

Ответ. $Q^I = 1,5 \cdot Q$; $q^I = 1,5 \cdot q$; $Q^{II} = 0,682 \cdot Q$; $q^{II} = 0,682 \cdot q$; изменение теплового потока происходит по закону гиперболы.

1.18. Для уменьшения потерь холода через стенки испарителя холодильной установки запроектировано два варианта конструкции изоляции различной толщины.

По варианту I стенка состоит из пробковой пластины $\delta_{пр}=16$ мм [$\lambda_{пр}=0,042$ Вт/(м·К)], войлока шерстяного $\delta_{в}=32$ мм [$\lambda_{в}=0,052$ Вт/(м·К)] и линолеума $\delta_{л}=4$ мм [$\lambda_{л}=0,186$ Вт/(м·К)].

По варианту II – из слоя стеклянной ваты $\delta_{св}=40$ мм [$\lambda_{св}=0,04$ Вт/(м·К)], фанеры сосновой $\delta_{ф}=5$ мм [$\lambda_{ф}=0,106$ Вт/(м·К)] и лака асфальтового $\delta_{ла}=2$ мм [$\lambda_{ла}=0,7$ Вт/(м·К)].

Рассчитать, какой вариант изоляции целесообразнее в теплотехническом отношении. Стенку аппарата считать плоской.

Ответ. Целесообразнее вариант II, так как $\lambda_{эkv.I} = 0,0489$ Вт/(м·К),
 $\lambda_{эkv.II} = 0,0416$ Вт/(м·К).

1.19. Для постройки временного жилища в условиях крайнего Севера имеются в распоряжении: фанера сосновая [$\delta_{ф}=5$ мм, $\lambda_{ф}=0,107$ Вт/(м·К)], земля влажная [$\lambda_{з}=0,656$ Вт/(м·К)] и снег [$\lambda_{сн}=0,465$ Вт/(м·К)].

В какой последовательности следует расположить материалы в конструкции стенки и какие толщины принять для слоев земли и снега, если плотность теплового потока внутри дома 58 Вт/м², требуемая температура стенки внутри

помещения 20 °С, а средняя расчетная температура наружной поверхности стенки -45 °С. Слой земли должен быть минимальным. Что произойдет, если толщина слоя снега будет взята больше требуемой по расчету?

Ответ: $\delta_z=0,196$ м, $\delta_{сн}=361$ м. Последовательность слоев (считая изнутри): фанера, земля и снег. При увеличении толщины слоя снега начнется таяние его с внутренней поверхности и увлажнение земли.

1.20. Холодильная камера отделена от цеха стенкой из строительного кирпича, толщиной 25 см [$\lambda_k=0,29$ Вт/(м·К)], покрытой со стороны цеха штукатуркой [$\lambda_{шт}=0,78$ Вт/(м·К)], а со стороны камеры шлаковой ватой [$\lambda_{шв}=0,07$ Вт/(м·К)] и такой же штукатуркой. Толщина каждого слоя штукатурки 2,5 см. Температура поверхности штукатурки со стороны камеры -20 °С. Температура воздуха в цехе 20 °С, относительная влажность 70%. Через стенку проникает тепловой поток плотностью 17,4 Вт/м².

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

<p>Дано: $q=16,5$ Вт/м² $\lambda_k=0,29$ Вт/(м·К) $\delta_k=50$ см $\lambda_{шт}=0,082$ Вт/(м·К) $\delta_{шт}=10$ см $\lambda_{шт}=0,78$ Вт/(м·К) $\delta_{шт}=2$ см</p>	<p>Решение: По $h-d$ - диаграмме при температуре воздуха в цехе 20°С и относительной влажности воздуха $\varphi = 70\%$ определяют точку росы $t^I = 14^\circ\text{С}$. Минимальную толщину слоя шлаковой ваты, обеспечивающую предельно допустимую температуру поверхности стенки со стороны цеха 14°С, рассчитывают с помощью уравнения (2)</p>
<p>$\delta_{\max} - ?$</p>	$q = \frac{t^I - t^V}{\frac{\delta_{шт}}{\lambda_{шт}} + \frac{\delta_k}{\lambda_k} + \frac{\delta_{шв}}{\lambda_{шв}} + \frac{\delta_{шт}}{\lambda_{шт}}}$ $\delta_{шв} = \lambda_{шв} \left(\frac{t^I - t^V}{q} - \left(\frac{\delta_{шт}}{\lambda_{шт}} + \frac{\delta_k}{\lambda_k} + \frac{\delta_{шт}}{\lambda_{шт}} \right) \right)$ $\delta_{шв} = 0,07 \left(\frac{14 - (-20)}{17,4} - \left(\frac{0,025}{0,78} + \frac{0,25}{0,29} + \frac{0,025}{0,78} \right) \right)$ <p>Откуда $\delta_{шв} = 0,0719$ м $\approx 0,072$ м (не менее)</p>

Цилиндрическая и шаровая стенки

1.21. При определении теплопроводности шлаковой ваты методом цилиндра материал помещают в зазор между двумя коаксиальными тонкостенными металлическими цилиндрами. Наружный диаметр внутреннего цилиндра 22,5 мм, внутренний диаметр наружного цилиндра 50 мм. Длина прибора 1,2 м. Сила тока электронагревателя, размещенного внутри трубы малого диаметра 0,45 А, при напряжении 127 В. Температуры на наружной поверхности внутреннего цилиндра 144 °С и внутренней поверхности наружного цилиндра 57,4 °С. Определить теплопроводность шлаковой ваты.

Ответ: $\lambda = 0,07 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

1.22. Между внутренней и наружной поверхностями трубы из стали диаметром 51x1,5 мм [$\lambda_{ст}=45,4 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$] разность температур 0,1 °С. Рассчитать тепловой поток на 1 м длины и плотность теплового потока на 1 м² внутренней поверхности трубы.

В какую сторону изменятся эти величины, если вместо трубы из стали взять трубу тех же размеров из меди [$\lambda_{м}=384 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$], нержавеющей стали [$\lambda_{нс}=13,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$], стекла [$\lambda_{стк}=0,745 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$]?

Ответ:

Материал	$q_l, \text{ Вт/м}$	$q, \text{ Вт/м}^2$
Сталь	476,8	3163
Медь	4032,0	26751
Нержавеющая сталь	137,6	913
Стекло	7,8	52

1.23. Тепловой поток через стенку обогреваемого паром змеевика из нержавеющей стали [$\lambda_{нс}=15,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$] диаметром 50x1,75 мм при погружении змеевика в воду равен 583 Вт/м.

На сколько будет отличаться температура наружной поверхности трубы от температуры внутренней поверхности? Как изменится эта температурная разность в случае замены змеевика из нержавеющей стали змеевиком из меди [$\lambda_{м}=384 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$] при условии поддержания неизменного теплового потока?

Ответ: $\Delta t_{нс} = 0,45^\circ\text{C}$; $\frac{\Delta t_{нс}}{\Delta t_{м}} = 25,3$.

1.24. Сравнить тепловые потоки на 1 м длины и плотности тепловых потоков на 1 м² средней поверхности (по среднему диаметру) для труб из стали разного диаметра: 6x2, 10x2, 20x2 и 30x2 [$\lambda_{с}=50 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$] при условии, что между внутренней и наружной поверхностями всех труб будет одинаковая разность температур 0,3 °С.

Ответ:

a , мм	6	10	20	30
q_l , Вт/м	85,7	184,3	422,1	658,3
q , Вт/м ²	6825,6	7336,7	7467,7	7487,5

1.25. Рассчитать плотность теплового потока на 1 м² поверхности стальных труб (см. задачу №1.24) по формуле для плоской стенки. Сравнить результат с соответствующей величиной, найденной по формуле для цилиндрической стенки. Определить получаемую погрешность.

Ответ: $q_{пл} = 7500$ Вт/м²; погрешность $a_6 = 9,9\%$; $a_{10} = 2,2\%$; $a_{20} = 0,4\%$; $a_{30} = 0,2\%$

1.26. Вывести соотношение между тепловыми потоками на 1 м для двух труб a и b различных размеров и теплопроводности.

$$\text{Ответ: } \frac{q_{lб}}{q_{la}} = \frac{\lambda_б \cdot (t^I - t^{II})_б \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)_a}{\lambda_a \cdot (t^I - t^{II})_a \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)_б}.$$

1.27. Вывести формулу отношения между плотностями тепловых потоков на 1 м² внутренней поверхности для труб различных размеров и теплопроводности. Чем будет отличаться аналогичная формула отношения между плотностями тепловых потоков на 1 м² наружной поверхности для этих ж труб?

$$\text{Ответ: для внутренних поверхностей } \frac{q_б}{q_a} = \frac{d_{1a} \cdot \lambda_б \cdot (t^I - t^{II})_б \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)_a}{d_{1б} \cdot \lambda_a \cdot (t^I - t^{II})_a \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)_б}.$$

В формулу отношения плотностей потоков на 1 м² наружной поверхности труб вместо частного от деления внутренних диаметров $d_{1a} / d_{1б}$ войдет отношение наружных диаметров $d_{2a} / d_{2б}$.

1.28. Охлаждающую поверхность можно выполнить из латунных труб [$\lambda_{лат} = 85,5$ Вт/(м·К)] диаметром 38x2,5 мм (вариант а) или стальных труб [$\lambda_{ст} = 50,3$ Вт/(м·К)] диаметром 44,5x2,5 мм (вариант б).

Какое будет соотношение между температурными разностями на наружных и внутренних поверхностях этих труб, если известно, что плотность теплового потока на 1 м² средней поверхности различных тонкостенных теплопроводных труб, применяемых в одинаковых условиях, практически одинакова. Решить задачу в общем виде и числах.

Ответ:

$$\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{а}}} = \frac{\lambda_{\text{а}} \cdot d_{\text{бср}} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)_{\text{б}}}{\lambda_{\text{б}} \cdot d_{\text{аср}} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)_{\text{а}}}; \quad \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{а}}} = 1,69.$$

1.29. Латунный змеевик [$\lambda_{\text{лат}}=85,5$ Вт/(м·К)] теплообменного аппарата, изготовленный из трубы диаметром 38x2,5 мм и длиной 8,6 м, требуется заменить стальным [$\lambda_{\text{с}}=50,3$ Вт/(м·К)] из трубы диаметром 44,5x2,5 мм. Разность температур на поверхностях латунного змеевика $\Delta t_{\text{лат}}=0,1$ °С и стального $\Delta t_{\text{с}}=0,21$ °С.

Какова должна быть длина нового змеевика, чтобы общее количество передаваемого тепла осталось прежним (а); увеличилось на 19,5% (б)?

Ответ. $L_{\text{с}} = 5,84$ м (а); $L_{\text{с}} = 6,98$ м (б).

1.30. Металлические трубы теплопередающего змеевика требуется заменить трубами из другого металла.

Каково должно быть отношение наружного и внутреннего диаметров новой трубы, чтобы после замены труб было сохранено общее количество передаваемого тепла, длина змеевика и разность температур на поверхностях трубы? Определить наружный диаметр новой трубы в случае замены медной трубы диаметром 38x2,5 мм [$\lambda_{\text{м}}=384$ Вт/(м·К)], алюминиевой [$\lambda_{\text{ал}}=203,5$ Вт/(м·К)] при том же внутреннем диаметре.

$$\text{Ответ: } \left(\frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}}\right)_2 = \left(\frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}}\right)_1^{\lambda_2/\lambda_1}.$$

1.31. По стеклянному трубопроводу диаметром 56x3 мм [$\lambda_{\text{стк}}=0,745$ Вт/(м·К)] течет пастеризованное молоко. Температура молока понижается в среднем на 1 °С (на каждые 10 м длины трубопровода при скорости жидкости 0,5 м/с). Удельная теплоемкость молока $c_{\text{м}}=3840$ Дж/(кг·К). Плотность 1030 кг/м³.

Определить температуру наружной поверхности трубы.

<p>Дано: $d_2=56$ мм $\delta=3$ мм $\lambda_{\text{стк}}=0,745$ Вт/(м·К) $\Delta t=0,1$ °С $c_{\text{м}}=3840$ Дж/(кг·К) $\rho_{\text{м}}=1030$ кг/м³</p>	<p>Решение: Количество молока, проходящее через трубу, $M = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot w \cdot \rho_{\text{м}} = \frac{\pi \cdot 0,05^2}{4} \cdot 0,5 \cdot 1030 = 1,01$ кг/с. Количество теплоты, которые молоко отдает стенке на участке трубы 1 м. $q_1 = M \cdot c_{\text{м}} \cdot \Delta t = 1,01 \cdot 3840 \cdot 0,1 = 388,1$ Вт/м, с другой стороны, $q_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot (t^I - t^{II})}{\ln \frac{d_2}{d_1}}$. (3)</p>
<p>$t^{II} - ?$</p>	

Отсюда температура на наружной поверхности трубы

$$t'' = t' - \frac{q_l \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} = 74,5 - \frac{388 \cdot \ln \frac{56}{50}}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,745} = 65^\circ \text{C}$$

1.32. Проверить, можно ли прокладывать канализацию бетонными трубами [$\lambda_6=1,28$ Вт/(м·К)] диаметром 150x25 мм без тепловой изоляции в грунте, температура которого на глубине заложения трубы непосредственно у ее поверхности достигает $-1,8^\circ \text{C}$. Температура замерзания жидкости в канализации $-0,5^\circ \text{C}$. Тепловой поток на 1 м трубы 21,7 Вт/м.

Влияние скорости движения по трубе в расчет не принимается.

Дано:

$$d_2=150 \text{ мм}$$

$$\delta=25 \text{ мм}$$

$$\lambda_6=1,28 \text{ Вт/(м·К)}$$

$$t''=-1,8^\circ \text{C}$$

$$t_3=-0,5^\circ \text{C}$$

$$q_l=21,7 \text{ Вт/м}$$

$$t'=?$$

Решение:

Для решения задачи необходимо выяснить, будет ли жидкость в канализации при данных условиях намерзать на внутренней поверхности труб. Это будет происходить, если температура внутренней поверхности трубы t' окажется ниже точки замерзания $t_3 = -0,5^\circ \text{C}$.

Для однослойной цилиндрической стенки трубы в соответствии с формулой (3)

$$t' = \frac{21,7 \cdot \ln 1,5}{1,28 \cdot 2 \cdot 3,14} - 1,8 = -0,71^\circ \text{C}$$

Ответ:

Температура внутренней поверхности $t' = -0,71^\circ \text{C}$.

Следовательно, прокладка труб без изоляции на данной глубине недопустима.

1.33. Змеевик испарителя холодильной машины изготовлен из труб нержавеющей стали [$\lambda_{нс}=13,3$ Вт/(м·К)] диаметром 40x3 мм. Змеевик погружен в раствор NaCl 18,8%-ной концентрацией (по массе соли к массе раствора). Внутри змеевика испаряется холодильный агент, охлаждающий внутреннюю поверхность трубы до $-15,8^\circ \text{C}$. Удельный тепловой поток от раствора к агенту составляет 207 Вт/м.

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

Ответ: Температура наружной поверхности трубы $t'' = -15,4^\circ \text{C}$, т.е. ниже температуры замерзания раствора заданной концентрации. Следовательно, при данном режиме работы холодильной машины раствор будет намерзать на поверхности труб. Его концентрацию необходимо повысить так, чтобы температура замерзания была ниже температуры поверхности трубы.

1.34. Температура кипения некоторого раствора при его сгущении до определенной концентрации $127,2^\circ \text{C}$. Нагревательная поверхность для

кипятильного аппарата проектируется в виде нескольких фарфоровых труб [$\lambda_{\text{ф}}=1,04 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$] диаметром 22x2,5 мм и общей длиной 6,55 м. Расположенный внутри трубы электронагреватель мощностью 0,83 кВт при кипении раствора данной концентрации обеспечивает на внутренней поверхности трубы температуру 132 °С.

Будет ли происходить устойчивое кипение при указанной мощности электронагревателя (наличие потерь тепла не учитывать)?

Ответ: Устойчивое кипение обеспечено не будет, так как при температуре внутренней поверхности трубы $t^I = 132^\circ\text{C}$ температура наружной ее поверхности $t^{II} = 127^\circ\text{C}$ (ниже температуры кипения заданной концентрации $127,2^\circ\text{C}$). Поэтому по достижении данной концентрации необходимо увеличить мощность электронагревателя.

1.35. Стальной паропровод диаметром 38x2,5 мм, длиной 28,7 м изолирован слоем минеральной ваты [$\lambda_{\text{мв}}=0,0465 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$] толщиной 18 мм. Температура на наружной поверхности трубы 152,2 °С, на наружной поверхности изоляции 65,3 °С.

Определить общую потерю тепла и удельные потери на 1 м, а также удельные потери на 1 м² внутренней поверхности трубы, наружной поверхности трубы и наружной поверхности изоляции.

Ответ: $Q = 1100 \text{ Вт}$; $q_l = 38,3 \text{ Вт}/\text{м}$; $q_{\text{вн}} = 369,7 \text{ Вт}/\text{м}^2$; $q_{\text{нар_тр}} = 321,1 \text{ Вт}/\text{м}^2$;
 $q_{\text{нар_из}} = 164,9 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

1.36. Стальной трубопровод диаметром 108x5 мм [$\lambda_{\text{ст}}=50,3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$] имеет трехслойную изоляцию. Толщина первого слоя 25 мм [$\lambda_1=0,038 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$]; второго – 35 мм [$\lambda_2=0,052 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$] и третьего – 4 мм [$\lambda_3=0,116 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$]. Температура на внутренней поверхности трубы 218 °С, на наружной поверхности второго слоя 76 °С.

Определить неизвестные температуры на поверхностях слоев.

Дано:

$$d_2=108 \text{ мм}$$

$$\delta_{\text{ст}}=5 \text{ мм}$$

$$\lambda_{\text{ст}}=50,3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$$

$$\delta_1=25 \text{ мм}$$

$$\lambda_1=0,038 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$$

$$\delta_2=35 \text{ мм}$$

$$\lambda_2=0,052 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$$

$$\delta_3=4 \text{ мм}$$

$$\lambda_3=0,116 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$$

$$t^I = 218 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t^{IV} = 76 \text{ }^\circ\text{C}$$

Решение:

Чтобы определить температуры поверхностей слоев, необходимо рассчитать тепловой поток на 1 м трубы

Температурному перепаду $t^I - t^{IV}$ соответствует удельное термическое сопротивление теплопроводности

$$R_1 + R_2 + R_3 = \frac{1}{2\lambda_1} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2\lambda_3} \cdot \ln \frac{d_4}{d_3}$$

Зависимость между температурной разностью и удельным термическим сопротивлением для нескольких слоев многослойной стенки такая же, как общая зависимость для всех слоев стенки в целом.

$$q_l = \frac{\pi \cdot \Delta t}{R}$$

$t - ?$

При стационарном тепловом процессе через каждый из слоев проходит один и тот же тепловой поток, равный потоку через всю многослойную стенку

$$q_l = \frac{\pi \cdot (t^I - t^{IV})}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{\pi \cdot (t^I - t^V)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$$

так как t^V неизвестно, воспользуемся левой частью этого выражения, откуда можно определить q_l

$$q_l = \frac{3,14 \cdot (218 - 76)}{\frac{1}{2 \cdot 50,3} \cdot \ln \frac{108}{98} + \frac{1}{0,038} \ln \frac{158}{108} + \frac{1}{2 \cdot 0,052} \ln \frac{228}{158}} = 52,24 \text{ Вт/м}$$

Зная q_l , можно рассчитать температуры поверхностей слоев.

$$q_l = \frac{\pi \cdot (t^I - t^{II})}{R_1} \Rightarrow t^{II} = t^I - \frac{q_l}{\pi} \cdot R_1$$

$$t^{II} = 218 - \frac{52,24}{3,14} \cdot 0,001 = 217,98^\circ \text{C}$$

$$t^{III} = t^{II} - \frac{q_l}{\pi} \cdot R_2 = 217,98 - \frac{52,24}{3,14} \cdot 5,0073 = 134,67^\circ \text{C}$$

$$t^{IV} = 134,6 - \frac{52,24}{3,14} \cdot 3,5269 \approx 75,99 = 76^\circ \text{C}$$

$$t^V = t^{IV} - \frac{q_l}{\pi} \cdot R_4 = 76 - \frac{52,24}{3,14} \cdot 0,148 = 73,54^\circ \text{C}$$

Ответ: $t^{II} = 217,98^\circ \text{C}$; $t^{III} = 134,67^\circ \text{C}$; $t^V = 73,54^\circ \text{C}$.

1.37. Трубу с наружным диаметром 57 мм необходимо покрыть двумя слоями тепловой изоляции: асбестом [$\lambda_{\text{асб}}=0,116 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$] и минеральной шерстью [$\lambda_{\text{мш}}=0,058 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$].

В какой последовательности следует располагать слои изоляционных материалов для получения лучшего эффекта? Для наглядности сравнения результатов толщину слоев принять одинаковой 30 мм. Объяснить, почему при многослойной изоляции цилиндрической стенки расположение слоев неважно (в отличие от плоской стенки).

Ответ: ближе к изолируемой поверхности выгоднее расположить материал с лучшими изолирующими свойствами (т.е. с меньшей теплопроводностью). Объяснение этого явления вытекает из уравнения теплового потока для многослойной цилиндрической стенки: в данном случае сумма удельных термических сопротивлений зависит от расположения слоев.

1.38. Стальной трубопровод [$\lambda_{ст}=45,4$ Вт/(м·К)] диаметром 60х5 мм холодильной установки имеет двухслойную тепловую изоляцию: слой минеральной ваты 20 мм [$\lambda_{м}=0,041$ Вт/(м·К)] и слой шлаковой ваты 30 мм [$\lambda_{шв}=0,07$ Вт/(м·К)]. Определить долю каждого из изоляционных слоев и стенки трубы в общем изолирующем действии конструкции.

Дано:
 $d_2=60$ мм
 $\delta_{ст}=5$ мм
 $\lambda_{ст}=45,4$ Вт/(м·К)
 $\delta_1=20$ мм
 $\lambda_1=0,041$ Вт/(м·К)
 $\delta_2=30$ мм
 $\lambda_2=0,07$ Вт/(м·К)
 $t^I=218$ °С
 $t^V=76$ °С

Решение:
 Эффективность изоляции измеряется ее удельным термическим сопротивлением. Общее удельное термическое сопротивление стенки трубы и двух изоляционных слоев равно сумме частных сопротивлений.

В данном случае

$$R_1 = \frac{1}{2 \cdot 45,4} \ln \frac{60}{50} = 0,002 \text{ (м} \cdot \text{К)}/\text{Вт}$$

$$R_2 = \frac{1}{2 \cdot 0,041} \ln \frac{100}{60} = 6,225 \text{ (м} \cdot \text{К)}/\text{Вт}$$

$$R_3 = \frac{1}{2 \cdot 0,07} \ln \frac{160}{100} = 3,353 \text{ (м} \cdot \text{К)}/\text{Вт}$$

Следовательно,

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 9,58 \text{ м} \cdot \text{К}/\text{Вт}$$

Таким образом, доля частных сопротивлений к общему

$$R_1 = \frac{0,002 \cdot 100}{9,58} = 0,02\% ; \quad R_2 = \frac{6,225 \cdot 100}{9,58} = 64,98\% ;$$

$$R_3 = \frac{3,353 \cdot 100}{9,58} = 35\%$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 100\%$$

Обратите внимание на следующее:

- доля стенки металлической трубы в общем изоляционном действии конструкции ничтожна;
- тонкий слой качественной изоляции, положенной непосредственно на трубу, может дать больший изолирующий эффект, чем сравнительно толстый слой изоляции несколько худшего качества, положенный снаружи, на первый слой.

Ответ: стенка трубы 0,02%; минеральная вата 64,98%; шлаковая вата 35%.

1.39. Вывести уравнение для определения величины эквивалентной теплопроводности трехслойной цилиндрической стенки. Рассчитать $\lambda_{э\text{кв}}$ для стальной [$\lambda_{ст}=58,2$ Вт/(м·К)] трубы диаметром 170,5 мм, покрытой слоем жароупорной изоляции [$\lambda_{ж_из}=0,128$ Вт/(м·К)] толщиной 20 мм, а затем – слоем пробки [$\lambda_{п}=0,041$ Вт/(м·К)] толщиной 50 мм.

Ответ: $\lambda_{э\text{кв}} = 0,060$ Вт/(м·К).

1.40. Стальную трубу [$\lambda_{ст}=45,4$ Вт/(м·К)] рассолопровода холодильной установки диаметром 89х3 мм можно изолировать стеклянной ватой [$\lambda_{св}=0,37$ Вт/(м·К)]; шерстяным войлоком [$\lambda_{в}=0,047$ Вт/(м·К)]; торфолеумом [$\lambda_{тф}=0,064$ Вт/(м·К)] и шлаковой ватой [$\lambda_{шв}=0,07$ Вт/(м·К)].

Какой толщины слой изоляции необходимо наложить на трубу при использовании различных материалов, чтобы потери холода во всех случаях оставались одинаковыми и не превышали 11,6 Вт/м, а температура на наружной поверхности изоляции была не ниже 15 °С. Температура внутренней поверхности трубы -22 °С.

Ответ: $\delta_{св} = 49,0$ мм; $\delta_{в} = 69,6$ мм; $\delta_{тф} = 115,7$ мм; $\delta_{шв} = 136,4$ мм.

1.41. Труба диаметром 68х3,5 мм из нержавеющей стали [$\lambda_{нс}=23,8$ Вт/(м·К)] покрыта двухслойной тепловой изоляцией из гранулированной пробки [$\lambda_{п}=0,038$ Вт/(м·К), $\delta_{п}=20$ мм, и шерстяного войлока [$\lambda_{в}=0,052$ Вт/(м·К), $\delta_{в}=40$ мм]. Рассчитать конструкцию изоляции из более дешевых и стойких материалов – стеклянной ваты [$\lambda_{св}=0,37$ Вт/(м·К)] и минеральной шерсти [$\lambda_{мш}=0,058$ Вт/(м·К)]. Определить толщину каждого из слоев новой конструкции, чтобы изолирующее действие ее было на 10% выше, а общая толщина слоев – на 10% меньше, чем толщина у прежней изоляции.

Ответ: Стеклянная вата $\delta_{св} = 44,4$ мм, минеральная шерсть $\delta_{мш} = 9,65$ мм.

1.42. Алюминиевая труба [$\lambda_{ал}=215$ Вт/(м·К)] диаметром 95х6 мм, охлаждаемая изнутри холодильным агентом, погружена в воду.

Определить максимальную толщину слоя льда [$\lambda_{л}=2,73$ Вт/(м·К)], который может образоваться на наружной поверхности трубы, если температура внутренней ее поверхности -28 °С, а количество теплоты, проникающей через 1 м трубы, покрытой льдом, 1910 кДж.

Ответ: $\delta_{л} = 70$ мм.

1.43. При определении теплопроводности материалов методом стационарного режима с помощью шарового прибора испытуемый материал закладывается в зазор между двумя, концентрично расположенными тонкими шаровыми стенками из теплопроводного металла. Внутренний шар обогревается электрическим током, поверхность наружного шара охлаждается окружающим воздухом.

Рассчитать теплопроводность мяса по следующим данным: наружный диаметр внутреннего шара 80 мм, внутренний диаметр наружного шара 150 мм. Температура на наружной поверхности внутреннего шара 85 °С, на внутренней поверхности наружного шара 33 °С. Сила тока в электрообогревателе 1,05 А при напряжении 24 В.

Ответ: $\lambda_{м} = 0,45$ Вт/(м·К).

1.44. Шаровой реактор наружным диаметром 960 мм имеет стенку толщиной 50 мм, состоящую из кварцевого стекла и нержавеющей стали, с эквивалентной теплопроводностью $\lambda_{\text{экв}}=1,49$ Вт/(м·К). Вследствие выделения тепла при экзотермической реакции температура внутренней поверхности стенки 210 °С, наружной поверхности 80 °С.

Определить плотность теплового потока для наружной и внутренней поверхностей реактора.

Дано:

$$d_2=960 \text{ мм}$$

$$\delta_{\text{ст}}=50 \text{ мм}$$

$$\lambda_{\text{экв}}=1,49 \text{ Вт/(м·К)}$$

$$t^I = 210 \text{ °С}$$

$$t^{II} = 80 \text{ °С}$$

Решение:

1. Общее количество выделяемой реактором теплоты

$$Q = \frac{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{экв}} \cdot (t^I - t^{II})}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 1,49 \cdot (210 - 80)}{\frac{1}{0,43} - \frac{1}{0,48}} = 10042,8 \text{ Вт}$$

2. Тепловая нагрузка стенки характеризуется плотностью теплового потока для наружной поверхности

$$q_{\text{нар}} = \frac{Q}{F_{\text{нар}}} = \frac{Q}{\pi \cdot d_2^2} = \frac{10042,8}{3,14 \cdot 0,96^2} = 3470,4 \text{ Вт/м}^2$$

3. Плотность теплового потока для внутренней поверхности. Если отношение поверхностей

$$\frac{F_{\text{вн}}}{F_{\text{нар}}} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{\pi \cdot d_2^2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \frac{0,86^2}{0,96^2} = 0,8025,$$

то

$$q_{\text{вн}} = \frac{q_{\text{нар}}}{0,8025} = \frac{3470,4}{0,8025} = 4324,5 \text{ Вт/м}^2.$$

Ответ: $q_{\text{нар}} = 3470 \text{ Вт/м}^2$; $q_{\text{вн}} = 4324,5 \text{ Вт/м}^2$.

ГЛАВА 2. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

2.1. Через прямоугольный закрытый бак размером 1,6x0,9x0,7 м протекает раствор хлористого натрия температурой -21 °С. Бак воспринимает тепло от окружающего воздуха температурой 14 °С. Стенка бака стальная толщиной 4 мм, теплопроводность стали $\lambda_{ст}=49$ Вт/(м·К). Коэффициент теплоотдачи от стенки бака к раствору $\alpha_{рс}=535$ Вт/(м²·К), от воздуха к стенке $\alpha_{в}=24,4$ Вт/(м²·К).

Проанализировать процесс теплопередачи: найти частные термические сопротивления теплопередачи, теплопроводности, общее сопротивление, определить коэффициент теплопередачи, плотность теплового потока, общее количество воспринимаемого тепла, а также температуры на внутренней и наружной поверхностях стенки.

Дано:

$$1,6 \times 0,9 \times 0,7 \text{ м}$$

$$\delta = 4 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = 49 \text{ Вт/(м·К)}$$

$$\alpha_{в} = 24,4 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}$$

$$\alpha_{рс} = 535 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}$$

$$t_1 = 14 \text{ °С}$$

$$t_2 = -21 \text{ °С}$$

Решение:

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_{в}} = \frac{1}{24,4} = 0,041 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}};$$

$$R_2 = \frac{\delta}{\lambda_c} = \frac{0,004}{49} = 0,0000815 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}};$$

$$R_3 = \frac{1}{\alpha_{рс}} = \frac{1}{535} = 0,00187 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}};$$

$$R = \frac{1}{\alpha_{в}} + \frac{\delta}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_{рс}} = 0,043 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}};$$

$$k = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,043} = 23,26 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}};$$

$$q = k(t_1 - t_2) = 23,26 \cdot [14 - (-20)] = 23,26 \cdot 34 = 790,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

$$F = 2 \cdot 1,6 \cdot 0,7 + 2 \cdot 0,9 \cdot 0,7 + 2 \cdot 1,6 \cdot 0,9 = 6,38 \text{ м}^2,$$

откуда

$$Q = qF = 790,8 \cdot 6,38 = 5045 \text{ Вт}.$$

Чтобы определить температуру на наружной поверхности бака, напишем уравнение теплоотдачи от воздуха к этой стенке

$$q = \alpha_{в}(t_1 - t^I); \quad 790,8 = (14 - t^I) \cdot 24,4,$$

$$\text{отсюда } t^I = -18,4 \text{ °С}.$$

Температуру на внутренней поверхности бака находим из уравнения теплоотдачи от стенки к раствору

$$q = \alpha_{рс}(t^{II} - t_2); \quad 790,8 = [t^{II} - (-21)] \cdot 535,$$

$$\text{откуда } t^{II} = -19,5 \text{ °С}.$$

Ответ:

$$R_1 = 0,041 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}; \quad R_2 = 0,0000815 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт};$$

$$R_3 = 0,00187 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}; \quad R = 0,043 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт};$$

$$k \approx 23,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); q \approx 790,8 \text{ Вт}/\text{м}^2; Q = 5045 \text{ Вт};$$

$$t^I = -18,4 \text{ }^\circ\text{С}, t^{II} = -19,5 \text{ }^\circ\text{С}$$

2.2. Сравнить количества тепла, передаваемые через кирпичную стенку здания от внутреннего воздуха к наружному [толщина 520 мм, $\lambda_{\text{к}}=0,29 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$] и через стеклянные окна в этой же стенке [толщина стекла 2 мм, $\lambda_{\text{ст}}=0,74 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$] при одинаковых условиях теплоотдачи: внутри помещения температура воздуха $18 \text{ }^\circ\text{С}$, коэффициент теплоотдачи $11,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, снаружи здания соответственно $11 \text{ }^\circ\text{С}$ и $26,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$. Решить задачу в общем виде и в числах.

$$\text{Ответ: } \frac{q_2}{q_1} = \frac{\sum R_1}{\sum R_2} = 15,2.$$

2.3. Наружные стенки двух холодильных камер работают в одинаковом температурном режиме, но в разных условиях: в первой камере стенка толщиной 40 см из строительного кирпича [$\lambda_{\text{к}}=0,29 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$], внутри камеры происходит естественная конвекция воздуха, коэффициент теплоотдачи $9,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$; во второй камере наружная стенка деревянная толщиной 25 см [$\lambda_{\text{д}}=0,29 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$], в камере искусственная циркуляция воздуха коэффициент теплоотдачи $48,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$. В обоих случаях коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стенок одинаков $24,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$.

Определить коэффициент теплопередачи через наружную стенку для обеих камер. В какой из камер потери холода с 1 м^2 поверхности стенок будут больше и во сколько раз?

$$\text{Ответ: } k_1 = 0,655 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), k_2 = 0,417 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \frac{q_1}{q_2} = 1,57.$$

2.4. Внутри воздуховода из фанеры толщиной 3 мм [$\lambda_{\text{ф}}=0,16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$] движется воздух. Стенка канала плоская. Температура воздуха снаружи воздуховода $23 \text{ }^\circ\text{С}$. Температура наружной его поверхности $28 \text{ }^\circ\text{С}$, коэффициент теплоотдачи от внутреннего воздуха к стенке воздуховода $72 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$, от наружной поверхности стенки к внешнему воздуху $15 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$.

Рассчитать температуру воздуха в воздуховоде.

Дано:

$$\delta=3 \text{ мм}$$

$$\lambda_{\text{ф}}=0,16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$$

$$\alpha_{\text{нар}}=15 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$$

$$\alpha_{\text{вн}}=72 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$$

$$t^I=28 \text{ }^\circ\text{С}$$

$$t_2=23 \text{ }^\circ\text{С}$$

Решение:

Потери тепла с 1 м^2 наружной поверхности канала составят

$$q_{\text{нар}} = \alpha_{\text{нар}} (t^I - t_2) = 15 \cdot (28 - 23) = 75 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Это количество теплоты проникает через 1 м^2 внутренней поверхности канала. Полагая, что внутренняя поверхность

канала приблизительно равна наружной (ввиду малой толщины стенки), можно считать, что $q_{вн} = q_{нар}$ и тогда

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_{нар}} + \frac{\delta}{\lambda_{ф}} + \frac{1}{\alpha_{вн}}} .$$

Откуда

$$t_1 = t_2 + qR = 23 + 75 \cdot 0,0993 = 30,4 \text{ } ^\circ\text{C} ,$$

где

$$R = \frac{1}{\alpha_{нар}} + \frac{\delta}{\lambda_{ф}} + \frac{1}{\alpha_{вн}} = \frac{1}{15} + \frac{0,003}{0,16} + \frac{1}{72} = 0,0993 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}} .$$

Ответ: $t_1 = 30,4 \text{ } ^\circ\text{C}$.

2.5. При испытании пастеризатора для молока установлено, что производительность аппарата 600 кг/ч, поверхность нагрева 1,5 м², коэффициент теплоотдачи от нагревательной поверхности к молоку 3020 Вт/(м²·К), а от горячей воды к стенке 3720 Вт/(м²·К). Температура молока при входе в аппарат 8 °С, а при выходе из него 75 °С, температура воды соответственно 93 °С и 32 °С. Толщина металлической стенки, разделяющей среды, 2 мм.

Определить теплопроводность этой стенки; из какого материала она сделана? Средние температуры жидкостей допустимо рассчитывать приближенно (по средней арифметической). Удельная теплоемкость молока 3,94 кДж/(кг·К).

Ответ: $\lambda = 17,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Значение величины коэф. теплопроводности указывает, что нагревательная поверхность выполнена из нержавеющей стали.

2.6. Аккумулятор холода выполнен в виде закрытого стального цилиндрического танка, его внутренние размеры: диаметр 0,8 м, длина 1,4 м. Толщина стенок 4 мм. Теплопроводность стали 48 Вт/(м·К). Танк заполнен протекающим через него холодным солевым раствором. При отсутствии тепловой изоляции потери холода от поверхности танка в окружающий воздух составляли 1850 Вт при температурах рассола –18 °С и воздуха 18 °С. Коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке танка 11,6 Вт/(м²·К).

Определить коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности стенки танка к рассолу. Ввиду значительных размеров танка и относительно небольшой толщины стенки ее можно рассматривать как плоскую.

Ответ: $\alpha_2 = 581 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

2.7. Толщина кирпичной стены 38 см [$\lambda=0,29 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$], температура воздуха снаружи здания –19,7 °С, внутри помещения поддерживается 20,2 °С, коэффициент теплоотдачи от воздуха внутри помещения к поверхности стенки 15,8 Вт/(м²·К), а от стенки к внешнему воздуху 28,3 Вт/(м²·К).

Определить температуру внутренней и наружной поверхности, а также температуру по средней плоскости стены. Как изменятся потери тепла стены и температура ее внутренней поверхности, если в результате увеличения скорости ветра коэффициент теплоотдачи снаружи увеличится до $54 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$?

Ответ: $t^I = 18,4^\circ \text{C}$; $t^{II} = -18,7^\circ \text{C}$; $t_{CP} = -0,15^\circ \text{C}$; $q_1 = 28,3 \text{ Вт}/\text{м}^2$; $q_2 = 28,7 \text{ Вт}/\text{м}^2$;
 $t_2^I = 18,4^\circ \text{C}$.

2.8. Закрытый медный цилиндрический кипятильник для воды равномерно теряет тепло в окружающий воздух. Коэффициент теплоотдачи от кипящей воды к стенке $4190 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, от стенки к воздуху $25,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Как изменятся потери тепла, если стенка бака будет изготовлена не из меди [$\delta_M = 1,5 \text{ мм}$; $\lambda_M = 386 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$], а из нержавеющей стали [$\delta_{nc} = 0,8 \text{ мм}$; $\lambda_{nc} = 15,4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$]?

От чего больше зависит в данном случае величина потерь – от толщины и теплопроводности стенки, теплоотдачи внутри или теплоотдачи снаружи стенки? Для приближенного расчета допустимо считать стенку плоской.

<p>Дано: $\delta_M = 1,5 \text{ мм}$ $\lambda_M = 386 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ $\delta_{nc} = 0,8 \text{ мм}$ $\lambda_{nc} = 15,4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ $\alpha_1 = 4190 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ $\alpha_2 = 25,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$</p>	<p>Решение:</p> $q_1 = \frac{t_1 - t_2}{\sum R_1}; \quad q_2 = \frac{t_1 - t_2}{\sum R_2},$ <p>Следовательно,</p> $\frac{q_2}{q_1} = \frac{\sum R_1}{\sum R_2};$ $\sum R_1 = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_M}{\lambda_M} + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{4190} + \frac{0,0015}{386} + \frac{1}{25,6} = 0,0393 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}};$ $\sum R_2 = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{nc}}{\lambda_{nc}} + \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{4190} + \frac{0,0008}{15,4} + \frac{1}{25,6} = 0,0394 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$ <p>Таким образом, $\frac{q_2}{q_1} = \frac{0,03930}{0,0394} 0,999,$</p> <p>т.е. разница между величинами q_2 и q_1 составляет всего 0,1% несмотря на то, что термическое сопротивление теплопроводности стенок отличается значительно</p> $\frac{R_{nc}}{R_M} = \frac{\frac{\delta_{nc}}{\lambda_{nc}}}{\frac{\delta_M}{\lambda_M}} = \frac{15,4}{386,0} = 13,4$ <p>Близкое совпадение q_2 и q_1 объясняется, очевидно, тем, что сопротивление теплопроводности стенки играет в общем сопротивлении весьма незначительную роль.</p> <p>Определим долю частных термических сопротивлений в общем сопротивлении, например для случая медной стенки. Сопротивление теплоотдачи первой среды – кипящей воды</p>
--	--

$$\frac{R_{\alpha_1}}{R} = \frac{2,38 \cdot 10^{-4} \cdot 100}{0,0393} = 0,60 \% .$$

Сопротивление теплопроводности стенки

$$\frac{R_{\lambda_m}}{R} = \frac{3,89 \cdot 10^{-6} \cdot 100}{0,0393} = 0,01 \% .$$

Сопротивление теплоотдачи второй среды – воздуха

$$\frac{R_{\alpha_2}}{R} = \frac{0,0391 \cdot 100}{0,0393} = 99,4 \% .$$

Таким образом, влияние термического сопротивления стенки на величину потерь тепла при взятых условиях ничтожно. Сопротивление теплоотдачи от жидкости к стенке также незначительно. Из расчета видно, что величина потерь тепла в данном случае определяется в основном коэффициентом теплоотдачи от поверхности к воздуху.

Вывод. *Если среди частных сопротивлений одно во много раз превышает сумму всех остальных, то величина теплового потока практически определяется этим основным сопротивлением.*

Ответ: $\frac{q_2}{q_1} = 0,999$, т.е. $q_2 \approx q_1$. В данных условиях практически $q = f(\alpha_2)$

2.9. В паровом теплообменнике для подогрева химического раствора теплопередающую стенку из меди толщиной 2 мм [$\lambda_m=384$ Вт/(м·К)] заменяют стенкой из нержавеющей стали толщиной 1,5 мм [$\lambda_c=15,5$ Вт/(м·К)]. Коэффициент теплоотдачи со стороны конденсирующегося греющего пара 8720 Вт/(м²·К), со стороны обогреваемого раствора 2560 Вт/(м²·К).

Определить изменение производительности аппарата в результате замены материала стенки. Как повлияет на производительность каждого из конструктивных вариантов увеличение коэффициента теплоотдачи от стенки к раствору в 1,5 раза? Какой вывод отсюда следует?

Ответ: Изменение производительности $\frac{q_2}{q_1} = 0,848$. При увеличении величины α_2 (стенка

из меди) $\frac{q_1^I}{q_1} = 1,343$; при увеличении величины α_2 (стенка из нержавеющей стали)

$$\frac{q_2^I}{q_2} = 1,28.$$

Выводы.

1. *При высоких коэффициентах теплоотдачи по обе стороны теплопередающей стенки изменение ее термического сопротивления существенно влияет на теплопередачу.*

2. Увеличение коэффициентов теплоотдачи дает больший эффект при использовании стенок с меньшим термическим сопротивлением.

2.10. Теплоотдача по одну сторону тонкой стенки из теплопроводного металла определяется коэффициентом $6050 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а по другую – $291 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Какой из коэффициентов теплоотдачи следует увеличивать для интенсификации процесса?

<p>Дано: $\alpha_1 = 6050 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ $\alpha_2 = 291 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$</p>	<p>Решение: Термическое сопротивление тонкой металлической стенки по сравнению с сопротивлениями теплоотдачи по обе стенки мало. Поэтому можно считать, что</p> $k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}}$ <p>Рассчитаем влияние на коэффициент теплопередачи увеличения каждого из коэффициентов α_1 и α_2 в два раза.</p> <p>До интенсификации процесса</p> $k = \frac{1}{\frac{1}{6050} + \frac{1}{291}} = 278 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}},$ <p>а после интенсификации путем увеличения α_1 в два раза</p> $k' = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 6050} + \frac{1}{291}} = 284 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$ <p>Увеличение составит $\frac{\Delta k}{k} \cdot 100 = 2,2 \%$.</p> <p>После интенсификации процесса путем увеличения α_2 в 2 раза</p> $k'' = \frac{1}{\frac{1}{6050} + \frac{1}{2 \cdot 291}} = 556 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$ <p>Увеличение составит $\frac{\Delta k}{k} \cdot 100 = 100 \%$.</p> <p>Следовательно, в условиях, когда коэффициенты теплоотдачи по разные стороны теплопередающей стенки значительно отличаются друг от друга, интенсификация процесса за счет увеличения большего коэффициента теплоотдачи нецелесообразна, она должна производиться по принципу «расшивки узкого места».</p> <p>Ответ: для интенсификации процесса необходимо увеличить меньший коэффициент теплоотдачи</p>
--	--

2.11. В теплообменном аппарате происходит теплопередача через плоскую стальную стенку толщиной 3 мм [$\lambda = 45,4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$]. Производительность

аппарата оказалась недостаточной. В результате испытания аппарата установлено, что $\alpha_1=1070$ Вт/(м²·К), $\alpha_2=78$ Вт/(м²·К), а разность между температурами сред 54 К. Для интенсификации процесса можно увеличить α_1 на 60% (а) и α_2 на 20% (б); уменьшить термическое сопротивление стенки, заменив стальную стенку толщиной 3 мм стенкой из меди толщиной 4 мм (в), увеличить разность температур на 15% (г). Какие из этих способов повышения производительности аппарата являются эффективными и какие рекомендовать не следует?

Определить повышение производительности в результате внедрения этих способов.

Дано:

$$\delta=3 \text{ мм}$$

$$\lambda=45,4 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

$$\alpha_1=1070 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$$

$$\alpha_2=78 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$$

$$\Delta t=54 \text{ К}$$

Решение:

Термическое сопротивление тонкой металлической стенки по сравнению с сопротивлениями теплоотдачи по обе стенки мало. Поэтому можно считать, что При теплопередаче через плоскую стенку плотность теплового потока

$$q = \frac{\Delta t}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

следовательно, до интенсификации

$$q = \frac{54}{\frac{1}{1070} + \frac{0,003}{45,4} + \frac{1}{78}} = 3907 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

1. При увеличении α_1 на 60% получаем

$$\alpha_1 = 1,6 \cdot 1070 = 1712 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}};$$

тогда

$$q = 4009 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

$$\Delta q_1 = \frac{4009 - 3907}{3907} \cdot 100 = 2,61 \%$$

2. При увеличении α_2 на 20% получаем

$$\alpha_2 = 1,2 \cdot 78 = 93,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}};$$

тогда

$$q = 4621 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

$$\Delta q_2 = \frac{4621 - 3907}{3907} \cdot 100 = 18,28 \%$$

3. В результате уменьшения термического сопротивления получаем сопротивление медной стенки

$$R = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{0,004}{384} = 1,04 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}.$$

Замена материала стенки дает уменьшение сопротивления по сравнению с прежней величиной $\left(\frac{0,003}{45,4} = 6,61 \cdot 10^{-5}\right)$ в 6,36 раза, что соответствует новому тепловому потоку

$$q = \frac{54}{\frac{1}{1070} + \frac{0,004}{384} + \frac{1}{78}} = 3923 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2};$$

$$\Delta q_3 = \frac{3923 - 3907}{3907} \cdot 100 = 0,41 \%$$

4. В результате увеличения разности температур на 15%

$$q = \frac{1,15 \cdot 54}{\frac{1}{1070} + \frac{0,003}{45,4} + \frac{1}{78}} = 4493 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Очевидно, что $\Delta q_4 = 15 \%$.

Вывод. Эффективность увеличения коэффициента теплоотдачи α_1 очень мала; эффективность замены одной металлической стенки другой, более теплопроводной, совершенно ничтожна; рекомендовать следует увеличение коэффициента теплоотдачи α_2 и увеличение температурной разности Δt . Интенсивность теплопередачи (и, следовательно, производительность аппарата) возрастает в отношении $q_1 = 1,183 \cdot 1,15 \cdot q = 1,36 \cdot q$, т.е. на 36%.

Ответ: увеличение α_1 и уменьшение термического сопротивления не эффективно, а увеличение α_2 и разности температур Δt дает суммарное повышение производительности на 36%.

2.12. До реконструкции испарителя холодильной установки удельная холодопроизводительность его составляла 975 Вт с 1 м² рабочей поверхности, соотношение между термическими сопротивлениями $\frac{1}{\alpha_1} : \frac{\delta}{\lambda} : \frac{1}{\alpha_2}$

соответствовало 149 : 1 : 99, а разность температур между рассолом и холодильным агентом равнялась 14 °С. После реконструкции испарителя в результате увеличения частоты вращения мешалки коэффициент теплоотдачи от рассола к стенке змеевика повысился на 16,7%, в результате замены медного змеевика змеевиком из нержавеющей стали термическое сопротивление теплопроводности увеличилось в 11 раз, вследствие повышения рабочего давления в испарителе коэффициент теплоотдачи от стенки змеевика к кипящему хладагенту повысился в 1,23 раза, а разность температур одновременно уменьшилась на 7%.

В какую сторону и в какой степени изменится производительность аппарата после реконструкции испарителя?

Для данного расчета рассматривать рабочую поверхность испарителя как плоскую стенку.

Ответ: $\frac{q_2}{q_1} = 1,056$ (увеличение на 5,64%).

2.13. Температура воздуха внутри сушильной камеры 140 °С, снаружи 29 °С, коэффициент теплоотдачи от воздуха к внутренней поверхности стенки 72 Вт/(м·К), от стенки к наружному воздуху 16,3 Вт/(м·К). Теплопроводность сложной стенки аппарата характеризуется эквивалентным коэффициентом $\lambda_{\text{экв}}=0,23$ Вт/(м·К).

Как будут изменяться потери тепла с 1 м² кирпичной стенки сушильной камеры и температура наружной поверхности стенки в случае ступенчатого увеличения толщины ее от 0,2 до 0,6 м через 0,1 м. Построить совмещенный график функций $q = f(\delta)$ и $t^I = f(\delta)$.

2.14. Бак из дерева [$\lambda_{\text{д}}=0,105$ Вт/(м·К)] заполнен водой. Температура воды 4,8 °С и окружающего воздуха 18,6 °С; коэффициент теплоотдачи от стенки к воде 322 Вт/(м²·К), от воздуха к стенке 7,9 Вт/(м²·К). Точка росы воздуха 14,3 °С. Определить минимальную толщину стенки бака, при которой на наружной ее поверхности не будет выпадать роса.

<p>Дано: $\lambda_{\text{д}}=0,105$ Вт/(м·К) $t_1=18,6$ °С $t_2=4,8$ °С $\alpha_1=7,9$ Вт/(м²·К) $\alpha_2=322$ Вт/(м²·К) $t_{\text{р}}=14,3$ °С</p>	<p>Решение: 1. Выпадение влаги на поверхности может происходить при температуре поверхности, равной или меньшей, чем точка росы $t_{\text{р}}$, т.е. при условии $t^I \leq t_{\text{р}}$. Поэтому в заданных условиях процесс выпадения росы на поверхности стенки бака начнется при $t^I = t_{\text{р}} = 14,3$ °С. Следовательно, плотность теплового потока, при которой уже начнется выпадение влаги,</p> $q_{\text{макс}} = \alpha_1(t_1 - t^I) = 7,9 \cdot (18,6 - 14,3) = 34 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$ <p>2. Определим минимально допустимую толщину стенки, при которой плотность теплового потока будет в пределах величины $q_{\text{макс}}$, соответствующей началу выпадения росы</p> $q_{\text{макс}} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{мин}}}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}; \quad 34 = \frac{18,6 - 4,8}{\frac{1}{7,9} + \frac{\delta_{\text{мин}}}{0,105} + \frac{1}{322}},$ <p>откуда $\delta_{\text{мин}} = 0,029$ м.</p> <p>Чтобы не происходило выпадение росы, температура поверхности бака должна быть выше 14,3 °С. Это возможно в данных условиях при плотности теплового потока менее 34 Вт/м². Для этого необходимо, чтобы толщина деревянной стенки бака была более 29 мм.</p>
<p>$\delta_{\text{мин}} - ?$</p>	

Ответ: $\delta_{\text{мин}} = 29 \text{ мм}$

2.15. Стенка парового котла (рисунок) из листовой стали толщиной 10,5 мм [$\lambda_c=45,6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$] с внутренней стороны покрылась слоем накипи толщиной 2,1 мм [$\lambda_n=1,32 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$], а с наружной – слоем сажи толщиной 1,4 мм [$\lambda_{\text{сж}}=0,080 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$]. Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке 1000 Вт/($\text{м}^2\cdot\text{К}$), от стенки к воде 6260 Вт/($\text{м}^2\cdot\text{К}$).

Рассчитать частные термические сопротивления теплопроводности каждого слоя и термические сопротивления теплоотдачи по обе стороны стенки, а также общие сопротивления для чистой и загрязненной стенки. Определить долю частных сопротивлений от общего в процентах. Сопоставить коэффициенты теплопередачи для чистой и загрязненной стенки. Во сколько раз изменился теплосъем котла в результате загрязнения?

Ответ: $R_q = 0,01039 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$; $R_3 = 0,02950 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$; $k_q = 96,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; $k_3 = 33,9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$;
 $\frac{k_q}{k_3} = \frac{R_3}{R_q} = 2,84$; $\frac{Q_q}{Q_3} = 2,84$.

2.16. Определить температуры на наружной и внутренней поверхностях стальной стенки парового котла (см. задачу №2.15) при наличии загрязнений, если кипение воды внутри котла происходит при 189 °С, а температура дымовых газов, омывающих стенку котла снаружи, 540 °С.

Дано:

$\delta_c=10,5 \text{ мм}$
 $\lambda_c=45,6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$
 $\delta_n=2,1 \text{ мм}$
 $\lambda_n=1,32 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$
 $\delta_{\text{сж}}=1,4 \text{ мм}$
 $\lambda_{\text{сж}}=0,08 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$
 $\alpha_r=1000 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$
 $\alpha_b=6260 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$
 $t_1=540 \text{ °С}$
 $t_2=189 \text{ °С}$

Решение:

Чтобы определить температуры t^{II} и t^{III} , можно составить и решить уравнения

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_r} + \frac{\delta_{\text{сж}}}{\lambda_{\text{сж}}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_b}};$$

или

$$q = \frac{t_1 - t^{\text{II}}}{\frac{1}{\alpha_r} + \frac{\delta_{\text{сж}}}{\lambda_{\text{сж}}}}.$$

$$q = \frac{540 - 189}{\frac{1}{1000} + \frac{0,0014}{0,081} + \frac{0,0105}{45,6} + \frac{0,0021}{1,32} + \frac{1}{6260}} = 11898 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Зная q , находим t^{II}

$$t^{\text{II}} = 540 - 11898 \left(\frac{1}{1000} + \frac{0,0014}{0,081} \right).$$

$$t^{\text{II}} = 212,8 \text{ °С}.$$

Определим t^{III}

$$q = \frac{t^{II} - t^{III}}{\frac{\delta_c}{\lambda_c}} \quad t^{III} = 212,8 - 11898 \left(\frac{0,0105}{45,6} \right),$$

$$t^{III} = 210,1^\circ \text{C}.$$

Рассчитаем t_2 , которая известна из условия задачи

$$q = \frac{t^{III} - t_2}{\frac{\delta_H}{\lambda_H} + \frac{1}{\alpha_B}}; \quad t_2 = 210,1 - 11898 \left(\frac{0,0021}{1,32} + \frac{1}{6260} \right);$$

$$t_2 = 189,3^\circ \text{C}.$$

По условию задачи $t_2 = 189^\circ \text{C}$, расхождение из-за

$$\text{неточности расчета } \frac{(189,3 - 189,0) \cdot 100}{189} = 0,16 \text{ \%}.$$

Ответ: $t^{II} = 212,8^\circ \text{C}$; $t^{III} = 210,1^\circ \text{C}$.

2.17. Стальной бак испарителя холодильной установки, заполненный раствором хлористого кальция, снабжен изоляцией из шлаковой ваты с обшивкой из досок (рисунок). Толщина стенки бака 3 мм [$\lambda_c = 45,6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$], толщина досок 15 мм [$\lambda_d = 0,107 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$], теплопроводность изоляции [$\lambda_{из} = 0,076 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$], температуры на внутренней поверхности стальной стенки $-47,6^\circ \text{C}$, окружающего воздуха $16,1^\circ \text{C}$, коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке $9,5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Рассчитать, какую толщину слоя изоляции необходимо запроектировать, чтобы на наружной поверхности обшивки не происходило намерзание инея и величину потерь холода с 1 м^2 поверхности бака.

$$\text{Ответ. } \delta_{из} > 13 \text{ мм}, \quad q < 153 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

2.18. Автоцистерна для перевозки молока (рисунок) изготовлена из листовой нержавеющей стали толщиной 4 мм [$\lambda_{нс} = 16,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$]. Цистерна изолирована слоем шлаковой ваты толщиной 34 мм [$\lambda_{шв} = 0,07 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$], с обшивкой из досок толщиной 18 мм [$\lambda_d = 0,107 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$] и рубашкой из кровельного железа толщиной 1 мм [$\lambda_p = 45,3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$]. При транспортировке молока в зимнее время на внутренней поверхности цистерны образуется слой льда из молока. Для удаления льда путем его оттаивания изнутри используют источник тепла мощностью 695 Вт. Температура воздуха снаружи цистерны -32°C . Коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности цистерны $31,4 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Поверхность цистерны $15,3 \text{ м}^2$. Температуру замерзания молока принять $-0,6^\circ \text{C}$. Теплопроводность льда, образовавшегося из молока, считать такой же, как для чистого льда [$\lambda_l = 2,25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$].

Можно ли полностью расплавить лед, если тепловой поток будет распределяться равномерно по всей внутренней поверхности цистерны? Если

невозможно, то какую толщину будет иметь остаточный слой? Стенку цистерны допустимо считать плоской.

<p>Дано: $\delta_{\text{нс}}=4$ мм $\lambda_{\text{нс}}=16,1$ ВТ/(м·К) $\delta_{\text{шв}}=34$ мм $\lambda_{\text{шв}}=0,07$ ВТ/(м·К) $\delta_{\text{л}}=18$ мм $\lambda_{\text{л}}=0,107$ ВТ/(м·К) $\delta_{\text{р}}=1$ мм $\lambda_{\text{р}}=45,3$ ВТ/(м·К) $Q=695$ Вт $F=15,2$ м² $\alpha_{\text{в}}=31,4$ ВТ/(м²·К) $t_3=-0,6$ °С $t_2=-32$ °С</p>	<p>Решение: При включении внутри цистерны источника стационарного теплового потока, который равномерно распределен по ее поверхности, температуры в сложной стенке начнут постепенно повышаться. При этом слой льда будет уменьшаться до тех пор, пока его термическое сопротивление не достигнет величины, при котором температура внутренней поверхности льда станет равной температуре плавления. Если температура окружающего воздуха при оттаивании не будет изменяться, то при постоянном тепловом потоке в стенке устанавливается стационарное распределение температур, плавление прекращается, и толщина льда сохраняется. Определим толщину остаточного слоя льда с помощью уравнения теплового потока. Особенность уравнения заключается в том, что в него входит разность температур поверхности t^1 и наружного воздуха t_2, причем этой разности температур соответствует неполная сумма тепловых сопротивлений</p> $Q = \frac{(t^1 - t_2) \cdot F}{\frac{\delta_{\text{л}}}{\lambda_{\text{л}}} + \frac{\delta_{\text{нс}}}{\lambda_{\text{нс}}} + \frac{\delta_{\text{шв}}}{\lambda_{\text{шв}}} + \frac{\delta_{\text{л}}}{\lambda_{\text{л}}} + \frac{\delta_{\text{р}}}{\lambda_{\text{р}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}}$ $\delta_{\text{л}} = 2,25 \left(\frac{(-0,6 - (-32)) \cdot 15,3}{695} - \left(\frac{0,004}{16,1} + \frac{0,034}{0,07} + \frac{0,018}{0,107} + \frac{0,001}{45,3} + \frac{1}{31,4} \right) \right)$ $\delta_{\text{л}} = 11,7 \text{ мм}$ <p>Таким образом, при заданном источнике тепла 695 Вт полное удаление льда невозможно; остаточный слой 11,7 мм.</p> <p>Ответ: $\delta_{\text{л}} = 11,7$ мм.</p>
--	---

2.19. Котел для приготовления сахарного сиропа (рисунок) состоит из медной чаши со стенкой толщиной 4 мм [$\lambda_{\text{м}}=384$ Вт/(м·К)] и рубашки из стали толщиной 4 мм [$\lambda_{\text{с}}=45,6$ Вт/(м·К)]. В межстенное пространство котла поступает водяной пар, конденсирующийся при температуре 126 °С [$\alpha_{\text{п}}=6240$ Вт/(м²·К)]. Внутри котла находится сироп, кипящий при 105 °С [$\alpha_{\text{ср}}=1430$ Вт/(м²·К)]. Для уменьшения потерь тепла наружную поверхность котла покрыли слоем асбестового волокна толщиной 55 мм [$\lambda_{\text{а}}=0,11$ Вт/(м·К)] с обшивкой из фанеры толщиной 4 мм [$\lambda_{\text{ф}}=0,19$ Вт/(м·К)]. Температура воздуха в цехе 29 °С, коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху 19 Вт/(м²·К).

Определить эффективность изоляции, т.е. процент потерь тепла до и после изоляции (a и b), относительное уменьшение потерь (a/b) и процент экономии тепла (ϵ) в результате изоляции. Стенку котла ввиду значительных размеров его считать плоской.

Дано:

$\delta_m = 4$ мм
 $\lambda_m = 384$ Вт/(м·К)
 $\delta_c = 4$ мм
 $\lambda_c = 45,6$ Вт/(м·К)
 $\delta_a = 55$ мм
 $\lambda_a = 0,11$ Вт/(м·К)
 $\delta_\phi = 4$ мм
 $\lambda_\phi = 0,19$ Вт/(м·К)
 $t_{п} = 126$ °С
 $\alpha_{п} = 6240$ Вт/(м²·К)
 $t_{ср} = 105$ °С
 $\alpha_{ср} = 1430$ Вт/(м²·К)
 $t_{в} = 29$ °С
 $\alpha_{в} = 19$ Вт/(м²·К)

Решение:

Определим количество тепла, полезно передаваемое от конденсирующегося пара к кипящему сиропу с 1 м² внутренней поверхности котла

$$q_1 = \frac{t_{п} - t_{ср}}{\frac{1}{\alpha_{п}} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_{ср}}} = \frac{126 - 105}{\frac{1}{6240} + \frac{0,004}{384} + \frac{1}{1430}} = 24166 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Рассчитаем потери тепла через наружную стенку паровой рубашки в окружающий воздух при отсутствии изоляции

$$q_2 = \frac{t_{п} - t_{в}}{\frac{1}{\alpha_{в}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_{в}}} = \frac{126 - 29}{\frac{1}{6240} + \frac{0,004}{45,6} + \frac{1}{19}} = 1834 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Найдем потери тепла от стенки паровой рубашки в воздух при наличии изоляции

$$q_3 = \frac{t_{п} - t_{в}}{\frac{1}{\alpha_{п}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_a}{\lambda_a} + \frac{\delta_\phi}{\lambda_\phi} + \frac{1}{\alpha_{в}}} = \frac{126 - 29}{\frac{1}{6240} + \frac{0,004}{45,6} + \frac{0,055}{0,110} + \frac{0,004}{0,19} + \frac{1}{19}} = 169 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

1. Потери тепла до изоляции

$$a = \frac{q_2 \cdot 100}{q_1 + q_2} = \frac{1834 \cdot 100}{24166 + 1834} = 7,05 \%$$

2. Потери тепла после изоляции

$$b = \frac{q_3 \cdot 100}{q_1 + q_3} = \frac{169 \cdot 100}{24166 + 169} = 0,69 \%$$

3. Относительное уменьшение потерь в результате изоляции

$$\frac{a}{b} = \frac{q_2}{q_3} = \frac{1834}{169} = 10,9 \text{ раза.}$$

4. Экономия тепла в результате изоляции

$$v = \frac{(q_2 - q_3) \cdot 100}{q_1 + q_2} = \frac{(1834 - 169) \cdot 100}{24166 + 1834} = 6,4 \%$$

Ответ: $a = 7,1 \%$; $b = 0,7 \%$; $a / b = 10,9$; $v = 6,4 \%$.

2.20. В связи с включением принудительной вентиляции в цехе коэффициент теплоотдачи от стенки аппарата к воздуху увеличивается в 1,5 раза (см. задачу №2.19).

Выяснить, как это повлияет на потери тепла котла при отсутствии изоляции и при ее наличии.

$$\text{Ответ: } \frac{q_2^I}{q_2} = 1,5; \quad \frac{q_3^I}{q_3} = 1,03.$$

Цилиндрическая и шаровая стенки

2.22. По неизолированному стальному трубопроводу диаметром 76x4 мм течет холодильный агент при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$; коэффициент теплоотдачи холодильного агента $2330\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, температура воздуха в помещении, где расположен трубопровод, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, коэффициент теплоотдачи воздуха $11,6\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Теплопроводность стали $\lambda_c=58,2\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Определить часовую потерю холода 1 м трубы. Расчет произвести по формулам для цилиндрической и плоской стенок.

<p>Дано: $d_n=76\text{ мм}$ $\delta_c=4\text{ мм}$ $\lambda_c=58,2\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ $\alpha_a=2330, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ $\alpha_b=11, \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ $t_a=-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t_b=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $l=1\text{ м}$</p>	<p>Решение: По формуле теплового потока для однослойной цилиндрической стенки</p> $Q = \frac{2\pi(t_b - t_a) \cdot F}{\frac{1}{\alpha_a r_1} + \frac{1}{\lambda_c \ln \frac{r_2}{r_1}} + \frac{1}{\alpha_b r_2}}$ <p>Следовательно, на 1 м получим</p> $q_{\text{цил}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot [20 - (-20)]}{\frac{1}{2330 \cdot 0,034} + \frac{1}{58,2 \ln \frac{0,038}{0,034}} + \frac{1}{11,6 \cdot 0,038}} = 110 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$ <p>По формуле для плоской стенки</p> $Q = \frac{F \cdot (t_b - t_a)}{\frac{1}{\alpha_a} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_b}}$ <p>Учитывая, что $\alpha_a \gg \alpha_b$, принимаем $F = 2\pi r_2 l$, получим на 1 м трубы</p> $q_{\text{пл}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 0,038 \cdot 40}{\frac{1}{2330} + \frac{0,004}{58,2} + \frac{1}{11,6}} = 110,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$ <p>Если $\alpha_1 \approx \alpha_2$, то при определении q по формулам плоской стенки в расчет вводят средний радиус трубы r_{cp}; $F = 2\pi r_{\text{cp}} l$.</p> <p>Ответ: $q_{\text{цил}} = 110 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$; $q_{\text{пл}} = 110,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$</p>
--	---

2.23. По стальной трубе $\lambda_c=45, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ диаметром 56x3 мм и длиной 12 м движется рассол, температура которого $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{рс}}=1745\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Температура внутренней поверхности трубопровода $-19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, коэффициент теплоотдачи воздуха $\alpha_b=17,5\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

Подсчитать количество холода, теряемое трубопроводов в единицу времени, и температуру воздуха в помещении, где он расположен.

Ответ: $Q = 1644 \text{ Вт}$, $t = 25^\circ \text{С}$.

2.24. Внутри змеевика диаметром 50x5 мм движется раствор $\alpha_{\text{pc}}=2180 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, снаружи – охлаждающая вода $\alpha_{\text{в}}=3060 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Змеевик можно выполнить из меди [$\lambda_{\text{м}}=384 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$], стали [$\lambda_{\text{с}}=45 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$], нержавеющей стали [$\lambda_{\text{нс}}=14,7 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$] и стекла [$\lambda_{\text{стк}}=1,04 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$].

Определить долю термического сопротивления стенки в общем сопротивлении теплопередачи при различном выполнении змеевика.

Ответ: $\frac{R_{\text{м}}}{R} = 0,0159 (1,59 \%)$; $\frac{R_{\text{с}}}{R} = 0,120 (12 \%)$; $\frac{R_{\text{нс}}}{R} = 0,297 (29,7 \%)$;
 $\frac{R_{\text{стк}}}{R} = 0,856 (85,6 \%)$.

2.25. Медный змеевик [$\lambda_{\text{м}}=384 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$] испарителя фреоновой холодильной машины имеет диаметр 30x2,5 мм. Внутри змеевика находится кипящий холодильный агент, снаружи движется охлаждаемый солевой раствор. Режим работы испарителя: температура кипения фреона -20°С ; средняя температура раствора -10°С . Коэффициент теплоотдачи со стороны холодильного агента $582 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, со стороны раствора $1050 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

Определить, какую длину должен иметь змеевик, чтобы можно было передать от солевого раствора к холодильному агенту тепловой поток 11630 Вт .

Ответ: $l = 37,3 \text{ м}$.

2.26. Трубчатый конденсатор паровой машины состоит из 12 медных труб [$\lambda_{\text{м}}=384 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$] диаметром 18x1,5 мм и длиной по 3 м. Коэффициент теплоотдачи со стороны водяного пара, конденсирующегося снаружи трубы $8140 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, со стороны воды, движущейся внутри трубы, $2910 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Температуры конденсации 55°С , входящей воды 16°С , выходящей 48°С . Удельная теплоемкость воды $4,19 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Определить часовое количество охлаждающей воды, необходимое для работы конденсатора.

Ответ: $G = 2,33 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$.

2.27. При работе электромотора провода обмотки нагреваются, что ограничивает допустимую нагрузку мотора.

Проверить, в какую сторону изменится тепловой поток от провода диаметром 3 мм к воздуху, если покрыть провод резиновой изоляцией. Каков должен быть слой резины [$\lambda=0,163 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$], чтобы теплоотдача от провода была максимальной принять коэффициент теплоотдачи от провода к воздуху $58,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

<p>Дано: $d_n = 3 \text{ мм}$ $\lambda = 0,163 \text{ Вт/(м·К)}$ $\alpha_B = 58,2 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$</p>	<p>Решение: Тепловой поток принимает максимальное значение при критическом диаметре изоляции</p> $d_{кр} = \frac{2\lambda_{из}}{\alpha_2} = \frac{2 \cdot 0,163}{58,2} = 0,0056 \text{ м,}$ <p>т.е. тепловой поток будет максимальным при $d_{из} = 5,6 \text{ мм}$ диаметр провода $d_n = 3 \text{ мм}$. Таким образом, $d_{кр} > d_n$. Следовательно, при покрытии провода резиновой изоляцией теплоотдача увеличивается. Для получения максимальной теплоотдачи необходимо применить резиновую изоляцию толщиной</p> $\delta = \frac{d_{кр} - d_n}{2} = \frac{5,6 - 3}{2} = 1,3 \text{ мм.}$ <p>Ответ: при покрытии провода резиновой изоляцией тепловой поток увеличивается: $q_{\text{макс}}$ достигается при $\delta = 1,3 \text{ мм}$</p>
---	---

2.28. Алюминиевый электропровод диаметром 3 мм и длиной 1 м покрыт каучуковой изоляцией [$\lambda = 0,163 \text{ Вт/(м·К)}$] толщиной 4 мм. Температура поверхности провода под изоляцией 70 °С. Температура воздуха в помещении, где проходит провод, 15 °С. Коэффициент теплоотдачи 11,6 Вт/(м²·К). Определить силу тока, который течет по проводу, если удельное сопротивление алюминия $\rho = 1,35 \text{ Ом·мм}^2/\text{м}$.

Ответ: $I = 60,1 \text{ А}$.

2.29. Электропровод диаметром 2 мм, находясь под током имеет температуру поверхности провода 90 °С и охлаждается потом воздуха при температуре 20 °С и коэффициенте теплоотдачи 34,8 Вт/(м²·К). Найти толщину каучуковой изоляции, при использовании которой через провод можно пропустить силу тока при неизменной температуре поверхности провода 90 °С. Во сколько раз максимальная сила тока больше силы тока, протекающего по оголенному проводу? Теплопроводность изоляции 0,174 Вт/(м·К).

Ответ: $\delta_{из} = 1,3 \text{ мм}$, $\frac{I_{\text{макс}}}{I} = 1,92$.

2.30. Погруженная в воду стальная труба [$\lambda_c = 45,4 \text{ Вт/(м·К)}$] диаметром 50x2,5 мм охлаждается рассолом таким образом, что средняя температура рассола поддерживается -10 °С, коэффициент теплоотдачи от стенки к рассолу 1450 Вт/(м²·К), температура внутренней поверхности трубы -9 °С. Рассчитать максимальную толщину льда [$\lambda_{л} = 2,25 \text{ Вт/(м·К)}$], который может образоваться на наружной поверхности трубы.

Дано:

$$d_n = 50 \text{ мм}$$

$$\delta = 2,5 \text{ мм}$$

$$\lambda_c = 45,4 \text{ Вт/(м·К)}$$

$$\lambda_l = 2,25 \text{ Вт/(м·К)}$$

$$\alpha_{pc} = 1450 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}$$

$$t_{pc} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t^I = -9 \text{ }^\circ\text{C}$$

Решение:

Увеличение толщины слоя льда на поверхности трубы будет происходить до момента, когда температура его поверхности, соприкасающейся с водой t^{III} , повысится до 0°C . Дальнейшее увеличение толщины слоя невозможно, ибо это означало бы повышение температуры льда выше 0°C .

С этого момента процесс теплопередачи от воды к рассолу становится стационарным и, следовательно, толщина слоя, достигнутая при $t^{III} = 0^\circ\text{C}$, является максимальной и постоянной. Исходя из этого, удельный тепловой поток от воды к рассолу может быть выражен уравнением

$$q_l = \frac{\pi(t^{III} - t^I)}{\frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_l} \ln \frac{d_3}{d_2}}.$$

В этом выражении два неизвестных q_l и d_3 , следовательно, для решения задачи необходимо второе уравнение.

Определим удельный тепловой поток

$$q_l = \frac{\pi(t^I - t_{pc})}{\alpha_{pc} \cdot d_1} = \frac{3,14 \cdot [-9 - (-10)]}{1450 \cdot 0,045} = 204,9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

Теперь) можно определить наружный диаметр ледяного слоя d_3

$$204,9 = \frac{3,14 \cdot [0 - (-9)]}{\frac{1}{2 \cdot 45,4} \ln \frac{0,05}{0,045} + \frac{1}{2 \cdot 2,25} \ln \frac{d_3}{0,05}}$$

Отсюда $d_3 = 92,5 \text{ мм}$, следовательно, искомая толщина слоя льда на поверхности трубы

$$\delta_2 = \frac{92,5 - 50}{2} \approx 21,3 \text{ мм}$$

Ответ: $\delta_2 = 21,3 \text{ мм}$

2.31. Стальной паропровод [$\lambda_c = 45,4 \text{ Вт/(м·К)}$] диаметром 320x10 мм изолирован асбестом [$\lambda_{асб} = 0,14 \text{ Вт/(м·К)}$]. Толщина изоляции 100 мм. Температуры пара $300 \text{ }^\circ\text{C}$ и воздуха $20 \text{ }^\circ\text{C}$, коэффициенты теплоотдачи $\alpha_n = 350 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}$, $\alpha_v = 23,3 \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}$.

Определить количество тепла, передаваемое от пара к воздуху в единицу времени на 1 м трубы, а также температуры внутренней поверхности трубы и наружной поверхности изоляции.

$$\text{Ответ: } q_l = 475,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}; t^I = 298,6^\circ\text{C}; t^{III} = 34,6^\circ\text{C}.$$

2.32. По изолированному стальному трубопроводу [$\lambda_c=45,4$ Вт/(м·К)] диаметром 76x4 мм течет холодильный агент температурой -20°C , коэффициент теплоотдачи агента 1160 Вт/(м²·К). Температура воздуха в помещении, где проходит трубопровод, 20°C , коэффициент теплоотдачи 11,6 Вт/(м²·К). Изоляцией служит пробка; толщина изоляции 60 мм [$\lambda_{\text{из}}=0,058$ Вт/(м·К)].

Определить потери холода трубопроводом без изоляции и с изоляцией, а также процент холода, сберегаемого с помощью изоляции.

$$\text{Ответ: } \frac{(Q_{\text{б.из}} - Q_{\text{из}}) \cdot 100}{Q_{\text{б.из}}} = 86,8 \%$$

2.33. Проходящий через территорию завода горячий газопровод (рисунок 32) из стальных труб [$\lambda_c=48$ Вт/(м·К)] диаметром 250x16 мм покрыт изоляцией из слоя шлаковой ваты толщиной 58 мм [$\lambda_{\text{шв}}=0,07$ Вт/(м·К)] и слоя волокнистого асбеста толщиной 32 мм [$\lambda_{\text{асб}}=0,11$ Вт/(м·К)]. Коэффициент теплоотдачи от газа к стенке трубы 95,5 Вт/(м²·К), от поверхности изоляции к окружающему воздуху 21 Вт/(м²·К).

Определить долю каждого из термических сопротивлений в общем сопротивлении теплопередачи. Как будет распределяться общая температурная разность между газом и воздухом по отдельным сопротивлениям сложной стенки?

$$\text{Ответ: } R_1 = 1,33 \%; R_2 = 0,04 \%; R_3 = 75,5 \%; R_4 = 20,05 \%; R_5 = 3,06 \%.$$

Температурные разности Δt_1 , Δt_2 будут пропорциональны частным тепловым сопротивлениям $\Delta t_1 = 0,013\Delta t$, $\Delta t_2 = 0,0004\Delta t$ и т.д.

2.34. Стальной трубопровод [$\lambda_c=45,4$ Вт/(м·К)] диаметром 76x3 мм, по которому холодный солевой раствор поступает из машинного отделения в холодильные камеры, на участке длиной 10 м проходит через помещение, где температура воздуха 25°C . Для уменьшения притоков тепла к раствору трубопровод изолирован слоем пробки толщиной 40 мм [$\lambda_{\text{п}}=0,0465$ Вт/(м·К)]. Во избежание проникновения влаги из воздуха в изоляцию ее покрывают слоем гидроизоляционной мастики толщиной 3 мм [$\lambda_{\text{м}}=0,174$ Вт/(м·К)].

Подсчитать потери холода трубопроводом за 10 ч и температуры на внутренней и наружной поверхностях изоляции при средней температуре рассола -15°C ,

коэффициенте теплоотдачи со стороны рассола 1510 Вт/(м²·К), коэффициенте теплоотдачи со стороны воздуха 9,3 Вт/(м²·К).

Ответ: $Q = 5360$ кДж, $t'' = -15$ °С; $t^{IV} = 21,9$ °С.

2.35. Кожухотрубный конденсатор холодильной установки изготовлен из стальных труб диаметром 57х3,5 мм [$\lambda_c=45,4$ Вт/(м·К)]. В процессе эксплуатации трубы конденсатора покрылись снаружи осадком толщиной 0,3 мм из загрязненного масла [$\lambda_m=0,14$ Вт/(м·К)], а изнутри – слоем «водяного камня» толщиной 0,6 мм [$\lambda_k=1,745$ Вт/(м·К)]. Коэффициенты теплоотдачи от конденсирующегося холодильного агента к наружной поверхности трубы 2190 Вт/(м²·К), от внутренней поверхности трубы к воде 2030 Вт/(м²·К). Определить общее термическое сопротивление и коэффициент теплопередачи для чистой и загрязненной трубы. Во сколько раз изменяется производительность аппарата в результате загрязнения при низменных температурах сред?

Ответ: $R_{\text{ч}} = 0,0193 \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$; $R_{\text{з}} = 0,0674 \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$;

2.36. В процессе эксплуатации первого котла его стальные водогрейные трубы диаметром 76х5 мм [$\lambda_c=48$ Вт/(м·К)] покрылись снаружи слоем сажи 1,1 мм [$\lambda_{\text{сж}}=0,105$ Вт/(м·К)], а изнутри слоем накипи 1,2 мм [$\lambda_n=1,31$ Вт/(м·К)]. Температура дымовых газов 420 °С, коэффициент теплоотдачи от газов к поверхности труб 71 Вт/(м²·К). Рабочее давление в котле 2000 кПа. Коэффициент теплоотдачи от стенок труб к кипящей воде 11400 Вт/(м²·К). Определить удельный тепловой поток на 1 м и плотность теплового потока, отнесенную к внутренней и наружной поверхностям трубы. Найти также паросъем котла в условиях питания котла водой при температуре 84 °С.

<p>Дано: $d_3=76$ мм $\delta_c=5$ мм $\lambda_c=48$ Вт/(м·К) $\delta_{\text{сж}}=1,1$ мм $\lambda_{\text{сж}}=0,105$ Вт/(м·К) $\delta_n=1,2$ мм $\lambda_n=1,31$ Вт/(м·К) $\alpha_r=71$ Вт/(м²·К) $\alpha_b=11400$ Вт/(м²·К)</p> <p>$p=2000$ кПа $t_b=84$ °С $t_r=420$ °С</p>	<p>Решение: Для трехслойной стенки при граничных условиях третьего рода</p> $q_l = \frac{\pi(t_r - t_b)}{\frac{1}{\alpha_b d_1} + \frac{1}{2\lambda_n} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2\lambda_{\text{сж}}} \ln \frac{d_4}{d_3} + \frac{1}{\alpha_r d_4}}$ <p>По таблицам насыщенного водяного пара для $p = 2000$ кПа температура кипения около 210 °С.</p> $q_l = 3120 \text{ Вт/м}$ <p>Зная удельный тепловой поток на 1 м, найдем плотность теплового потока внутренней и наружной поверхности труб</p> $q = \frac{q_l \cdot l}{f} = \frac{q_l \cdot l}{\pi \cdot d \cdot l} = \frac{q_l}{\pi \cdot d}$ <p>Следовательно,</p>
---	---

$$q_{\text{вн}} = \frac{q_l}{\pi \cdot d_{\text{вн}}} = \frac{3120}{3,14 \cdot 0,066} \approx 15000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \text{ и}$$

$$q_{\text{нар}} = \frac{q_l}{\pi \cdot d_{\text{нар}}} = \frac{3120}{3,14 \cdot 0,076} \approx 13600 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Паросъем котла определим на основании плотности теплового потока на 1 м^2 внутренней поверхности труб.

По таблицам водяного пара при давлении 2000 кПа

энтальпия сухого насыщенного пара $h'' = 2800 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, для

воды при $84 \text{ }^\circ\text{C}$ $h' = 352 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, следовательно, расход

тепла на 1 кг пара $h'' - h' \approx 2448 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Отсюда паросъем

$$D = \frac{q}{t'' - t'} = \frac{15000 \cdot 3600}{2448} = 22 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$$

Ответ: $q_l = 3120 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$; $q_{\text{вн}} = 15000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$; $q_{\text{нар}} = 13600 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$;

$$D = 22 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}.$$

2.37. Горячую воду из котельной подают в цех со скоростью движения 2 м/с по изолированному стальному [$\lambda_c = 45,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$] трубопроводу диаметром 58x3,5 мм длиной 10 м. Трубопровод проходит через лестничную клетку, где средняя температура воздуха равна $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Какую теплопроводность должна иметь изоляция, чтобы падение температуры воды от котельной до цеха не превышало 5 К? Допустимая толщина изоляции 60 мм. Температура воды при входе в трубу $80 \text{ }^\circ\text{C}$, коэффициент теплоотдачи $1860 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, а со стороны воздуха $5,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

Ответ: $\lambda_{\text{из}} = 0,094 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

2.38. В термостатной камере для поддержания устойчивой температуры $35 \text{ }^\circ\text{C}$ необходим приток тепла 582 Вт. Через камеру проходит паропровод, по которому протекает пар при температуре $158 \text{ }^\circ\text{C}$. Труба паропровода стальная диаметром 120x10 мм [$\lambda_c = 45,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$] длиной 5 м изолирована слоем шлаковой ваты толщиной 50 мм [$\lambda_{\text{шв}} = 0,07 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$]. Коэффициенты теплоотдачи от пара к стенке трубы $6980 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, от трубы к окружающему воздуху $9,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

Достаточно ли притока тепла от паропровода для поддержания в камере требуемой постоянной температуры? Если недостаточно, то какова

необходимая дополнительная длина паропровода. Определить температуру на поверхности изоляции.

Ответ: Притока тепла недостаточно; необходимо дополнительно 2,27 м; $t''' = 47,5^\circ\text{C}$.

2.39. Температуры на поверхностях изоляции из пробки [$\lambda_{\text{п}}=0,0465$ Вт/(м·К)], положенной на трубопровод из стали [$\lambda_{\text{с}}=45,4$ Вт/(м·К)], равны $t'''=20^\circ\text{C}$ и $t''=-10^\circ\text{C}$. Внутри трубы движется рассол [$\alpha_{\text{рс}}=2330$ Вт/(м²·К)], снаружи труба окружена воздухом [$\alpha_{\text{в}}=5,8$ Вт/(м²·К)].

Вычислить тепловой поток через изоляцию трубы на 1 м и определить температуры рассола и воздуха, если диаметр трубы 38x3 мм; $\delta_{\text{из}}=15$ мм.

$$\text{Ответ: } q_l = 15,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}; t_{\text{рс}} = -10^\circ\text{C}; t_{\text{в}} = 32,1^\circ\text{C}.$$

2.40. По стальной трубе диаметром 50x5 мм [$\lambda_{\text{с}}=58,2$ Вт/(м·К)], изолированной слоем ньювеля толщиной 20 мм [$\lambda_{\text{н}}=0,035$ Вт/(м·К)], протекает вода температурой 80°C . Снаружи труба омывается воздухом температурой 20°C . Коэффициент теплоотдачи от воды к стенкам трубы 582 Вт/(м²·К). Потери тепла в воздух составляют 19,8 Вт/м.

Определить коэффициент теплоотдачи от изоляции к воздуху, а также температуры внутренней и наружной поверхности трубы и наружной поверхности изоляции.

$$\text{Ответ: } \alpha_2 = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}; t^I = 79,7^\circ\text{C}; t'' = 79,6^\circ\text{C}; t''' = 26,8^\circ\text{C}.$$

2.41. В трубчатом пастеризаторе для молока находится 24 трубы диаметром 25x2 мм и длиной 1,8 м из нержавеющей стали [$\lambda_{\text{нс}}=18,1$ Вт/(м·К)]. При работе пастеризатора внутренняя поверхность труб покрывается белково-солевым осадком толщиной 0,9 мм [$\lambda_{\text{с}}=0,35$ Вт/(м·К)]. Средние температуры греющей воды 91°C , а пастеризуемого молока 78°C . Коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубы 2760 Вт/(м²·К), от стенки к молоку 1965 Вт/(м²·К). Аппарат чистят один раз в смену.

Определить тепловую производительность пастеризатора до чистки и после ее. Как рассчитать относительное повышение производительности аппарата в результате чистки, не зная температурного режима и полагая, что температуры сред после чистки не изменяются?

$$\text{Ответ: } Q_{\text{ч}} = 40400 \text{ Вт}; Q_3 = 9950 \text{ Вт}. \beta = \frac{R_3 - R_{\text{ч}}}{R_{\text{ч}}} = 3,07 \text{ раза.}$$

2.42. По трубопроводу из стальных труб диаметром 100x8,5 мм [$\lambda_{\text{с}}=47,9$ Вт/(м·К)] движется сухой насыщенный пар при абсолютном давлении 18700 кПа,

коэффициент теплоотдачи от пара к стенке трубы 5350 Вт/(м²·К). Трубопровод покрыт двумя слоями изоляции одинаковой толщины по 26 мм; первый слой – из волокнистого асбеста [$\lambda_{асб}=0,172$ Вт/(м·К)], второй – из стеклянной ваты [$\lambda_{св}=0,046$ Вт/(м·К)].

Температура воздуха в цехе 27 °С. Коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к воздуху 18,6 Вт/(м²·К).

Сравнить тепловые потери на 1 м трубы, а также распределение температур на поверхностях трубы и изоляции при указанной и обратной последовательности расположения слоев.

Ответ: 1. $q_l = 224 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$; $t^I = 359,8^\circ\text{C}$; $t^{II} = 359,7^\circ\text{C}$; $t^{III} = 269,1^\circ\text{C}$; $t^{IV} = 45,8^\circ\text{C}$.

2. $q_l = 186,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$; $t^I = 359,8^\circ\text{C}$; $t^{II} = 359,7^\circ\text{C}$; $t^{III} = 95,5^\circ\text{C}$; $t^{IV} = 42,7^\circ\text{C}$.

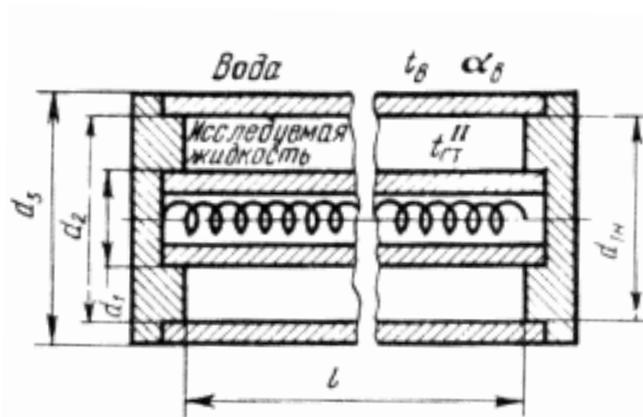
2.43. Внутри стальной трубы диаметром 78x3 мм [$\lambda_c=45,6$ Вт/(м·К)] течет раствор температурой –22 °С. Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к раствору 1490 Вт/(м²·К). Трубопровод последовательно покрывают тремя слоями изоляции [$\lambda_{из}=0,186$ Вт/(м·К)], каждый толщиной 16 мм. Температура окружающего воздуха 22 °С, коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности изоляции 10,5 Вт/(м²·К).

Проанализировать изменение тепловых потерь на 1 м трубы и температур слоев на наружной поверхности изоляции в результате нанесения слоев.

Ответ:

Толщина изоляции, мм	$q_l, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$	$t_{\text{пов}}, ^\circ\text{C}$
0	112,2	-21,6
16	76,8	0,8
32	60,3	9,1
48	50,9	13,1

2.44. Чтобы определить теплопроводность жидкостей, применяют метод коаксиальных цилиндров, основанный на пропускании стационарного теплового потока через цилиндрический слой исследуемой жидкости. При этом толщина слоя и разность температур на его границах должны быть такими, чтобы обеспечить передачу тепла внутри жидкости только путем теплопроводности (без конвективного теплообмена). Соответствующий прибор состоит из двух тонкостенных высокотеплопроводных цилиндров, причем внутренний цилиндр снабжен электрическим нагревателем, а зазор между стенками цилиндров заполняется жидкостью.



Весь прибор помещают в термостат с жидкой средой (например, водой). В результате опытов, проведенных с паточкой, получены следующие данные: температуры воды в термостате $58\text{ }^{\circ}\text{C}$ и наружной поверхности внутреннего цилиндра $62,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, коэффициент теплоотдачи от прибора к воде $3140\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Сила тока в нагревателе $0,05\text{ А}$, электрическое сопротивление нихромовой спирали 756 Ом .

Рассчитать теплопроводность патоки, если цилиндры имеют следующие размеры: наружный диаметр внутреннего цилиндра $4,5\text{ мм}$; внутренний диаметр наружного цилиндра $9,9\text{ мм}$; наружный диаметр наружного цилиндра $15,9\text{ мм}$. Длина прибора 166 мм . Теплопроводность стенки наружного цилиндра $\lambda=384\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

$$\text{Ответ: } \lambda_{\text{ж}} = 0,384 \frac{\text{Вт}}{(\text{м}\cdot\text{К})}.$$

2.45. Для улучшения теплопередачи от труб химического реактора к газу и уменьшения расхода металла вместо увеличения диаметра этих труб их покрывают слоем бетона. Средние температуры жидкости внутри трубы $117\text{ }^{\circ}\text{C}$, а газа $43\text{ }^{\circ}\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи от внутренней среды к стенке трубы $430\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, от трубы к газу $55,8\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

Определить изменение термических сопротивлений и теплового потока от трубы диаметром $30\times 2,5\text{ мм}$ из нержавеющей стали [$\lambda_{\text{нс}}=17,5\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$], если поочередно покрывать ее слоями толщиной 5 ; 10 и 15 мм бетона [$\lambda_{\text{б}}=1,28\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$]. Какая толщина слоя явится наиболее целесообразной? К чему привело бы дальнейшее увеличение толщины слоя? Каков максимально достижимый в данных условиях тепловой поток на 1 м трубы?

$$\text{Ответ: } \delta_{\text{б}} = 8\text{ мм}; q_{l_{\text{макс}}} = 355 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}.$$

2.46. Для отопления пола здания служит воздушный канал, проходящий под полом. В канале проложен стальной трубопровод диаметром $120\times 5\text{ мм}$ [$\lambda_{\text{с}}=45,4\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$] для горячей воды. Можно ли, покрыв трубу бетоном [$\lambda_{\text{б}}=1,16\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$] или асбестом [$\lambda_{\text{асб}}=0,12\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$], увеличить количество

передаваемого через трубу тепла? Подсчитать максимальный удельный тепловой поток через 1 м трубы, покрытой бетоном, если температура воды 80 °С, коэффициент теплоотдачи воды 1160 Вт/(м²·К), температура воздуха 20 °С, коэффициент теплоотдачи воздуха 14 Вт/(м²·К).

<p>Дано: $d_H=120$ мм $\delta_c=5$ мм $\lambda_c=45,4$ Вт/(м·К) $\lambda_b=1,16$ Вт/(м·К) $\lambda_{асб}=0,12$ Вт/(м·К) $\alpha_B=1160$ Вт/(м²·К) $\alpha_{воз}=14$ Вт/(м²·К) $t_B=80$ °С $t_{воз}=20$ °С</p>	<p>Решение: <i>Определяем критический диаметр изоляции для бетона</i></p> $d_{кр_б} = \frac{2\lambda_b}{\alpha_B} = \frac{2 \cdot 1,16}{14} = 0,166 \text{ м};$ <p><i>для асбеста</i></p> $d_{кр_асб} = \frac{2\lambda_{асб}}{\alpha_B} = \frac{2 \cdot 0,12}{14} = 0,0171 \text{ м.}$ <p><i>Так как диаметр трубы $d_H < d_{кр_б}$ для бетона ($0,12 < 0,166$), покрытие трубы бетоном приведет к увеличению теплового потока по сравнению с неизолированной трубой. Для асбеста $d_H > d_{кр_асб}$ ($0,12 > 0,0171$) и, следовательно, покрытие трубы асбестом приведет к уменьшению теплового потока по сравнению с неизолированной трубой. Максимальный тепловой поток через покрытую бетоном трубу будет при диаметре покрытия d_3, равном $d_{кр_б}$,</i></p> $q_{l_{\max}} = \frac{\pi(t_B - t_{воз})}{\frac{1}{\alpha_B d_1} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_b} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_{воз} d_3}} =$ $= \frac{3,14 \cdot (80 - 20)}{\frac{1}{1160 \cdot 0,110} + \frac{1}{2 \cdot 45,4} \ln \frac{0,120}{0,110} + \frac{1}{2 \cdot 1,16} \ln \frac{0,166}{0,120} + \frac{1}{14 \cdot 0,166}} \approx$ $\approx 326 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$ <p>Ответ: В результате покрытия трубы бетоном увеличивается тепловой поток по сравнению с тепловым потоком через неизолированную трубу ($d_H < d_{кр}$) асбестом – уменьшается тепловой поток ($d_H > d_{кр}$), $q_{l_{\max}} = 326 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$.</p>
--	--

2.47. Для уменьшения теплового потока через стальную трубу [$\lambda_c=45,6$ Вт/(м·К)] диаметром 18x1,5 мм, предлагается изоляция с теплопроводностью 0,35 Вт/(м·К), коэффициент теплоотдачи от изолированной трубы к воздуху равен 7 Вт/(м²·К). Целесообразно ли применение изоляции с указанной теплопроводностью? Вычислить максимальное значение теплопроводности изоляции, обеспечивающее уменьшение потерь тепла через трубу. Найти величину теплового потока на 1 м трубы, покрытой такой изоляцией, если дано: толщина изоляции 30 мм, температура воды внутри трубы 80 °С, $\alpha_B=350$ Вт/(м²·К), температура воздуха снаружи трубы 20 °С.

Ответ: Применение изоляции с теплопроводностью $0,35 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ нецелесообразно,

$$\lambda_{\text{из_макс}} = 0,063 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, q_l = 13,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}.$$

2.48. Стальной рассольный трубопровод 50x3 мм [$\lambda_c=45,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$] проходит через машинное отделение. Средняя температура рассола $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, температура воздуха в помещении $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к рассолу $1745 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, коэффициент теплоотдачи от воздуха к трубе $11,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Относительная влажность воздуха в помещении 70%. Будет ли выпадать влага на поверхности трубопровода? Решить задачу также для случая, когда трубопровод изолирован торфоплитами [$\lambda_{\text{тп}}=0,093 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$] толщиной 3 см.

Примечание. Температура точки росы находится по таблицам параметров влажного воздуха по $h-d$ -диаграмме.

Ответ: В обоих случаях на поверхности трубопровода будет конденсироваться влага, так как температура наружной поверхности трубы ниже точки росы воздуха в помещении.

2.49 В холодильной камере необходимо поддерживать постоянную температуру t_k . Камера имеет две наружных и две внутренних стены, конструкции которых:

наружной стены:

железобетон, толщиной δ_1 ; ($\lambda_1=1,55 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$);

кирпич, толщиной δ_2 ; ($\lambda_2=0,70 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$);

гидроизоляция (битум) δ_3 ; ($\lambda_3=0,27 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$);

теплоизоляция δ_4 ; ($\lambda_4=0,084 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$);

штукатурка δ_5 ; ($\lambda_5=0,70 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$);

внутренней:

штукатурка δ_6 ; ($\lambda=0,70 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$);

изоляция δ_7 ; ($\lambda=0,26 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$);

штукатурка δ_8 ; ($\lambda=0,70 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$).

Высота камеры H , длина наружной стены L_n , внутренней стены $L_{вн}$.

Температура наружного воздуха $t_{\text{нар}}$, в соседних камерах t_{k1} и t_{k2} .

Коэффициенты теплоотдачи:

от наружного воздуха к стенке α_n , от внутренней поверхностей стен к воздуху в камере α_k , от воздуха соседних камер к поверхности перегородок α_{k1} и α_{k2} .

Теплопритоками через пол и потолок пренебречь.

Определить.

1. Длину и площадь охлаждающих труб змеевика, если диаметр труб $d \times \delta$;

материал - сталь (медь); Температура охлаждающей среды в змеевике $t_{ж}$, коэффициент теплоотдачи от стенки трубы и жидкости в змеевике $\alpha_{ж}$, коэффициент теплоотдачи от воздуха в камере к наружной поверхности труб α_2 ;

2. Какую температуру должна иметь охлаждающая среда в змеевике, если на поверхности трубы слой льда, толщиной $\delta_{л}$ ($\lambda_{л}$), а температура в камере сохраняется постоянной.

Геометрические размеры камер

№	наружная стена					внутренняя стена				Размеры стен		
	железобетон δ_1 мм	кирпич δ_2 мм	гидроизоляция δ_3 мм	теплоизоляция δ_4 мм	штукатурка δ_5 мм	штукатурка δ_6 мм	теплоизоляция δ_7 мм	штукатурка δ_8 мм	H м	$L_{вн}$ м	$L_{нар}$ м	
1	50	150	10	100	5	5	50	5	3	6	3	
2	100	200	15	150	4	4	100	4	4	9	6	
3	150	300	10	200	5	5	150	5	5	6	6	
4	200	150	15	100	4	4	200	4	3	6	3	
5	50	200	10	150	3	3	50	3	6	9	6	
6	100	300	15	200	4	4	100	4	3	9	6	
7	150	150	10	100	5	5	150	5	3	6	6	
8	200	200	15	150	3	3	200	3	5	9	6	
9	50	300	10	200	4	4	50	4	6	5	8	
10	100	150	15	100	5	5	100	5	3	3	6	
11	150	200	10	150	3	3	150	3	4	7	4	
12	200	300	15	200	4	4	200	4	5	8	5	
13	50	150	10	100	5	5	50	5	3	6	3	
14	100	200	15	150	4	4	100	4	4	9	6	
15	150	300	10	200	5	5	150	5	5	6	6	
16	200	150	15	100	4	4	200	4	3	6	3	
17	50	200	10	150	3	3	50	3	6	9	6	
18	100	300	15	200	4	4	100	4	3	9	6	
19	150	150	10	100	5	5	150	5	3	6	6	
20	200	200	15	150	3	3	200	3	5	9	6	
21	50	300	10	200	4	4	50	4	6	5	8	
22	100	150	15	100	5	5	100	5	3	3	6	
23	150	200	10	150	3	3	150	3	4	7	4	
24	200	300	15	200	4	4	200	4	5	8	5	
25	50	150	10	100	5	5	50	5	3	6	3	
26	100	200	15	150	4	4	100	4	4	9	6	
27	150	300	10	200	5	5	150	5	5	6	6	
28	200	150	15	100	4	4	200	4	3	6	3	
29	50	200	10	150	3	3	50	3	6	9	6	
30	100	300	15	200	4	4	100	4	3	9	6	

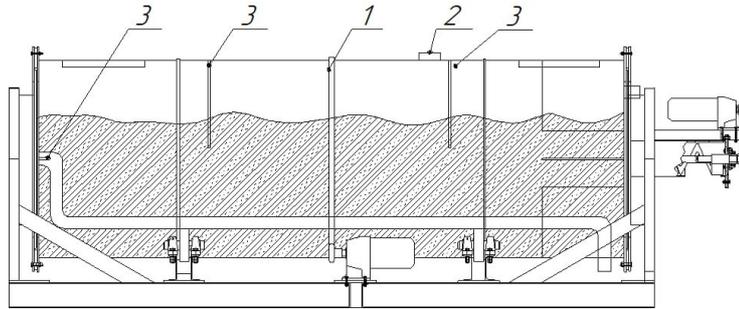
Условия теплообмена в камерах

№	Наружный воздух		Соседние камеры				Охлажд. камера	
	t_n °C	α_n Вт/м ² К	камера №1		камера №2		t_k °C	α_k Вт/м ² К
			t_{k1} °C	α_{k1} Вт/м ² К	t_{k2} °C	α_{k2} Вт/м ² К		
1	15	8	10	4	5	6	5	4
2	20	10	5	5	10	5	0	5
3	25	12	0	6	5	4	-5	6
4	15	8	-5	4	6	6	-10	7
5	20	10	-10	5	-5	5	-10	4
6	25	12	10	6	2	4	-5	5
7	15	8	5	4	-5	6	-5	6
8	20	10	0	5	10	5	0	7
9	25	12	-5	6	10	4	0	4
10	15	8	-10	4	8	6	5	5
11	20	10	0	5	6	5	5	6
12	25	12	5	6	4	4	0	7
13	15	8	10	4	5	6	5	4
14	20	10	5	5	10	5	0	5
15	25	12	0	6	5	4	-5	6
16	15	8	-5	4	6	6	-10	7
17	20	10	-10	5	-5	5	-10	4
18	25	12	10	6	2	4	-5	5
19	15	8	5	4	-5	6	-5	6
20	20	10	0	5	10	5	0	7
21	25	12	-5	6	10	4	0	4
22	15	8	-10	4	8	6	5	5
23	20	10	0	5	6	5	5	6
24	25	12	5	6	4	4	0	7
25	15	8	10	4	5	6	5	4
26	20	10	5	5	10	5	0	5
27	25	12	0	6	5	4	-5	6
28	15	8	-5	4	6	6	-10	7
29	20	10	-10	5	-5	5	-10	4
30	25	12	10	6	2	4	-5	5

Условия теплообмена между змеевиком и камерой

№	охлажд. среда		от трубы	труба		иней
	t _ж °C	α _ж Вт/м ² К	α ₂ Вт/м ² К	диаметр	толщина	толщина
				мм	стенки мм	слоя мм
1	0	1000	6	16	1	5
2	-5	2000	8	57	3,5	7
3	-10	3000	8	38	2,5	3
4	-15	2000	10	16	1	3
5	-15	1000	6	57	3,5	5
6	-10	1000	8	38	2,5	4
7	-10	2000	8	16	1	3
8	-5	3000	10	57	3,5	7
9	-5	3000	6	38	2,5	3
10	0	2000	8	16	1	3
11	0	2000	8	57	3,5	6
12	-5	1000	10	38	2,5	3
13	0	1000	6	16	1	5
14	-5	2000	8	57	3,5	7
15	-10	3000	8	38	2,5	3
16	-15	2000	10	16	1	3
17	-15	1000	6	57	3,5	5
18	-10	1000	8	38	2,5	4
19	-10	2000	8	16	1	3
20	-5	3000	10	57	3,5	7
21	-5	3000	6	38	2,5	3
22	0	2000	8	16	1	3
23	0	2000	8	57	3,5	6
24	-5	1000	10	38	2,5	3
25	0	1000	6	16	1	5
26	-5	2000	8	57	3,5	7
27	-10	3000	8	38	2,5	3
28	-15	2000	10	16	1	3
29	-15	1000	6	57	3,5	5
30	-10	1000	8	38	2,5	4

2.50 В барабанном биоферментаторе, изготовленном из стали толщиной $\delta_{ст}$ с наружным диаметром D_H и длиной L , протекает процесс твердофазной аэробной ферментации органических отходов.



Температура протекающего процесса $t=70$ °С, температура окружающей среды $t_{окр}=20$ °С. Снаружи корпус биоферментатора покрыт слоем теплоизоляционного материала толщиной $\delta_{из}$ с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{из}$, коэффициент теплопроводности материала корпуса $\lambda_{ст}=52$ Вт/(м·К). Средние коэффициенты теплоотдачи с внутренней поверхности корпуса и внешней изоляционного материала соответственно равны α_1 и $\alpha_2=8,7$ Вт/(м²·К).

Определить количество теплоты, отдаваемой барабаном биоферментатора трубы в окружающее пространство, а также температуры на внутренней и внешней поверхностях трубы.

	Вариант							
	1	2	3	4	5	6	7	8
L , мм	1000	1600	2200	3100	3700	5000	5500	6800
D_H , мм	325	530	720	1020	1220	1620	1820	2220
$\delta_{ст}$, мм	6	7	10	12	13	16	17	18
$\lambda_{из}$, Вт/(м·К)	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043
$\delta_{из}$, мм	50	50	50	50	50	50	50	50
	Вариант							
	9	10	11	12	13	14	15	16
L , мм	1300	2100	3000	4100	5000	6500	7300	9000
D_H , мм	325	530	720	1020	1220	1620	1820	2220
$\delta_{ст}$, мм	8	10	11	13	14	15	16	17
$\lambda_{из}$, Вт/(м·К)	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043
$\delta_{из}$, мм	100	100	100	100	100	100	100	100

ПРИЛОЖЕНИЯ

Плотность растворов хлористого натрия и хлористого кальция (кг/м³)

Масса соли в растворе, %	Температура раствора, °С						Масса соли в растворе, %	Температура раствора, °С				
	15	0	-5	-10	-15	-20		15	0	-10	-20	-30
	<i>Хлорид натрия</i>							<i>Хлорид кальция</i>				
10	1075	1078	1079	—	—	—	15	1132	1137	1140	—	—
11	1082	1086	1087	—	—	—	16	1142	1147	1150	—	—
12	1089	1093	1095	—	—	—	17	1151	1157	1160	—	—
13	1098	1101	1102	-	—	-	18	1161	1167	1170	—	—
14	1103	1108	1110	-	-	-	19	1171	1177	1180	—	—
15	1111	1116	1117	1119	-	—	20	1181	1187	1190	—	-
16	1119	1124	1125	1125	-	—	21	1191	1197	1201	1205	—
17	1127	1133	1134	1135	-	-	22	1201	1207	1211	1215	—
18	1134	1141	1142	1144	-	-	23	1211	1218	1222	1226	—
19	1141	1147	1148	1149	1151	—	24	1222	1228	1238	1237	-
20	1151	1158	1160	1162	1163	-	25	1232	1239	1244	1248	-
21	1160	1165	1168	1169	1171	-	26	1243	1250	1254	1259	1263
22	1168	1174	1176	1178	1180	-	27	1252	1261	1266	1270	1275
23	1174	1181	1183	1185	1187	1188	28	1264	1272	1277	1282	1287
24	1184	1191	1194	1196	1198	-	29	1275	1283	1288	1293	1298
25	1193	1199	1202	1204	-	-	30	1286	1294	1298	1304	1310

Коэффициент объемного расширения растворов хлористого кальция и хлористого натрия

Масса соли в растворе, %	Температура раствора, °С					Масса соли в растворе, %	Температура раствора, °С					
	20	10	0	-10	-20		20	10	0	-10	-20	-30
	<i>Хлорид натрия</i>						<i>Хлорид кальция</i>					
10	2,9	1,9	1,8	—	—	15	3,5	2,9	2,4	1,9	—	—
15	2,8	2,8	2,7	2,7	—	20	3,9	3,5	3,2	2,8	—	—
20	4,5	4,0	3,6	3,2	—	25	4,1	3,9	3,7	3,5	3,3	—
23	4,7	4,2	3,8	3,4	3,0	30	4,3	4,2	4,1	4,0	4,0	3,9

Теплофизические свойства раствора хлористого натрия

$\rho_{15^{\circ}\text{C}}$, кг/м ³	ξ , %	t_3 , °C	t , °C	c , кДж/(кг·K)	λ Вт/(м·K)	$\mu \cdot 10^4$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$a \cdot 10^7$, м ² /с	ρ_{Γ}
1050	7	-4,4	20	3,843	0,593	10,78	1,03	1,47	6,95
			10	3,835	0,576	14,12	1,34	1,43	9,40
			0	3,827	0,559	18,73	1,78	1,39	12,70
			-4	3,818	0,556	21,58	2,06	1,38	14,80
1080	11	-7,5	20	3,697	0,593	11,47	1,06	1,48	7,20
			10	3,684	0,570	15,20	1,41	1,43	9,90
			0	3,676	0,556	20,20	1,87	1,41	13,40
			-5	3,672	0,549	24,42	2,26	1,38	16,40
			-7,5	3,672	0,545	26,48	2,45	1,37	17,80
1100	13,6	-9,8	20	3,609	0,593	12,26	1,12	1,50	7,40
			10	3,601	0,568	16,18	1,47	1,43	10,30
			0	3,588	0,554	21,48	1,95	1,40	13,00
			-5	3,584	0,547	26,08	2,37	1,38	17,10
			-9,8	3,580	0,540	34,32	3,13	1,37	22,90
1120	16,2	-12,2	20	3,534	0,573	13,14	1,20	1,44	8,3
			10	3,525	0,569	17,26	1,57	1,44	10,9
			0	3,512	0,552	22,26	1,98	1,40	15,1
			-10	3,504	0,535	34,91	3,18	1,37	23,2
			-5	3,508	0,544	28,34	2,58	1,38	18,6
			-12,2	3,500	0,533	42,17	3,84	1,36	28,3
1140	18,8	-15,1	20	3,462	0,582	14,32	1,26	1,47	8,5
			-10	3,454	0,566	18,54	1,63	1,43	11,4
			0	3,442	0,550	25,60	2,25	1,40	16,1
			-5	3,433	0,542	31,18	2,74	1,38	19,8
			-10	3,429	0,533	38,74	3,40	1,36	24,8
			-15	3,425	0,524	47,76	4,19	1,35	31,0

Продолжение

$\rho_{15^{\circ}\text{C}},$ кг/м ³	$\xi,$ %	$t_3, ^{\circ}\text{C}$	$t,$ °C	$c,$ кДж/(кг·К)	λ Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^4,$ Па·с	$\nu \cdot 10^6$ м ² /с	$a \cdot 10^7,$ м ² /с	РГ
1160	21,2	-18,2	20	3,396	0,579	15,49	1,33	1,46	9,1
			10	3,383	0,563	20,10	1,73	1,43	12,1
			0	3,375	0,547	28,24	2,44	1,39	17,5
			-5	3,366	0,539	34,42	2,96	1,37	21,5
			-10	3,362	0,530	43,05	3,70	1,36	27,1
			-15	3,358	0,522	52,76	4,55	1,34	33,9
			-18	3,354	0,518	60,80	5,24	1,33	39,4
1175	23,1	-21,2	20	3,345	0,565	16,67	1,42	1,47	9,6
			10	3,337	0,549	21,57	1,84	1,40	13,1
			0	3,324	0,544	30,40	2,59	1,39	18,6
			-5	3,320	0,536	37,46	3,20	1,37	23,3
			-10	3,312	0,528	47,07	4,02	1,35	29,5
			-15	3,308	0,520	57,47	4,90	1,34	36,5
			-21	3,303	0,514	77,47	6,60	1,32	50,0

Теплофизические свойства раствора хлористого кальция

$\rho_{15^{\circ}\text{C}}$, кг/м ³	ξ , %	t_3 , °C	t , °C	c , кДж/(кг·K)	λ Вт/(м·K)	$\mu \cdot 10^4$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$a \cdot 10^7$, м ² /с	Рг
1080	9,4	-5,2	20	3,642	0,584	12,36	1,15	1,48	7,75
			10	3,634	0,570	15,49	1,44	1,45	9,88
			0	3,626	0,556	21,58	2,00	1,42	14,10
			-5	3,601	0,549	25,48	2,36	1,41	16,70
1130	14,7	-10,2	20	3,362	0,576	14,91	1,32	1,51	8,70
			10	3,349	0,563	18,63	1,64	1,48	11,05
			0	3,328	0,549	25,60	2,27	1,47	15,60
			-5	3,316	0,542	30,40	2,70	1,44	18,70
			-10	3,308	0,543	40,60	3,60	1,43	25,30
1170	18,9	-15,7	20	3,148	0,572	18,04	1,54	1,55	9,90
			10	3,140	0,558	22,36	1,91	1,52	12,60
			0	3,128	0,544	29,91	2,56	1,49	17,20
			-5	3,098	0,537	34,32	2,94	1,48	19,80
			-10	3,086	0,529	46,68	4,00	1,46	27,30
			-15	3,065	0,523	61,49	5,27	1,46	35,90
1190	20,9	-19,2	20	3,077	0,569	20,01	1,68	1,55	10,90
			10	3,056	0,555	24,52	2,06	1,52	13,60
			0	3,044	0,542	32,75	2,76	1,49	18,50
			-5	3,034	0,535	38,25	3,22	1,49	21,50
			-10	3,024	0,527	50,70	4,25	1,47	28,90
			-15	3,014	0,521	65,90	5,53	1,45	38,20
1220	23,8	-15,7	20	2,998	0,565	23,54	1,94	1,57	12,50
			10	2,952	0,551	28,73	2,35	1,52	15,40
			0	2,931	0,538	38,15	3,13	1,50	20,80
			-5	2,910	0,530	44,13	3,63	1,49	24,40
			-10	2,910	0,523	59,23	4,87	1,47	33,00
			-15	2,910	0,518	75,51	6,20	1,46	42,50
			-20	2,889	0,511	94,73	7,77	1,44	53,80
			-25	2,889	0,504	115,72	9,48	1,43	66,50

Продолжение

$\rho_{15^{\circ}\text{C}},$ кг/м ³	$\xi,$ %	$t_3, ^{\circ}\text{C}$	$t,$ $^{\circ}\text{C}$	$c,$ кДж/(кг·К)	λ Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^4,$ Па·с	$\nu \cdot 10^6$ м ² /с	$a \cdot 10^7,$ м ² /с	РГ
1240	25,7	-31,2	20	2,889	0,480	26,28	2,12	1,57	13,5
			10	2,879	0,548	32,17	2,51	1,52	16,5
			0	2,868	0,535	42,56	3,43	1,50	22,7
			-10	2,847	0,521	66,78	5,40	1,47	36,6
			-15	2,847	0,514	83,65	6,75	1,45	46,3
			-20	2,805	0,508	105,62	8,52	1,45	58,5
			-25	2,805	0,501	129,15	10,40	1,44	72,0
			-30	2,763	0,494	148,08	12,00	1,44	83,0
1260	27,5	-38,6	20	2,847	0,558	29,32	2,33	1,56	14,9
			10	2,826	0,545	36,09	2,87	1,52	18,8
			0	2,809	0,532	48,05	3,81	1,50	25,3
			-10	2,784	0,519	75,22	5,97	1,50	40,3
			-20	2,763	0,506	118,66	9,45	1,45	65,0
			-25	2,742	0,499	147,10	11,70	1,44	80,7
			-30	2,742	0,492	171,61	13,60	1,42	95,5
			-35	2,721	0,486	215,74	17,10	1,42	120,0
1270	28,4	-43,6	20	2,805	0,557	31,38	2,47	1,56	15,8
			0	2,780	0,529	51,19	4,02	1,50	26,7
			-10	2,763	0,518	80,22	6,32	1,47	42,7
			-20	2,721	0,505	126,51	10,00	1,45	68,8
			-25	2,721	0,498	159,85	12,60	1,43	87,5
			-30	2,700	0,491	188,29	14,90	1,43	103,5
			-35	2,700	0,484	245,17	19,30	1,41	136,5
			-40	2,680	0,478	304,01	24,00	1,40	171,0
1280	29,1	-50,1	20	2,805	0,555	34,03	2,65	1,54	17,2
			0	2,755	0,528	54,92	4,30	1,50	28,7
			-10	2,721	0,516	86,30	6,75	1,48	45,4
			-20	2,680	0,504	138,27	10,80	1,46	73,4
			-30	2,659	0,490	212,80	16,60	1,44	115,0
			-35	2,638	0,483	254,97	19,90	1,43	139,0
			-40	2,638	0,477	323,62	25,30	1,41	179,0
			-45	2,617	0,465	402,07	31,4	1,40	223,0
			-50	2,617	0,464	490,33	38,3	1,30	295,0

Продолжение

$\rho_{15^{\circ}\text{C}},$ кг/м ³	$\xi,$ %	$t_3, ^{\circ}\text{C}$	$t,$ °C	$c,$ кДж/(кг·К)	λ Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^4,$ Па·с	$\nu \cdot 10^6$ м ² /с	$a \cdot 10^7,$ м ² /с	Рг
1286	29,9	-55,0	20	2,742	0,538	35,11	2,75	1,55	17,8
			0	2,738	0,528	56,88	4,43	1,50	29,5
			-10	2,700	0,515	90,42	7,04	1,48	47,5
			-20	2,680	0,502	144,16	11,23	1,48	77,0
			-30	2,659	0,488	225,55	17,60	1,43	123,0
			-35	2,638	0,483	284,39	22,10	1,41	156,5
			-40	2,638	0,476	353,04	27,50	1,40	196,0
			-45	2,617	0,470	431,49	33,50	1,39	240,0
			-50	2,617	0,463	509,95	39,70	1,37	290,0
			-55	2,596	0,456	647,24	50,20	1,36	368,0

Теплофизические свойства раствора этиленгликоля

$\rho_{15^\circ\text{C}}$, кг/м ³	ξ , %	t_3 , °C	t , °C	c , кДж/(кг·K)	λ Вт/(м·K)	$\mu \cdot 10^4$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$ м ² /с	$a \cdot 10^7$, м ² /с	РГ
1005	4,6	-2	50	4,145	5,88	0,586	0,616	1,48	3,96
			20	4,145	10,79	1,07	0,582	1,38	7,70
			10	4,124	13,73	1,365	0,570	1,37	9,90
			0	4,103	19,61	1,95	0,558	1,34	14,40
1010	8,4	-4	50	4,103	6,86	0,68	0,593	1,43	4,75
			20	4,061	11,77	0,17	0,570	1,38	8,40
			10	4,061	15,69	1,55	0,558	1,36	11,40
			0	4,061	22,56	2,23	0,547	1,33	16,70
1015	12,2	-5	50	4,061	6,86	0,677	0,582	1,41	4,80
			20	4,019	13,73	1,35	0,547	1,33	10,10
			10	3,998	18,63	1,84	0,541	1,33	13,80
			0	3,977	25,50	2,51	0,535	1,30	18,90
1020	16,0	-7	50	4,019	7,84	0,77	0,558	1,36	5,65
			20	3,936	14,71	1,45	0,535	1,33	10,80
			10	3,915	20,59	2,02	0,523	1,31	15,40
			0	3,894	28,44	2,79	0,512	1,28	21,60
			-5	3,894	34,30	3,37	0,500	1,26	26,60
1025	19,8	-10	50	3,977	7,84	0,76	0,547	1,33	5,7
			20	3,894	16,67	1,63	0,523	1,30	12,5
			10	3,873	22,56	2,20	0,512	1,29	17,0
			0	3,852	31,38	3,06	0,500	1,26	24,2
			-5	3,852	38,25	3,73	0,488	1,24	30,0
1030	23,6	-13	50	3,953	8,83	0,858	0,523	1,29	6,6
			20	3,852	17,65	1,72	0,500	1,26	13,7
			10	3,810	25,50	2,48	0,494	1,26	19,6
			0	3,768	35,30	3,44	0,488	1,26	27,4
			-10	3,768	51,00	4,95	0,488	1,26	39,4
1035	27,4	-15	50	3,852	8,83	0,855	0,512	1,28	6,7
			20	3,768	19,61	1,90	0,488	1,25	15,2
			0	3,726	39,23	3,80	0,477	1,23	31,0
			-10	3,684	56,88	5,50	0,477	1,25	44,0
			-15	3,663	70,61	6,83	0,471	1,24	55,0

Продолжение

$\rho_{15^{\circ}\text{C}},$ кг/м ³	$\xi,$ %	$t_3, ^{\circ}\text{C}$	$t,$ $^{\circ}\text{C}$	$c,$ кДж/(кг·К)	λ Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^4,$ Па·с	$\nu \cdot 10^6$ м ² /с	$a \cdot 10^7,$ м ² /с	РГ
1040	31,2	-17	50	3,810	9,81	0,94	0,500	1,26	7,5
			20	3,726	21,58	2,07	0,477	1,23	16,8
			0	3,642	44,13	4,25	0,465	1,23	34,5
			-10	3,642	66,60	6,45	0,465	1,23	52,0
			-15	3,622	82,37	7,90	0,459	1,22	65,0
1045	35,0	-21	50	3,726	10,79	1,03	0,477	1,22	8,4
			20	3,642	24,52	2,35	0,465	1,22	19,2
			0	3,599	49,03	4,70	0,465	1,22	37,7
			-10	3,559	76,49	7,35	0,454	1,22	60,0
			-15	3,538	96,16	8,90	0,454	1,22	73,0
			-20	3,517	117,68	11,30	0,454	1,23	92,0
1050	38,8	-26	50	3,684	11,30	1Д2	0,465	1,20	9,3
			20	3,559	27,46	2,63	0,454	1,20	21,6
			0	3,517	55,90	5,32	0,454	1,22	44,0
			-10	3,475	86,30	8,25	0,454	1,23	67,0
			-15	3,454	107,87	10,30	0,454	1,25	82,0
			-20	3,433	142,20	13,50	0,454	1,26	107,0
			-25	3,412	186,33	17,80	0,454	1,26	144,0
1055	42,6	-26	50	3,601	13,73	1,30	0,442	1,16	11,2
			20	3,475	29,42	2,78	0,442	1,20	23,0
			0	3,433	61,78	5,85	0,442	1,22	47,5
			-10	3,391	96,10	9,10	0,442	1,23	73,0
			-15	3,370	122,58	11,70	0,442	1,25	93,0
			-20	3,349	160,83	15,20	0,442	1,25	122,0
			-25	3,328	215,75	20,50	0,442	1,26	162,0
1060	46,4	-33	50	3,517	15,69	1,48	0,430	1,15	12,8
			20	3,391	34,32	3,24	0,430	1,19	27,0
			0	3,349	68,65	6,28	0,430	1,22	51,5
			-10	3,308	107,87	10,20	0,430	1,22	84,0
			-15	3,287	137,29	13,00	0,430	1,23	105,0
			-20	3,266	181,42	17,20	0,430	1,23	140,0
			-25	3,245	240,26	22,60	0,430	1,25	180,0
			-30	3,224	323,62	30,50	0,430	1,26	242,0

Теплофизические свойства раствора пропиленгликоля

ξ_v , %	t_3 , °C	ρ , кг/м ³	t , °C	c , кДж/(кг·K)	λ Вт/(м·K)	$\mu \cdot 10^3$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$ м ² /с	$a \cdot 10^7$, м ² /с	ρ_T
25	-10	1032	-10	3,93	0,466	10,22	9,9	1,15	86,2
		1030	0	3,95	0,47	6,18	6	1,16	51,9
		1024	20	3,98	0,478	2,86	2,8	1,17	23,9
		1016	40	4	0,491	1,42	1,4	1,21	11,6
		1003	60	4,03	0,505	0,903	0,9	1,25	7,2
25,0	-20	1050	-20	3,68	0,42	47,25	45	1,09	414,0
		1045	0	3,72	0,425	47,25	12	1,09	109,8
		1036	20	3,77	0,429	4,56	4,4	1,10	40,1
		1025	40	3,82	0,433	2,26	2,2	1,11	19,9
		1012	60	3,88	0,437	1,32	1,3	1,11	11,7
47,0	-30	1066	-30	3,45	0,397	160	150	1,08	1389,6
		1062	-20	3,49	0,396	74,3	70	1,07	655,2
		1058	-10	3,52	0,395	31,74	30	1,06	282,8
		1054	0	3,56	0,395	18,97	18	1,05	171,0
		1044	20	3,62	0,395	6,264	6	1,05	57,4
		1030	40	3,69	0,393	2,978	2,9	1,03	28,0
		1015	60	3,76	0,392	1,624	1,6	1,03	15,6

Теплофизические сухого воздуха при 760 мм рт. ст.

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

Теплофизические свойства воды на линии насыщения

t , °C	$p \cdot 10^{-5}$, Па	ρ , кг/м ³	h , кДж/кг	c_p , кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, 1/К	$\sigma \cdot 10^4$, Н/м	Pr
0	1,013	999,9	0	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	983,1	251,1	4,179	65,9	16,0	469,0	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	355,0	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

Теплофизические свойства криогенных веществ (жидких)

T , К	$\sigma \cdot 10^3$, Н/м	$\nu \cdot 10^8$, м ² /с	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/кг
<i>Кислород (O₂)</i>						
90	13,2	16,55	147	7,98	1137	1,625
85	14,5	18,64	154	8,26	1160	1,607
80	15,7	24,44	161	8,56	1183	1,589
75	17,0	25,21	169	8,93	1205	1,570
70	18,3	25,98	176	9,26	1226	1,550
65	19,4	26,75	184	9,84	1246	1,500
<i>Неон</i>						
28	4,45	9,80	112	4,51	1188,5	2,09
26	5,25	11,75	115	4,81	1223,7	1,97
24	5,9	14,28	119	4,91	1256,3	1,98
<i>Водород (H₂)</i>						
23	1,69	15,59	124	15,46	67,34	11,91
22	1,85	16,32	122	16,08	68,61	11,06
20	2,25	18,47	118	17,46	70,92	9,53
18	2,60	21,37	114	18,95	72,99	8,24
16	2,95	25,54	109	19,69	74,79	7,40
14,6	3,20	29,36	106	19,89	77,12	6,91
<i>Гелий-4</i>						
4,2	0,09		27,1	4,84	125	4,48
4,0	0,12	2,88	26,2	5,09	129	3,99
3,5	0,17	2,71	23,8	4,83	136	3,62
3,0	0,22	2,67	21,4	6,13	141	2,49
2,5	0,27	2,49	19,0	5,62	145	2,33

Продолжение

T , К	$\sigma \cdot 10^3$, Н/м	$\nu \cdot 10^8$, м ² /с	$\lambda \cdot 10^3$, Вт/(м·К)	$a \cdot 10^8$, м ² /с	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/кг
<i>Азот (N₂)</i>						
120	0,65	7,51	63,2	3,06	529	3,90
115	1,79	7,93	70,7	3,96	583	3,063
110	2,22	8,81	78,3	4,87	626	2,566
105	3,11	9,68	86,4	5,64	661	2,319
100	4,06	10,32	95,2	6,33	691	2,176
95	5,06	11,56	104,1	6,94	719	2,086
90	6,10	12,50	113,0	7,47	746	2,028
85	7,16	14,41	125,5	8,18	771	1,989
80	8,28	17,18	138,0	8,84	795	1,964
75	9,41	20,53	150,5	9,46	817	1,948
70	10,56	25,21	163,0	10,05	838	1,935
<i>Аргон (Ar)</i>						
140	1,28	6,85	61,2	3,49	942	1,85
135	2,10	7,08	67,3	4,18	1007	1,60
130	2,99	7,61	73,4	4,45	1064	1,55
125	3,94	8,05	81,0	5,01	1114	1,45
120	4,95	8,96	86,5	5,74	1160	1,30
115	6,01	9,83	91,4	5,88	1195	1,30
110	7,10	10,94	96,2	6,46	1240	1,20
105	8,24	12,18	102,6	6,71	1275	1,20
100	9,42	13,56	109,0	7,56	1310	1,10
95	10,63	15,23	115,0	7,78	1343	1,10
90	11,68	17,35	121,0	8,79	1376	1,00
85	13,20	19,89	127,0	9,03	1407	1,00

Теплофизические свойства некоторых твердых материалов

Материалы	t , °С	ρ , кг/м ³	λ Вт/(м·К)	c , кДж/(кг·К)	$a \cdot 10^6$, м ² /с
<i>Металлы</i>					
Алюминий	0	2570	204,0	0,920	91,3
Бронза	20	8000	64,0	0,381	20,8
Латунь	0	8600	85,5	0,378	26,4
Медь	0	8800	384,0	0,381	114,5
Никель	20	9000	58,2	0,462	14,01
Олово	0	7230	64,0	0,921	39,2
Свинец	0	11400	34,9	0,129	23,6
Серебро	0	10500	458,0	0,234	186,5
Сталь 3	20	7850	52,0	0,460	14,4
Сталь 45	20	7700	41,9	0,611	8,9
Титан	20	4500	15,0	0,437	7,63
Цинк	20	7000	116,3	0,394	42,3
Чугун	20	7220	63,0	0,504	17,4
<i>Изоляционные и строительные материалы</i>					
Асбест:					
листовой	30	770	0,1163	0,818	0,198
волокно	50	470	0,1105	0,818	0,290
шнур	20	800	0,138	0,816	–
Асфальт	20	2110	0,698	2,09	0,159
Бетон с щебнем:					
влажный	0	2000	1,28	0,84	–
сухой	0	1600	0,84	–	–
Бетон с гравием гидротехнический	0 – 30	2400	2,00	0,83	1,00
Железобетон набивной	0	2200	1,55	0,84	–
Шлакобетон	0	1500	0,70	0,80	–
Вата хлопчатобумажная	30	80	0,042	–	–
Войлок шерстяной	30	330	0,0524	–	–
Гипс	–	1650	0,291	0,88	–
Глина	20	2000	0,90	0,84	–
Глина огнеупорная	450	1845	1,04	1,09	–
Гравий	20	1840	0,36	–	–

Продолжение

Материалы	t , °С	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	c , кДж/(кг·К)	$a \cdot 10^6$, м ² /с
Дерево:					
дуб перпендикулярно волокнам	20	800	0,207	1,76	1,147
дуб параллельно волокнам	20	800	0,363	–	–
сосна перпендикулярно волокнам	0 – 50	546	0,14 – 0,16	2,72	–
сосна параллельно волокнам	20 – 25	546	0,35 – 0,72	2,72	–
Зонолит	100	200	0,099	–	–
Каменный уголь	20	1400	0,186	1,31	1,03
Картон	20	–	0,14 – 0,35	1,51	–
Керамические плитки	20	2000	0,92	0,929	–
Кирпич:					
красный	0	1800	0,77	0,88	–
силикатный	0	1900	0,81	0,84	–
изоляционный	100	550	0,1395	–	–
Кладка из красного кирпича:					
на холодном растворе	0	1700	0,81	0,88	–
на теплом растворе	0	1600	0,67	0,84	–
Кладка из силикатного кирпича					
на холодном растворе	0	1900	0,87	0,84	–
на теплом растворе	0	1700	0,76	0,80	–
Кожа (подошвенная)	30	1000	0,16	–	–
Лед	0	917	2,20	2,26	1,06
	-95	–	3,96	1,17	–
Мел	50	2000	0,93	0,88	0,531
Минеральная шерсть	50	200	0,0465	0,92	0,253
Мрамор	90	2700	1,31	0,419	1,15
Накипь котельная	65	–	0,13 – 3,14	–	–
Опилки древесные	20	200	0,070	–	–
Парафин	20	920	0,268	–	–
Пенополистирол:					
сухой	–	40	0,038	1,34	–
влажностью 10 %	–	40	0,05	1,34	–
Пенопласт ПХВ-1:					
сухой	–	125	0,052	1,26	–
влажностью 10 %	–	125	0,064	1,26	–
Пенополиуретан:					
сухой	–	80	0,041	1,47	–
влажностью 10 %	–	80	0,05	1,47	–

Продолжение

Материалы	t , °С	ρ , кг/м ³	λ Вт/(м·К)	c , кДж/(кг·К)	$a \cdot 10^6$, м ² /с
Песок:					
сухой	20	1500	0,326	0,798	2,73
влажный	20	1650	1,130	2,09	0,492
Плексиглас	20	–	0,184	–	–
Пробковая пластина	30	190	0,042	1,88	0,117
То же, мелочь (4 – 5 мм)	60	85	0,044 – 0,058	1,76	–
Резина твердая	0 – 100	1200	0,157– 0,160	1,38	–
Резина мягкая	20	1100	0,15	1,38	–
Снег:					–
свежевыпавший	–	200	0,100	2,09	–
уплотненный	–	400	0,46	2,09	–
Стекло:					–
обыкновенное	20	2500	0,74	0,67	–
термометрическое	20	2590	0,96	0,75	–
кварцевое	0	2210	1,30	0,668	–
Стекланная вата	0	200	0,0372	0,67	0,278
Текстолит	20	1300 – 1400	0,23 – 0,34	1,46 – 1,51	
Торфоплиты	50	220	0,064	–	–
Фанера клееная	0	600	0,15	–	–
Фарфор	95	2400	1,04	1,09	0,398
Фибролит	80	360-440	0,073-0,128		–
Целлулоид	30	1400	0,21		–
Штукатурка:					
известковая	0	1600	0,70	0,84	–
цементно-песчаная	0	1800	1,20	0,84	–
Эбонит	20	1200	0,157-0,17		–
<i>Пищевые продукты</i>					
Баклажаны ($W=91,7\%$)	60	1032	0,37	3,96	0,119
Вишни ($W=70,8\%$)	–	1070	0,57	3,37	0,158
Говядина:					
тощая	–	970 – 990	0,56	3,18	0,180
средней упитанности ($W=74,5\%$)	30	1050	0,49	2,92	0,158
жирная	30	960 – 980	0,45	2,51	0,187
Кабачки ($W=94,4\%$)	–	1021	0,60	4,04	0,142

Продолжение

Материалы	t , °С	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	c , кДж/(кг·К)	$a \cdot 10^6$, м ² /с
Картофель ($W=81,2\%$)	60	1076	0,61	3,66	0,163
Капуста белокочанная ($W=91,2\%$)	60	1034	0,99 – 1,3	3,95	0,27 – 0,361
Куриное мясо	–	1030	0,41	3,31	0,124
Лук репчатый ($W=85,6\%$)	60	1057	0,47	3,74	0,131
Масло сливочное	275	949	0,188	4,63	–
Молоко сухое:	293	940	0,232	4,87	–
обычной сушки	–	600	0,16	2,093	0,131
распылительной сушки	–	659	0,19	1,926	0,150
Морковь ($W=90,5\%$)	60	1037	0,62	3,93	0,165
Огурцы ($W=96\%$)	60	1015	0,44	4,086	0,114
Сахарный песок	0	1600	0,582	1,26	0,278
Свекла ($W=86,7\%$)	60	1052	0,62	3,80	0,166
Свинина ($W=78,5\%$)	–	940 – 960	0,41	2,18	0,198
Судак ($W=76\div 79\%$)	273 – 300	1045 – 1070	0,43 – 0,52	3,81	–
Сыр голландский	–	1050	0,35	2,56	0,133
Томаты ($W=94,0\%$)	60	1023	0,60	4,03	0,156
Треска ($W=78\div 83\%$)	273 – 293	1020 – 1052	0,45 – 0,55	3,43 – 3,73	–
Яблоки ($W=86,7\%$)	60	1052	0,48	3,82	0,161

Теплофизические свойства молока и сливок

t , °С	ρ , кг/м ³	c , кДж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^7$, м ² /с	$\mu \cdot 10^4$,	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\sigma \cdot 10^2$, Н/м	P_T
<i>Молоко натуральное</i>								
5	1102,3	3,615	0,526	1,320	29,60	2,685	4,70	20,34
10	1033,2	3,853	0,531	1,335	24,70	2,393	4,60	17,92
15	1030,0	3,854	0,537	1,352	21,00	2,039	4,50	15,08
20	1027,9	3,855	0,542	1,368	17,90	1,741	4,30	12,73
30	1023,6	3,856	0,553	1,401	13,30	1,299	4,30	9,27
40	1019,3	3,859	0,564	1,412	10,40	1,020	4,30	7,22
50	1015,1	3,864	0,575	1,466	8,50	0,837	4,20	5,71
5t60	1010,3	3,869	0,586	1,499	7,10	0,703	4,10	4,69
70	1004,5	3,879	0,597	1,532	6,20	0,617	-	4,03
80	998,7	3,893	0,608	1,564	5,70	0,571	-	3,65
<i>Сливки 35 %-ной жирности</i>								
5	1003,9	2,828	0,323	1,138	784,5	78,15	5,00*	686,7
10	1000,9	2,857	0,328	1,147	392,3	39,19	4,88*	341,77
15	997,7	2,885	0,334	1,160	171,6	17,19	4,56*	148,10
20	994,5	2,914	0,339	1,169	117,7	11,84	4,54*	101,31
30	988,2	2,971	0,351	1,196	68,6	6,94	4,37*	58,03
40	981,9	3,029	0,363	1,221	44,1	4,49	4,35*	36,77
50	975,5	3,086	0,377	1,252	25,5	2,61	4,27*	20,85
60	969,2	3,143	0,392	1,287	25,1	2,59	4,17*	20,12
70	962,9	3,200	0,409	1,327	24,5	2,544	-	19,17
80	956,6	3,258	0,427	1,359	24,5	2,541	-	18,69

**Значения величин μ_1 , A_1 , D_1 для расчета безразмерных температур в
регулярном режиме охлаждения или нагрева тел**

Bi	Пластина			Цилиндр			Шар		
	μ_1	A_1	D_1	μ_1	A_1	D_1	μ_1	A_1	D_1
0	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000
0,01	0,0998	1,0020	1,0000	0,1412	1,0031	1,0000	0,1713	1,0035	1,0000
0,04	0,1987	1,0065	1,0000	0,2814	1,0102	1,0000	0,3450	1,0121	1,0000
0,06	0,2425	1,0099	1,0000	0,3438	1,0150	1,0000	0,4217	1,0181	1,0000
0,08	0,2791	1,0130	1,0000	0,3960	1,0199	0,9999	0,4860	1,0239	1,0000
0,1	0,3111	1,0159	1,0000	0,4417	1,0245	0,9998	0,5423	1,0297	0,9997
0,2	0,4328	1,0312	0,9995	0,6170	1,0482	0,9992	0,7593	1,0592	0,9994
0,3	0,5218	1,0450	0,9982	0,7465	1,0711	0,9983	0,9208	1,0880	0,9985
0,4	0,5932	1,0581	0,9973	0,8516	1,0931	0,9970	1,0528	1,1164	0,9974
0,5	0,6533	1,0701	0,9955	0,9408	1,1142	0,9950	1,1656	1,1440	0,9959
0,6	0,7051	1,0813	0,9939	1,0184	1,1345	0,9936	1,2644	1,1713	0,9944
0,7	0,7506	1,0918	0,9920	1,0873	1,1539	0,9916	1,3525	1,1978	0,9926
0,8	0,7910	1,1016	0,9903	1,1490	1,1724	0,9893	1,4320	1,2237	0,9905
0,9	0,8274	1,1107	0,9882	1,2048	1,1902	0,9868	1,5044	1,2488	0,9881
1,0	0,8603	1,1192	0,9862	1,2558	1,2071	0,9843	1,5708	1,2732	0,9855
1,5	0,9882	1,1537	0,9749	1,4569	1,2807	0,9694	1,8366	1,3848	0,9707
2,0	1,0769	1,1784	0,9635	1,5994	1,3377	0,9535	2,0288	1,4793	0,9534
3,0	1,1925	1,2102	0,9430	1,7887	1,4192	0,9225	2,2889	1,6223	0,9171
4,0	1,2646	1,2287	0,9264	1,9081	1,4698	0,8984	2,4557	1,7201	0,8829
5,0	1,3138	1,2403	0,9130	1,9898	1,5029	0,8721	2,5704	1,7870	0,8533
6,0	1,3496	1,2478	0,9021	2,0490	1,5253	0,8532	2,6537	1,8338	0,8280
7,0	1,3766	1,2532	0,8932	2,0937	1,5409	0,8375	2,7165	1,8673	0,8068
8,0	1,3978	1,2569	0,8859	2,1286	1,5523	0,8242	2,7654	1,8920	0,7889
9,0	1,4149	1,2598	0,8796	2,1566	1,5611	0,8133	2,8044	1,9106	0,7737
10,0	1,4289	1,2612	0,8743	2,1795	1,5677	0,8041	2,8363	1,9249	0,7667
15,0	1,4729	1,2677	0,8565	2,2509	1,5853	-	2,94	1,960	—
20,0	1,4961	1,2699	-	2,2880	1,5918	0,7359	2,99	1,979	0,688
30,0	1,5202	1,2717	0,8354	2,3261	1,5964	—	3,04	1,985	—
40,0	1,5325	1,2723	-	2,3455	1,5988	—	3,065	1,990	—
50,0	1,5400	1,2727	0,8250	2,3572	1,5995	0,7170	3,08	1,994	0,62
60,0	1,5451	1,2728	-	2,3651	1,6009	—	3,09	1,996	—
80,0	1,5514	1,2730	—	2,3750	1,6012	—	3,10	1,998	—

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теоретические основы хладотехники. Теплообмен / под. Ред. Э. И. Гуйго – Л.: Агропромиздат, 1986. – 320 с.
2. Лыков А. В, Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
3. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 320 с
4. Исаченко В. П. Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1981. – 417 с.
5. Данилова Г. Н., Филаткин В. Н., Щербов М. Г., Бучко Н. А. Сборник задач по процессам теплообмена в пищевой и холодильной промышленности. – М.: Агропромиздат, 1986. – 288 с.
6. Богданов С. Н., Иванов О. П., Куприянова А. В. Холодильная техника, Свойства веществ. Справочник. – Л. Машиностроение, 1976. – 166 с.
7. Теплофизические характеристики пищевых продуктов и материалов. Справочное пособие / А. С. Гинзбург, М. Г. Громов, Г. И. Красовская. – М.: Агропромиздат, 1990.
8. Промышленные фторорганические продукты. Справочник / Б. Н. Максимов, В. Г. Барабанов, И. Я. Серушкин и др. – Л.: Химия, ЛО, 1990. – 464 с
9. Холодильная техника. Теплофизические основы получения искусственного холода. Справочник. – М.: Пищевая промышленность. 1980. – 232 с.
10. Mahmoud Massoud. Engineering Thermofluids: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer – Springer Science & Business Media, 2005. – 1144 с

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ОСНОВНЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	3
ПРЕДИСЛОВИЕ	5
ГЛАВА 1. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ	6
ГЛАВА 2. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА.....	28
ПРИЛОЖЕНИЯ	61
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	81

Митропов Владимир Викторович
Уваров Роман Алексеевич

Сборник задач по процессам теплообмена ч.1

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А