

**КАЗАНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ
ЗДАНИЙ И ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ
И ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ**

Учебно-методическое пособие

**Казань
2025**

УДК 697.1(075.8)

ББК 38.113я73

П79

Рецензенты

д-р техн. наук, доцент ФГАОУ ВО «КФУ» А. О. Попов;
канд. хим. наук, доцент ФГБОУ ВО «КГЭУ» А. В. Ахмеров

**Проектирование тепловой защиты зданий и инженерных
П79 сетей:** учебно-методическое пособие / составители: Р. А. Садыков,
А. Л. Осипов, А. В. Ахмеров, А. К. Мухаметзянова. – Казань: КГЭУ,
2025. – 84 с.

Содержит материал, необходимый для выполнения на практических занятиях по дисциплине «Математическое моделирование в строительстве» теплотехнических и влажностных расчетов ограждающих конструкций зданий и сооружений с учетом требований нормативной строительной документации.

Предназначено для обучающихся по образовательной программе направления подготовки 08.04.01 Строительство, направленность (профиль) «Проектирование, эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений».

УДК 697.1(075.8)

ББК 38.113я73

*Рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом
Института атомной и тепловой энергетики КГЭУ*

© Садыков Р. А., Осипов А. Л., Ахмеров А. В., Мухаметзянова А. К., составление, 2025

© КГЭУ, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ДЛЯ ТЕЛ КАНОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ.....	5
1.1. Теплопроводность плоской стенки	5
1.2. Теплопередача через плоскую стенку.....	9
1.3. Теплопроводность цилиндрической стенки.....	11
1.4. Теплопередача через цилиндрическую стенку	16
1.5. Теплопередача через шаровую стенку.....	17
1.6. Обобщенный метод решения задач теплопроводности в плоской, цилиндрической и шаровой стенках	20
1.7. Пути интенсификации теплопередачи.....	24
1.8. Критический диаметр цилиндрической стенки	26
1.9. Контактное термическое сопротивление.....	29
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ УСТАНОВИВШИХСЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ	33
2.1. Задание и исходные данные	33
2.2. Расчет теплового режима ограждения	38
2.2.1. Определение нормативных требований.....	39
2.2.2. Расчет приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции	40
2.2.3. Проверка нормативных требований	47
2.3. Расчет сопротивления воздухопроницанию ограждающей конструкции	48
2.4. Расчет стационарного температурного поля в ограждающей конструкции	50
2.4.1. Расчет стационарного одномерного температурного поля.....	50
2.4.2. Расчет стационарного двумерного температурного поля.....	53
2.5. Расчет теплоустойчивости наружных ограждающих конструкций в теплый период	53
2.6. Расчет влажностного режима наружных ограждающих конструкций.....	57
2.6.1. Проверка внутренней поверхности наружных ограждений на возможность конденсации влаги.....	57
2.6.2. Защита от переувлажнения ограждающей конструкции	59
2.6.3. Расчет конденсации влаги в толще ограждающей конструкции	63
ПРИЛОЖЕНИЕ А	70
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	82

ВВЕДЕНИЕ

Математическое моделирование (ММ) в строительстве рассматривает вопросы теплопередачи, воздухопроницания, теплоустойчивости и влажностного режима в многослойных ограждающих конструкциях (МОК) зданий и сооружений в связи с процессами тепло- и массообмена, обусловленными действием внешних климатических факторов и работой инженерных систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. В настоящее время значение моделирования теплофизических процессов, протекающих в МОК, усиливается (*ВИМ*-технологии) в связи с широким применением индустриальных конструкций из современных материалов, повышением требований к комфортности внутреннего климата помещений, а также развитием строительства в районах с резко выраженными природно-климатическими воздействиями.

Цель издания учебно-методического пособия по дисциплине «Математическое моделирование в строительстве» – закрепить и развить знания, полученные учащимися при изучении теоретического курса, приобрести навыки решения практических задач, связанных с ММ установленных теплофизических процессов в ОК зданий и сооружений. Все расчеты производятся в соответствии с требованиями нормативной документации [8–13].

Изложение и порядок расположения материала подчинены главной цели – помочь магистрам освоить методику теплотехнических и влажностных расчетов с учетом существующих источников по методам ММ в строительстве, а также СНиПов, ГОСТов и пособий по проектированию ОК зданий и сооружений.

При выполнении расчетного задания у обучающихся формируются базовые знания по моделированию стационарных процессов переноса в МОК жилых, общественных и производственных зданий, которые тесно связаны с их проектированием и методами определения оптимального сопротивления теплопередаче ОК зданий и сооружений.

1. УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ДЛЯ ТЕЛ КАНОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

1.1. Теплопроводность плоской стенки

Рассмотрим температурное поле и тепловой поток при стационарной теплопроводности через однородную плоскую стенку, площадь боковой поверхности которой настолько велика, что теплообменом через торцы ее можно пренебречь. Участок такой стенки изображен на рис. 1.1. Стенка имеет толщину δ и одинаковый для всей стенки коэффициент теплопроводности λ . Температуры на границах стенки t_{w1} и t_{w2} , а изотермические поверхности имеют форму плоскостей, параллельных поверхностям.

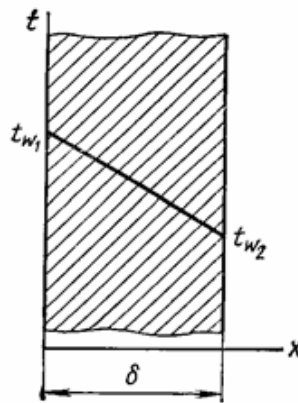


Рис. 1.1. Плоская стенка

При рассматриваемых условиях теплота может распространяться только вдоль оси x , и температурное поле будет одномерным. Температурные градиенты вдоль остальных осей координат равны нулю. Следовательно,

$$\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0.$$

Дифференциальное уравнение энергии для стационарной одномерной задачи о теплопроводности плоской стенки без внутренних источников теплоты приводятся к виду

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = 0.$$

Проинтегрировав это уравнение дважды, найдем:

$$\frac{dt}{dx} = C_1; \quad (1.1)$$

$$t = C_1x + C_2. \quad (1.2)$$

Следовательно, температурное поле однородной плоской стенки при постоянном коэффициенте теплопроводности выражается линейной зависимостью температуры от координаты (рис. 1.1).

Определим константы интегрирования в уравнении температурного поля. Граничные условия первого рода для рассматриваемой задачи запишутся равенствами:

$$\begin{aligned} \text{при } x = 0 \quad t &= t_{w1}; \\ \text{при } x = \delta \quad t &= t_{w2}. \end{aligned}$$

Подстановка этих условий в формулу (1.2) дает:

$$C_2 = t_{w1}; \quad C_1 = \frac{t_{w2} - t_{w1}}{\delta}.$$

Заменив константы интегрирования в формуле найденными выражениями, получим уравнение температурного поля вида

$$t = \frac{t_{w2} - t_{w1}}{\delta} x + t_{w1}. \quad (1.3)$$

Определим плотность теплового потока через плоскую стенку. В соответствии с законом Фурье с учетом равенства (1.1) можно записать

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} = -\lambda C_1 = -\lambda \frac{t_{w2} - t_{w1}}{\delta}.$$

Следовательно,

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{w1} - t_{w2}). \quad (1.4)$$

Соотношение $\frac{\lambda}{\delta}$ называется *тепловой проводимостью плоской стенки*, а обратная величина $\frac{\delta}{\lambda}$ – *внутренним термическим сопротивлением*.

Рассмотрим теперь теплопроводность плоской многослойной стенки, состоящей из n -слоев. На границе раздела двух слоев возникает *контактное термическое сопротивление*, обусловленное неплотным соприкосновением поверхностей. Термическое сопротивление контакта в отдельных случаях может быть пренебрежимо малым, но иногда общее тепловое сопротивление многослойной стенки благодаря сопротивлению в местах контакта увеличивается в несколько раз.

Тепловой поток через поверхность контакта можно выразить формулой

$$q = \frac{1}{R_{\text{к}}} (t' - t''), \quad (1.5)$$

где $R_{\text{к}}$ – контактное термическое сопротивление; t' и t'' – температуры контактирующих поверхностей.

Оценим температурное поле и тепловой поток теплопроводностью через многослойную стенку с учетом контактных сопротивлений. Каждый слой имеет заданную толщину δ_i и коэффициент теплопроводности λ_i (рис. 1.2).

При стационарном тепловом режиме тепловые потоки через каждый из слоев, а также через зоны контактов будут одинаковыми, так как только при этом условии температурное поле не изменяется с течением времени.

Выразим плотности тепловых потоков через отдельные слои и поверхности контактов с помощью формул:

$$\left\{ \begin{array}{l} q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_{w1} - t'_{w2}), \\ q = \frac{1}{R_{\text{н1}}} (t'_{w2} - t''_{w2}), \\ q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (t''_{w2} - t'_{w3}), \\ \dots\dots\dots \\ q = \frac{\lambda_n}{\delta_n} (t_{wn} - t'_{wn+1}). \end{array} \right. \quad (1.6)$$

Перепишем эти уравнения в виде:

$$\begin{cases} t_{w1} - t'_{w2} = q \frac{\delta_1}{\lambda_1}, \\ t'_{w2} - t''_{w2} = q R_{H1}, \\ t''_{w2} - t'_{w3} = q \frac{\delta_2}{\lambda_2}, \\ \dots\dots\dots \\ t_{wn} - t'_{wn+1} = q \frac{\delta_n}{\lambda_n}. \end{cases} \quad (1.7)$$

Просуммировав правые и левые части этих неравенств, получим

$$t_{w2} - t_{wn+1} = q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + R_{H1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \right),$$

откуда

$$q = \frac{t_{w2} - t_{wn+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \sum_{i=1}^{n-1} R_{H_i}}. \quad (1.8)$$

Здесь i – номер слоя.

Если при решении какой-либо задачи контактными термическими сопротивлениями можно пренебречь, то в этой формуле

$$\sum_i^{n-1} R_{K_i} = 0.$$

Для построения температурного поля многослойной стенки необходимо оценить температуру на поверхности каждого слоя в отдельности. Система уравнений (1.7) позволяет получить расчетные формулы для определения температуры на поверхности любого слоя.

Так, просуммировав три первых равенства этой системы, получим формулу для определения температуры t'_{w3} :

$$t'_{w3} = t_{w1} - q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + R_{K1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right). \quad (1.9)$$

Температурное поле многослойной стенки изображено на рис. 1.2. Наклон температурной линии в отдельных слоях различен. Это объясняется тем, что для всех слоев

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} = \text{const.}$$

Поэтому слои с меньшим коэффициентом теплопроводности имеют больший температурный градиент и, следовательно, больший наклон температурной линии.

Воспользуемся этим правилом для выяснения действительной формы температурного поля в однородной плоской стенке с учетом зависимости коэффициента теплопроводности от температуры. Разделим однородную стенку на большое количество слоев так, чтобы в пределах каждого слоя коэффициент теплопроводности можно было считать постоянным. Тогда для материалов, у которых с увеличением температуры величина λ уменьшается (такую зависимость λ от t имеет большинство металлов), в зоне высокой температуры температурная линия будет проходить более круто, а в зоне низких температур – более полого, чем при среднем постоянном коэффициенте теплопроводности. Увеличивая число слоев, в пределе получим криволинейную зависимость 1. Для материалов, у которых с повышением температуры λ также увеличивается (теплоизоляторы), температурное поле изобразится линией 2 (рис. 1.3).

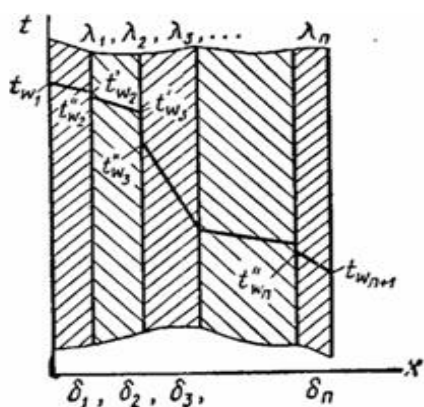


Рис. 1.2. Температурное поле многослойной стенки

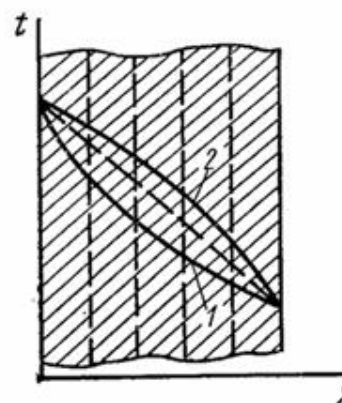


Рис. 1.3. Многослойная стенка (теплоизоляторы)

1.2. Теплопередача через плоскую стенку

Для получения расчетной формулы теплового потока при теплопередаче рассмотрим многослойную плоскую стенку при граничных условиях третьего рода. Стенка состоит из n слоев с известными толщинами

и коэффициентами теплопроводности (рис. 1.4). Известны также контактные термические сопротивления между отдельными слоями. Теплоносители имеют температуры t_{f_1} и t_{f_2} , а интенсивность их теплообмена с поверхностями стенки определяется коэффициентами α_1 и α_2 .

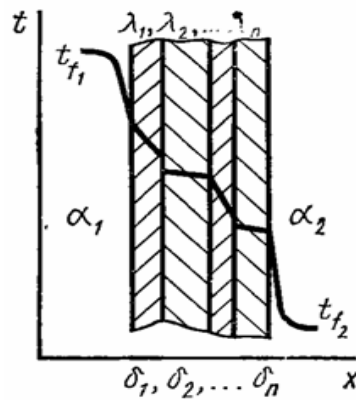


Рис. 1.4. Многослойная стенка, состоящая из n слоев

При стационарном режиме теплообмена плотности теплового потока от первого теплоносителя к стенке, через стенку и от стенки ко второму теплоносителю одинаковы. С учетом формулы (1.8) для многослойной плоской стенки плотности теплового потока определяются выражениями:

$$q = \alpha_1(t_{f_1} - t_{w_1}), \quad (1.10)$$

$$q = \frac{t_{w_1} - t_{w_{n+1}}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \sum_{i=1}^{n-1} R_{кi}}, \quad (1.11)$$

$$q = \alpha_2(t_{w_{n+1}} - t_{f_2}) \quad (1.12)$$

Выразив из этих уравнений разности температур в явном виде и просуммировав левые и правые части полученных равенств, найдем формулу для плотности теплового потока:

$$q = k(t_{f_1} - t_{f_2}), \quad (1.13)$$

где k – коэффициент теплопередачи, который выражается равенством

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \sum_{i=1}^{n-1} R_{K_i} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (1.14)$$

Величина, обратная коэффициенту теплопередачи $\frac{1}{k}$, называется *общим термическим сопротивлением*.

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \sum_{i=1}^{n-1} R_{K_i} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (1.15)$$

Из формулы (1.15) видно, что общее термическое сопротивление складывается из внешних термических сопротивлений ($\frac{1}{\alpha_1}$ и $\frac{1}{\alpha_2}$), внутренних термических сопротивлений отдельных слоев ($\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$) и контактных термических сопротивлений между ними ($\sum_{i=1}^{n-1} R_{K_i}$).

Температуры крайних поверхностей стенки определяются из равенств (1.10) и (1.12):

$$t_{w_1} = t_{f_1} - \frac{q}{\alpha_1}; \quad t_{w_{n+1}} = t_{f_2} + \frac{q}{\alpha_2}.$$

Температуры на поверхностях отдельных слоев стенки рассчитываются по формулам теплопроводности. Температурное поле при теплопередаче через плоскую стенку показано на рис. 1.4.

1.3. Теплопроводность цилиндрической стенки

Рассмотрим теплопроводность однородной цилиндрической стенки большой длины так, чтобы передачей теплоты с торцов трубы можно было пренебречь (рис. 1.5). Если внутренняя и внешняя поверхности поддерживаются при постоянных температурах t_{w_1} и t_{w_2} , то тепловой поток имеет радиальное направление, а изотермические поверхности имеют форму цилиндров. В этих условиях температурное поле $t = f(r)$ будет одномерным.

Размеры стенки оценим радиусами r_1 , r_2 и длиной l , а коэффициент теплопроводности будем считать одинаковым для всей стенки.

Для стационарной одномерной задачи о теплопроводности цилиндрической стенки без внутренних источников теплоты дифференциальное уравнение энергии приводится к виду

$$\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} = 0. \quad (1.16)$$

Введение новой переменной

$$u = \frac{dt}{dr} \quad (1.17)$$

позволяет привести уравнение к виду

$$\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} = 0. \quad (1.18)$$

После разделения переменных и интегрирования получим

$$\ln u + \ln r = \ln C_1. \quad (1.19)$$

Потенцирование этого выражения, переход к первоначальным переменным и интегрирование дают

$$t = C_1 \ln r + C_2. \quad (1.20)$$

Следовательно, зависимость $t = f(r)$ носит логарифмический характер.

Искривление линии температурного поля в цилиндрической стенке обусловлено варьированием плотности теплового потока при изменении радиуса цилиндра; при уменьшении радиуса площадь поверхности, через которую проходит тепло, также становится уже. Поэтому на малых радиусах температурная линия проходит более круто. Это правило останется в силе и при обратном направлении теплового потока (пунктир на рис. 1.5).

Граничные условия первого рода записываются равенствами:

$$\begin{aligned} \text{при } r = r_1 & \quad t = t_{w1}; \\ \text{при } r = r_2 & \quad t = t_{w2}. \end{aligned}$$

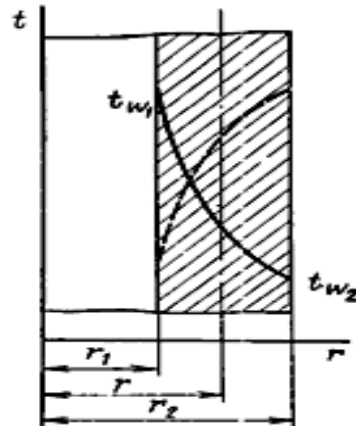


Рис. 1.5. Линии температурного поля

Подставив эти выражения в равенство (1.20), получим:

$$C_1 = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\ln \frac{r_1}{r_2}}; \quad C_2 = t_{w1} - (t_{w1} - t_{w2}) \frac{\ln r_1}{\ln \frac{r_1}{r_2}}. \quad (1.21)$$

Заменяя в уравнении (1.20) константы интегрирования выражениями (1.21), получим формулу температурного поля:

$$t = t_{w1} - \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \ln \frac{d}{d_1}, \quad (1.22)$$

где d_1 и d_2 – внутренний и наружный диаметр цилиндра; d – переменный диаметр.

Тепловой поток через изотермическую поверхность с радиусом r можно оценить по закону Фурье:

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dr} 2\pi r l. \quad (1.23)$$

Из формулы получается следующее выражение для температурного градиента:

$$\frac{dt}{dr} = -\frac{t_{w1} - t_{w2}}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \cdot \frac{2}{d}. \quad (1.24)$$

После подстановки выражения (1.24) в (1.23) найдем

$$Q = \frac{\pi l(t_{w_1} - t_{w_2})}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}. \quad (1.25)$$

Если отнести тепловой поток к единице длины цилиндрической стенки, то формула (1.25) переписется в виде

$$q_l = \frac{\pi(t_{w_1} - t_{w_2})}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}. \quad (1.26)$$

Величину $\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}$ называют *внутренним термическим сопротивлением цилиндрической стенки*.

Обозначим плотности теплового потока на внутренней и внешней поверхностях q_1 и q_2 . Так как

$$Q = q_1 l = q_1 \pi d_1 l = q_2 \pi d_2 l, \\ q_l = q_1 \pi d_1 = q_2 \pi d_2.$$

Это выражение можно использовать для подсчета q_1 или q_2 по величине q_l .

Если $\frac{d_2}{d_1} < 2$, т. е. труба тонкостенная, то кривизна стенки слабо влияет на величину теплового потока. В этом случае (с точностью до 4 %) для определения теплового потока вместо выражения (1.26) можно использовать формулу плоской стенки:

$$q_l = \frac{2\lambda}{d_2 - d_1} \pi d_{\text{ср}} (t_{w_1} - t_{w_2}), \quad (1.27)$$

где $d_{\text{ср}}$ – средний диаметр цилиндрической стенки.

Выведем формулу для определения теплового потока через многослойную цилиндрическую стенку, состоящую из n слоев (рис. 1.6), с учетом контактного термического сопротивления. Тепловой поток через поверхность контакта с диаметром d выразится формулой

$$q_l = \frac{1}{R_{\text{к}}} (t'_w - t''_w) \pi d. \quad (1.28)$$

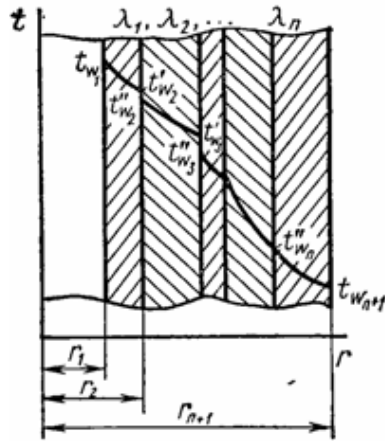


Рис. 1.6. Цилиндрическая стенка, состоящая из n слоев

При стационарном режиме величины q_l одинаковы для всех участков теплового тракта. Их можно определить с помощью формул (1.26) и (1.28):

$$\left\{ \begin{array}{l} q_l = \frac{\pi(t_{w_1} - t'_{w_2})}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}; \\ q_l = \frac{1}{R_K} (t'_{w_2} - t''_{w_2}) \pi d_2; \\ q_l = \frac{\pi(t''_{w_2} - t'_{w_3})}{\frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_2}{d_1}}; \\ \dots\dots\dots \\ q_l = \frac{\pi(t''_{w_n} - t'_{w_{n+1}})}{\frac{1}{2\lambda_n} \ln \frac{d_{n+1}}{d_n}}. \end{array} \right. \quad (1.29)$$

Выразив из этих равенств в явном виде разности температур и просуммировав левые и правые части равенств, после перестановки членов найдем

$$q_l = \frac{\pi(t_{w_1} - t_{w_{n+1}})}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{R_{K_i}}{d_{i+1}}}. \quad (1.30)$$

Если контактными термическими сопротивлениями можно пренебречь, то в формуле (1.30)

$$\sum_{i=1}^{n-1} \frac{R_{\kappa i}}{d_{i+1}} = 0.$$

Температуры на поверхностях отдельных слоев определяются по формулам, которые выводятся так же, как и для плоской стенки. Так, для оценки температуры t'_{w0} формула имеет вид

$$t'_{w0} = t_{w1} - \frac{q_1}{\pi} \left(\frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{R_{\kappa 1}}{d_2} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} \right). \quad (1.31)$$

Температурное поле многослойной цилиндрической стенки показано на рис. 1.6.

1.4. Теплопередача через цилиндрическую стенку

Для расчета теплового потока при теплопередаче через многослойную цилиндрическую стенку (рис. 1.7) необходимо задать диаметры каждого слоя, коэффициенты теплопроводности стенок, контактные термические сопротивления между ними, а также граничные условия третьего рода – температуры теплоносителей и коэффициенты теплообмена с обеих сторон стенки.

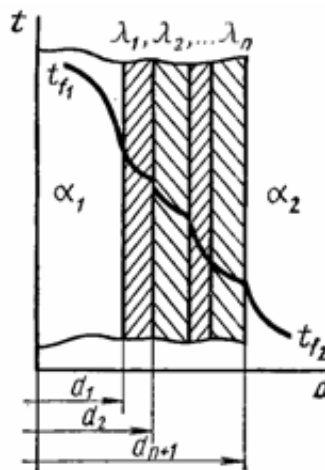


Рис. 1.7. Цилиндрическая стенка

При стационарном режиме теплообмена тепловые потоки, приходящиеся на каждый метр длины цилиндрической стенки, будут одинаковы для всех сечений теплового тракта. С учетом формулы (1.30) тепловые потоки на единицу длины цилиндрической стенки можно выразить уравнениями:

$$q_l = \pi \alpha_1 d_1 (t_{f_1} - t_{w_1}), \quad (1.32)$$

$$q_l = \frac{\pi(t_{w_1} - t_{w_{n+1}})}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{R_{k_i}}{d_{i+1}}}, \quad (1.33)$$

$$q_l = \pi \alpha_2 d_{n+1} (t_{w_{n+1}} - t_{f_1}). \quad (1.34)$$

Если из этих уравнений определить разности температур в явном виде, а затем просуммировать правые и левые части равенств, то для теплового потока q_l можно получить формулу

$$q_l = \pi k_l (t_{f_1} - t_{f_2}), \quad (1.35)$$

где k_l – *линейный коэффициент теплопередачи*, который определяется выражением

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{R_{k_i}}{d_{i+1}} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}}. \quad (1.36)$$

Величина, обратная линейному коэффициенту теплопередачи $\frac{1}{k_l}$, называется *общим линейным термическим сопротивлением*.

Температура поверхностей, соприкасающихся с теплоносителем, определяется из формул (1.32) и (1.34):

$$t_{w_1} = t_{f_1} - \frac{q_l}{\alpha_1 d_1}; \quad t_{w_{n+1}} = t_{f_2} + \frac{q_l}{\alpha_1 d_{n+1}}.$$

Температурное поле при теплопередаче через многослойную цилиндрическую стенку показано на рис. 1.7.

1.5. Теплопередача через шаровую стенку

А. Граничные условия первого рода

Пусть имеется полый шар с радиусами r_1 и r_2 , постоянным коэффициентом теплопроводности λ и с заданными равномерно распределенными температурами поверхностей t_{c_1} и t_{c_2} .

Так как в рассматриваемом случае температура измеряется только в направлении радиуса шара, то дифференциальное уравнение теплопроводности в сферических координатах принимает вид:

$$\nabla^2 t = \frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dt}{dr} = 0. \quad (1.37)$$

Граничные условия запишутся:

$$\begin{cases} \text{при } r = r_1 & t = t_{c_1}; \\ \text{при } r = r_2 & t = t_{c_2}. \end{cases} \quad (1.38)$$

После первого интегрирования уравнения (1.37) получено:

$$\frac{dt}{dr} = \frac{C_1}{r^2}. \quad (1.38a)$$

Второе интегрирование дает

$$t = C_2 - \frac{C_1}{r}. \quad (1.39)$$

Постоянные интегрирования в уравнении (1.39) определяются из граничных условий. При этом получим

$$C_1 = -\frac{t_{c_1} - t_{c_2}}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}; \quad (1.39a)$$

$$C_2 = t_{c_1} - \frac{t_{c_1} - t_{c_2}}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \frac{1}{r_1}. \quad (1.39b)$$

Подставляя значения C_1 и C_2 в уравнение (1.39), получаем выражения для температурного поля в шаровой стенке:

$$t = t_{c_1} - \frac{t_{c_1} - t_{c_2}}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r} \right). \quad (1.40)$$

Для нахождения количества теплоты, проходящей через шаровую поверхность величиной F в единицу времени, можно воспользоваться законом Фурье:

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dr} F = -\lambda 4\pi r^2 \frac{dt}{dr};$$

здесь Q измеряется в ваттах.

Если в это выражение подставить значение градиента температуры $\frac{dt}{dr}$, то получим

$$Q = \frac{4\pi\lambda(t_{c_1} - t_{c_2})}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)} = \frac{2\pi\lambda\Delta t}{\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}} = \pi\lambda \frac{d_1 d_2}{\delta} \Delta t. \quad (1.41)$$

Эти уравнения являются расчетными формулами теплопроводности шаровой стенки. Из уравнения (1.40) следует, что при постоянном λ температура в шаровой стенке меняется по закону гиперболы.

Б. Граничные условия третьего рода (теплопередача)

При заданных граничных условиях третьего рода кроме r_1 и r_2 будут известны $t_{ж_1}$, $t_{ж_2}$, а также коэффициенты теплоотдачи шаровой стенки α_1 и α_2 – и по поверхностям.

Поскольку процесс стационарный и полный тепловой поток Q , Вт, будет постоянным для всех изотермических поверхностей, то можно записать:

$$Q = \alpha_1 \pi d_1^2 (t_{ж_1} - t_{ж_2});$$

$$Q = \frac{2\pi\lambda}{\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}} (t_{c_1} - t_{c_2});$$

$$Q = \alpha_2 \pi d_2^2 (t_{c_2} - t_{ж_2}).$$

Из этих уравнений следует, что

$$Q = \frac{\pi(t_{ж_1} - t_{ж_2})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1^2} + \frac{1}{2\lambda} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}\right) + \frac{1}{\alpha_2 d_2^2}} = k_{III} \pi \Delta t. \quad (1.42)$$

Величина

$$k_{\text{ш}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1^2} + \frac{1}{2\lambda} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_2^2}}$$

называется коэффициентом теплоотдачи шаровой стенки и измеряется в Вт/К.

Обратная величина:

$$\frac{1}{k_{\text{ш}}} = R_{\text{ш}} = \frac{1}{\alpha_1 d_1^2} + \frac{1}{2\lambda} \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_2^2}$$

называется термическим сопротивлением теплопередачи шаровой стенки и измеряется в К/Вт.

1.6. Обобщенный метод решения задач теплопроводности в плоской, цилиндрической и шаровой стенках

Для процесса теплопроводности в плоской, цилиндрической и шаровой стенках можно предположить обобщенное решение как при постоянном коэффициенте теплопроводности λ , так и в случае зависимости последнего от температуры.

Рассмотрим одномерную задачу для всех трех случаев при постоянном коэффициенте теплопроводности стенки. При этом зависимость температуры в пространстве для плоскости стенки представим как $t = f_1(x)$, для цилиндрической стенки $t = f_2(r)$ и для шаровой стенки $t = f_3(r)$.

Если принять, что изотермические поверхности в рассматриваемых телах замкнуты, то температура становится функцией только координаты n , являющейся нормалью к изотермическим поверхностям, тепловой поток будет пропорционален градиенту температуры $\frac{\partial t}{\partial n}$, а величина поверхности выразится функцией $F = F(n)$.

Замкнутость изотермических поверхностей для цилиндра и шара очевидна, а пластину будем рассматривать как предельный случай замкнутой системы, когда $n \rightarrow \infty$.

Вследствие замкнутости изотермических поверхностей поток через стенку любого из рассматриваемых тел можно представить как

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dn} F(n). \quad (1.43)$$

Так как $Q = \text{const}$ для любой изотермической поверхности, то, разделяя переменные в уравнении (1.43) и интегрируя в пределах от $n = n_1$ до $n = n_2$ и соответственно от t_{c_1} до t_{c_2} , получим:

$$Q = \frac{\lambda(t_{c_1} - t_{c_2})}{\int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{F(n)}}. \quad (1.44)$$

Видим, что формула (1.44) аналогична ранее полученной для плоской стенки:

$$q = \frac{\lambda(t_{c_1} - t_{c_2})}{\delta}.$$

При этом Q аналогично плотности теплового потока q , а $\int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{F(n)} = I_{n_1}^{n_2}$ – толщине стенки, которую в дальнейшем условимся называть приведенной толщиной стенки.

Величина $\int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{F(n)}$ зависит только от геометрической формы стенки.

А. Для плоской пластины $n = x$, $n_1 = 0$ и $n_2 = \delta$, а

$$F_n = F = \text{const},$$

тогда

$$I_{n_1}^{n_2} = \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{F} = \frac{1}{F} \int_0^{\delta} dx = \frac{\delta}{F}.$$

Подставляя полученное значение $I_{n_1}^{n_2}$ в уравнение (1.44), приходим к выражению теплового потока Q , Вт, для плоской пластины:

$$Q = \frac{\lambda(t_{c_1} - t_{c_2})}{\delta} F. \quad (1.45)$$

Б. Для цилиндрической стенки $n = r$, $n_1 = r_1$ и $n_2 = r_2$, а

$$F(n) = F(r) = 2\pi rl,$$

тогда

$$I_{n_1}^{n_2} = \int_{n_1}^{n_2} \frac{d(n)}{F(n)} = \int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{2\pi lr} = \frac{1}{2\pi l} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

С учетом полученного значения $I_{n_1}^{n_2}$ выражение (1.44) принимает вид:

$$Q = \frac{2\pi l \lambda (t_{c_1} - t_{c_2})}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (1.46)$$

В. Для шаровой стенки $n = r$, $n_1 = r_1$ и $n_2 = r_2$, а $F(n) = F(r) = 4\pi r^2$,

тогда $I_{n_1}^{n_2} = \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{F(n)} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{4\pi r^2} = \frac{1}{4\pi r^2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$ и формула (1.44) применительно

к шаровой стенке принимает вид:

$$Q = \frac{2\pi \lambda (t_{c_1} - t_{c_2})}{\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}}. \quad (1.47)$$

Интегрируя выражение (1.43) в пределах от n_1 до любой текущей координаты и в интервале температур от t_{c_1} до t , получаем уравнение для температурного поля:

$$t = t_{c_1} - \frac{Q}{\lambda} \int_{n_1}^n \frac{dn}{F(n)}.$$

Обозначая $\int_{n_1}^n \frac{dn}{F(n)} = I_{n_1}^n$, последнее уравнение можно записать как

$$t = t_{c_1} - \frac{Q}{\lambda} I_{n_1}^n.$$

Подставляя в полученное выражение значение теплового потока Q из (1.44), получаем

$$t = t_{c_1} - (t_{c_1} - t_{c_2}) \frac{I_{n_1}^n}{I_{n_1}^{n_2}}. \quad (1.48)$$

Отношение $\frac{I_{n_1}^n}{I_{n_1}^{n_2}}$ в уравнении (1.48) можно рассматривать как некоторую приведенную безразмерную координату X , которая зависит от геометрической формы стенки. Уравнение (1.48) можно привести к безразмерному виду:

$$\frac{t - t_{c_1}}{t_{c_1} - t_{c_2}} = 1 - \frac{I_{n_1}^n}{I_{n_1}^{n_2}}. \quad (1.49)$$

С обозначениями $\frac{t - t_{c_1}}{t_{c_1} - t_{c_2}} = \theta$ (безразмерная температура) и $\frac{I_{n_1}^n}{I_{n_1}^{n_2}} = X$ уравнение (1.50) принимает вид:

$$\theta = 1 - X. \quad (1.50)$$

Уравнение является обобщенным выражением температурного поля в безразмерных величинах для всех трех геометрических форм.

Приведенная безразмерная координата в уравнении (1.50) вычисляется с учетом геометрической формы стенки:

– для плоской стенки:

$$X = X_{\Pi} = \frac{x}{\delta}; \quad (1.51)$$

– для цилиндрической стенки:

$$X = X_{\Pi} = \frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}; \quad (1.52)$$

– для шаровой стенки:

$$X = X_{\text{ш}} = \frac{\left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d}\right)}{\left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}\right)}. \quad (1.53)$$

Уравнения (1.44) и (1.50) получены при постоянном коэффициенте теплопроводности стенки. Аналогичным образом можно получить обобщенные зависимости и для случая, когда коэффициент теплопроводности λ является функцией температуры.

1.7. Пути интенсификации теплопередачи

А. Интенсификация теплопередачи путем увеличения коэффициентов теплоотдачи

Из уравнения теплопередачи

$$Q = kF\Delta t$$

следует, что при заданных размерах стенки и температурах жидкостей величиной, определяющей теплопередачу, является k . Но поскольку теплопередача – явление сложное, то правильное решение можно найти только на основе анализа частных составляющих, характеризующих процесс. Так, например, если мы имеем дело с плоской стенкой, для которой

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

то при $\frac{\delta}{\lambda} \rightarrow 0$ (что можно принять для тонких стенок с большим коэффициентом λ)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{\alpha_1}{1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1}} = \frac{\alpha_2}{\frac{\alpha_2}{\alpha_1} + 1}. \quad (1.54)$$

Из уравнения (1.54) следует, что коэффициент теплопередачи не может быть больше самого малого α . При $\alpha_2 \rightarrow \infty$, k стремится к своему предельному значению α . При $\alpha_1 \rightarrow \infty$ коэффициент теплопередачи стремится к α_2 .

Проследим это на числовых примерах.

- а) 1) $\alpha_1 = 40$ и $\alpha_2 = 5000$ Вт/(м²·К);
 2) $\alpha_1 = 40$ и $\alpha_2 = 10000$ Вт/(м²·К).

По формуле (1.54) находим, что коэффициенты теплопередачи будут равны:

$$k_1 = 78,8 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)} \text{ и } k_2 = 39,8 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

- б) 1) $\alpha_1 = 80$ Вт/(м²·К) и $\alpha_2 = 5000$ Вт/(м²·К);
 2) $\alpha_1 = 200$ Вт/(м²·К) и $\alpha_2 = 5000$ Вт/(м²·К).

Для случая (б) находим, что коэффициенты теплопередачи становятся равными:

$$k_1 = 78,8 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)} \text{ и } k_2 = 192 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Из рассмотренного примера видно, что при $\alpha_1 \ll \alpha_2$ увеличение большего из коэффициентов теплопередачи (α_2) практически не дает увеличения k_1 . Увеличение меньшего из коэффициентов теплоотдачи (α_1) в 2 и 5 раз дает увеличение k почти во столько же раз.

На рис. 1.8 представлена зависимость $k = f(\alpha_1, \alpha_2)$ согласно формуле (1.54). Из графика следует, что при увеличении α_1 значение k быстро растет до тех пор, пока α_1 не сравняется с α_2 . После того как α_1 станет больше α_2 рост k замедляется и при дальнейшем увеличении α_1 практически прекращается. Следовательно, при $\alpha_1 \ll \alpha_2$ для увеличения k следует увеличивать α_1 , т. е. уменьшать большее из термических сопротивлений $\frac{1}{\alpha_1}$. Иначе говоря, при $\alpha_1 \ll \alpha_2$ увеличение k возможно за счет увеличения α_1 . Если $\alpha_2 \approx \alpha_1$, увеличение коэффициента теплопередачи возможно за счет увеличения любого из α .

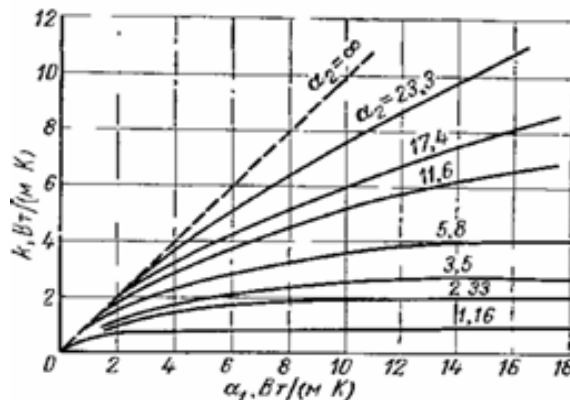


Рис. 1.8. Зависимость $k = f(\alpha_1, \alpha_2)$

Б. Интенсификация теплопередачи за счет оребрения стенок

При передаче теплоты через цилиндрическую стенку термические сопротивления $\frac{1}{\alpha_1 d_1}$ и $\frac{1}{\alpha_2 d_2}$ определяются не только значениями коэффициентов теплоотдачи, но и размерами самих поверхностей. При передаче тепла через шаровую стенку влияние диаметров d_1 и d_2 оказывается еще сильнее, что видно из соотношений $\frac{1}{\alpha_1 d_1^2}$ и $\frac{1}{\alpha_2 d_2^2}$. Отсюда следует, что если α мало, то термическое сопротивление теплоотдачи можно уменьшить путем увеличения соответствующей поверхности. Такой же результат можно получить и для плоской стенки, если одну из поверхностей увеличить путем оребрения. Последнее обстоятельство и положено в основу интенсификации теплопередачи за счет оребрения. При этом термические сопротивления станут пропорциональными величинами:

$$\frac{1}{\alpha_1 F_1} \text{ и } \frac{1}{\alpha_2 F_2}.$$

Следует указать, что при использовании метода оребрения нужно руководствоваться следующими соображениями: если $\alpha_1 \ll \alpha_2$, то оребрять поверхность со стороны α_1 следует до тех пор, пока $\alpha_1 F_1$ не достигает значения $\alpha_2 F_2$. Дальнейшее увеличение поверхности F_1 малоэффективно. Ребристые поверхности изготавливаются или в виде сплошных отливок или отдельных ребер, прикрепленных к поверхности.

Строгое аналитическое решение задачи о распространении тепла в ребре связано со значительными трудностями. В основу решения поэтому кладут некоторые допущения, которые позволяют сравнительно простым путем получить нужный результат. Ниже рассмотрим метод решения задач о теплопроводности в ребрах простейших геометрических форм.

1.8. Критический диаметр цилиндрической стенки

Рассмотрим влияние изменения наружного диаметра на термическое сопротивление теплопередачи цилиндрической стенки, которое будет зависеть от внешнего диаметра. Из уравнения следует, что при этих условиях $\frac{1}{\alpha_1 d_1} \equiv R_{l1} = \text{const}$.

Термическое сопротивление теплопроводности $\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} \equiv R_{lc}$ с увеличением d_2 будет возрастать, а термическое сопротивление теплоотдачи $\frac{1}{\alpha_2 d_2} \equiv R_{l2}$ будет уменьшаться. Очевидно, что полное термическое сопротивление будет определяться характером изменения составляющих R_{lc} и R_{l2} . Изменение частных термических сопротивлений изображено на рис. 1.9.

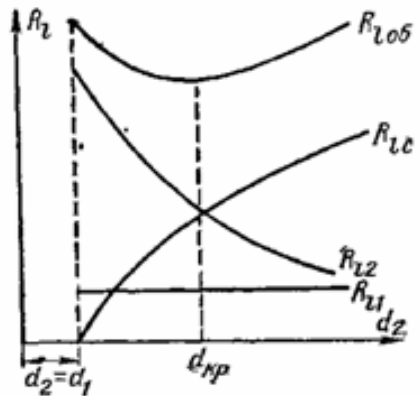


Рис. 1.9. Зависимость термического сопротивления стенки от d_2

Для того чтобы выяснить, как будет изменяться R_l при утолщении цилиндрической стенки, исследуем R_l как функцию d_2 . Возьмем производную от R_l по d_2 и приравняем нулю:

$$\frac{d(R_l)}{d(d_2)} = \frac{1}{2\lambda d_2} - \frac{1}{\alpha_2 d_2^2} = 0.$$

Значение d_2 из последнего выражения соответствует экстремальной точке кривой $R_l = f(d_2)$. Исследовав кривую любым из известных способов на максимум и минимум, увидим, что в экстремальной точке имеет место минимум. Таким образом, при значении диаметра $d_2 = \frac{2\lambda}{\alpha_2}$ термическое сопротивление теплопередачи будет минимальным.

Значение внешнего диаметра трубы, соответствующего минимальному полному термическому сопротивлению теплопередачи, называется *критическим диаметром* и обозначается $d_{кр}$. Рассчитывается он по формуле

$$d_{кр} = \frac{2\lambda}{\alpha_2}. \quad (1.55)$$

При $d_2 < d_{кр}$ с увеличением d_2 полное термическое сопротивление теплопередачи снижается, так как повышение площади наружной поверхности оказывает на термическое сопротивление большее влияние, чем утолщение стенки.

При $d_2 > d_{кр}$ с увеличением d_2 термическое сопротивление теплопередачи возрастает, что указывает на доминирующее влияние толщины стенки.

Изложенные соображения необходимо учитывать при выборе тепловой изоляции для покрытия различных цилиндрических аппаратов и трубопроводов.

Рассмотрим критический диаметр изоляции, наложенной на трубу (рис. 1.10). Термическое сопротивление теплопередачи для такой трубы запишется как

$$R_l = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_{из}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3}.$$

Из уравнения $q_l = \frac{\pi \Delta t}{R_l}$ следует, что q_l при увеличении внешнего диаметра изоляции d_3 сначала будет возрастать и при $d_3 = d_{кр}$ будет иметь максимум q_l . При дальнейшем увеличении внешнего диаметра изоляции q_l будет снижаться (рис. 1.11).

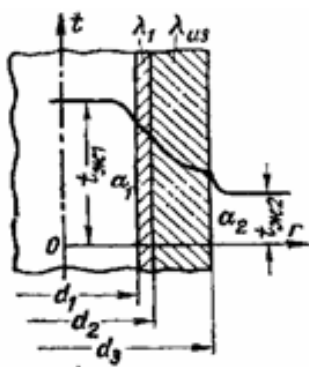


Рис. 1.10. К понятию критического диаметра изоляции

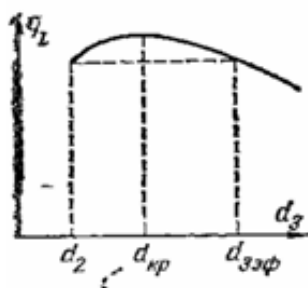


Рис. 1.11. Зависимость тепловых потерь от толщины изоляции, наложенной на цилиндрическую стенку

Выбрав какой-либо теплоизоляционный материал для покрытия цилиндрической поверхности, прежде всего, нужно рассчитать критический диаметр по формуле (1.55) для заданных $\lambda_{из}$ и α_2 .

Если окажется, что величина $d_{кр}$ больше наружного диаметра трубы d_2 , то применение выбранного материала в качестве тепловой изоляции нецелесообразно. В области $d_2 < d_3 < d_{кр.из}$ при увеличении толщины изоляции будет наблюдаться повышение теплотерь. Это положение наглядно иллюстрируется на рис. 1.11. Только при $d_3 = d_{3эф}$ тепловые потери вновь станут такими же, как для первоначального, неизолированного трубопровода. Следовательно, некоторый слой тепловой изоляции не будет оправдывать своего назначения.

Значит, для эффективной работы тепловой изоляции необходимо, чтобы $d_{кр.из} \leq d_2$.

Пример. Трубу внешним диаметром $d = 20$ мм необходимо покрыть тепловой изоляцией. В качестве изоляции может быть взят асбест с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,1$ Вт/(м·К), коэффициент теплоотдачи во внешнюю среду $\alpha_2 = 5$ Вт/(м²·К). Целесообразно ли в данном случае использовать асбест в качестве материала для тепловой изоляции?

Критический диаметр изоляции:

$$d_{кр.из} = \frac{2\lambda_{из}}{\alpha_2} = \frac{2 \cdot 0,1}{5} = 0,04 \text{ м} = 40 \text{ мм.}$$

Так как $d_2 < d_{кр.из}$, асбест в рассматриваемом случае использовать нецелесообразно.

Вопрос о критическом диаметре рассмотрен применительно к круглому цилиндру. Очевидно, что аналогичный эффект будет наблюдаться и в случае тел иной геометрии, у которых внутренняя и внешняя поверхности различны.

1.9. Контактное термическое сопротивление

При любом способе обработки материала на его поверхности всегда имеются микроскопические выступы и впадины, поэтому в местах соприкосновения поверхностей касание происходит только в отдельных точках, а остальные участки поверхности разделены слоем воздуха или другого газа или жидкости. Опыты показывают, что при небольших сжимающих усилиях площадь фактического контакта составляет 1–5 % от общей поверхности.

Повышение сопротивления тепловому потоку в месте контакта двух поверхностей обусловлено меньшим коэффициентом теплопроводности газовой прослойки по сравнению с твердым телом, отклонением направления теплового потока от нормали к поверхности контакта, повышенным термическим сопротивлением поверхностного слоя из-за окисной пленки и загрязнения.

Если пренебречь радиационным теплообменом между поверхностями, разделенными газовой прослойкой, которым передается не больше 1–2 % теплоты, то можно считать, что тепловая проводимость контакта равна сумме тепловых проводимостей фактического контакта $(\frac{1}{R_{\phi}})$ и газовой прослойки

$(\frac{1}{R_{\Gamma}})$:

$$\frac{1}{R_{\kappa}} = \frac{1}{R_{\phi}} + \frac{1}{R_{\Gamma}}. \quad (1.56)$$

Опыты показывают, что составляющие контактного термического сопротивления соизмеримы. Если соприкасающиеся твердые тела обладают высокой теплопроводностью, то большая часть теплоты передается через точки соприкосновения. Если зазор между контактирующими поверхностями заполнен хорошо проводящим газом (например, гелием) или жидкостью, то основное количество передаваемой теплоты пойдет через прослойку.

При увеличении сжимающего усилия термическое сопротивление фактического контакта существенно уменьшается, тогда как термическое сопротивление газовой прослойки изменяется не больше чем на 20 %.

Величина контактного термического сопротивления зависит от силы сжатия, от чистоты и твердости соприкасающихся поверхностей, температуры и природы газа или жидкости, заполняющей пространство между поверхностями контакта.

На рис. 1.12 изображены зависимости контактного термического сопротивления от силы сжатия и чистоты обработки поверхности, полученные опытным путем для пары «медь – медь». Как видно из рис. 1.12, увеличение нагрузки вызывает сначала резкое уменьшение термического сопротивления, а затем – более плавное. При силе сжатия больше 200 бар контактное термическое сопротивление практически перестает зависеть от величины этой силы. Это правило подтверждается для большинства металлов, особенно при высокой чистоте соприкасающихся поверхностей.

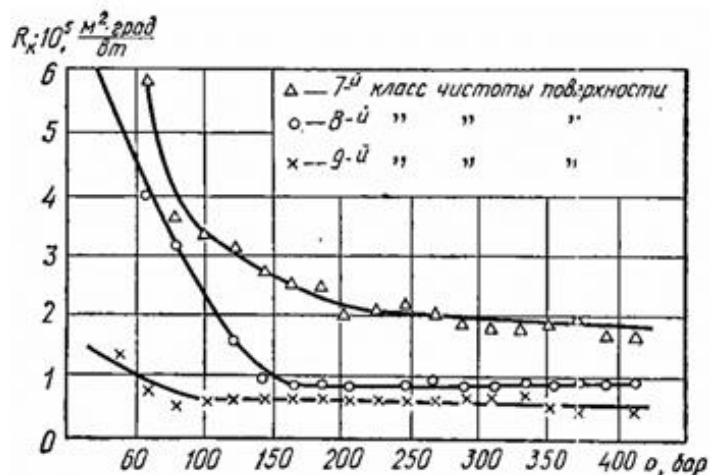


Рис. 1.12. Зависимости контактного термического сопротивления от силы сжатия и чистоты обработки поверхности

Из рис. 1.12 видно, что с повышением класса чистоты обработки контактное термическое сопротивление уменьшается, и его зависимость от сжимающей силы становится более слабой.

Уменьшение твердости соприкасающихся поверхностей способствует увеличению площади фактического контакта и снижению его термического сопротивления.

Температура в зоне контакта также влияет на его термическое сопротивление: с увеличением температуры контактное термическое сопротивление уменьшается. Так, при контакте тел, выполненных из дюрала, увеличение температуры от 88 до 214 °С сопровождается уменьшением контактного термического сопротивления на 40–60 %.

Контактное термическое сопротивление существенно уменьшается при покрытии соприкасающихся поверхностей мягкими металлами (медь, олово и др.) или при прокладках из мягких материалов.

Контактное термическое сопротивление приводит к резкому изменению температуры на поверхности раздела двух слоев, которое схематично можно рассматривать как скачок температур. Величина этого скачка пропорциональна тепловой нагрузке и контактному термическому сопротивлению. Так, при обработке поверхности по 6-му классу чистоты, $q = 580\,000 \text{ Вт/м}^2$ и $p = 20\text{--}400$ бар для стали марки Сталь 30 температурный скачок на поверхности контакта составляет от 400 до 100 °С, для пары «Сталь 30 – дюраль» – примерно от 290 до 70 °С, для пары «Сталь 30 – медь» – от 190 до 60 °С.

Величину контактного термического сопротивления для средней чистоты обработки поверхностей можно приблизительно рассчитать по методике. Более надежные сведения о величинах контактного термического сопротивления получаются опытным путем.

Вопросы для самопроверки

1. Какова постановка дифференциального уравнения теплопроводности для стационарного состояния?
2. Что такое граничные условия?
3. Что такое контактное термическое сопротивление?
4. Чему равен тепловой поток для многослойной неограниченной пластины?
5. Чему равен тепловой поток для многослойного неограниченного цилиндра?
6. Чему равен тепловой поток для многослойного шара?
7. Чему равен критический диаметр цилиндрической стенки?
8. Какие существуют пути интенсификации теплопередачи?

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ УСТАНОВИВШИХСЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

2.1. Задание и исходные данные

Выполните следующие расчеты многослойного наружного ограждения для пятиэтажного жилого здания:

1. Расчет теплового режима:
 - 1) определите нормативные требования;
 - 2) рассчитайте толщину утепляющего слоя;
 - 3) найдите приведенное сопротивление теплопередаче ОК;
 - 4) проверьте нормативные требования.
2. Расчет воздухопроницаемости.
3. Расчет стационарного температурного поля в ограждении:
 - 1) рассчитайте одномерное стационарное температурное поле:
 - а) без учета фильтрации воздуха;
 - б) учетом фильтрации воздуха;
 - 2) рассчитайте двумерное стационарное температурное поле.
4. Расчет теплоустойчивости.
5. Расчет влажностного режима:
 - 1) определите температуру точки росы;
 - 2) проверьте внутреннюю поверхность наружных ограждений на возможность конденсации влаги в зоне теплопроводного включения;
 - 3) проверьте нормативные требования по защите от переувлажнения ОК;
 - 4) вычислите конденсацию влаги в толще ОК.

Варианты заданий приведены в табл. 2.1–2.3. Район строительства принимается по двум последним цифрам шифра зачетной книжки (табл. 2.1), остальные данные – по последней (табл. 2.2, 2.3).

Таблица 2.1

Район строительства

№	Город	№	Город	№	Город	№	Город
00	Абакан	25	Дмитров	50	Нарьян-Мар	75	Сургут
01	Александровск-Сахалинский	26	Екатеринбург	51	Нижний Новгород	76	Сыктывкар
02	Анадырь	27	Елабуга	52	Николаевск-на-Амуре	77	Таганрог
03	Архангельск	28	Енисейск	53	Новосибирск	78	Тамбов
04	Астрахань	29	Иваново	54	Оймякон	79	Тверь
05	Барнаул	30	Ижевск	55	Омск	80	Тобольск

Окончание табл. 2.1

№	Город	№	Город	№	Город	№	Город
06	Белгород	31	Йошкар-Ола	56	Орел	81	Томск
07	Белорецк	32	Иркутск	57	Оренбург	82	Тула
08	Биробиджан	33	Казань	58	Охотск	83	Тында
09	Благовещенск	34	Калининград	59	Пенза	84	Тюмень
10	Бодайбо	35	Калуга	60	Пермь	85	Улан-Удэ
11	Братск	36	Каменск-Уральский	61	Петропавловск-Камчатский	86	Уренгой
12	Брянск	37	Кемерово	62	Псков	87	Уфа
13	Великие Луки	38	Комсомольск-на-Амуре	63	Пятигорск	88	Ухта
14	Верхнеуральск	39	Кострома	64	Ржев	89	Хабаровск
15	Верхоянск	40	Краснодар	65	Ростов-на-Дону	90	Ханты-Мансийск
16	Владивосток	41	Красноярск	66	Рязань	91	Чебоксары
17	Владикавказ	42	Курск	67	Салехард	92	Челябинск
18	Владимир	43	Майкоп	68	Самара	93	Черкесск
19	Волгоград	44	Махачкала	69	Санкт-Петербург	94	Чита
20	Вологда	45	Мончегорск	70	Саранск	95	Элиста
21	Воркута	46	Москва	71	Саратов	96	Южно-Курильск
22	Воронеж	47	Мурманск	72	Смоленск	97	Южно-Сахалинск
23	Грозный	48	Муром	73	Сочи	98	Якутск
24	Дербент	49	Нальчик	74	Ставрополь	99	Ярославль

Конструктивная схема наружного ограждения представлена на рис. 2.1, схема фасада здания – на рис. 2.2, размеры оконных проемов – на рис. 2.3.

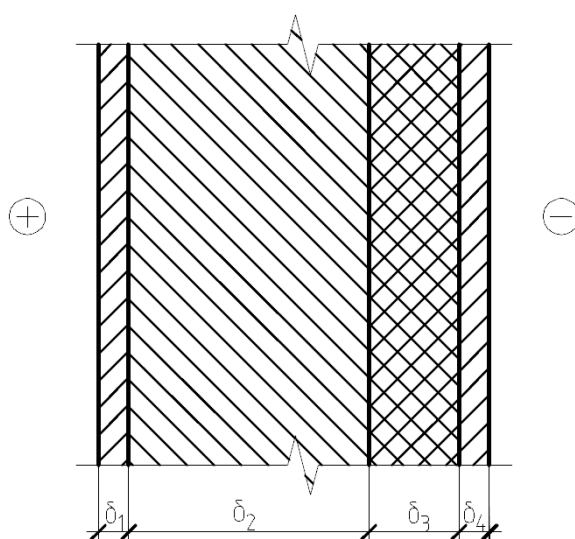


Рис. 2.1. Конструкция наружного ограждения:
 \oplus , \ominus – соответственно внутренняя и наружная части ограждений,
 δ_i – толщина i -го слоя ограждения, $i = \overline{1,4}$.

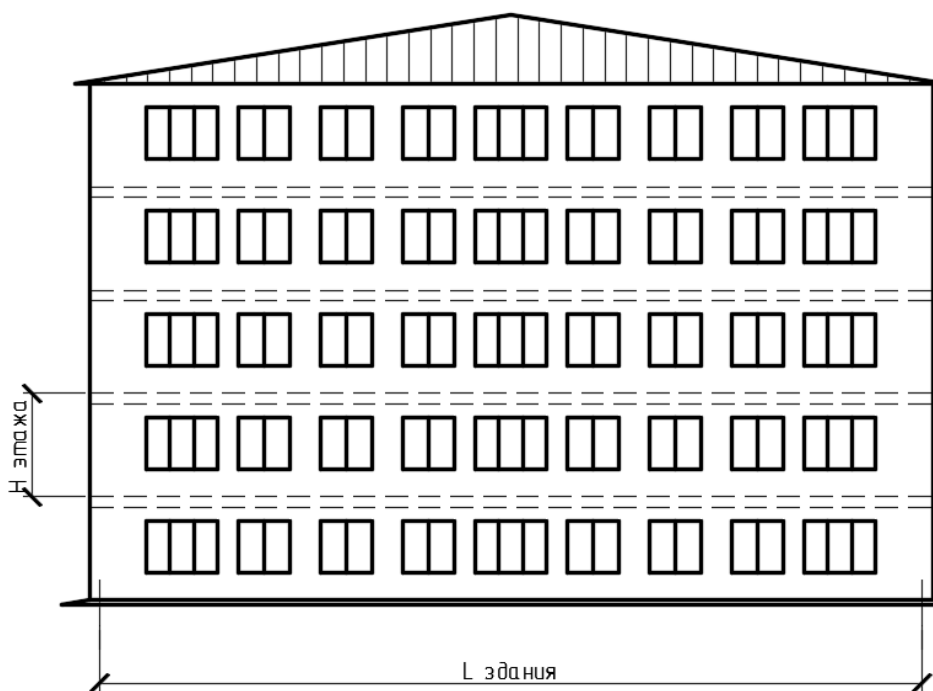


Рис. 2.2. Схема фасада здания

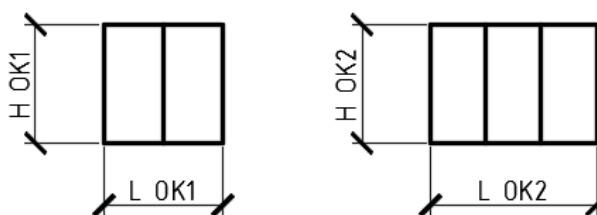


Рис. 2.3. Размеры оконных проемов

Таблица 2.2

Геометрические размеры фасада здания и оконных проемов

Последняя цифра шифра в зачетной книжке	H этажа, мм	L здания, мм	ОК1		ОК2	
			L , мм	H , мм	L , мм	H , мм
0	2700	19200	900	1200	1800	1200
1	3000	20700	1000	1200	2100	1200
2	3300	21000	1200	1200	1800	1200
3	3000	22800	1350	1200	2100	1200
4	2700	21000	1200	1350	1800	1350
5	3000	22800	1350	1350	2100	1350
6	3300	22800	1500	1350	1800	1350
7	3000	21900	1200	1500	2100	1500
8	2700	21900	1350	1500	1800	1500
9	3000	23700	1500	1500	2100	1500

Таблица 2.3

Тип и материалы ОК

Последняя цифра шифра в зачетной книжке	Толщина слоя, м			Номер материала слоя				Тип наружного ограждения*
	δ_1	δ_2	δ_4	1	2	3	4	
0	0,015	0,12	0,08	201	108	17	108	1
1	0,015	0,12	0,08	202	109	8	109	1
2	0,01	0,38	0,12	203	180	27	180	2
3	0,01	0,38	0,12	201	183	28	181	2
4	0,015	0,38	0,12	202	188	31	182	2
5	0,015	0,25	0,12	203	156	32	180	2
6	0,01	0,3	0,12	201	172	32	181	2
7	0,01	0,4	0,12	202	171	31	182	2
8	0,01	0,38	0,015	203	183	28	201	3
9	0,01	0,3	0,015	201	171	27	202	3

Примечание – тип наружного ограждения:
1 – трехслойная бетонная панель на гибких связях;
2 – несущая стеновая конструкция с облицовкой из кирпичной кладки;
3 – фасадные системы с тонким штукатурным слоем

Номер материала слоя, указанный в табл. 2.3, соответствует номеру материала по приложению А, табл. А.1. В этой же табл. А.1 можно найти теплотехнические показатели строительных материалов в сухом состоянии и их расчетные коэффициенты: влажности w , %, теплопроводности λ , Вт/(м·°С), теплоусвоения s , Вт/(м²·°С) и паропроницаемости μ , мг/(м·ч·Па).

Расчетные коэффициенты следует принимать при условиях эксплуатации конструкций А и Б. Эти условия конструкций определяются в зависимости от влажностного режима помещений и зоны влажности района строительства.

Расчетная температура внутреннего воздуха здания при расчете ОК жилых зданий принимается по минимальным значениям оптимальной температуры соответствующих зданий для холодного периода года по [8, табл. 1]. Для жилых зданий – в интервале 20–22 °С.

При расчетах ОК (в том числе для определения точки росы) относительную влажность внутреннего воздуха для помещений жилых зданий следует принимать равной 55 %. Для других типов зданий – согласно [11, п. 5.7].

Влажностный режим помещений зданий в холодный период года в зависимости от относительной влажности и температуры внутреннего воздуха следует устанавливать по табл. 2.4 или [11, табл. 1].

Зоны влажности района строительства следует принимать по карте [11].

Таблица 2.4

Влажностный режим помещений зданий

Режим	Влажность внутреннего воздуха, %, при температуре, °С		
	до 12	свыше 12 до 24	свыше 24
Сухой	до 60	до 50	до 40
Нормальный	свыше 60 до 75	свыше 50 до 60	свыше 40 до 50
Влажный	свыше 75	свыше 60 до 75	свыше 50 до 60
Мокрый	–	свыше 75	свыше 60

Условия эксплуатации ограждающих конструкций А или Б в зависимости от влажностного режима помещений и зон влажности района строительства, необходимые для выбора теплотехнических показателей материалов наружных ограждений, следует устанавливать по табл. 2.5.

Таблица 2.5

Условия эксплуатации ОК

Влажностный режим помещений зданий	Условия эксплуатации А и Б в зоне влажности		
	сухой	нормальной	влажной
Сухой	А	А	Б
Нормальный	А	Б	Б
Влажный или мокрый	Б	Б	Б

Для удобства дальнейших тепловых расчетов все исходные и выбранные из [11] теплофизические характеристики рекомендуется свести в табл. 2.6.

В СР проверяется удовлетворение ОК следующим нормативным требованиям [11]:

- приведенному сопротивлению теплопередаче ОК здания;
- воздухопроницаемости ОК;
- теплоустойчивости ОК в теплый период года;

Таблица 2.6

Исходные данные и теплофизические характеристики
материалов конструкции наружного ограждения

Город	Номера слоя	Материал слоя	Характеристики материала в сухом состоянии			Расчетные характеристики материала (при условиях эксплуатации А или Б)			
			плотность ρ_0 , кг/м ³	удельная теплоемкость c_0 , кДж/(кг·°С)	теплопроводность λ_0 , Вт/(м·°С)	влажность w , %	теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	теплоусвоение s , м ² ·°С	паропроницаемость μ , мг/(м·ч·Па)
	1								
	2								
	3								
	4								

- ограничению минимальной температуры и недопущению конденсации влаги на внутренней поверхности ОК в холодный период года;
- влажностному состоянию ОК.

2.2. Расчет теплового режима ограждения

ОК современных зданий характеризуются наличием конструктивных и утепляющих слоев, различного рода теплотехнических неоднородностей в виде плит перекрытий, связей, перегородок, оконных откосов, конструктивных элементов фасадных систем и т. п.

Часть ОК, которая не содержит теплотехнических неоднородностей, будем называть **гладью конструкции**. Гладь конструкции является однородной.

Для характеристики теплозащитных качеств неоднородных конструкций, к которым можно отнести большинство ОК современных зданий, используется понятие **приведенное сопротивление теплопередаче ОК** [1, 7]. Приведенное сопротивление теплопередаче ОК считается основной теплозащитной характеристикой здания, и величина его регламентируется нормами [11].

Теплозащитная оболочка здания – это совокупность ОК, образующих замкнутый контур, ограничивающий отапливаемый объем здания.

Теплозащитная оболочка здания должна отвечать следующим требованиям:

- а) приведенное сопротивление теплопередаче отдельных ОК должно быть не меньше нормируемых значений (поэлементные требования);
- б) удельная теплозащитная характеристика здания должна быть не больше нормируемого значения (комплексное требование);

в) температура на внутренних поверхностях ОК должна быть не ниже минимально допустимых значений (санитарно-гигиеническое требование).

Требования тепловой защиты здания будут выполнены при одновременном выполнении всех трех составляющих.

В рамках данной КР проверяются выполнение требований а) и в). Комплексное требование не проверяется.

2.2.1. Определение нормативных требований

Требования к тепловой защите зданий устанавливаются в следующем порядке.

1. Принимаются средняя температура наружного воздуха, °С, и продолжительность отопительного периода, сут/год, по СП 131.13330 [12] для жилых зданий для периода со средне-суточной температурой наружного воздуха не более 8 °С, а при проектировании лечебно-профилактических, детских учреждений и домов-интернатов для престарелых не более 10 °С.

2. Принимается расчетная температура внутреннего воздуха здания по ГОСТ 30494 [9]: при расчете ОК жилых и общественных зданий по минимальным значениям оптимальной температуры соответствующих зданий по [9], для производственных с сухим и нормальным режимами – по нормам проектирования соответствующих зданий.

3. Рассчитываются градусо-сутки отопительного периода по формуле

$$ГСОП = (t_{в} - t_{от}) \cdot z_{от}, \quad (2.1)$$

где $t_{от}$, $z_{от}$ – средняя температура наружного воздуха, °С, и продолжительность, сут/год, отопительного периода, принимаемые по [12]; $t_{в}$ – расчетная температура внутреннего воздуха здания, °С, принимаемая по [9].

4. Находятся базовые значения сопротивления теплопередаче ОК здания, $R_0^{ТР}$, (м²·°С)/Вт, по табл. 3 [11];

5. Находится нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче ОК $R_0^{норм}$, (м²·°С)/Вт, по формуле

$$R_0^{норм} = R_0^{ТР} \cdot m_p, \quad (2.2)$$

где $R_0^{ТР}$ – базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче ОК, (м²·°С)/Вт, следует принимать в зависимости от градусо-суток отопительного периода, ГСОП, °С·сут/год, региона строительства и определять по [11, табл. 3] или табл. 2.7; m_p – коэффициент, учитывающий особенности региона строительства. В расчете по формуле (2.2) принимается равным 1.

Допускается снижение значения коэффициента m_p в случае, если при выполнении расчета удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания учитываются требования к данной удельной характеристике [11].

Значения коэффициента m_p при этом должны быть не менее: 0,63 – для стен, 0,8 – для остальных ОК (кроме светопрозрачных), 1,0 – для светопрозрачных конструкций.

В случаях реконструкции зданий, для которых по архитектурным или историческим причинам невозможно утепление стен снаружи, нормируемое значение сопротивления теплопередаче стен допускается определять по формуле

$$R_0^{\text{норм}} = \frac{(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})}{\Delta t^{\text{н}} \cdot \alpha_{\text{в}}}, \quad (2.3)$$

где $t_{\text{в}}$ – то же, что в формуле (2.1); $t_{\text{н}}$ – расчетная температура наружного воздуха в холодный период года, °С, принимаемая равной средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 [12]; $\Delta t^{\text{н}}$ – нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха $t_{\text{в}}$ и температурой внутренней поверхности ОК – $\tau_{\text{в}}$, °С, принимаемый по [11, табл. 5] или приложению А, табл. А.2; $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждения, Вт/(м²·°С), [11, табл. 4] или приложение А, табл. А.3.

2.2.2. Расчет приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции

Рассматривают два основных случая расчета приведенного сопротивления теплопередаче:

а) расчет приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции (ОК) с известными характеристиками;

б) подбор элементов проектируемой конструкции для достижения целевого сопротивления теплопередаче.

Поскольку по заданию толщина утепляющего слоя неизвестна, то в рамках курсового проекта рассматривается второй случай расчета приведенного сопротивления теплопередаче проектируемой конструкции. Подбор элементов проектируемой ОК для достижения целевого сопротивления теплопередаче проводят в нижеприведенной последовательности.

Таблица 2.7

Базовые значения требуемого сопротивления теплопередаче ОК

Здания и помещения, коэффициенты a и b	Градусо- сутки отопительного периода, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}/\text{год}$	Базовые значения требуемого сопротивления теплопередаче $R_0^{\text{ТР}}$, ($\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$)/Вт, ОК				
		стен	покрытий и перекрытий над проездами	перекрытий чердачных, над холодными подпольями и подвалами	окон и балконных дверей	фонарей
1	2	3	4	5	6	7
1. Жилые, лечебно-профи- лактические и детские учреж- дения, школы, интернаты	2000	2,1	3,2	2,8	0,49	0,3
	4000	2,8	4,2	3,7	0,63	0,35
	6000	3,5	5,2	4,6	0,73	0,4
	8000	4,2	6,2	5,5	0,75	0,45
	10000	4,9	7,2	6,4	0,77	0,5
	12000	5,6	8,2	7,3	0,8	0,55
a	–	0,00035	0,0005	0,00045	–	0,000025
b	–	1,4	2,2	1,9	–	0,25
2. Общие, кроме указанных выше, админи- стративные и бытовые, за исключением помеще-ний с влажным или мокрым режимом	2000	1,8	2,4	2,0	0,49	0,3
	4000	2,4	3,2	2,7	0,63	0,35
	6000	3,0	4,0	3,4	0,73	0,4
	8000	3,6	4,8	4,1	0,75	0,45
	10000	4,2	5,6	4,8	0,77	0,5
	12000	4,8	6,4	5,5	0,8	0,55
a	–	0,0003	0,0004	0,00035	–	0,000025
b	–	1,2	1,6	1,3	–	0,25

Примечание – значения $R_0^{\text{ТР}}$ для величин ГСОП, отличающихся от табличных, следует определять как $R_0^{\text{ТР}} = a \cdot \text{ГСОП} + b$, где a , b – коэффициенты, значения которых следует принимать по данным таблицы для соответствующих групп зданий, за исключением графы 6, для группы зданий в поз. 1 и 2

Выбор ограждающей конструкции

Вид ограждающей конструкции (ОК), набор материалов и толщин слоев выбирают по заданию. Определяют условия эксплуатации ОК [11, п. 4.4] и расчетные коэффициенты материалов слоев [11] или приложение А, табл. А.1.

Типовая разбивка на элементы

Выбирают типовую разбивку на элементы, которую корректируют с учетом особенностей ОК. Для стен типовую разбивку следует принимать по [13]. В рамках данной курсовой работы рассматриваются следующие элементы конструкции (рис. 2.1):

плоский элемент

- стена по глади;

линейные элементы

- сопряжение с плитой перекрытия;
- стыки с оконными блоками;

точечный элемент

- крепеж утеплителя (тарельчатый анкер).

Определение удельных геометрических показателей

Для каждого элемента находят абсолютный геометрический показатель.

Для приведения теплотерь всех элементов (плоских, линейных и точечных) к 1 м^2 площади фрагмента необходимо добавить абсолютные геометрические характеристики фрагмента ограждения и представить в виде их удельных геометрических показателей, т. е. соотнесенных с площадью всего фрагмента.

Удельный геометрический показатель точечного элемента (крепежа утеплителя) на практике изменяется в пределах от 5 до 12 шт/м^2 .

Расчет толщины утепляющего слоя

Для плоских элементов выбирают толщину утеплителя. Для этого нормируемое сопротивление теплопередаче конструкции умножают на повышающий коэффициент и подбирают конструкцию со значением:

$R_0^{\text{усл}} = 1,5R_0^{\text{норм}}$ – в том числе для ненесущей стеновой конструкции с облицовкой из кирпичной кладки;

$R_0^{усл} = 1,3R_0^{норм}$ – в случае, если про конструкцию известно, что она отличается высокой однородностью (в том числе для фасадных систем с тонким штукатурным слоем);

$R_0^{усл} = 1,8R_0^{норм}$ – в случае, если про конструкцию известно, что она отличается низкой однородностью.

Условное сопротивление теплопередаче однородной части (глади) ОК, $R_0^{усл}$, $(м^2 \cdot ^\circ C)/Вт$, определяется по формуле

$$R_0^{усл} = R_B + R_K + R_H = \frac{1}{\alpha_B} + R_K + \frac{1}{\alpha_H}, \quad (2.4)$$

где R_B – сопротивление теплоотдачи от внутреннего воздуха (при $t_B > \tau_B$) к внутренней поверхности ОК (или сопротивление тепловосприятию); R_K – термическое сопротивление однородной части (глади) ОК; R_H – сопротивление теплоотдачи от наружной поверхности ОК к наружному воздуху (при $\tau_H > t_H$); α_B – то же, что в формуле (2.3); α_H – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждения, $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$, [11, табл. 6] или приложение А, табл. А.4.

Для многослойной конструкции R_K определяется по формуле

$$R_K = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (2.5)$$

где R_i – термическое сопротивление слоя однородной части (глади) ограждения; δ_i – толщина i -го слоя ОК, м; λ_i – коэффициент теплопроводности материала i -го слоя ограждения, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$.

Используя формулу (2.4), получим выражение R_3 для определения предварительной толщины слоя утеплителя $\delta_{ут}$:

$$R_3 = R_0^{усл} - \left(\frac{1}{\alpha_B} + R_1 + R_2 + R_4 + \frac{1}{\alpha_H} \right), \quad (2.6)$$

$$\delta_{ут} = \delta_3 = \lambda_3 \cdot R_3. \quad (2.7)$$

Вычисленное значение δ_3 должно быть скорректировано в соответствии с требованиями унификации конструкции ограждений, поэтому за δ_3 принимают ближайшее большее стандартное значение.

Определение удельных потерь теплоты всех элементов

Для выбранной толщины утеплителя определяют удельные потери теплоты всех элементов ОК. Источниками получения удельных потерь теплоты служат: расчет температурного поля или справочные материалы.

В КР необходимо использовать справочные материалы в виде таблиц [13]. Номера таблиц и дополнительные характеристики конструкции определяются по последней цифре шифра зачетной книжки согласно табл. 2.8.

Таблица 2.8

Неоднородности ОК

Последняя цифра шифра	Тип наружного ограждения*	Таблица в СП 230.1325800.2015		
		Лин. 1 (плита)	Лин. 2 (окно)	Точ. 1 (дюбель)
0	1	Г.13 $d_n = 160$	Г.32 $d_p = 60$	Г.4 $L_1 = 0$
1	1	Г.13 $d_n = 210$	Г.32 $d_p = 60$	Г.4 $L_1 = 5$
2	2	Г.13 $d_n = 160$	Г.32 $d_p = 60$	Г.4 $L_1 = 0$
3	2	Г.13 $d_n = 210$	Г.32 $d_p = 60$	Г.4 $L_1 = 5$
4	2	Г.13 $d_n = 160$	Г.32 $d_p = 80$	Г.4 $L_1 = 10$
5	2	Г.13 $d_n = 210$	Г.32 $d_p = 80$	Г.4 $L_1 = 15$
6	2	Г.13 $d_n = 160$	Г.32 $d_p = 120$	Г.4 $L_1 = 20$
7	2	Г.13 $d_n = 210$	Г.32 $d_p = 120$	Г.4 $L_1 = 0$
8	3	Г.19 $d_n = 160$	Г.33 $d_p = 0$	Г.4 $L_1 = 15$
9	3	Г.19 $d_n = 210$	Г.33 $d_p = 20$	Г.4 $L_1 = 20$

Примечание – тип наружного ограждения:

1 – трехслойная бетонная панель на гибких связях;

2 – несущая стеновая конструкция с облицовкой из кирпичной кладки;

3 – фасадные системы с тонким штукатурным слоем

Справочными материалами для определения удельных потерь теплоты также могут служить данные технических свидетельств или альбомов типовых чертежей, другие официальные результаты расчетов.

Расчет приведенного сопротивления теплопередаче

Приведенное сопротивление теплопередаче ОК, $R_0^{\text{пр}}$, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$, рассчитывается по методике [11] с использованием таблиц [13] или результатов расчета температурных полей в специализированном программном обеспечении [16]. Приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки здания следует определять по формуле

$$R_0^{\text{пр}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_i U_i + \sum_{j=1}^m l_j \Psi_j + \sum_{k=1}^r n_k X_k}, \quad (2.8)$$

где a_i – удельный геометрический показатель i -го плоского элемента, $\text{м}^2/\text{м}^2$, который равен отношению площади i -го элемента в исследуемой конструкции, A_i , м^2 , к общей площади конструкции, A , м^2 :

$$a_i = \frac{A_i}{A}; \quad (2.9)$$

l_j – удельный геометрический показатель j -го линейного элемента, $\text{м}/\text{м}^2$, который равен отношению суммарной протяженности j -го элемента, L_j , м , к общей площади конструкции, A , м^2 :

$$l_j = \frac{L_j}{A}; \quad (2.10)$$

n_k – удельная геометрическая показатель k -го точечного элемента, $1/\text{м}^2$, который равен отношению суммарного количества k -ых элементов в исследуемой конструкции, N_k , к общей площади конструкции, A , м^2 :

$$n_k = \frac{N_k}{A}; \quad (2.11)$$

ψ_j – удельные потери теплоты через линейную неоднородность j -го вида, Вт/(м·°C); χ_k – удельные потери теплоты через точечную неоднородность k -го вида, Вт/°C; U_i – коэффициент теплопередачи однородной i -той части фрагмента теплозащитной оболочки здания (удельные потери теплоты через плоский элемент i -го вида), Вт/(м²·°C). Определяется по формуле

$$U_i = \frac{1}{R_{0,i}^{\text{усл}}}, \quad (2.12)$$

где $R_{0,i}^{\text{усл}}$ – условное сопротивление теплопередаче однородной части ОК, (м²·°C)/Вт, рассчитывается по формуле (2.4).

Коэффициент теплотехнической однородности, r , характеризующий эффективность утепления конструкции ($0 \leq r \leq 1$), вычисляется по формуле:

$$r = \frac{R_0^{\text{пр}}}{R_0^{\text{усл}}}. \quad (2.13)$$

Результаты расчетов сводят в табл. 2.9.

Таблица 2.9

Геометрические и теплозащитные характеристики элементов

Элемент конструкции		Удельный геометрический показатель	Удельные потери теплоты	Удельный поток теплоты, обусловленный элементом	Доля общего потока теплоты через элемент, %
Название элемента	Плоский	$a_1 = \text{м}^2/\text{м}^2$	$U_1 = \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	$U_1 a_1 = \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	
...	
Название элемента	Линейный	$l_1 = \text{м}/\text{м}^2$	$\psi_1 = \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$	$\psi_1 l_1 = \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	
...	
Название элемента	Точечный	$n_1 = 1/\text{м}^2$	$\chi_1 = \text{Вт}/\text{°C}$	$\chi_1 n_1 = \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	
...	
Итого				$\frac{1}{R_0^{\text{пр}}} = \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$	100 %

По табл. 2.9 и формуле (2.8) проводят расчет приведенного сопротивления теплопередаче.

2.2.3. Проверка нормативных требований

Поэлементные требования

По результатам расчета проводят проверку полученного значения приведенного сопротивления теплопередаче нормативному требованию. Должно выполняться условие:

$$R_0^{\text{пр}} \geq R_0^{\text{норм}}. \quad (2.14)$$

Если условие не выполняется, корректируют конструктивное решение ОК. Корректировка может заключаться, как в изменении толщины или типа утеплителя, так и в замене наиболее значимых теплозащитных элементов.

Примечание. Как правило, целевое сопротивление может считаться достигнутым, если полученное расчетом приведенное сопротивление теплопередаче не меньше целевого сопротивления теплопередаче и отличается от него не более чем:

- на 10 % – для $R_0^{\text{усл}} < 3,5 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$;
- на 7 % – для $3,5 \leq R_0^{\text{усл}} \leq 5 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$;
- на 5 % – для $5 \leq R_0^{\text{усл}} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$.

В случае изменения характеристик некоторых элементов ОК (особенно толщины утеплителя) оценивают необходимость корректировки теплозащитных свойств остальных элементов. При необходимости пересчитывают характеристики элементов с использованием таблиц [13].

Проводят окончательный расчет приведенного сопротивления теплопередаче. Для этого заново заполняют табл. 2.9 и применяют формулу (2.8).

В случае значительных сложностей при подборе характеристик элементов для достижения необходимого значения приведенного сопротивления теплопередаче для расчета $R_0^{\text{норм}}$ используют понижающий коэффициент $m_p = 0,63$ (для стен).

Санитарно-гигиеническое требование

Проверка санитарно-гигиенического требования выполняется в разделе 2.6 после определения минимальной температуры на внутренней поверхности ОК (раздел 2.3) и расчета температуры точки росы (раздел 2.6).

2.3. Расчет сопротивления воздухопроницанию ограждающей конструкции

Воздухопроницаемость ОК – физическое явление, заключающееся в фильтрации воздуха в ОК, вызванной перепадом давления воздуха.

В целях экономии топливно-энергетических ресурсов наружные ОК должны иметь необходимое сопротивление воздухопроницанию.

Сопротивление воздухопроницанию ОК, за исключением заполнений световых проемов (окон, балконных дверей и фонарей), зданий и сооружений R_u должно быть не менее нормируемого (требуемого) $R_u \geq R_u^{TP}$ сопротивления воздухопроницанию R_u^{TP} , $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{кг}$, определяемого по формуле

$$R_u^{TP} = \frac{\Delta p}{G_H}, \quad (2.15)$$

где G_H – нормативная воздухопроницаемость ОК, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, принимаемая по [11, табл. 9] или приложению А, табл. А.5; Δp – разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ОК, Па, рассчитываемая в формуле [7]

$$\begin{aligned} \Delta p &= 0,55H(\gamma_H - \gamma_B) + 0,03\gamma_H v^2, \\ v^2 &= 0,55Hg(\rho_H - \rho_B) + 0,03\rho_H g v^2 = \\ &= 0,55Hg(\rho_H - \rho_B) + 0,3v^2\rho, \quad \gamma = \rho g, \quad g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}, \end{aligned} \quad (2.16)$$

где H – высота здания (от уровня пола первого этажа до верха вытяжной шахты), м. Высота одного этажа принимается равной 3 м; γ_H , γ_B – удельный вес соответственно наружного и внутреннего воздуха, $\text{Н}/\text{м}^3$, определяемый по формуле [7]

$$\gamma = \frac{3463}{(273 + t)} = \frac{3463}{T}, \quad (2.17)$$

где t – температура воздуха: внутреннего (для определения γ_B) – то же, что в формуле (3.1); наружного (для определения γ_H) – принимается равной средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 (то же, что в формуле (3.3)); v – максимальная из средних скоростей ветра по румбам за январь, повторяемость которых составляет 16 % и более, принимаемая по [12].

Сопротивление воздухопроницанию R_u многослойной ОК следует рассчитывать как сумму сопротивлений воздухопроницанию отдельных слоев по формуле

$$R_u = \sum_{i=1}^n R_{ui}, \quad (2.18)$$

где R_{ui} – сопротивления воздухопроницанию отдельных слоев ОК, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{кг}$. Принимаются по [11] или приложению А, табл. А.6.

В случае выполнения условия $R_u \geq R_u^{\text{ТР}}$ выбранная ОК удовлетворяет нормативным требованиям.

В случае $R_u < R_u^{\text{ТР}}$ необходимо предусмотреть меры по повышению сопротивления воздухопроницаемости ограждения. Для этого рекомендуется выбрать отдельные материалы и конструкции с бóльшим R_u , а также располагать у наружной поверхности более плотные слои ограждения (рис. 2.4). В качестве таких слоев целесообразно принимать цементно-песчаную штукатурку, керамическую плитку, естественный облицовочный камень и т. п.

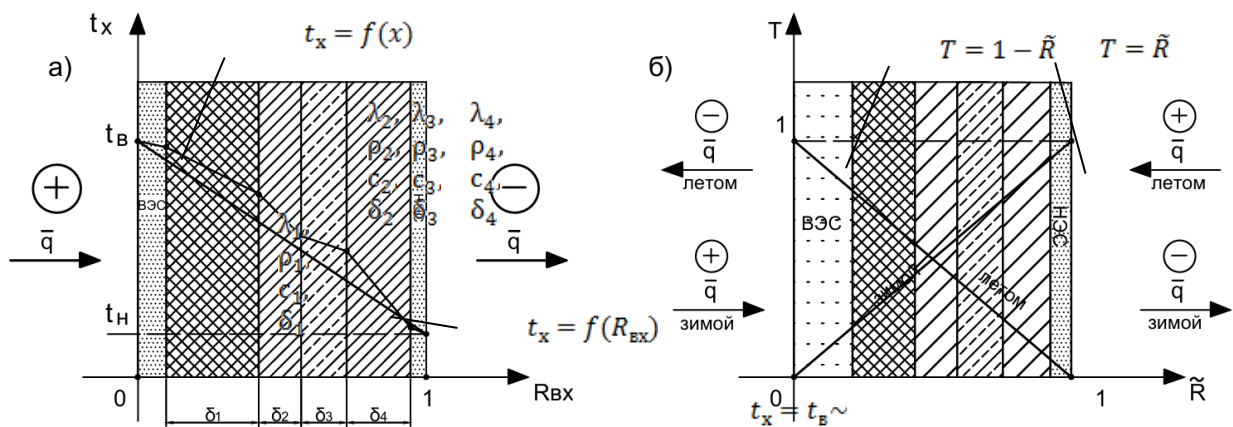


Рис. 2.4. Графическое распределение поля температур в МОК:

- а) в размерностях $t(x)$ и $t(R)$; б) в безразмерном виде $T(\tilde{R})$ для зимнего и летнего периодов года: 1. ВЭС – внутренний эквивалентный слой, НЭС – наружный эквивалентный слой; 2. Зимний и летний графики зеркально противоположны

$$\beta = k = \frac{1}{R_0}, \quad \tilde{R} = \frac{R_{B-x}}{R_0} = kR_{B-x},$$

$$R_{B-x} = \sum_{i=B}^{i=x} \frac{\delta_{i-x}}{\lambda_{i-x}}.$$

В зимнее время:

а) при $\tilde{R} = \frac{R_{B-x}}{R_0} = 0$, $T = 0$ или $t_x = t_B$, где $R_{B-x} = 0$, т. е. в ядре потока

внутреннего воздуха сопротивления нет;

б) при $\frac{R_{B-x}}{R_0} = 1$, $T = 1$ или $t_B - t_x = t_B - t_H$, $t_x = t_H$, где $R_{B-x} = R_0$, т. е.

максимальная толщина с учетом двух эквивалентных слоёв.

В летнее время:

а) при $R = 0$, $T = 1$;

б) при $R = 1$, $T = 0$.

2.4. Расчет стационарного температурного поля в ограждающей конструкции

При проектировании и выборе конструкций ограждения необходимо знать распределение температуры в его толще и на поверхностях ОК. Это дает возможность определить область промерзания ОК, условия конденсации влаги в толще конструкции, правильно назначить место расположения пароизоляционных слоев.

2.4.1. Расчет стационарного одномерного температурного поля Расчет без учета фильтрации воздуха

При стационарном режиме теплопередачи через ограждения температура в любой плоскости x определяется по формуле

$$t_x = t_B - (t_B - t_H) \frac{R_{B-x}}{R_0} \quad (2.19)$$

или

$$t_x = t_B - qR_{B-x},$$

$$q = \frac{\max |\nabla t|}{R_0} = k \max |\nabla t|,$$

$$t_x = t_B - k \max |\nabla t| R_{B-x},$$

$$T = \tilde{R}, \quad \tilde{R} = \frac{R_{B-x}}{R_0};$$

$$T = \frac{t_B - t_x}{t_B - t_H} = \frac{R_{B-x}}{R_0} = kR_{B-x}, \quad T \in [0,1], \quad R \in [0,1],$$

где R_{B-x} – сопротивление теплопередаче от внутренней среды до сечения x ; R_0 – общее сопротивление теплопередаче однородной части ОК конструкции; q – удельный тепловой поток, Вт/м². Определяется по формуле

$$q = \frac{(t_B - t_H)}{R_0} = k \max |\nabla t| = \frac{\max |\nabla t|}{R_0}; k = \frac{1}{R_0}. \quad (2.20)$$

Ввиду линейности уравнения (2.19) для построения графика одномерного стационарного поля в ограждении достаточно определить t на поверхностях ограждения и в плоскостях соприкосновения слоев из разного материала (рис. 2.5).

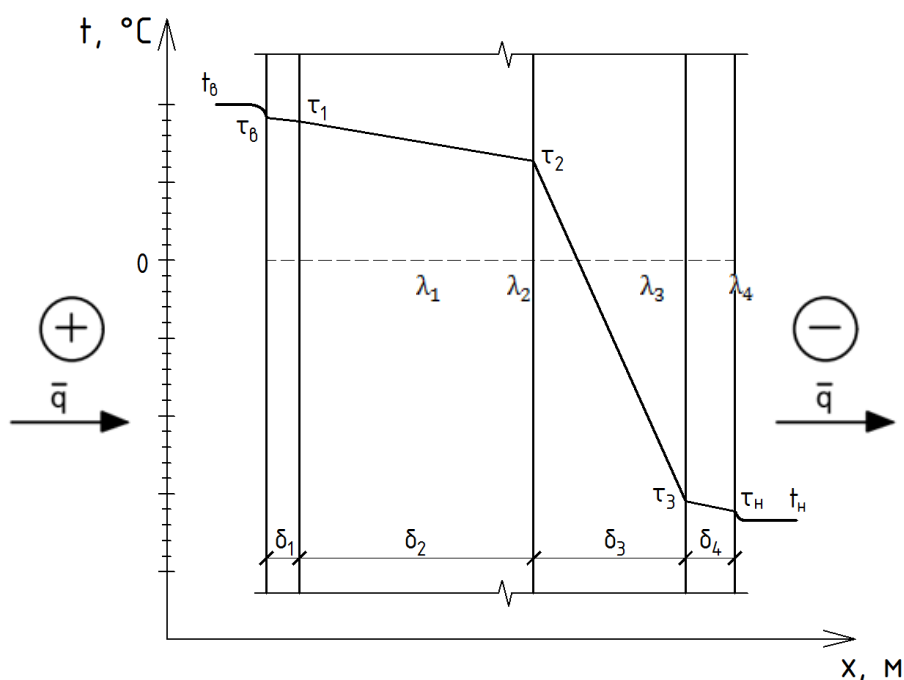


Рис. 2.5. Наглядный (качественный) график распределения $t(x)$. Здесь t_B, τ_B, τ_H, t_H – соответственно температуры внутри помещения, на внутренней и наружной поверхностях конструкции, наружной окружающей среды

Расчет с учетом фильтрации воздуха

При наличии поперечной фильтрации воздуха в ОК (рис. 2.6) температура в рассчитываемом сечении определяется по формулам:

– при инфильтрации:

$$t_x^{\text{инф}} = t_B - (t_B - t_H) \frac{e^{cGR_{B-x}} - 1}{e^{cGR_0} - 1} \cdot \frac{e^{cGR_0}}{e^{cGR_{B-x}}}$$

или

$$t_x^{\text{инф}} = t_B - (t_B - t_H) \frac{e^{cGR_{B-x}} - 1}{e^{cGR_0} - 1} \cdot e^{cG(R_{B-x} - R_0)}, \quad (2.21)$$

– при эксфильтрации:

$$t_x^{\text{эксф}} = t_B - (t_B - t_H) \frac{e^{cGR_{B-x}} - 1}{e^{cGR_0} - 1}, \quad (2.22)$$

где c – теплоемкость воздуха, 1 кДж/кг·°С; $W = G$ – удельное количество воздуха, проходящего через ОК (плотность потока вещества (воздуха)), кг/(м²·ч).

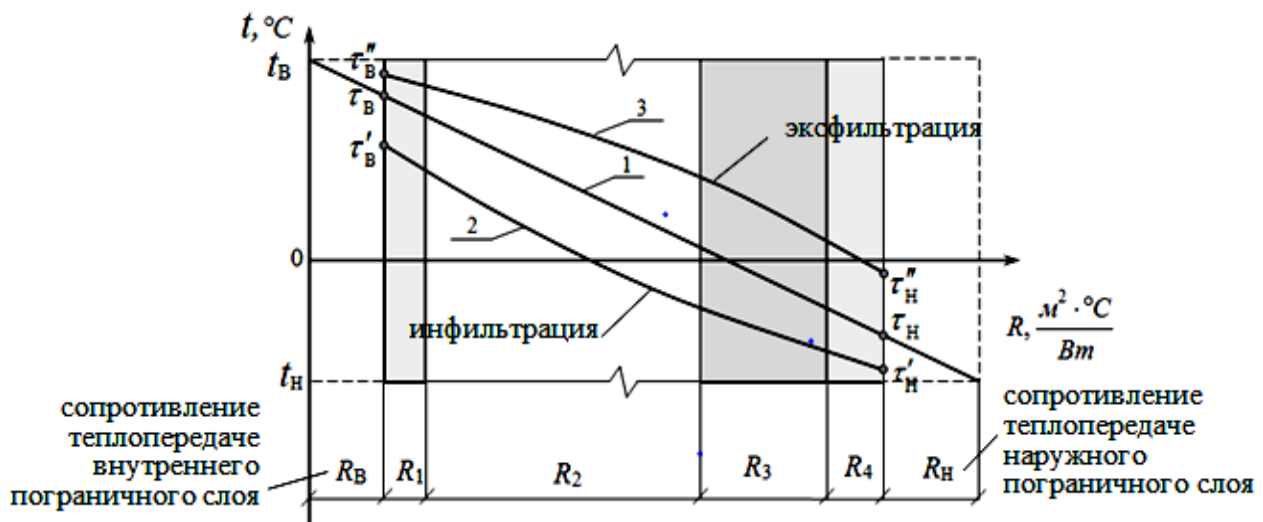


Рис. 2.6. Типовой (типичный) график распределения $t(R)$ в многослойной ОК без учета (1) и с учетом воздухопроницаемости: (2) – при инфильтрации и (3) – при эксфильтрации воздуха.

Можно записать через критерии Pe , Pr , Re в следующем виде:

$$T_x^u = \frac{t_x^u - t}{t_B - t_H} = \frac{e^{Pe_x} - 1}{e^{Pe_0} - 1} \cdot \frac{e^{Pe_0}}{e^{Pe_x}} = \frac{e^{Pe_x} - 1}{e^{Pe_0} - 1} \cdot e^{Pe_0 - Pe_x},$$

где

$$Pe_0 = \frac{cG}{k} = cGR_0, \quad Pe_x = \frac{cG}{k_x} = cGR_{B-x}.$$

Рассмотрим случай, когда ОК подвержена воздействию повышенного перепада давления, вызванного, например, высотой здания, кратковременными порывами ветра и др. В рамках данной работы разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ОК рассчитывается укрупненно, а G определяется по формуле

$$G = \frac{\Delta P}{R_u} = \frac{k\Delta p}{R_u}, \quad (2.23)$$

где k – повышающий коэффициент, принимаемый по последней цифре шифра зачетной книжки согласно табл. 2.10; Δp – по формуле (2.16); R_u – по формуле (2.18).

Таблица 2.10

Значения повышающего коэффициента

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Повышающий коэффициент k	2,5	5	7	9	10	8	6,5	5,5	4,5	3,5

2.4.2. Расчет стационарного двумерного температурного поля

Двумерное стационарное температурное поле неоднородного узла ОК рассчитывается с использованием специализированного программного обеспечения (ПО) *Elcut* [16] в рамках лабораторных работ по данной дисциплине. Результатом выполнения лабораторной работы является определение минимальной температуры в зоне теплопроводного включения.

Результаты должны быть включены в СР.

2.5. Расчет теплоустойчивости наружных ограждающих конструкций в теплый период

Проверка наружных ограждений на теплоустойчивость осуществляется в районах со среднемесячной температурой воздуха в июле 21 °С и выше.

Если, по заданию к самостоятельной работе, среднемесячная

температура наружного воздуха за июль меньше 21 °С, то необходимо сделать соответствующий вывод, а расчет теплоустойчивости ОК произвести при температуре, указанной в табл. 2.11.

Теплоустойчивость – это свойство ограждения сохранять относительное постоянство температуры на внутренней поверхности τ_B при колебаниях внешних тепловых воздействий A_{t_H} и обеспечивать комфортные условия в помещении. Фактическая амплитуда колебаний температуры внутренней поверхности ОК не должна превышать требуемую:

$$A_{\tau_B} \leq A_{\tau_B}^{\text{TP}}. \quad (2.24)$$

Таблица 2.11

Температура для расчета теплоустойчивости

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t_H	25	26	27	28	29	30	28	26	24	31

Требуемая амплитуда колебаний температуры внутренней поверхности ОК с учетом санитарно-гигиенических норм определяется по выражению

$$A_{\tau_B}^{\text{TP}} = 2,5 - 0,1(t_H - 21), \quad (2.25)$$

где t_H – среднемесячная температура наружного воздуха за июль, °С, [12].

Фактическая амплитуда колебаний температуры внутренней поверхности ОК определяется по формуле

$$A_{\tau_B} = \frac{A_{t_H}^{\text{расч}}}{\nu}, \quad (2.26)$$

где $A_{t_H}^{\text{расч}}$ – расчетная амплитуда колебаний температуры наружного воздуха, °С; ν – величина затухания расчетной амплитуды колебаний температуры наружного воздуха в ОК [7].

Расчетная амплитуда колебаний температуры наружного воздуха равна

$$A_{t_H}^{\text{расч}} = 0,5A_{t_H} + \frac{P(I_{\text{max}} - I_{\text{cp}})}{\alpha_H}, \quad (2.27)$$

где $A_{tн}$ – максимальная амплитуда суточных колебаний температуры наружного воздуха в июле, °С, [12, табл. 11]; P – коэффициент поглощения солнечной радиации материалом наружной поверхности ОК [11]; I_{\max} , $I_{\text{ср}}$ – соответственно максимальное и среднее значения суммарной солнечной радиации (прямой и рассеянной), Вт/м², принимаемые согласно [12] или по приложению А, табл. А.7 для наружных стен – как для вертикальных поверхностей западной ориентации и для покрытий – как для горизонтальной поверхности; $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ОК по летним условиям, Вт/(м²·°С), определяемый по формуле

$$\alpha_{\text{н}} = 5,8(1 + 2\sqrt{v}), \quad (2.28)$$

где v – минимальная скорость ветра из средних скоростей ветра по румбам за июль, повторяемость которых составляет 16 % и более, принимаемая согласно [12], но не менее 1 м/с.

Величина $A_{\tau_{\text{в}}}$ зависит от свойств материала, характеризующихся значениями D , S , R , Y . Величину затухания расчетной амплитуды колебаний температуры наружного воздуха v в ОК, состоящей из однородных слоев, следует определять по формулам

$$v = 0,9e^{\frac{D}{\sqrt{2}}} \frac{(s_1 + \alpha_{\text{в}})(s_2 + Y_1) \dots (s_n + Y_{n-1})(\alpha_{\text{н}} + Y_n)}{(s_1 + Y_1)(s_2 + Y_2) \dots (s_n + Y_n)\alpha_{\text{н}}},$$

$$v = 0,9e^{\frac{D}{\sqrt{2}}} \frac{(s_1 + \alpha_{\text{в}})(\alpha_{\text{н}} + Y_n) \prod_{i=2}^n (s_i + Y_{i-1})}{\alpha_{\text{н}} \prod_{i=1}^n (s_i + Y_i)}, \quad (2.29)$$

где D – тепловая инерция ОК, определяемая по формуле

$$D = \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{i=1}^n R_i s_i, \quad (2.30)$$

где R_i – термическое сопротивление отдельного i -го слоя ОК, м²·°С/Вт; s_1, s_2, \dots, s_n – расчетные коэффициенты теплоусвоения материала отдельных слоев ОК, Вт/(м²·°С); $\alpha_{\text{в}}$ – то же, что в формуле (2.3); $\alpha_{\text{н}}$ – то же, что в формуле (5.4); $Y_1, Y_2, \dots, Y_{n-1}, Y_n$ – коэффициенты теплоусвоения наружной поверхности отдельных слоев ОК, Вт/(м²·°С).

Порядок нумерации слоев в формуле (5.6) принят в направлении от внутренней поверхности к наружной.

Для многослойной неоднородной ОК с теплопроводными включениями величину затухания расчетной амплитуды колебаний температуры наружного воздуха ν в ОК следует определять в соответствии с [8].

Примечания

1. Расчетный коэффициент теплоусвоения воздушных прослоек принимается равным нулю.

2. Слои конструкции, расположенные между воздушной прослойкой, вентилируемой наружным воздухом, и наружной поверхностью ОК, не учитываются.

3. При суммарной тепловой инерции ОК $D \geq 4$, расчет на теплоустойчивость не требуется.

Для определения коэффициентов теплоусвоения наружной поверхности отдельных слоев ОК следует предварительно вычислить тепловую инерцию D_i каждого слоя.

Коэффициент теплоусвоения наружной поверхности слоя Y , Вт/(м²·°С), с тепловой инерцией $D \geq 1$ следует принимать равным расчетному коэффициенту теплоусвоения s материала этого слоя конструкции.

Коэффициент теплоусвоения наружной поверхности слоя Y с тепловой инерцией $D < 1$ следует определять расчетом, начиная с первого слоя (считая от внутренней поверхности ОК) следующим образом:

а) для первого слоя – по формуле

$$Y_1 = \frac{R_1 s_1^2 + \alpha_B}{1 + R_1 \alpha_B}; \quad (2.31)$$

б) для i -го слоя – по формуле

$$Y_i = \frac{R_i s_i^2 + Y_{i-1}}{1 + R_i Y_{i-1}}. \quad (2.32)$$

Если условие (2.24) не выполняется, то ОК является нетеплоустойчивой. В этом случае необходимо принять для наружных слоев (ближе к наружному воздуху) материал с большим коэффициентом теплоусвоения s .

2.6. Расчет влажностного режима наружных ограждающих конструкций

2.6.1. Проверка внутренней поверхности наружных ограждений на возможность конденсации влаги

Конденсация влаги из внутреннего воздуха на внутренней поверхности наружного ограждения, особенно при резких понижениях температур, является основной причиной увлажнения наружных ОК. Для устранения такой конденсации влаги необходимо добиваться, чтобы температура на внутренней поверхности $t_{вп}$ и в толще ограждения превышала температуру точки росы t_p на 2–3 °С, т.е. должно соблюдаться условие $t_{вп} > t_p + (2 \div 3 \text{ °С})$.

Расчет

1. Определяется температура внутренней поверхности $t_{вп}$ для однородной конструкции:

$$t_{вп} = t_{в} - (t_{в} - t_{н}) \frac{R_{в}}{R_0}. \quad (2.33)$$

2. Температура на внутренней поверхности ОК в зоне теплотехнической неоднородности $t_{вп}^{\text{неод}}$ определяется по результатам расчета двумерного температурного поля с использованием специального ПО *Elcut* [16].

3. Температура точки росы t_p для данного состояния внутреннего воздуха $t_{в}$ определяется по формуле [7] или по приложению А, табл. А.8:

$$t_p = -\frac{5330}{\ln \frac{e_{в}}{1,84 \cdot 10^{11}}} - 273, \quad (2.34)$$

где $e_{в}$ – парциальное давление (действительная упругость) водяных паров воздуха в помещении, Па. Определяется по формуле

$$e_{в} = \frac{\varphi_{в} \cdot E_{в}}{100}, \quad (2.35)$$

где φ_B – относительная влажность воздуха в помещении, %, для жилых помещений принимается 55 %; E_B – давление насыщенного водяного пара, Па, при температуре воздуха в помещении. В зависимости от точности может определяться по аппроксимационным формулам [4]. В частности, при температуре от минус 40 до плюс 45°С E находится по приложению А, табл. А.8, или формуле

$$E = 1,84 \cdot 10^{11} \exp\left(-\frac{5330}{273 + t}\right). \quad (2.36)$$

Алгоритм определения температуры точки росы для случая $t_B = 20$ °С и $\varphi_B = 50$ % с использованием формул (6.2)–(6.4) представлен на рис. 2.7.

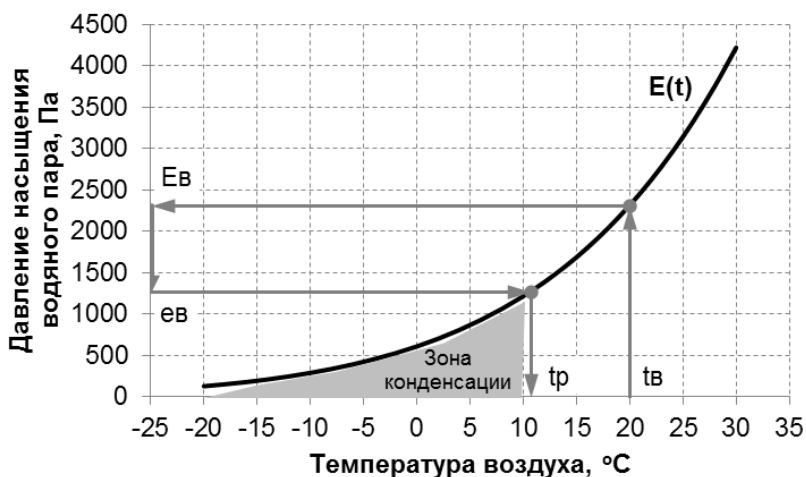


Рис. 2.7. Схема определения температуры точки росы

4. Выполняется проверка санитарно-гигиенического требования к ОК, для чего сравниваются $t_{ВП}$ и $t_{ВП}^{неод}$ с t_p .

В случае, когда $t_{ВП} > t_p$ и $t_{ВП}^{неод} > t_p$, то конденсации на внутренней поверхности ОК не будет. Санитарно-гигиеническое требование выполняется.

Если же $t_{ВП} < t_p$ или $t_{ВП}^{неод} < t_p$, то возможно выпадение конденсата. В случае, когда $t_{ВП} < t_p$, необходимо увеличение общего сопротивления теплопередаче однородной части (глади) ОК R_0 . При $t_{ВП}^{неод} < t_p$, как правило, требуется модернизация рассматриваемого конструктивного узла. Для снижения t_p должна быть предусмотрена вентиляция помещения с целью регулирования влажности внутреннего воздуха.

2.6.2. Защита от переувлажнения ограждающей конструкции

При разности парциальных давлений водяных паров внутреннего и наружного воздуха в толще ОК возникает поток водяного пара (диффузия), который направлен в сторону меньшего давления. Свойство материалов пропускать водяные пары называется паропроницаемостью.

Защита от переувлажнения ОК должна обеспечиваться путем проектирования ОК с сопротивлением паропроницанию внутренних слоев не менее требуемого значения, определяемого расчетом одномерного влагопереноса (осуществляемому по механизму паропроницаемости).

Сопротивление паропроницанию $R_{п}$, $(м^2 \cdot ч \cdot Па)/мг$, ОК (в пределах от внутренней поверхности до плоскости максимального увлажнения (ПМУ), определяемой в соответствии с 0) должно быть не менее наибольшего из следующих требуемых сопротивлений паропроницанию:

а) требуемого сопротивления паропроницанию $R_{п1}^{тр}$, $(м^2 \cdot ч \cdot Па)/мг$ (из условия недопустимости накопления влаги в ОК за годовой период эксплуатации), определяемого по формуле:

$$R_{п1}^{тр} = \frac{(e_B - E) \cdot R_{пн}}{E - e_H}; \quad (2.37)$$

б) требуемого сопротивления паропроницанию $R_{п2}^{тр}$ $(м^2 \cdot ч \cdot Па)/мг$ (из условия ограничения влаги в ОК за период с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха), определяемого по формуле

$$R_{п2}^{тр} = \frac{0,0024 \cdot z_0 \cdot (e_B - E_B)}{\rho_w \cdot \delta_w \cdot \Delta w_{ср} + \eta}, \quad (2.38)$$

где e_B – парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, Па, при расчетных температуре и относительной влажности воздуха в помещении, определяемое по формуле 2.26; E_B – парциальное давление насыщенного водяного пара, Па, при температуре внутреннего воздуха помещения t_B , определяемое в соответствии с п. 2.3.

E – давление насыщенного водяного пара в ПМУ за годовой период эксплуатации, Па, определяемое по формуле

$$E = \frac{E_1 z_1 + E_2 z_2 + E_3 z_3}{12}, \quad (2.39)$$

где E_1, E_2, E_3 – давления насыщенного водяного пара в ПМУ, соответственно зимнего, весенне-осеннего и летнего периодов, Па, определяемые согласно п. 2.3, по температуре в ПМУ, при средней температуре наружного воздуха соответствующего периода; z_1, z_2, z_3 – продолжительность зимнего, весенне-осеннего и летнего периодов года, мес, определяемая по [12] с учетом следующих условий:

а) к зимнему периоду относятся месяцы со средними температурами наружного воздуха ниже минус 5 °С;

б) к весенне-осеннему периоду относятся месяцы со средними температурами наружного воздуха от минус 5 до плюс 5 °С;

в) к летнему периоду относятся месяцы со средними температурами воздуха выше плюс 5 °С.

Примечание. При определении давления насыщения E_3 для летнего периода температуру в ПМУ во всех случаях следует принимать не ниже средней температуры наружного воздуха летнего периода, парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха e_B – не ниже среднего парциального давления водяного пара наружного воздуха за этот период.

$R_{пн}$ – сопротивление паропрооницанию, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$, части ОК, расположенной между наружной поверхностью ОК и ПМУ, определяемое по п. 2.3; e_n – среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха за годовой период, Па [12]; z_0 – продолжительность периода влагонакопления, сут, принимаемая равной периоду с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха [12]; E_0 – давление насыщенного водяного пара ПМУ, Па, определяемое при средней температуре наружного воздуха периода влагонакопления z_0 согласно п. 2.3; ρ_w – плотность материала увлажняемого слоя, $\text{кг}/\text{м}^3$; δ_w – толщина увлажняемого слоя ОК, м, принимаемая равной 2/3 толщины однородной (однослойной) стены или толщине слоя многослойной ОК, в котором располагается ПМУ; Δw – предельно допустимое приращение влажности в материале увлажняемого слоя, % по массе, за период влагонакопления z_0 , принимаемое по [11, табл. 10].

В случае, когда ПМУ приходится на стык между двумя слоями, $\rho_w \delta_w \Delta w$ в формуле (6.6) принимается равной сумме $(\rho_{w1} \delta_{w1} \Delta w_1 + \rho_{w2} \delta_{w2} \Delta w_2)$, где δ_{w1} и δ_{w2} соответствуют половинам толщин стыкующихся слоев.

η – коэффициент, определяемый по формуле

$$\eta = \frac{0,0024(E_0 - e_{н.отр})z_0}{R_{п.н}}, \quad (2.40)$$

где $e_{н.отр}$ – среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха периода месяцев с отрицательными среднемесячными температурами, Па [12].

ПМУ определяется для периода с отрицательными среднемесячными температурами следующим образом:

1. Для каждого слоя многослойной ОК по формуле (2.41) вычисляется значение комплекса $f_i(t_{м.у.})$, характеризующего температуру в ПМУ:

$$f_i(t_{м.у.}) = 5330 \frac{R_{о.п}(t_{в} - t_{н.отр})}{R_0^{усл}(e_{в} - e_{н.отр})} \cdot \frac{\mu_i}{\lambda_i}, \quad (2.41)$$

где $R_{о.п}$ – общее сопротивление паропрооницанию ОК, $м^2 \cdot ч \cdot Па / мг$, определяемое согласно п. 3.4; $R_0^{усл}$ – условное сопротивление теплопередаче однородной многослойной ОК, $(м^2 \cdot ^\circ C) / Вт$; $t_{н.отр}$ – средняя температура наружного воздуха для периода с отрицательными среднемесячными температурами, $^\circ C$; $e_{в}$ – то же, что и в формуле (2.37); $e_{н.отр}$ – то же, что и в формуле (2.40); λ_i, μ_i – расчетные коэффициенты теплопроводности, $Вт / (м \cdot ^\circ C)$ и паропрооницаемости, $мг / (м \cdot ч \cdot Па)$, материала соответствующего слоя.

2. По полученным значениям комплекса $f_i(t_{м.у.})$ по [11, табл. 11] определяются значения температур в ПМУ, $t_{м.у.}$, для каждого слоя многослойной ОК.

3. Вычисляются температуры на границах слоя, полученные расчетом по 0 (при средней температуре наружного воздуха периода с отрицательными среднемесячными температурами).

4. Составляется табл. 2.12, содержащая номер слоя, значения комплекса $f_i(t_{м.у.})$ и $t_{м.у.}$ для него, температуры на границах слоя. Результаты расчетов представляются в табл. 2.12.

5. Для определения слоя, в котором находится ПМУ, производится сравнение полученных значений $t_{м.у.}$ с температурами на границах слоев ОК. Если температура $t_{м.у.}$ в каком-то из слоев расположена в интервале

температур на границах этого слоя, то делается вывод о наличии в данном слое ПМУ и определяется координата плоскости – $x_{м.у}$ (в предположении линейного распределения температуры внутри слоя).

Таблица 2.12

Определение ПМУ

Номер слоя	$f_i (t_{м.у})$	$t_{м.у}$	t_x	Наличие ПМУ
1				
2				
3				
4				

6. Если в каждом из двух соседних слоев ОК отсутствует плоскость с температурой $t_{м.у}$, при этом у более холодного слоя $t_{м.у}$ выше его температуры, а у более теплого слоя $t_{м.у}$ ниже его температуры, то ПМУ находится на границе этих слоев.

Если внутри конструкции ПМУ отсутствует, то она расположена на наружной её поверхности.

Если при расчете обнаружилось две плоскости с $t_{м.у}$ в конструкции, то за плоскость максимального увлажнения принимается плоскость, расположенная в слое утеплителя.

Для многослойных ОК с выраженным теплоизоляционным слоем (термическое сопротивление теплоизоляционного слоя больше $2/3 R_0$) и наружным защитным слоем, коэффициент паропроницаемости материала которого меньше, чем у материала теплоизоляционного слоя, допускается принимать ПМУ на наружной границе утеплителя при условии выполнения неравенства:

$$\frac{\mu_{ут}}{\lambda_{ут}} > 2,$$

где $\lambda_{ут}$, $\mu_{ут}$ – расчетные коэффициенты теплопроводности, Вт/(м·°С) и паропроницаемости, мг/м·ч·Па, материала теплоизоляционного слоя.

Давление насыщенного водяного пара E , Па, при температуре от минус 40 до плюс 45 °С, определяется по формуле (6.4) или по приложению А, табл. А.8.

Сопротивление паропроницанию $R_{\Pi i}$, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$, однослойной или отдельного слоя многослойной ОК определяется по формуле

$$R_{\Pi i} = \frac{\delta_i}{\mu_i}, \quad (2.42)$$

где δ_i – толщина слоя ОК, м; μ_i – расчетный коэффициент паропроницаемости материала слоя ОК, $\text{мг} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$.

Сопротивление паропроницанию $R_{\Pi,о}$, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) / \text{мг}$, многослойной ОК (или ее части) равно сумме сопротивлений паропроницанию составляющих ее слоев:

$$R_{\Pi,о} = \sum R_{\Pi i}. \quad (2.43)$$

Сопротивление паропроницанию $R_{\Pi,о}$, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) / \text{мг}$, листовых материалов и тонких слоев пароизоляции следует принимать по [11].

Примечания

1. Сопротивление паропроницанию замкнутых воздушных прослоек в ОК следует принимать равным нулю, независимо от расположения и толщины этих прослоек.

2. Для обеспечения требуемого сопротивления паропроницанию ОК следует определять сопротивление паропроницанию $R_{\Pi,о}$ конструкции в пределах от внутренней поверхности до плоскости максимального увлажнения.

3. В помещениях с влажным или мокрым режимом следует предусматривать пароизоляцию теплоизолирующих уплотнителей сопряжений элементов ОК (мест примыкания заполнений проемов к стенам и т. п.) со стороны помещений; сопротивление паропроницанию в местах таких сопряжений проверяется из условия ограничения накопления влаги в сопряжениях за период с отрицательными среднемесячными температурами наружного воздуха на основании расчетов температурного и влажностного полей.

4. Температуру t_x , °С, ОК в плоскости, отстоящей от внутренней поверхности на расстоянии x , м, следует определять по формуле (4.1), подставляя в качестве t_H соответствующую температуру наружного воздуха.

2.6.3. Расчет конденсации влаги в толще ограждающей конструкции

Расчет влажностного режима ОК при стационарных условиях диффузии водяного пара проводится графическим методом для периодов с отрицательными и положительными температурами наружного воздуха.

Для выяснения вопроса, будет ли происходить в ОК конденсация влаги или нет, необходимо построить линию падения упругости водяного пара e и линию падения максимальной упругости водяного пара E от сопротивления паропроницанию $R_{п.о}$ (рис. 2.8).

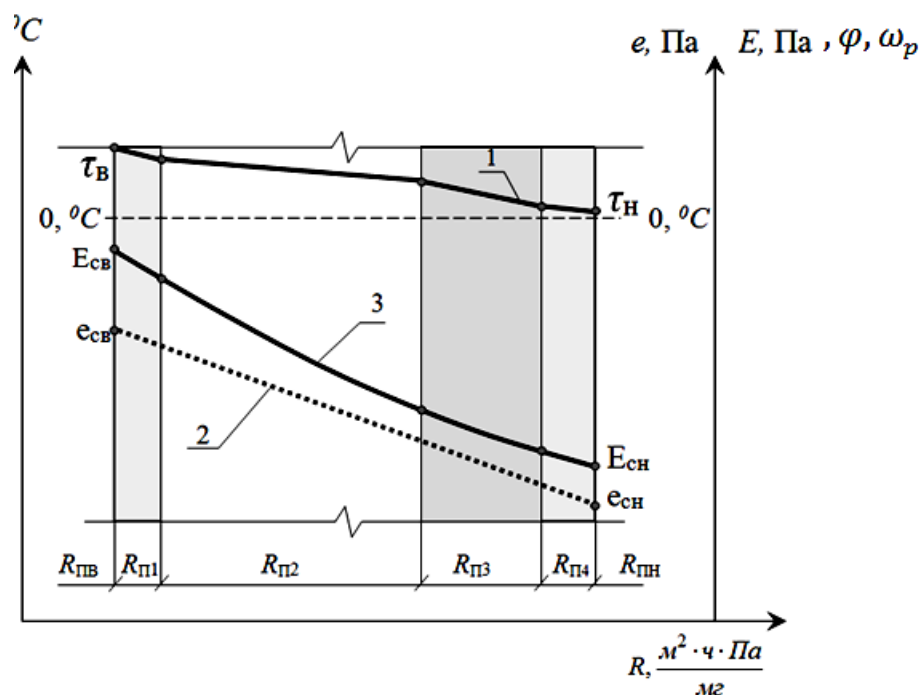


Рис. 2.8. Примерные графики $\tau(x)$ – (1), $e(R_n)$ – (2) и $E(R_n)$ – (3) ОК при отсутствии выпадения конденсата

Общее сопротивление паропроницанию ограждения $R_{п.о}$ определяется по формуле (2.43).

$$R_{п.о} = R_{ПВ} + \sum_{i=1}^n R_{ni} + R_{нн}. \quad (2.44)$$

Значение e_H принимается по [12, табл. 7.1] как среднее за соответствующий период года, e_B – вычисляется по формуле (2.35). Упругость водяного пара в любом сечении ОК e_x находится по формуле

$$e_x = e_B - (e_B - e_H) \frac{R_{ПВ-x}}{R_{п.о}}, \quad (2.45)$$

где $R_{ПВ-x}$ – сумма сопротивлений паропроницанию слоев ОК от внутренней поверхности до рассматриваемого сечения x .

Упругость водяного пара на внутренней $e_{св}$ и наружной $e_{сн}$ поверхностях ОК можно принять равными e_B и e_H соответственно. Далее эти точки соединяются на графике $e(R_n)$ прямой штриховой линией (рис. 2.9). Для графика $e(x)$ строится ломаная линия, так как для каждого характерного сечения ОК находится свое значение e_i .

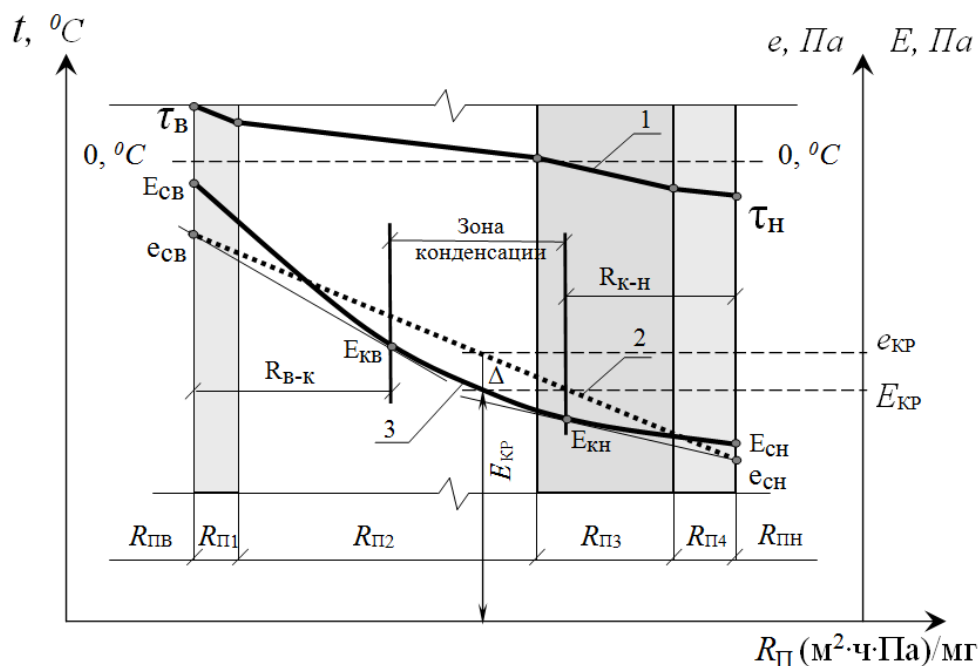


Рис. 2.9. Примерные графики изменения $\tau(x)$ – (1), $e(R_n)$ – (2) и $E(R_n)$ – (3) ОК при выпадении конденсата, Δ – максимальное отклонение значения $e(R_n)$ и $E(R_n)$ в зоне конденсации

Для построения линии падения максимальной упругости $E(R_n)$ сначала вычисляют температуры на границах и промежутках слоев ОК:

$$t_x = t_B - (t_B - t_H^{ср}) \frac{R_{B-x}}{R_0}, \quad (2.46)$$

где $t_H^{ср}$ – наружная средняя температура воздуха за соответствующий период года, °C.

По вычисленным температурам по формуле (2.36) или приложению А, табл. А.7 определяются значения максимальной упругости водяного пара $E(t_x)$ для каждого слоя ОК. Далее строится график $E(R_n)$ или $E(x)$. Если прямая $e_{св} - e_{сн}$ не пересекается с кривой $E(R_n)$, то конденсации влаги в ОК не будет.

Если же они пересекаются, то возможна конденсация паров влаги внутри ОК. В этом случае из точек $e_{св}$ и $e_{сн}$ проводятся касательные к линии E . Точки касания $E_{кв}$ и $E_{кн}$ выделяют зону конденсации влаги в ОК. Сопряженные точки $e_{св} - E_{кв} - E_{кн} - e_{сн}$ представляют собой кривую действительного падения упругости водяного пара в ОК.

При наличии зоны конденсации необходимо определить количество влаги, конденсирующейся в ОК при стационарных условиях диффузии водяного пара. Удельное количество пара (массовый поток) j_{m1} , (мг/м²·ч), поступающего к зоне конденсации из помещения, вычисляется по формуле

$$j_{m1} = \frac{|e_{св} - E_{кв}|}{\sum_{k=1}^{\Pi} R_{пв-к}}, \quad (2.47)$$

где $\sum_{i=1}^K R_{в-к}$ – сумма сопротивлений паропрооницанию отдельных слоев ОК от внутренней поверхности до левой границы зоны конденсации.

Удельное количество пара, уходящего из зоны конденсации наружу j_{m2} , вычисляется по формуле

$$j_{m2} = \frac{|E_{кн} - e_{сн}|}{\sum_{k=1}^{\Pi} R_{нк-н}}, \quad (2.48)$$

где $\sum_{k=1}^{\Pi} R_{нк-н}$ – сумма сопротивлений паропрооницанию отдельных слоев ОК от правой границы зоны конденсации до наружной поверхности.

Тогда удельное количество конденсирующейся влаги в ОК j_k будет равно:

при $E_{кн} > e_{сн}$

$$j_k = j_{m1} - j_{m2}, \quad (2.49)$$

при $E_{кн} < e_{сн}$

$$j_k = j_{m1} + j_{m2}. \quad (2.50)$$

Рассмотренный метод расчета влажностного режима ОК позволяет рассчитать также скорость просыхания (сушки) ОК после прекращения в нем конденсации пара в период с положительными температурами наружного воздуха. Упругость водяного пара в этом случае принимается равной

значению E_K при соответствующей средней температуре теплого периода года ($t_H^{cp} > 0$ °С). Величины j_{m_1} и j_{m_2} для периода просыхания определяются по формулам (2.48)–(2.49) и означают соответственно удельное количество влаги, удаляемой в сторону помещения и по направлению к наружной поверхности, так как $E_K > E_{KB} > e_{CB} > e_B$ и $E_K > E_{KH} > e_{CH} > e_H$.

Таким образом, процесс просыхания будет идти в обоих направлениях, однако необходимо учесть, что в формуле (2.48) e_{CB} и E_{KB} поменяются местами, а удельный массовый поток высыхания $j_{выс}$ ОК будет равен сумме потоков j_{m_1} и j_{m_2} :

$$j_{выс} = j_{m_1} + j_{m_2}, \quad (2.51)$$

$$j_{m_1} = \frac{|E_{KB} - e_{CB}|}{\sum_{i=1}^K R_{ПВ-К}}, \quad (2.52)$$

$$j_{m_2} = \frac{|E_{KH} - e_{CH}|}{\sum_{i=1}^{\Pi} R_{ПК-Н}}. \quad (2.53)$$

При $e_B > E_K > e_H$ высыхание будет идти только по направлению к наружной поверхности ОК и $j_{выс} = j_{m_2} - j_{m_1}$.

При $e_B < E_K < e_H$ высыхание будет идти только по направлению к внутренней поверхности ОК и $j_{выс} = j_{m_1} - j_{m_2}$.

Если $0 \leq j_K / j_{выс} \leq 1$, то годовой баланс влаги в ОК будет нормальным, если же $j_K / j_{выс} > 1$, то в ОК необходимо предусмотреть дополнительный пароизоляционный слой, устанавливаемый обычно с внутренней стороны ОК.

Соотношение удельных потоков $j_K / j_{выс}$ фактически выражает соотношение удельных скоростей процессов сорбции и десорбции влаги (сушки) в ОК. Период конденсации влаги в ОК вычисляется при температуре $t_H^{cp} < 0$ °С. Зная скорости и периоды конденсации и удаления влаги (при $t_H^{cp} > 0$ °С), можно просчитать количество влаги, содержащейся в ОК, и требуемый период времени для ее удаления.

Вопросы для самопроверки

1. Как определить условия эксплуатации ОК?
2. Что такое ГСОП? Каковы формула расчета для ГСОП и её единица измерения?
3. Какие требования предъявляются к тепловой защите зданий?
4. Какая существует последовательность проверки поэлементных требований к тепловой защите здания?
5. Что такое термическое сопротивление слоя, конструкции? Представьте формулу расчета для данных величин и их единицу измерения.
6. Чем сопротивление теплопередаче отличается от термического сопротивления?
7. Что показывает коэффициент теплопроводности? Какова его единица измерения?
8. Что такое коэффициент теплотехнической однородности? В каких пределах он изменяется?
9. Что такое инфильтрация/эксфильтрация?
10. Зачем необходимо учитывать фильтрацию воздуха через ограждение?
11. Как изменяется поперечная фильтрация воздуха при увеличении высоты здания?
12. Что такое воздухопроницаемость ОК? Какова единица измерения данной величины?
13. Какое требование должно выполняться при проверке ограждения на воздухопроницаемость?
14. Как найти сопротивление воздухопроницанию ОК? Какова единица измерения данной величины?
15. Как изменится температура на внутренней поверхности, если слой изоляции установить не снаружи, а изнутри?
16. Как по температурному полю определить теплоизоляционный слой?
17. Изменяется ли градиент температуры в пределах одного слоя?
18. Равны ли градиенты температуры для разных слоев многослойной ОК?
19. Изменяется ли удельный тепловой поток по толщине однослойной и многослойной ОК?
20. Как должен выглядеть график температуры по толщине стены в масштабе сопротивлений теплопередаче?
21. Как выглядит температурное поле при наличии инфильтрации и эксфильтрации?
22. В каких случаях выполняется проверка на теплоустойчивость ОК?

23. Какое требование должно выполняться при проверке ОК на теплоустойчивость?

24. Что показывает коэффициент теплоусвоения материала? Какова единица измерения данной величины?

25. Как определить тепловую инерцию ОК? Какова единица измерения данной величины?

26. Как выглядит схема колебания температуры в толще ОК?

27. Что такое относительная влажность воздуха? Каковы формула и единица измерения данной величины?

28. Что такое температура точки росы? Как её определить?

29. Как изменится относительная влажность при колебании температуры воздуха?

30. Как изменится температура точки росы при увеличении температуры воздуха при постоянной ϕ_v ?

31. Как изменится температура точки росы при понижении ϕ_v при постоянной температуре воздуха?

32. Что такое паропроницаемость?

33. Что показывает коэффициент паропроницаемости? Какова единица измерения данной величины?

34. Как найти сопротивление паропроницаемости? Какова единица измерения данной величины?

35. Какое требование должно выполняться для защиты ОК от переувлажнения?

36. Какие требуемые сопротивления паропроницаемости Вам известны?

37. Какая существует последовательность расчета конденсации влаги в толще ОК?

38. Как определить зону конденсации в ограждении?

39. Как определить количество конденсируемой влаги в ОК за зимний период?

40. Как определить количество удаляемой влаги из ОК за летний период?

41. Какое условие при расчете конденсации влаги в толще ОК должно выполняться?

42. Каким образом можно уменьшить/исключить конденсацию влаги в ОК?

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1

Теплотехнические показатели строительных материалов и изделий

Материал (номер соответствует прил. Т СП 50.13330.2012 [11])	Характеристики материала в сухом состоянии			Расчетные характеристики материала (при условиях эксплуатации ОК А или Б)						
	Плотность ρ_0 , кг/м ³	удельная теплоемкость c_0 , кДж/(кг·°С)	Теплопро- водности λ_0 , Вт/(м·°С)	Влажность w , %		Теплопро- водность λ , Вт/(м·°С)		Тепло- усвоение s_2 , Вт/(м ² ·°С)		Паропро- ницаемость μ , мг/(м·ч·Па)
				А	Б	А	Б	А	Б	А, Б
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Теплоизоляционные материалы										
8. Плиты из пенополи- стирола	25–30	1,34	0,036	2	10	0,038	0,044	0,34	0,41	0,05
17. Пенополиуретан	80	1,47	0,041	2	5	0,042	0,05	0,62	0,70	0,05
27. Плиты минерало- ватные из каменного волокна	80–125	0,84	0,036	2	5	0,042	0,045	0,53	0,59	0,32
28. То же	40–60	0,84	0,035	2	5	0,041	0,044	0,37	0,41	0,35
31. Плиты из стеклянного штапельного волокна	75	0,84	0,04	2	5	0,042	0,047	0,46	0,52	0,5
32. То же	60	0,84	0,038	2	5	0,04	0,045	0,4	0,45	0,51
Конструкционные и конструкционно-теплоизоляционные материалы										
<i>Бетоны на искусственных пористых заполнителях</i>										
108. Керамзито-бетон на керамзитовом песке	1200	0,84	0,36	5	10	0,44	0,52	6,36	7,57	0,11
109. То же	1000	0,84	0,27	5	10	0,33	0,41	5,03	6,13	0,14
<i>Бетоны особо легкие на пористых заполнителях и ячеистые</i>										
156. Полистиролбетон на портландцементе	600	1,06	0,145	4	8	0,175	0,20	3,07	3,49	0,068

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
171. Газо- и пенобетон на цементном вяжущем	600	0,84	0,14	8	12	0,22	0,26	3,36	3,91	0,17
172. То же	400	0,84	0,11	8	12	0,14	0,15	2,19	2,42	0,23
<i>Кирпичная кладка из сплошного кирпича</i>										
180. Глиняного обыкновенного на цементно-песчаном растворе	1800	0,88	0,56	1	2	0,7	0,81	9,2	10,12	0,11
181. Глиняного обыкновенного на цементно-шлаковом растворе	1700	0,88	0,52	1,5	3	0,64	0,76	8,64	9,7	0,12
182. Глиняного обыкновенного на цементно-перлитовом растворе	1600	0,88	0,47	2	4	0,58	0,7	8,08	9,23	0,15
183. Силикатного на цементно-песчаном растворе	1800	0,88	0,7	2	4	0,76	0,87	9,77	10,9	0,11
<i>Кирпичная кладка из пустотного кирпича</i>										
188. Керамического пустотного на цементно-песчаном растворе	1400	0,88	0,41	1	2	0,52	0,58	7,01	7,56	0,16
Конструкционные материалы										
201. Раствор цементно-песчаный	1800	0,84	0,58	2	4	0,76	0,93	9,6	11,09	0,09
202. Раствор сложный (песок, известь, цемент)	1700	0,84	0,52	2	4	0,7	0,87	8,95	10,42	0,098
203. Раствор известково-песчаный	1600	0,84	0,47	2	4	0,7	0,81	8,69	9,76	0,12
<i>Примечания:</i>										
1. Расчетные значения коэффициента теплоусвоения (при периоде 24 ч) материала в конструкции вычислены по формуле $s = 0,27 \sqrt{\lambda \rho_0 (c_0 + 0,0419w)}$, где λ , ρ_0 , c_0 , w принимают по соответствующим графам настоящего приложения.										
2. Характеристики материалов в сухом состоянии приведены при массовом отношении влаги в материале w , %, равном нулю.										

Таблица А.2

Нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ОК

Здания и помещения	Нормируемый температурный перепад Δt^H , °С, для		
	наружных стен	покрытий и чердачных перекрытий	перекрытий над проездами, подвалами и подпольями
1. Жилые, лечебно-профилактические и детские учреждения, школы, интернаты	4,0	3,0	2,0
2. Общественные, кроме указанных в п.1, административные и бытовые, за исключением помещений с влажным или мокрым режимом	4,5	4,0	2,5
3. Производственные с сухим и нормальным режимами	$t_B - t_p^*$, но не более 7	$0,8(t_B - t_p)$, но не более 6	2,5
4. Производственные и другие помещения с влажным или мокрым режимами	$t_B - t_p$	$0,8(t_B - t_p)$	2,5
5. Производственные здания со значительными избытками явной теплоты (более 23 Вт/м^3) и расчетной относительной влажностью внутреннего воздуха не более 50 %	12	12	2,5
* <i>Примечание – t_p – температура точки росы, °С, при расчетной температуре и относительной влажности внутреннего воздуха.</i>			

Таблица А.3

Коэффициенты теплоотдачи внутренней поверхности ОК

Внутренняя поверхность ОК	Коэффициент теплоотдачи, $\alpha_{в},$ Вт/(м ² ·°С)
1. Стен, полов, гладких потолков, потолков с выступающими ребрами при отношении высоты h ребер к расстоянию a , между гранями соседних ребер $h/a \leq 0,3$	8,7
2. Потолков с выступающими ребрами при отношении $h/a > 0,3$	7,6
3. Окон	8,0
4. Зенитных фонарей	9,9
<p><i>Примечание – Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{в}$ внутренней поверхности ОК животноводческих и птицеводческих зданий следует принимать в соответствии с СП 106.13330.</i></p>	

Таблица А.4

Коэффициенты теплоотдачи наружной поверхности ОК

Наружная поверхность ОК	Коэффициент теплоотдачи для зимних условий, $\alpha_{\text{н}},$ Вт/(м ² ·°С)
1. Наружных стен, покрытий, перекрытий над проездами и над холодными (без ограждающих стенок) подпольями в Северной строительной-климатической зоне	23
2. Перекрытий над холодными подвалами, сообщающимися с наружным воздухом, перекрытий над холодными (с ограждающими стенками) подпольями и холодными этажами в Северной строительной-климатической зоне	17
3. Перекрытий чердачных и над неотапливаемыми подвалами со световыми проемами в стенах, а также наружных стен с воздушной прослойкой, вентилируемой наружным воздухом	12
4. Перекрытий над неотапливаемыми подвалами и техническими подпольями, не вентилируемых наружным воздухом	6

Таблица А.5

Нормативная воздухопроницаемость ОК

Внутренняя поверхность ОК	Поперечная воздухопроницаемость, G_H , кг/(м ² ·ч) не более
1. Наружные стены, перекрытия и покрытия жилых, общественных, административных и бытовых зданий и помещений	0,5
2. Наружные стены, перекрытия и покрытия производственных зданий и помещений	1,0
3. Стыки между панелями наружных стен: а) жилых зданий; б) производственных зданий	0,5* 1,0*
4. Входные двери в квартиры	1,5
5. Входные двери в жилые, общественные и бытовые здания	7,0
6. Окна и балконные двери жилых, общественных и бытовых зданий и помещений с деревянными переплетами; окна и фонари производственных зданий с кондиционированием воздуха	6,0
7. Окна и балконные двери жилых, общественных и бытовых зданий и помещений с пластмассовыми или алюминиевыми переплетами	5,0
8. Окна, двери и ворота производственных зданий	8,0
9. Фонари производственных зданий	10,0
10. Окна и фонари производственных зданий с кондиционированием воздуха	6,0
* в кг/(м·ч).	

Таблица А.6

Сопротивление воздухопроницанию слоев ОК

Материалы и конструкции	Толщина слоя, мм	Сопротивление воздухопроницанию R_u , $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{кг}$
1	2	3
1. Бетон сплошной (без швов)	100	20000
2. Газосиликат сплошной (без швов)	140	21
3. Известняк-ракушечник	500	6
4. Картон строительный (без швов)	1,3	64
5. Кирпичная кладка из сплошного кирпича на цементно-песчаном растворе толщиной в один кирпич и более	250 и более	18
6. Кирпичная кладка из сплошного кирпича на цементно-шлаковом растворе толщиной в полкирпича	120	1
7. Кладка кирпича керамического пустотного на цементно-песчаном растворе толщиной в полкирпича	–	2
8. Кладка из легкобетонных камней на цементно-песчаном растворе	400	13
9. Листы асбестоцементные с заделкой швов	6	200
10. Обои бумажные обычные	–	20
11. Обшивка из обрезных досок, соединенных впритык или вчетверть	20–25	0,1
12. Обшивка из обрезных досок, соединенных в шпунт	20–25	1,5
13. Обшивка из досок двойная с прокладкой между обшивками строительной бумаги	50	100
14. Обшивка из фибролита или из древесноволокнистых бесцементных мягких плит с заделкой швов	15–70	2,5
15. Обшивка из фибролита или из древесноволокнистых бесцементных мягких плит без заделки швов	15–70	0,5

Окончание табл. А.6

1	2	3
16. Обшивка из жестких древесно-волокнистых листов с заделкой швов	10	3,3
17. Обшивка из гипсовой сухой штукатурки с заделкой швов	10	20
18. Пенобетон автоклавный (без швов)	100	2000
19. Пенобетон неавтоклавный (без швов)	100	200
20. Пенополистирол	50–100	80
21. Пеностекло сплошное (без швов)	120	Более 2000
22. Плиты минераловатные жесткие	50	2
23. Рубероид	1,5	Воздухонепроницаем
24. Толь	1,5	490
25. Фанера клееная (без швов)	3–4	2900
26. Шлакобетон сплошной (без швов)	100	14
27. Штукатурка		
цементно-песчаным раствором по каменной или кирпичной кладке	15	373
известковая по каменной или кирпичной кладке	15	142
известково-гипсовая по дереву (по драни)	20	17
28. Керамзитобетон плотностью		
1000 кг/м ³	250–400	53–80
1100–1300 кг/м ³	250–450	390 –590
<p><i>Примечания:</i></p> <p>1. Для кладки из кирпича и камней с расшивкой швов на наружной поверхности приведенное в настоящей таблице сопротивление воздухопроницанию следует увеличивать на 20 (м²·ч·Па)/кг.</p> <p>2. Сопротивление воздухопроницанию воздушных прослоек и слоев ограждающих конструкций из сыпучих (шлака, керамзита, пемзы и т. п.), рыхлых и волокнистых (минеральной ваты, соломы, стружки и т. п.) материалов следует принимать равным нулю независимо от толщины слоя.</p> <p>3. Для материалов и конструкций, не указанных в настоящей таблице, сопротивление воздухопроницанию следует определять экспериментально.</p>		

Таблица А.7

Максимальные и средние значения суммарной солнечной радиации
(прямая и рассеянная) при ясном небе в июле

Градусы с.ш.	Ориентация поверхности	Суммарная солнечная радиация, Вт/м ²	
		максимальная I_{\max}	средняя $I_{\text{ср}}$
36	Горизонтальная	1000	344
	Западная	712	162
38	Горизонтальная	942	334
	Западная	721	163
40	Горизонтальная	928	333
	Западная	740	169
42	Горизонтальная	915	334
	Западная	748	175
44	Горизонтальная	894	331
	Западная	756	180
46	Горизонтальная	880	329
	Западная	752	182
48	Горизонтальная	866	328
	Западная	764	184
50	Горизонтальная	859	328
	Западная	774	187
52	Горизонтальная	852	329
	Западная	781	194
54	Горизонтальная	838	329
	Западная	788	200
56	Горизонтальная	817	327
	Западная	786	201

Таблица А.8

Значения давления насыщенного водяного пара E
при нормальном барометрическом давлении

А. Для температур от 0 до минус 41 °С

$t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{Па}$	$t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{Па}$	$t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{Па}$	$t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{Па}$	$t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{Па}$
0,0	611	-5,4	412	-10,6	277	-16	181	-23	101
-0,2	602	-5,6	406	-10,8	273	-16,2	178	-23,5	97
-0,4	593	-5,8	400	-11	269	-16,4	175	-24	93
-0,6	585	-6	394	-11,2	265	-16,6	172	-24,5	89
-0,8	577	-6,2	388	-11,4	261	-16,8	170	-25	85
-1,0	568	-6,4	382	-11,6	257	-17	167	-25,5	82
-1,2	560	-6,6	376	-11,8	253	-17,2	164	-26	78
-1,4	552	-6,8	371	-12	249	-17,4	162	-26,5	75
-1,6	544	-7	365	-12,2	245	-17,6	159	-27	72
-1,8	536	-7,2	360	-12,4	241	-17,8	156	-27,5	69
-2,0	529	-7,4	354	-12,6	237	-18	154	-28	66
-2,2	521	-7,6	349	-12,8	234	-18,2	151	-28,5	63
-2,4	513	-7,8	344	-13	230	-18,4	149	-29	60
-2,6	506	-8	339	-13,2	226	-18,6	146	-29,5	57
-2,8	499	-8,2	334	-13,4	223	-18,8	144	-29,8	56
-3,0	491	-8,4	329	-13,6	219	-19	142	-30	55
-3,2	484	-8,6	324	-13,8	216	-19,2	139	-31	50
-3,4	477	-8,8	319	-14	213	-19,4	137	-32	46
-3,6	470	-9	314	-14,2	209	-19,6	135	-33	42
-3,8	463	-9,2	309	-14,4	206	-19,8	133	-34	38
-4,0	457	-9,4	304	-14,6	203	-19,9	132	-35	35
-4,2	450	-9,6	300	-14,8	199	-20	130	-36	31
-4,4	443	-9,8	295	-15	196	-20,5	125	-37	29
-4,6	437	-9,9	293	-15,2	193	-21	120	-38	26
-4,8	431	-10	291	-15,4	190	-21,5	115	-39	24
-5,0	424	-10,2	286	-15,6	187	-22	110	-40	21
-5,2	418	-10,4	282	-15,8	184	-22,5	106	-41	19

Б. Для температур от 0 до 50 °С

Температура, $t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{Па}$					
	Десятые доли градуса					
	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8
0	611	619	628	633	637	646
1	656	665	675	679	684	694
2	704	714	724	729	734	744
3	755	766	776	782	787	798
4	809	821	832	838	844	856
5	867	879	892	898	904	916
6	929	942	955	961	968	981
7	995	1008	1022	1029	1036	1050
8	1064	1079	1094	1101	1108	1123
9	1139	1154	1169	1177	1185	1201
10	1217	1233	1250	1258	1267	1284
11	1301	1318	1335	1344	1353	1371
12	1389	1407	1426	1435	1445	1464
13	1483	1502	1522	1532	1542	1562
14	1583	1603	1624	1634	1645	1666
15	1688	1710	1732	1743	1754	1777
16	1800	1823	1846	1858	1870	1894
17	1918	1942	1967	1979	1992	2017
18	2043	2069	2095	2108	2121	2148
19	2175	2202	2230	2244	2258	2286
20	2315	2344	2373	2388	2402	2432
21	2463	2493	2524	2540	2555	2587
22	2619	2651	2683	2700	2716	2750
23	2783	2817	2852	2869	2887	2922
24	2957	2993	3030	3048	3066	3103
25	3141	3179	3217	3237	3256	3295

Окончание табл. А.8

Температура, $t, ^\circ\text{C}$	$E, \text{Па}$					
	Десятые доли градуса					
	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8
26	3335	3375	3415	3435	3456	3497
27	3539	3581	3623	3645	3667	3710
28	3754	3798	3843	3866	3889	3934
29	3981	4027	4075	4098	4122	4171
30	4219	4269	4318	4343	4369	4419
31	4471	4523	4575	4601	4628	4681
32	4735	4790	4845	4873	4901	4957
33	5014	5071	5129	5158	5187	5247
34	5306	5367	5427	5458	5489	5551
35	5614	5677	5741	5774	5806	5871
36	5937	6004	6071	6105	6139	6208
37	6277	6347	6418	6453	6489	6561
38	6634	6707	6781	6819	6856	6932
39	7008	7086	7163	7203	7242	7321
40	7402	7482	7564	7605	7647	7730
41	7814	7899	7985	8028	8071	8159
42	8247	8336	8426	8471	8516	8608
43	8700	8794	8888	8935	8983	9079
44	9176	9274	9372	9422	9472	9572
45	9674	9776	9880	9932	9984	10090
46	10196	10303	10411	10466	10521	10631
47	10742	10855	10968	11025	11083	11198
48	11314	11432	11551	11610	11670	11791
49	11913	12036	12160	12223	12286	12412
50	12540	12668	12798	12864	12929	13061

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) / В. Н. Богословский. – 3-е изд. – Санкт-Петербург : Издательство «АВОК Северо-Запад», 2006. – 400 с.
2. Богословский, В. Н. Тепловой режим здания / В. Н. Богословский. – Москва : Стройиздат, 1979. – 248 с.
3. Ильинский, В. М. Строительная теплофизика (ограждающие конструкции и микроклимат зданий) : учебное пособие / В. М. Ильинский. – Москва : Высшая школа, 1974. – 320 с.
4. Малявина, Е. Г. Теплофизика зданий : учебное пособие / Е. Г. Малявина. – Москва : Издательство АСВ, 2013. – 144 с.
5. Пособие по проектированию ограждающих конструкций зданий. НИИСФ Госстроя СССР. – Москва : Стройиздат, 1967. – 444 с.
6. Ушков, Ф. В. Теплопередача ограждающих конструкций при фильтрации воздуха / Ф. В. Ушков. – Москва : Стройиздат, 1969. – 144 с.
7. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К. Ф. Фокин. – Москва : АВОК-ПРЕСС, 2006. – 251 с.
8. ГОСТ 26253-2014. Здания и сооружения. Метод определения теплоустойчивости ограждающих конструкций. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 11 с.
9. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 15 с.
10. ГОСТ 31167-2009. Здания и сооружения. Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 20 с.
11. СП 50.13330.2024. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – Москва : Стандартинформ, 2024. – 101 с.
12. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 154 с.
13. СП 230.1325800.2015. Конструкции ограждающих зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 108 с.
14. СП 345.1325800.2017. Здания жилые и общественные. Правила проектирования тепловой защиты. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 46 с.

15. Блази, В. Справочник проектировщика. Строительная физика / В. Блази; под редакцией и с дополнениями А. К. Соловьева. – Москва : Техносфера, 2005. – 480 с.

16. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. – Санкт-Петербург : ПК ТОР, 2009. – 339 с.

17. Рот, А. В. Комплексные теплотехнические расчеты ограждений зданий : учебное пособие / А. В. Рот. – Ленинград : Стройиздат, 1970. – 112 с.

Учебное издание

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ
И ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ**

Учебно-методическое пособие

Составители: **Садыков** Ренат Ахатович,
Осипов Айрат Линарович,
Ахмеров Артём Владимирович,
Мухаметзянова Аида Камилевна

Кафедра энергообеспечения предприятий,
строительства зданий и сооружений КГЭУ

Редактор *М.С. Беркутова*
Компьютерная верстка *Т. И. Лунченковой*

Подписано в печать 22.12.2025.
Формат 60×84/16. Усл. печ. л.5,11. Уч.-изд. л. 2,54.
Заказ № 612/эл.

ФГБОУ ВО «КГЭУ».
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51