



Уральский
федеральный
университет

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Строительный институт

**Ю. И. ТОЛСТОВА
Р. Н. ШУМИЛОВ**

ОСНОВЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ

Учебное пособие



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б. Н. ЕЛЬЦИНА

Ю. И. Толстова, Р. Н. Шумилов

ОСНОВЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ

Рекомендовано методическим советом УрФУ
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по программе бакалавриата
по направлению подготовки 270800 «Строительство»

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2014

УДК 697(075.8)
Т 529

Рецензенты:

кафедра «Теплогазоснабжение и вентиляция»
Казанского государственного архитектурно-строительного университета
(заведующий кафедрой доктор технических наук,
профессор В. Н. Посохин);

Н. Г. Козловская, главный специалист по отоплению и вентиляции
ООО «Группа предприятий Корус»

Научный редактор
доктор технических наук, профессор А. С. Носков

Толстова, Ю. И.

Т 529 Основы строительной теплофизики : учеб. пособие /
Ю. И. Толстова, Р. Н. Шумилов ; М-во образования и науки
Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т ; [науч. ред. А. С. Носков]. —
Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. — 104 с.

ISBN 978-5-7996-1131-6

В учебном пособии изложены основные принципы теплопередачи и массообмена, используемые при расчетах теплозащиты зданий. Рассмотрены вопросы теплоустойчивости помещения, влажностного режима и воздухопроницаемости. Приведены методические рекомендации по расчету теплового, влажностного и воздушного режимов.

Для студентов, изучающих дисциплину «Основы обеспечения микроклимата зданий, включая теплофизику здания», а также для слушателей курсов повышения квалификации и переподготовки специалистов по направлению «Энергосбережение».

УДК 697(075.8)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предмет изучения строительной теплофизики — тепловой, влажностный и воздушный режимы здания. Знание ее необходимо для рационального проектирования наружных ограждающих конструкций зданий.

Целью преподавания этого раздела является изучение физических основ и методов расчета процессов, происходящих в наружных ограждениях при эксплуатации зданий. Основное внимание уделяется тепловому режиму, закономерности которого позволяют рассматривать влажностный и воздушный режимы с использованием методов аналогии.

Связь с другими дисциплинами специальности заключается в применении знаний, полученных при изучении тепло- и массообмена, физики, механики жидкости и газа.

В результате усвоения раздела «Строительная теплофизика» студент должен понимать закономерности формирования тепло-влажностного режима помещения, знать основные расчетные зависимости, описывающие эти процессы, и уметь использовать их для практических инженерных расчетов.

В соответствии с учебным планом специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция» направления 270800 «Строительство» раздел входит в состав дисциплины «Основы обеспечения микроклимата зданий, включая теплофизику здания» и является базой для освоения таких дисциплин, как «Отопление» и «Теплоснабжение».

В настоящее время оптимизация теплозащиты зданий — важное направление энергосбережения. В связи с этим основные показатели уровня теплозащиты устанавливаются нормативными документами, законами и стандартами, разрабатываемыми специалистами и утверждаемыми министерствами, ведомствами и государственными органами.

1. ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОЗАЩИТЫ

Вся история человечества с момента выделения из животного мира человека разумного — это история поисков путей защиты от неблагоприятных воздействий окружающей среды, от пещеры — к современному зданию с высоким уровнем комфорта.

Основное назначение здания состоит в защите находящихся в нем людей от неблагоприятных воздействий природы. Проблемы теплозащиты являются важными при проектировании и строительстве зданий и сооружений.

Внутренний климат (тепловой режим) помещения формируется в результате внутренних и внешних воздействий. Схема таких воздействий на здание приведена на рис. 1.1.

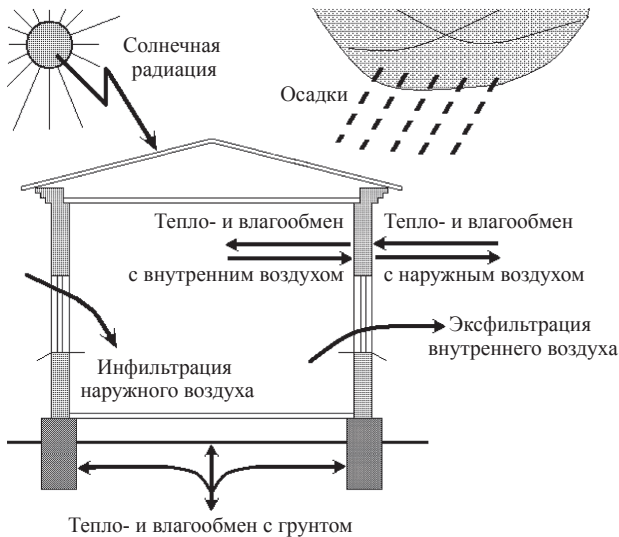


Рис. 1.1. Схема внутренних и внешних воздействий на здание

Внутренний климат помещения характеризуется определенным сочетанием температуры воздуха t , его влажности ϕ и подвижности v . Параметры внутреннего воздуха задают гигиенисты и технологи.

Гигиенические нормативы, включающие значения основных параметров воздуха, получены на основании исследований самочувствия людей в климатических камерах и обобщения полученных данных. Параметры внутреннего воздуха приведены в ГОСТ 12.1.005-88* «Общие требования к воздуху рабочей зоны», а также в главах строительных норм и правил (СНиП) для зданий и помещений различного назначения. Отметим, что рабочей зоной называют пространство, ограниченное по высоте 2 м над уровнем пола или площадки, на которых находятся места постоянного или непостоянного пребывания работающих или находящихся там людей.

Наряду с гигиеническими нормативами параметры внутреннего воздуха могут быть заданы технологами с учетом требований технологического процесса. Схема разработки теплового режима помещения приведена на рис. 1.2.

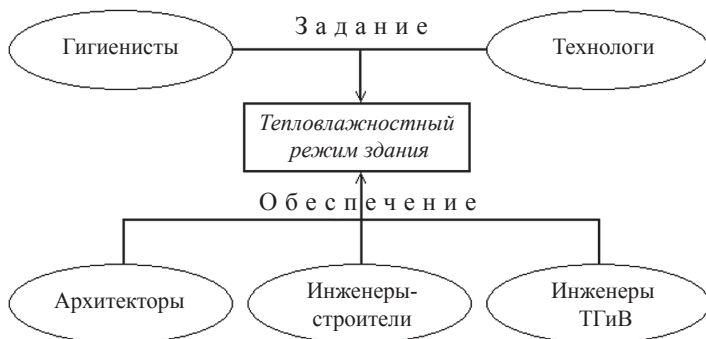


Рис. 1.2. Схема разработки теплового режима здания

Роль строительной теплофизики особенно значительна для климатических условий России, где продолжительность отопительного периода составляет для большинства регионов более 200 суток. Следует учесть также, что на выработку тепловой энергии

расходуется более 60 % добываемого топлива, а на отопление зданий используется более трети производимого тепла. Необходимость снижения потерь тепла зданиями и мощности систем отопления, компенсирующих эти теплотери, вызвана также экологическими проблемами. Особую озабоченность вызывает загрязнение атмосферного воздуха при сжигании топлива.

При взаимодействии наружных ограждений с внутренней и внешней средой здания происходят процессы тепло- и массообмена. В основе расчетов этих процессов применяются закономерности стационарной теплопередачи [5, 7, 8].

2. СТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

2.1. Общие понятия

Стационарная теплопередача — это такой вид передачи тепла, при котором температура и тепловой поток не изменяются во времени и направлении. При взаимодействии наружных ограждений с внутренней и внешней средой происходят процессы тепло- и массообмена. Тепловая энергия и энергия вообще рассматриваются как мера количества движения материи. Перенос теплоты осуществляется с помощью материальных носителей — частиц (атомы, молекулы, электроны, ионы). Перемещение тепла в какой-либо среде возможно только при различии температур в отдельных областях или объемах, при этом перемещение тепла происходит в сторону понижения температуры.

Современная наука выделяет два вида передачи тепла:

- изменение энергии молекул (атомов) при их взаимодействии;
- изменение энергии за счет излучения или поглощения электромагнитных волн.

В зависимости от способа передачи тепла различают такие виды теплопередачи, как теплопроводность, конвекция и излучение (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Виды теплопередачи

2.2. Теплопроводность

Теплопроводность — это передача тепла между частицами или элементами среды при непосредственном соприкосновении. В чистом виде теплопроводность наблюдается в твердых и сыпучих телах.

При теплопроводности перенос теплоты осуществляется в результате непосредственной передачи энергии от частиц, обладающих большей энергией, к частицам с меньшей энергией. Большинство строительных материалов относятся к твердым телам. Поэтому при теплотехнических расчетах можно считать, что в них распространение тепла происходит только путем теплопроводности. Следовательно, можем воспользоваться законом Фурье, согласно которому плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры.

Рассмотрим плоскую однослойную стенку (рис. 2.2). Введем условные обозначения в соответствии с принятыми в строительной теплотехнике [5]. Обозначим буквой t температуру воздуха, а буквой τ — температуры поверхностей. Применим индексы: «в» — внутренний; «н» — наружный. Получим $t_{\text{в}}$, $t_{\text{н}}$ — температуры внутреннего и наружного воздуха; $\tau_{\text{в}}$ и $\tau_{\text{н}}$ — температуры внутренней и наружной поверхностей.

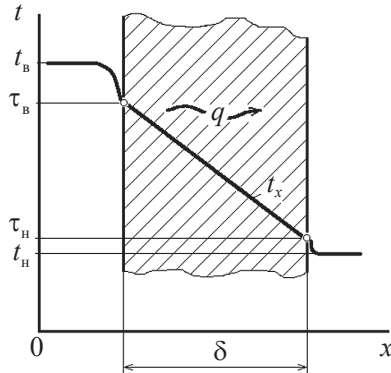


Рис. 2.2. Расчетная схема наружного ограждения

Рассмотрим уравнение Фурье для одномерного температурного поля, когда перенос тепла происходит только в направлении, перпендикулярном поверхности. Уравнение Фурье для данного случая имеет вид

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}, \quad (2.1)$$

где q — удельный тепловой поток, Вт/м²; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °С); dt/dx — изменение температуры в направлении теплового потока, °С/м.

Знак «минус» в правой части уравнения указывает на то, что перенос тепла происходит в направлении, противоположном понижению температуры. В конечных разностях уравнение Фурье для одномерного температурного поля для плоской стенки представим как

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (\tau_{\text{в}} - \tau_{\text{н}}). \quad (2.2)$$

Уравнение (2.2) представляет собой уравнение прямой, поэтому распределение температур при стационарных условиях теплопередачи имеет линейный характер.

Коэффициент теплопроводности зависит от вида материала, плотности, влажности и температуры. Для строительных материалов значения коэффициентов теплопроводности изменяются в широких пределах [1] — от $\lambda = 0,035$ Вт/(м · °С) для пенополиуретана до $\lambda = 3$ Вт/(м · °С) для гранита. Металлы имеют еще большие величины коэффициентов теплопроводности, например, коэффициент теплопроводности стали $\lambda = 50$ Вт/(м · °С).

Теплопроводность строительных материалов существенно зависит от их влажности, которая формируется в результате воздействия влажностного режима внутреннего и наружного воздуха. В теплотехнических расчетах коэффициент теплопроводности следует принимать по данным СНиП [Там же] в зависимости от условий эксплуатации. В свою очередь, условия эксплуатации

зависят от влажностного режима помещения и от зоны влажности по карте районирования [1].

Влажностный режим помещений принимается в зависимости от назначения зданий и помещений с учетом вида технологического процесса.

2.3. Конвекция

Конвекцией называется перенос теплоты при движении жидкости или газа у нагретой или охлажденной поверхности. Различают естественную и вынужденную конвекцию.

Поскольку в холодный период года температура внутреннего воздуха t_v выше температуры наружного воздуха t_n , то между температурами внутренней и наружной поверхностей наружного ограждения имеет место соотношение $\tau_v > \tau_n$. Следовательно, $t_v > \tau_v$ и $\tau_n > t_n$. Таким образом, имеем поверхности, температура которых отличается от температуры окружающего воздуха. Это и является условием возникновения конвекции вблизи данных поверхностей. При этом перемещение воздуха происходит за счет разности плотностей холодного и более нагретого воздуха. Зависимость плотности воздуха ρ от его температуры можно представить приближенной формулой

$$\rho = 353/(273 + t),$$

где ρ — плотность воздуха, кг/м^3 ; t — температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

Это означает, что частицы воздуха большей температуры имеют меньшую плотность и стремятся занять верхнее положение, частицы с меньшей температурой имеют большую плотность и опускаются вниз под действием силы тяжести. Такая конвекция называется естественной.

Рассматривая условия теплообмена у наружной поверхности, можно заметить, что в дополнение к естественной конвекции действует и конвекция вынужденная, вызванная воздействием ветра.

Количество тепла, передаваемого путем конвекции, определяется с помощью формулы Ньютона:

$$q_k = \alpha_k \Delta t, \quad (2.3)$$

где q_k — плотность конвективного теплового потока, Вт/м²; α_k — коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м² · °С); Δt — разность температур поверхности и воздуха, °С.

С учетом уравнения (2.3) для внутренней поверхности имеем

$$q_{кв} = \alpha_{кв} (t_b - \tau_b),$$

а для наружной поверхности

$$q_{кн} = \alpha_{кн} \cdot (\tau_n - t_n).$$

Значения коэффициентов конвективного теплообмена зависят от многих факторов. При естественной конвекции α_k зависит от физических констант воздуха, разности температур, геометрического размера поверхности. Методы определения коэффициентов конвективного теплообмена α_k рассматриваются в теории тепло- и массообмена [10, 11].

Анализ рассматриваемой задачи показал, что для условий теплопередачи через наружное ограждение в холодный период года можно пренебречь влиянием изменения физических констант и для практических расчетов можно воспользоваться выражением

$$\alpha_k^{ест} = m \cdot \Delta t^{1/3}. \quad (2.4)$$

Здесь m — коэффициент, зависящий от положения ограждения по отношению к горизонту и направления теплового потока, Вт/(м² · °С^{2/3}); Δt — разность температур поверхности и воздуха, °С.

Ниже приведены значения коэффициента m , рассчитанные Р. Н. Шумиловым [9] с использованием критериальных уравнений для конвективного теплообмена при естественной конвекции [10].

Коэффициент теплообмена при вынужденной конвекции зависит от режима течения воздуха, скорости вынужденного движения v и геометрического размера l . В работе [8] приведена приближенная формула, полученная с использованием критериальных уравнений для конвективного теплообмена при вынужденной конвекции [10]:

$$\alpha_{\text{к}}^{\text{вын}} = 6v^{0,8}l^{0,2}, \quad (2.5)$$

где $\alpha_{\text{к}}^{\text{вын}}$ — коэффициент конвективного теплообмена при вынужденной конвекции, Вт/(м² · °C); v — скорость воздуха, м/с; l — геометрический размер, м.

Положение ограждения	Значение коэффициента m , Вт/(м ² · °C ^{2/3})
Вертикальное	1,85
Горизонтальное с теплоотдачей вверх	2,4
Горизонтальное с теплоотдачей вниз	1,3

Приведенные зависимости могут быть использованы для практических расчетов стандартных режимов передачи тепла для типовых зданий. В более сложных случаях следует обратиться к специальной литературе [10, 11].

2.4. Излучение

Излучение — процесс передачи тепла от одной поверхности к другой через лучепрозрачную среду. При нагревании какого-либо тела часть тепловой энергии превращается на его поверхности в энергию лучистую. Излучение между телами происходит при помощи электромагнитных волн. Тепло с поверхности более нагретого тела передается через лучепрозрачную среду (воздух) на поверхность другого тела, где вновь переходит в тепловую форму энергии (рис. 2.3).

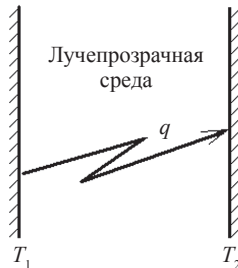


Рис. 2.3. Схема лучистого теплообмена между поверхностями

Интенсивность излучения тепла поверхностью тела зависит от его температуры и способности излучать тепло. Количество тепла, передаваемого излучением между двумя поверхностями, определяется по закону Стефана — Больцмана [11]:

$$q_{\text{л}} = \varepsilon C_0 \cdot \varphi [(T_1 / 100)^4 - (T_2 / 100)^4], \quad (2.6)$$

где ε — степень черноты системы тел; C_0 — постоянная Стефана — Больцмана, Вт/(м² · К⁴); φ — угловой коэффициент излучения; T_1, T_2 — температуры нагретой и охлажденной поверхностей, К.

По аналогии с уравнением (2.3) можно выразить тепловой поток, передаваемый путем излучения, как

$$q_{\text{л}} = \alpha_{\text{л}} \cdot \Delta t, \quad (2.7)$$

где $\alpha_{\text{л}}$ — коэффициент теплообмена излучением, Вт/(м² · °С), определяемый по формуле

$$\alpha_{\text{л}} = \varepsilon C_0 \cdot \varphi [(T_1 / 100)^4 - (T_2 / 100)^4] / \Delta t;$$

Δt — разность температур поверхностей, °С.

Поскольку большинство строительных материалов имеет степень черноты, близкую к единице, то и степень черноты системы тел близка к единице ($\varepsilon \approx 1$).

При теплообмене в помещении, когда тепловоспринимающая поверхность окружает теплоотдающую, угловой коэффициент излучения $\varphi = 1$ [Там же]. При выполнении инженерных расчетов можно использовать ориентировочные значения коэффициентов теплообмена, приводимые в нормативной и справочной литературе, не производя подробных расчетов. Однако при разработке новых технических решений и применении нетрадиционных строительных материалов требуются серьезные обоснования.

2.5. Теплопередача через наружное ограждение

Рассмотрим способы передачи тепла от внутреннего воздуха к наружному. Теплопередача происходит от внутреннего воздуха к внутренней поверхности путем конвекции и излучения. Далее тепло передается за счет теплопроводности от внутренней

поверхности к наружной через слои материалов, из которых состоит наружное ограждение. От наружной поверхности к наружному воздуху тепло отдается также путем излучения и конвекции. Как видно, эти процессы излучения и конвекции при передаче тепла через наружное ограждение происходят совместно.

Тогда в общем случае тепловой поток у поверхности теплоотдачи можно представить как сумму тепловых потоков, передаваемых излучением $q_{\text{л}}$ и конвекцией $q_{\text{к}}$:

$$q = q_{\text{л}} + q_{\text{к}} = (\alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}})\Delta t = \alpha \cdot \Delta t, \quad (2.8)$$

где α — коэффициент теплообмена, $\alpha = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}}$; Δt — разность температур воздуха и поверхности: у внутренней поверхности $\Delta t = t_{\text{в}} - \tau_{\text{в}}$; у наружной поверхности $\Delta t = t_{\text{н}} - \tau_{\text{н}}$.

Коэффициент теплообмена у внутренней поверхности называют *коэффициентом тепловосприятости* $\alpha_{\text{в}}$. Коэффициент теплообмена у наружной поверхности называют *коэффициентом теплоотдачи* $\alpha_{\text{н}}$.

Для практических расчетов значения этих коэффициентов можно принимать по СНиП [1]. Величина коэффициента тепловосприятости $\alpha_{\text{в}}$ зависит от вида поверхности (гладкая, с выступами или ребрами), а величина коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{н}}$ зависит от положения ограждения по отношению к наружному воздуху. Например, для гладких внутренних поверхностей стен и потолков $\alpha_{\text{в}} = 8,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$, для наружной поверхности в холодный период года $\alpha_{\text{н}} = 23,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$.

Используя расчетную схему (см. рис. 2.2), можно записать систему уравнений, характеризующих передачу тепла через наружное ограждение.

Количество тепла, передаваемого от внутреннего воздуха к внутренней поверхности конвекцией и излучением, равно

$$q = \alpha_{\text{в}}(t_{\text{в}} - \tau_{\text{в}}).$$

Решением этого уравнения относительно разности температур является

$$t_b - \tau_b = q / \alpha_b. \quad (2.9)$$

Количество тепла, передаваемого от внутренней поверхности к наружной за счет теплопроводности:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (\tau_b - \tau_n),$$

откуда

$$\tau_b - \tau_n = q \frac{\delta}{\lambda}. \quad (2.10)$$

Количество тепла, передаваемого от наружной поверхности к наружному воздуху конвекцией и излучением, равно

$$q = \alpha_n (\tau_n - t_n),$$

откуда

$$\tau_n - t_n = q / \alpha_n. \quad (2.11)$$

Суммируя левые и правые части уравнений (2.9)–(2.11), получим

$$t_b - t_n = q(1 / \alpha_b + \delta / \lambda + 1 / \alpha_n).$$

Из последнего уравнения найдем величину плотности теплового потока:

$$q = \frac{t_b - t_n}{\frac{1}{\alpha_b} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_n}}. \quad (2.12)$$

Количество тепла, передаваемого от внутреннего воздуха к наружному воздуху (плотность теплового потока), можно выразить через коэффициент теплопередачи:

$$q = k(t_b - t_n), \quad (2.13)$$

где k — коэффициент теплопередачи, Вт/(м² · °С).

Из уравнений (2.12) и (2.13) получаем соотношение для определения коэффициента теплопередачи:

$$k = 1 / (1 / \alpha_{\text{в}} + \delta / \lambda + 1 / \alpha_{\text{н}}). \quad (2.14)$$

Для многослойного ограждения уравнение (2.14) принимает вид

$$k = 1 / (1 / \alpha_{\text{в}} + \Sigma \delta / \lambda + 1 / \alpha_{\text{н}}),$$

где $\Sigma \delta / \lambda$ — сумма отношений толщин слоев δ наружного ограждения к их коэффициентам теплопроводности λ .

Количество тепла Q , проходящего через ограждение площадью F , определяется по формуле

$$Q = qF, \quad (2.15)$$

где Q — количество тепла, Вт; F — площадь, м².

Это выражение используется при расчетах потерь тепла через наружные ограждения и проектировании систем отопления.

2.6. Сопротивление теплопередаче

Для упрощения инженерных расчетов в строительной теплотехнике используется понятие «сопротивление». Сопротивление — это величина, обратная соответствующим коэффициентам. Размерность сопротивления м² · °С/Вт.

Так, коэффициенту тепловосприятости $\alpha_{\text{в}}$ соответствует сопротивление тепловосприятию $R_{\text{в}} = 1 / \alpha_{\text{в}}$; коэффициенту теплоотдачи $\alpha_{\text{н}}$ — сопротивление теплоотдаче $R_{\text{н}} = 1 / \alpha_{\text{н}}$; коэффициенту теплопередачи k — общее сопротивление теплопередаче $R_{\text{о}} = 1 / k$.

Термическое сопротивление однослойного ограждения определяется как $R = \delta / \lambda$. Для многослойного ограждения термическое сопротивление равно

$$\Sigma R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots = \delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \dots = \delta_3 / \lambda_3 + \dots = \Sigma (\delta / \lambda). \quad (2.16)$$

Тогда общее сопротивление теплопередаче при любом количестве слоев можно рассчитать по формуле

$$R_0 = R_b + \Sigma R + R_n. \quad (2.17)$$

Как видно из уравнения (2.17), общее сопротивление теплопередаче R_0 может быть рассчитано при известной конструкции ограждения, когда заданы толщины и характеристики слоев. Однако оптимальным образом рассчитать теплозащиту ограждающих конструкций не представляется возможным. Поэтому в качестве дополнительного условия формулируются нормативные и экономические требования, а также условия энергосбережения, которые будут рассмотрены в разделе 4.

2.7. Термическое сопротивление неоднородных конструкций

Современные конструкции наружных ограждений зданий, как правило, могут содержать несколько слоев или элементов, состоящих из различных материалов с различными теплотехническими свойствами. Такие конструкции называют неоднородными. Неоднородные элементы могут быть расположены перпендикулярно или параллельно направлению теплового потока. В зависимости от этого определяется термическое сопротивление неоднородных конструкций.

При расположении неоднородных слоев перпендикулярно тепловому потоку термическое сопротивление рассчитывается по формуле

$$\Sigma R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots = \Sigma \delta / \lambda, \quad (2.18)$$

где R_1, R_2, R_3 — термические сопротивления слоев.

При наличии в ограждающей конструкции неоднородных слоев, расположенных перпендикулярно и параллельно направлению теплового потока, находят приведенное термическое сопротивление неоднородной конструкции. Для этого конструкцию делят на элементы, одни из которых расположены параллельно,

а другие — перпендикулярно направлению теплового потока. Затем определяют средние термические сопротивления для перпендикулярного и параллельного расположения элементов.

Среднее термическое сопротивление рассчитывается по формуле

$$R_{\text{ср}} = \frac{F_1 + F_2 + \dots}{\frac{F_1}{R_1} + \frac{F_2}{R_2} + \dots}, \quad (2.19)$$

где F_1, F_2, \dots — площади отдельных элементов; R_1, R_2, \dots — термические сопротивления этих элементов.

Приведенное термическое сопротивление неоднородной конструкции определяется по приближенной формуле

$$R_{\text{пр}} = 0,33 (R_{\text{II}} + 2R_1), \quad (2.20)$$

где R_{II}, R_1 — средние термические сопротивления для параллельного и перпендикулярного расположения элементов.

Такой расчет достаточно трудоемкий и требует подробных данных о рассчитываемой конструкции. Поэтому СНиП допускает при проектировании неоднородных наружных ограждений использовать формулу

$$R_0 = R_0^{\text{усл}} r,$$

где $R_0^{\text{усл}}$ — общее сопротивление теплопередаче без учета неоднородности в направлении, параллельном тепловому потоку; r — коэффициент теплотехнической однородности.

В СНиП [1] приводятся данные о коэффициентах теплотехнической однородности для трехслойных панелей из бетона с ребрами и теплоизоляционными вкладышами. При этом коэффициент теплотехнической однородности r определяется как

$$r = r_1 r_2,$$

где r_1 — коэффициент, учитывающий относительную площадь ребер; r_2 — коэффициент, учитывающий плотность материала ребер.

Уменьшение сопротивления теплопередаче конструкции вследствие неоднородности весьма существенно. Так, при изменении относительной площади ребер от 0,25 до 0,05 значение r_1 изменяется от 0,5 до 0,8. При изменении плотности бетона от 1000 до 2400 кг/м³ значение коэффициента r_2 уменьшается от 1 до 0,7. Тогда при $R_0^{\text{ст}} = 3 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ получим фактически $R_0 = 1,8 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$.

Для панелей с металлическими связями и утеплителем из минеральных или вспененных материалов значения коэффициента r даются в зависимости от плотности бетона, но здесь величина коэффициента r близка к единице, за исключением конструкций из тяжелых бетонов.

Одним из видов неоднородных конструкций являются конструкции с неventилируемыми воздушными прослойками. Использование их объясняется малым коэффициентом теплопроводности воздуха по сравнению с другими материалами, а также возможностью уменьшения веса строительных изделий и конструкций.

Известны выпускаемые промышленностью пустотные кирпичи, панели перекрытий и т. д. Однако использование воздушных прослоек в качестве утеплителя оказалось неэффективным, так как в дополнение к процессу передачи тепла теплопроводностью происходит передача тепла конвекцией и излучением. Эти виды теплопередачи объясняются наличием окружающих прослойку поверхностей разной температуры и воздуха между ними.

Схема участка наружного ограждения с замкнутой воздушной прослойкой приведена на рис. 2.4.

Количество тепла, передаваемого путем теплопроводности, рассчитывается по уравнению (2.2):

$$q_m = \lambda \frac{\Delta t}{\delta} = \frac{\lambda}{\delta} (\tau_1 - \tau_2),$$

где λ — коэффициент теплопроводности воздуха в прослойке, Вт · м/°С; δ — толщина прослойки, м; τ_1, τ_2 — температуры поверхностей воздушной прослойки, °С.

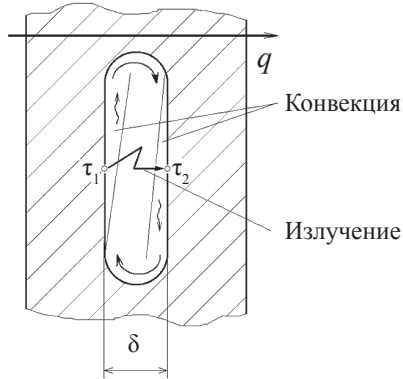


Рис. 2.4. Схема замкнутой воздушной прослойки

Как видно, у поверхности с температурой τ_1 возникает восходящий конвективный поток, а у поверхности с температурой τ_2 — ниспадающий. Средняя температура воздуха в прослойке $t = 0,5 (\tau_1 + \tau_2)$. Количество тепла, передаваемого конвекцией, согласно уравнению (2.3) равно

$$q_k = \alpha_k (\tau_1 - t) = \alpha_k (\tau_1 - 0,5 (\tau_1 + \tau_2)) = 0,5 \alpha_k (\tau_1 - \tau_2).$$

Так как воздух является лучепрозрачной средой, то между поверхностями, имеющими разную температуру, происходит передача тепла излучением. Количество тепла, передаваемого излучением, можно определить по (2.7) как

$$q_l = \alpha_l \cdot \Delta t = \alpha_l (\tau_1 - \tau_2).$$

Таким образом, удельный тепловой поток через воздушную прослойку $q_{\text{вн}}$ определяется по формуле

$$q_{\text{вн}} = q_t + q_k + q_l = (0,5 \alpha_k + \alpha_l + \lambda/\delta) (\tau_1 - \tau_2),$$

где q_t — количество тепла, передаваемое теплопроводностью, Вт/м²; q_k — количество тепла, передаваемое конвекцией, Вт/м²; q_l — количество тепла, передаваемое излучением, Вт/м².

Увеличение толщины прослойки оказывает малое влияние на уменьшение количества тепла, передаваемого теплопроводностью. Однако при этом увеличиваются интенсивность конвекции, коэффициент конвективного теплообмена и доля тепла, передаваемого конвекцией. Большая часть тепла передается излучением.

Теплозащитные качества воздушных прослоек зависят и от расположения прослойки, направления теплового потока, расстояния от наружной поверхности ограждения. Так, в горизонтальных прослойках конвекция менее интенсивна, чем в вертикальных. При совпадении направления теплового потока и конвекции коэффициент конвективного теплообмена также увеличивается.

Для практических расчетов допускается использовать данные о термических сопротивлениях воздушных прослоек, приведенные в СНиП [1].

3. НОРМИРОВАНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТЫ

3.1. Требуемое сопротивление теплопередаче

Как было показано в разделе 2.6, при выборе оптимальных решений по теплозащитным свойствам наружных ограждений необходимо руководствоваться определенными требованиями, которые влияют на технические решения в области строительства в соответствии с государственными приоритетами. Это могут быть санитарно-гигиенические, экономические требования или задачи энергосбережения. В соответствии с этим определяются нормативные значения общего сопротивления теплопередаче.

Минимальное сопротивление теплопередаче определяется исходя из следующих санитарно-гигиенических требований:

- 1) исключение возможности образования конденсата на внутренней поверхности наружных ограждений;
- 2) ограничение количества тепла, отдаваемого с поверхности тела человека путем излучения;
- 3) ограничение локальной асимметрии теплоотдачи.

Рассмотрим первое требование. Известно, что в состав воздуха входят водяные пары, количество которых определяет его влажность. Для каждого состояния воздуха, которое характеризуется температурой, влажностью и барометрическим давлением, существует температура, при которой воздух становится насыщенным, т. е. приобретает относительную влажность $\varphi = 100\%$. Эта температура называется температурой точки росы. Если температура внутренней поверхности ограждения ниже температуры точки росы, то на внутренней поверхности образуется конденсат. Поэтому при проектировании ограждений необходимо, чтобы температура внутренней поверхности ограждения была выше температуры точки росы при заданной температуре и относительной влажности воздуха. Таким образом, выполнение данного

требования сводится к ограничению минимальной температуры внутренней поверхности наружного ограждения.

Второе требование касается самочувствия человека. Известно, что тепло передается с поверхности тела человека конвекцией, излучением и при испарении с поверхности кожи (рис. 3.1). Уравнение теплового баланса имеет вид

$$Q_o = Q_k + Q_l + Q_{\text{исп}},$$

где Q_o — общая теплоотдача человека в окружающую среду; Q_k , Q_l , $Q_{\text{исп}}$ — тепло, отдаваемое человеком за счет конвекции, излучения и испарения соответственно.

На рис. 3.1 приведена доля этих составляющих при нормальных условиях. При этом величина лучистой составляющей зависит от температуры тепловоспринимающей поверхности, т. е. от температуры внутренней поверхности наружного ограждения в наибольшей степени.

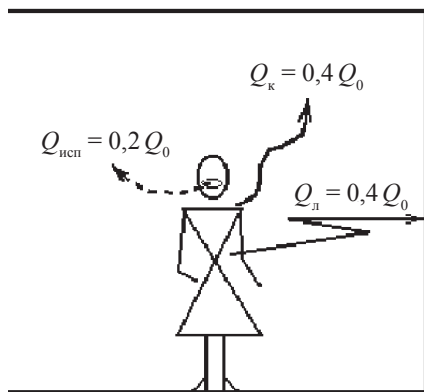


Рис. 3.1. Схема теплообмена человека с окружающей средой

Асимметрия теплоотдачи заключается в том, что температура поверхностей, окружающих человека, находящегося в помещении, различна. Следовательно, будет отличаться и количество

тепла, отдаваемого излучением. Анализируя третье требование, касающееся ограничения асимметрии теплоотдачи излучением с поверхности тела человека, можно сделать аналогичный вывод о необходимости нормирования температуры внутренней поверхности. Кстати, это требование было сформулировано недавно с учетом данных гигиенических исследований.

Итак, для удовлетворения перечисленных требований необходимо ограничить температуру на внутренней поверхности наружного ограждения. Но эта температура, в свою очередь, зависит от температуры внутреннего воздуха в помещении. Поэтому принято ограничивать не саму температуру на внутренней поверхности наружного ограждения, а разность между температурой внутреннего воздуха и температурой на внутренней поверхности наружных ограждающих конструкций.

Эту разность называют нормируемым температурным перепадом $\Delta t^H = t_B - \tau_B$. На ограничении этого температурного перепада и построено нормирование теплозащиты, принятое в строительной теплотехнике.

Для вывода формулы для расчета минимального сопротивления теплопередаче рассмотрим уравнение теплового баланса при стационарных условиях. Напоминаем, что в условиях стационарной теплопередачи тепловой поток не изменяется во времени по величине и направлению, т. е. $q = \text{idem}$:

$$q = \frac{t_B - t_H}{R_0} = \frac{t_B - \tau_B}{R_B} = \frac{\tau_B - \tau_1}{R_1} = \dots = \frac{\tau_n - \tau_H}{R_n} = \frac{\tau_H - t_H}{R_H} = \text{idem}. \quad (3.1)$$

Приравнявая два первых уравнения в выражении (3.1), имеем

$$q = (t_B - t_H) / R_0 = (t_B - \tau_B) / R_B,$$

откуда получим

$$R_0 = \frac{R_B(t_B - t_H)}{(t_B - \tau_B)}. \quad (3.2)$$

Если в выражении (3.2) ограничить разность температур внутреннего воздуха и внутренней поверхности, т. е. принять $t_{в} - \tau_{в} = \Delta t^{н}$, то получим формулу для определения требуемого сопротивления теплопередачи $R_{0}^{тп}$:

$$R_{0}^{тп} = \frac{R_{в} \cdot (t_{в} - t_{н})n}{\Delta t^{н}}. \quad (3.3)$$

Значения нормируемого температурного перепада $\Delta t^{н} = t_{в} - \tau_{в}$ приведены в [1] и зависят от назначения зданий (жилые, общественные, производственные) и вида наружных ограждений (наружные стены, чердачные перекрытия, перекрытия над подвалами).

Для поверхностей, выходящих в неотапливаемое помещение, в формулу вводится коэффициент уменьшения расчетной разности температур n . Значения этого коэффициента приводятся также в [Там же] в зависимости от вида наружного ограждения.

Таким образом, величина требуемого сопротивления теплопередаче зависит от назначения здания и вида наружного ограждения, а также от географического местоположения района строительства, в соответствии с которым принимается температура наружного воздуха $t_{н}$. В качестве расчетной температуры наружного воздуха берется средняя температура холодной пятидневки января за последние 50 зим [3]. Назначение здания учитывается при выборе температуры внутреннего воздуха $t_{в}$, о которой шла речь в разделе 1.

Полученное значение сопротивления теплопередаче не всегда является достаточным для выполнения других требований к теплозащите и может не соответствовать задачам экономии энергоресурсов или снижения экономических затрат. Согласно действующим нормативам решение по теплозащите должно приниматься из условий энергосбережения. Этому условию соответствует сопротивление теплопередаче по условиям энергосбережения.

3.2. Сопротивление теплопередаче по условиям энергосбережения

Чем больше уровень теплозащиты, тем меньше требуется энергоресурсов для поддержания необходимого теплового режима в помещении. В то же время экономия от снижения энергопотребления зависит от климатических условий района строительства (чем суровее климат, тем эффективнее теплозащита, тем больше экономия тепла). Суровость климата принято оценивать показателем «градусосутки отопительного периода». Значение этого показателя рассчитывается по формуле

$$B = (t_{\text{в}} - t_{\text{он}})Z_{\text{он}}, \quad (3.4)$$

где B — градусосутки отопительного периода, град. · сут.; $t_{\text{в}}$ — расчетная температура внутреннего воздуха, °С; $t_{\text{он}}$ — средняя температура наружного воздуха за отопительный период, °С; $Z_{\text{он}}$ — продолжительность отопительного периода, сут.

Отметим, что отопительный период — это период со средне-суточными значениями температуры наружного воздуха ниже или равной +8 °С. Данные о параметрах отопительного периода зависят от географического местоположения района строительства и принимаются по СНиП «Строительная климатология» [3].

Значения показателя B для территории России изменяются в широких пределах: от 1000 градусосуток для Сочи до 12 000 — для районов Республики Саха — Якутия. Чем больше величина B , тем больше затраты на отопление и тем больший эффект дает улучшение теплозащиты. Поэтому чем больше значение показателя B , тем больше рекомендуемые значения сопротивлений теплопередаче по условиям энергосбережения $R_0^{\text{эл}}$.

Значения сопротивлений теплопередаче $R_0^{\text{эл}}$ были рассчитаны исходя из стратегического направления по снижению энергопотребления на перспективу. В соответствии с прогнозом изменения энергетического баланса России предусматривалось 20 %-е снижение удельного энергопотребления каждые пять лет. Нормы сопротивлений теплопередаче по условиям энергосбережения были

рассчитаны исходя из стратегического направления по снижению энергопотребления на перспективу. В соответствии с прогнозом изменения энергетического баланса России предусматривалось 20 %-е снижение удельного энергопотребления каждые пять лет. Нормы сопротивлений теплопередаче по условиям энергосбережения $R_0^{эн}$ были введены в 1995 г. на период до 2000 г. и затем с 2000 до 2005 г., но далее не менялись. Эти данные приведены в СНиП [1] и СП [4] для зданий разного назначения в зависимости от величины показателя B , назначения здания и вида наружного ограждения.

Согласно действующим нормативам по назначению здания подразделяются на следующие группы:

- жилые, детские, лечебные;
- общественные;
- производственные.

Виды наружных ограждающих конструкций по СНиП: наружные стены; покрытия и чердачные перекрытия; перекрытия над проездами, подвалами и подпольями; зенитные фонари.

3.3. Сопротивление теплопередаче из экономических условий

В инженерной практике принято оценивать основные решения по экономическим условиям: оптимальному варианту должны соответствовать минимальные затраты финансовых средств. Рассмотрим этот подход применительно к задаче проектирования теплозащиты.

Годовые затраты на поддержание заданных параметров воздушной среды (приведенные затраты) в помещениях складываются из затрат на устройство теплозащиты наружных ограждений и эксплуатационных затрат (затрат на отопление):

$$П = EK + Э, \quad (3.5)$$

где $П$ — приведенные затраты на теплозащиту, руб./год; E — коэффициент эффективности капитальных вложений или процентная

ставка кредита, 1/год; K — капитальные затраты, руб.; \mathcal{E} — затраты на отопление, руб./год.

При увеличении общего сопротивления теплопередаче затраты на устройство теплозащиты наружных ограждений увеличиваются, а затраты на отопление уменьшаются. Сумма этих затрат имеет следующую тенденцию: при увеличении сопротивления теплопередаче суммарные затраты снижаются, а затем увеличиваются (рис. 3.2).

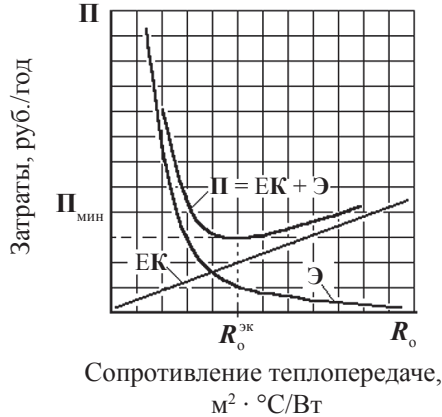


Рис. 3.2. Зависимость приведенных затрат от сопротивления теплопередаче

Как видно, график изменения суммарных затрат имеет минимум, которому соответствует оптимальное значение сопротивления теплопередаче из экономических условий $R_0^{\text{эк}}$. Решение можно получить графическим путем, задавая разные значения R_0 и определяя K , \mathcal{E} и Π .

Можно получить и аналитическое решение, имея в виду, что производная данной функции равна нулю в точке минимума. Такое решение было получено В. Н. Богословским, который вывел формулу для расчета сопротивления теплопередаче из экономических условий [7]:

$$R_o^{\text{ЭК}} = \sqrt{\frac{(t_{\text{в}} - t_{\text{от}}) Z_{\text{оп}} c_{\text{т}}}{\lambda_{\text{ут}} c_{\text{ут}} E}}. \quad (3.6)$$

Здесь $Z_{\text{оп}}$ — продолжительность отопительного периода, с; $c_{\text{т}}$ — стоимость единицы тепла, руб./Дж; $\lambda_{\text{ут}}$ — коэффициент теплопроводности материала утепляющего слоя, Вт/(м · °С); $c_{\text{ут}}$ — стоимость утеплителя, руб./м³.

К сожалению, в последние годы в связи с изменением условий ценообразования экономический подход к выбору уровня теплозащиты применяется не всегда, а в действующих нормативных документах основное внимание уделено выполнению условий энергосбережения.

Анализ технических решений и оценка экономических тенденций развития энергетики, выполненный В. Г. Гагариным [13], показал, что дальнейшее повышение уровня теплозащиты зданий не является экономически целесообразным как по инвестиционной привлекательности, так и по эффективности капитальных вложений.

Опыт проектирования свидетельствует, что санитарно-гигиенические требования могут быть приоритетными и возможен возврат к нормированию по допустимому температурному перепаду [14]. В работе [15] отмечается, что для выбора энергоэффективных решений необходимо учитывать экономические показатели (эксплуатационные расходы, окупаемость), а также энергетический баланс инженерных систем. Анализ целесообразности увеличения толщины утепляющего слоя рассмотрен в работе [16].

Авторами был выполнен анализ изменения основных параметров, входящих в формулу (3.6). Использовались данные о тарифах региональных энергетических компаний и прайс-листы фирм — производителей теплоизоляционных материалов. Было установлено, что стоимость тепловой энергии значительно различается по регионам России и имеет устойчивую тенденцию роста.

В то же время стоимость современных типов утеплителей имеет значения в интервале $c_{\text{ут}} = 2300\text{--}3300$ руб./м³. Коэффициенты теплопроводности большинства утеплителей составляют

$\lambda_{\text{ут}} = 0,034-0,044$ Вт/(м · °С), а различие по регионам России несущественно.

В табл. 3.1 представлены значения сопротивлений теплопередаче $R_o^{\text{эк}}$ наружных стен и покрытий жилых зданий, рассчитанные по экономическим условиям по формуле (3.6) для основных регионов России. Также приведены значения сопротивлений теплопередаче по условиям энергосбережения $R_o^{\text{эп}}$, принятые по СНиП 23-02 в зависимости от показателя B . Установлено, что зависимость сопротивлений теплопередаче $R_o^{\text{эк}}$ и $R_o^{\text{эп}}$ от показателя суровости климата B практически одинакова.

Таблица 3.1

Сопротивления теплопередаче наружных стен и покрытий жилых зданий $R_o^{\text{эп}}$ по СНиП 23-02 и по расчету $R_o^{\text{эк}}$

Округ	Показатель B , град. · сут	Стоимость тепловой энергии, руб./Гкал	Сопротивление теплопередаче, м ² · °С/Вт		
			$R_o^{\text{эк}}$	$R_o^{\text{эп}}$	
				стен	покрытий
Северо-Кавказский	2560	840	1,87	2,3	3,48
Южный	3540	1230	2,66	2,64	3,97
Северо-Западный	4818	690	2,32	3,13	4,61
Москва	4943	1440	3,40	3,18	4,67
Центральный	5014	1200	3,12	3,21	4,71
Приволжский	5590	1670	3,90	3,44	5,00
Уральский	6444	911	3,09	3,73	5,42
Дальневосточный	6548	1430	3,90	3,76	5,47
Сибирский	6974	940	3,27	3,89	5,69

Данные табл. 3.1 показывают, что в настоящее время значения экономически целесообразного сопротивления теплопередаче наружных стен $R_o^{\text{эк}}$ для большинства регионов России близки к рекомендуемым СНиП сопротивлениям теплопередаче по условиям энергосбережения $R_o^{\text{эп}}$. Однако для покрытий зданий значения

сопротивлений теплопередаче $R_0^{\text{эп}}$ значительно превышают экономически целесообразные $R_0^{\text{эк}}$.

Определение нормативного значения сопротивления теплопередаче расчетом позволяет определять уровень теплозащиты зданий с учетом региональных условий и формирования цен на тепловую энергию и теплоизоляционные материалы. При этом основными показателями нормирования являются стоимость тепловой энергии и теплоизоляционных материалов, а также климатологические данные района строительства.

Установлено, что нормативные значения сопротивлений теплопередаче, приведенные в СНиП, являются экономически обоснованными и не требуют пересмотра в сторону увеличения.

3.4. Расчетное сопротивление теплопередаче

В результате расчетов мы получаем минимальное сопротивление теплопередаче $R_0^{\text{тп}}$, сопротивление теплопередаче по условиям энергосбережения $R_0^{\text{эп}}$ и сопротивление теплопередаче из экономических условий $R_0^{\text{эк}}$.

Следует обратить внимание на то, что строительные нормы допускают определение уровня теплозащиты по величине сопротивления теплопередаче в соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями для объектов с избыточными тепловыделениями, а также для реконструируемых зданий.

В остальных случаях за расчетное значение сопротивления теплопередаче $R_0^{\text{р}}$ принимается большее из полученных значений $R_0^{\text{тп}}$ и $R_0^{\text{эп}}$.

Тогда из приведенного ниже уравнения можно определить термическое сопротивление $R_{\text{ит}}$ и толщину утепляющего слоя:

$$R_0^{\text{р}} = 1/\alpha_{\text{в}} + R_1 + \dots R_{\text{ит}} + \dots R_n + 1/\alpha_{\text{н}}, \quad (3.7)$$

где $R_1, \dots, R_{\text{ит}}, \dots, R_n$ — термические сопротивления материальных слоев, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; $\alpha_{\text{в}}$ и $\alpha_{\text{н}}$ — коэффициенты тепловосприятости и теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; i — номер слоя.

Входящее в это уравнение сопротивление теплопередаче теплоизоляционного слоя определяется как

$$R_{\text{ут}} = \delta_{\text{ут}} / \lambda_{\text{ут}},$$

откуда находим значение толщины утепляющего слоя $\delta_{\text{ут}} = R_{\text{ут}} \cdot \lambda_{\text{ут}}$.

3.5. Требования строительных норм [1]

Теплозащитная оболочка здания должна отвечать следующим нормативным требованиям:

а) приведенные сопротивления теплопередаче отдельных ограждающих конструкций должны быть не менее нормируемых значений (поэлементные требования);

б) удельная теплозащитная характеристика здания должна быть не больше нормируемого значения (комплексное требование);

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

Требования тепловой защиты здания будут выполнены при одновременном выполнении требований «а» — «в».

3.5.1. Поэлементные требования

Нормируемое сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции следует определять по формуле

$$R_0^{\text{норм}} = R_0^{\text{зн}} \cdot m_p,$$

где $R_0^{\text{зн}}$ — сопротивление теплопередаче по условиям энергосбережения; m_p — коэффициент, учитывающий особенности региона строительства, но не менее значений: для наружных стен $m_p = 0,63$; для окон $m_p = 0,95$; для остальных конструкций $m_p = 0,8$.

Как указывалось в разделе 3.4, строительные нормы допускают определять уровень теплозащиты по величине сопротивления теплопередаче в соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями для объектов с избыточными тепловыделениями, а также для реконструируемых зданий.

3.5.2. Комплексное требование

Нормируемое значение удельной теплозащитной характеристики здания принимается в зависимости от отапливаемого объема и градусосуток отопительного периода (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Нормируемые значения удельной теплозащитной характеристики здания, Вт/(м³ · град)

Отапливаемый объем, м ³	Градусосутки отопительного периода, град. · сут				
	1000	3000	5000	8000	12 000
300	0,957	0,708	0,562	0,429	0,326
600	0,759	0,562	0,446	0,341	0,259
1200	0,606	0,449	0,356	0,272	0,207
2500	0,486	0,360	0,286	0,218	0,166
6000	0,391	0,289	0,229	0,175	0,133
15 000	0,327	0,242	0,192	0,146	0,111
50 000	0,277	0,205	0,162	0,124	0,094
200 000	0,269	0,182	0,145	0,111	0,084

3.5.3. Санитарно-гигиеническое требование

Температура внутренней поверхности ограждающей конструкции в зоне теплопроводных включений, угловых частей стен и оконных откосов должна быть не ниже температуры точки росы внутреннего воздуха при расчетной температуре наружного воздуха.

Минимальная температура внутренней поверхности остекления производственных зданий должна быть не ниже значения 0 °С, для остальных зданий — не ниже плюс 3 °С.

Относительная влажность внутреннего воздуха принимается по нормам проектирования соответствующих зданий. Например, для жилых, лечебных и детских учреждений относительная влажность составляет 55 %, для кухонь — 60 %; для ванных комнат — 65 %, для общественных зданий — 60 %.

4. НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

4.1. Примеры нестационарной теплопередачи

В реальных условиях тепловой поток и параметры окружающей среды постоянно меняются во времени. Рассмотрим наиболее часто встречающиеся явления, часть из которых является следствием изменения климатических условий, а другая связана с особенностями технологии и эксплуатации зданий и сооружений. Можно выделить следующие режимы нестационарной теплопередачи, которые следует предвидеть и рассматривать при разработке проектов отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха:

- изменение температуры наружного воздуха;
- воздействие солнечной радиации;
- изменение во времени теплоступлений в помещение;
- аварийные режимы эксплуатации (отключение систем отопления или теплоснабжения и т. д.).

На рис. 4.1 приведен график изменения температуры наружного воздуха по месяцам. Мы видим, что в течение года температуры наружного воздуха увеличиваются от января к июлю и снова снижаются. Вот почему существует понятие расчетных температур. Например, для расчета тепловых потерь и мощности систем отопления расчетной является температура наружного воздуха холодной пятидневки января, а для расчета систем вентиляции расчетная температура наружного воздуха принимается в зависимости от периода года.

Аналогичный характер имеет изменение температуры наружного воздуха в течение суток, когда минимальная температура наблюдается в ночное время, а максимальная — в 13 ч. То же самое можно отнести к воздействию солнечной радиации, которая отмечается в дневное время с изменением интенсивности

в зависимости от времени суток, о чем свидетельствуют климатологические данные, приводимые в [3].

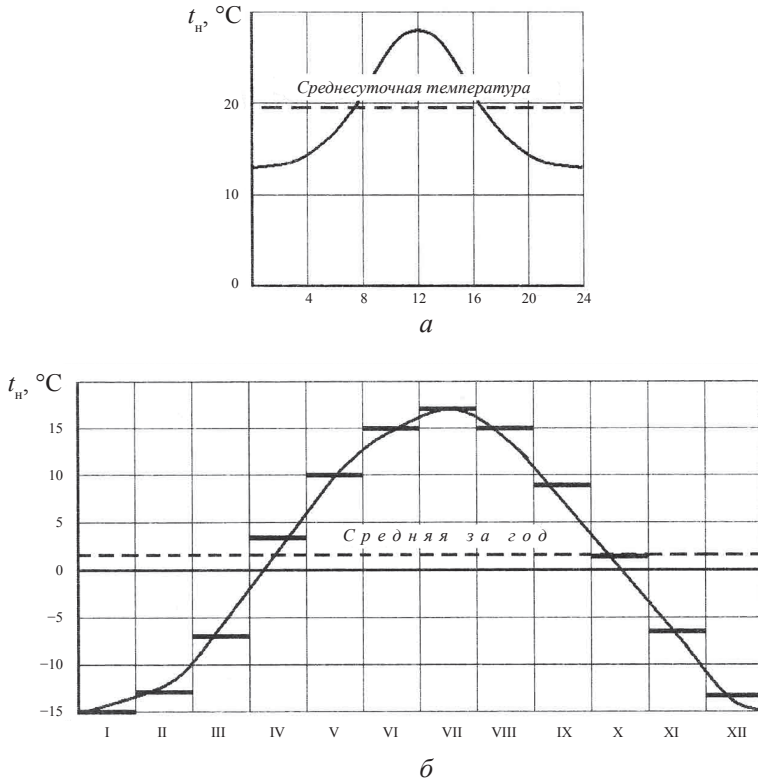


Рис. 4.1. Изменение температуры наружного воздуха:
а — по часам суток (летом); б — по месяцам года

Перейдем к примерам изменения тепловых потоков. Так, особенности технологических процессов, режимы работы и эксплуатации зданий и сооружений приводят к изменению поступлений тепла в помещения. Например, в помещениях с большим скоплением людей поступления тепла могут изменяться в сотни раз в связи с перерывами, окончанием сеансов, занятий, заседаний.

Особенно заметны изменения теплоступлений в производственных помещениях, связанные с регламентом технологических процессов. Тем не менее за счет поглощения тепла ограждающими конструкциями с учетом продолжительного периода остывания оборудования возможно сокращение затрат тепла на отопление зданий во многих конкретных случаях.

Приводимые данные показывают, что рассмотренные выше явления повторяются с определенной частотой и для них можно использовать закономерности гармонических колебаний.

4.2. Теплоустойчивость помещения

При изменении величины теплового потока происходит изменение температуры внутреннего воздуха и температуры внутренней поверхности ограждающих конструкций. Помимо внешних ограждений в помещении имеются внутренние ограждения (внутренние стены и перегородки, двери, перекрытия), которые принимают температуру внутреннего воздуха. При уменьшении теплоступлений температура внутреннего воздуха снижается и внутренние ограждения отдают накопленное тепло окружающему воздуху. Таким образом, они могут накапливать тепло при увеличении теплоступлений и отдавать его внутреннему воздуху при уменьшении теплоступлений.

Теплоустойчивость помещения — это его свойство сохранять относительное постоянство температуры внутреннего воздуха при переменных тепловых воздействиях. При уменьшении теплоступлений воздух в помещении начинает охлаждаться и его температура со временем уменьшается. Этому препятствует теплоотдача в помещение всех ранее нагретых поверхностей ограждающих конструкций, которые обладают теплоаккумулирующими свойствами.

Оценку теплоустойчивости помещений производят по величине амплитуды колебания температуры внутреннего воздуха $A_{t_{в}}$. Допустимые значения амплитуды колебания температуры внутреннего воздуха $A_{t_{в}}^{\text{доп}}$ определяются исходя из гигиенических

требований. Так, для систем центрального отопления допустимое значение $A_{t_b}^{\text{доп}} = \pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$; при печном отоплении $A_{t_b}^{\text{доп}} = \pm 3,0 \text{ } ^\circ\text{C}$.

При аварийном режиме значение A_{t_b} можно определить с учетом минимальной температуры воздуха в помещении. Например, при наличии трубопроводов или систем, содержащих воду, температура воздуха не должна опускаться ниже $+5 \text{ } ^\circ\text{C}$, а допустимое значение амплитуды колебания температуры составит

$$A_{t_b}^{\text{доп}} = \pm (t_b - 5) / 2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Величина A_{t_b} должна зависеть от теплотехнических характеристик ограждений помещения и от причины, вызывающей эти колебания, т. е. амплитуды колебаний теплового потока A_q . В свою очередь, амплитуда колебаний теплового потока — это отклонение максимального или минимального значения теплового потока от его среднего значения. Найдем связь между амплитудой колебания температуры внутреннего воздуха и другими параметрами. Для упрощения выводов используем удельные тепловые потоки. Из определения амплитуды имеем

$$A_q = q_{\text{max}} - q_{\text{cp}}, \quad (4.1)$$

где q_{max} — максимальный тепловой поток, Вт/м^2 ; q_{cp} — среднее значение теплового потока, Вт/м^2 .

Выразим тепловые потоки через коэффициент тепловосприимчивости α_b :

$$q_{\text{max}} = \alpha_b (t_{b,\text{max}} - \tau_{b,\text{max}}); \quad q_{\text{cp}} = \alpha_b (t_b - \tau_b),$$

где t_b , τ_b — средние значения температуры воздуха в помещении и на внутренней поверхности соответственно, $^\circ\text{C}$; $t_{b,\text{max}}$, $\tau_{b,\text{max}}$ — максимальные значения этих температур.

Тогда получим

$$\begin{aligned} A_q &= \alpha_b (t_{b,\text{max}} - \tau_{b,\text{max}}) - \alpha_b (t_b - \tau_b) = \\ &= \alpha_b (t_{b,\text{max}} - t_b) - \alpha_b (\tau_{b,\text{max}} - \tau_b) = \alpha_b (A_{t_b} - A_{\tau_b}). \end{aligned} \quad (4.2)$$

Введем коэффициент теплоусвоения поверхности:

$$Y_{\text{в}} = A_q / A_{\text{тв}}, \quad (4.3)$$

откуда

$$A_{\text{тв}} = A_q / Y_{\text{в}}.$$

После подстановки этого выражения в уравнение (4.2) имеем

$$A_q = \alpha_{\text{в}} (A_{\text{тв}} - A_q / Y_{\text{в}}),$$

откуда

$$A_{\text{тв}} = A_q (1 / \alpha_{\text{в}} + 1 / Y_{\text{в}}). \quad (4.4)$$

Введем коэффициент теплопоглощения:

$$B = 1 / (1 / \alpha_{\text{в}} + 1 / Y_{\text{в}}). \quad (4.5)$$

Тогда с учетом выражения (4.5) получим

$$A_{\text{тв}} = A_q / B \quad \text{и} \quad A_q = A_{\text{тв}} B.$$

Для конструкции площадью F тепловой поток, воспринимаемый поверхностью, составит $Q = qF$, а значение амплитуды колебания теплового потока A_Q можно рассчитать по формуле

$$A_Q = A_q F = A_{\text{тв}} B F.$$

Для помещения в целом

$$A_Q = \Sigma A_{\text{тв}} B F = A_{\text{тв}} \Sigma B_i F_i,$$

где $\Sigma B_i F_i$ — теплопоглощение внутренних поверхностей помещения, Вт/°С.

В то же время амплитуда колебания теплового потока равна $A_Q = Q_{\text{max}} - Q_{\text{ср}}$. Ее можно выразить через коэффициент неравномерности отдачи тепла M :

$$M = A_Q / Q_{\text{ср}} = (Q_{\text{max}} - Q_{\text{ср}}) / Q_{\text{ср}}.$$

С учетом замен получим формулу для расчета амплитуды колебания температуры внутреннего воздуха [5]:

$$A_{tв} = 0,7MQ_{cp} / \Sigma B_i F_i, \quad (4.6)$$

где 0,7 — поправочный коэффициент; Q_{max} , Q_{cp} , Q_{min} — максимальное, среднее и минимальное значение теплопоступлений в помещение, Вт.

Теперь необходимо сравнить значение амплитуды колебания температуры внутреннего воздуха с действующими нормами и принять решение по организации отопления помещения.

Кроме того, следует обратить внимание на то, что для расчета амплитуды колебания температуры внутреннего воздуха необходимо иметь данные о режимах работы оборудования, систем отопления и использования помещения. Для определения теплопоглощения внутренних поверхностей помещения далее рассмотрим закономерности усвоения тепла этими поверхностями.

4.3. Теплоусвоение

Нестационарные процессы теплопередачи вызывают изменение температур на поверхности и в толще ограждающих конструкций. С этим явлением связано понятие «теплоусвоение» — способность ограждающих конструкций усваивать тепло. По мере прохождения через толщу ограждения колебательные процессы ослабевают, происходит затухание температурных колебаний. Решение задачи о затухании температурных волн получено с помощью дифференциального уравнения теплопроводности для нестационарных условий [7, 8]. Этими данными мы воспользуемся в дальнейшем.

Графически процесс затухания температуры в толще ограждения можно представить следующим образом (рис. 4.2). Максимальное изменение амплитуды колебаний температуры наблюдается в слое, прилегающем к поверхности со стороны периодического теплового воздействия. Этот слой называется слоем резких коле-

баний температуры. На второй стороне слоя резких колебаний амплитуда колебаний уменьшается в 2 раза.

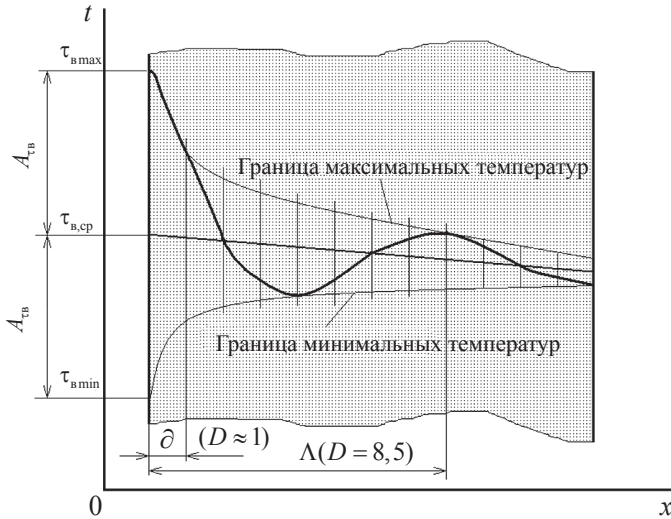


Рис. 4.2. Характер изменения температуры по толщине ограждения при нестационарной теплопередаче

В расчетах нестационарного режима используется понятие инерционности или массивности ограждения. Этот показатель определяется по формуле

$$D = R_s, \quad (4.7)$$

где R — термическое сопротивление, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; s — коэффициент теплоусвоения материала, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$.

Установлено, что одной длине температурной волны Λ соответствует тепловая инерция $D = 8,5$, а толщина слоя резких колебаний температуры $\delta_{рк}$ составляет около 1/8 длины волны Λ . Следовательно, величина тепловой инерции слоя резких колебаний температуры составит $D_{рк} = 8,5/8 = 1$.

Инерционность слоя резких колебаний температуры можно выразить через его термическое сопротивление и коэффициент теплоусвоения:

$$D_{\text{рк}} = R_{\text{рк}} s = (\delta_{\text{рк}} / \lambda_{\text{рк}}) s,$$

откуда определяется толщина слоя резких колебаний:

$$\delta_{\text{рк}} = \lambda_{\text{рк}} / s_{\text{рк}}, \quad (4.8)$$

где $\lambda_{\text{рк}}$, $s_{\text{рк}}$ — коэффициенты теплопроводности и теплоусвоения материала слоя резких колебаний.

Инерционность многослойного ограждения складывается из значений инерционности его слоев:

$$\Sigma D = \Sigma (R_i s_i). \quad (4.9)$$

Следует отметить, что процесс теплоусвоения оказывает существенное влияние на изменение температур в толще ограждения в наибольшей мере в пределах слоя резких колебаний. Это учитывается при определении коэффициента теплоусвоения поверхности со стороны периодического теплового воздействия.

5. ВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ

5.1. Значение влажностного режима

Влажностный режим наружного ограждения тесно связан с теплотехническим режимом. С повышением влажности строительных материалов повышается и их теплопроводность, поэтому увлажненные ограждения будут иметь пониженные теплотехнические качества. Следовательно, влажностный режим имеет теплотехническое значение. Поэтому коэффициенты теплопроводности определяются с учетом условий эксплуатации (сочетание влажностного режима помещения и зоны влажности по климатической карте).

Увеличение влажности материалов слоев наружного ограждения приводит к увеличению влажности внутреннего воздуха помещения. Также при увеличении теплопроводности уменьшается температура внутренней поверхности, что может привести к образованию плесени и конденсата на внутренней поверхности. В этом смысле можно считать, что влажностный режим имеет гигиеническое значение.

Влажностный режим имеет также техническое значение, поскольку накопление влаги в толщине ограждающей конструкции с учетом многократных циклов попеременного ее замерзания и оттаивания снижает прочность строительных материалов. Это может привести к образованию трещин, отслаиванию штукатурки и разрушению ограждающих конструкций и сооружений.

5.2. Источники поступления влаги в ограждения

Рассмотрим наиболее распространенные источники поступления влаги.

1. Строительная влага — влага, поступающая в строительные материалы при их изготовлении. Этот вид влаги устраняется

в течение первого года эксплуатации путем естественной сушки материала.

2. Грунтовая влага — влага, проникающая в ограждение на высоту до 1,5 м.

В качестве мер защиты от грунтовой влаги применяют гидроизоляцию фундаментов и нижней части наружных ограждений.

3. Атмосферная влага — влага, попадающая в ограждение с атмосферными осадками через стыки конструкций и непосредственно в материал при косом направлении осадков. В качестве мер борьбы используются устройство водостоков, покрытие поверхностей специальными материалами.

4. Бытовая и производственная влага (эксплуатационная) — влага, поступающая в ограждение при эксплуатации здания (мытьё, стирка, приготовление пищи, технологические процессы). Для устранения бытовой влаги необходимо обеспечить проведение процессов, связанных с выделением влаги, в специально отведенных местах; для устранения производственной влаги применяются укрытия оборудования и принудительная вентиляция. Для зданий с влажным режимом рекомендуется покрытие наружных ограждений с внутренней стороны водонепроницаемыми материалами.

5. Конденсация влаги из внутреннего воздуха в большинстве случаев является основным источником поступления влаги в ограждения. Влага из воздуха может конденсироваться как на внутренней поверхности ограждения, так и в его толще.

5.3. Основные понятия влажностного режима

Атмосферный воздух всегда содержит некоторое количество влаги в виде водяного пара, что и обуславливает его влажность.

Абсолютная влажность — количество водяных паров, содержащихся в 1 м^3 воздуха, $\text{г}/\text{м}^3$. Различают действительную влажность d , которой соответствует относительная влажность φ , и максимальную влажность d_{max} , которой соответствует максимальная относительная влажность $\varphi_{\text{max}} = 100 \%$.

Относительная влажность — отношение действительной абсолютной влажности к максимально возможной. Относительная влажность характеризует степень насыщения воздуха влагой:

$$\varphi = \frac{d}{d_{\max}} 100 \%. \quad (5.1)$$

Относительная влажность воздуха имеет большое гигиеническое значение. Нормальной относительной влажностью считается значение $\varphi = (30-60) \%$. Если $\varphi > 60 \%$, то это затрудняет отдачу влаги человеком с поверхности тела и ухудшает его состояние. Если $\varphi < 30 \%$, то это вызывает усиленное испарение влаги, что также отрицательно сказывается на самочувствии человека. Значения относительной влажности воздуха в помещениях различного назначения принимаются по нормам проектирования.

Парциальное давление — давление, которое имел бы водяной пар, входящий в состав воздуха, если бы он занимал весь объем. Парциальное давление зависит от температуры t , барометрического давления $P_{\text{бар}}$ и относительной влажности φ . Различают действительное парциальное давление e , которому соответствует фактическое значение t , $P_{\text{бар}}$, φ , и максимальное парциальное давление E , которому соответствует относительная влажность $\varphi = 100 \%$.

Для любых сочетаний параметров воздуха справедлива зависимость

$$e / E = \varphi / 100, \quad (5.2)$$

где e , E — действительное и максимальное парциальные давления, Па.

Значения максимальных парциальных давлений E приводятся в технической и справочной литературе [5, 10]. По этим данным получены эмпирические зависимости, которыми также можно пользоваться в инженерных расчетах.

Температура точки росы — это та температура, до которой надо охладить воздух, имеющий данную температуру, относительную влажность и барометрическое давление, чтобы он стал

насыщенным водяными парами, т. е. приобрел относительную влажность $\varphi = 100\%$. Для определения температуры точки росы необходимо иметь данные о температуре воздуха, относительной влажности и барометрическом давлении. Тогда можно определить максимальное парциальное давление E и действительное парциальное давление e . Затем находим температуру, для которой полученное значение парциального давления является максимальным. Это и будет температура точки росы τ_p . Проиллюстрируем способ определения τ_p примером.

Определим температуру точки росы воздуха, имеющего температуру $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ и относительную влажность $\varphi = 60\%$. Ниже приведены данные о максимальных парциальных давлениях E в интервале температур от 10 до 26 $^\circ\text{C}$.

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	10	12	14	16	18	20	22	24	26
$E, \text{ кПа}$	1,2	1,4	1,6	1,8	2,1	2,4	2,7	3,0	3,3

Находим, что при температуре $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ максимальное парциальное давление $E = 2,4\text{ кПа}$. Тогда действительное парциальное давление

$$e = 60 \cdot 0,01 \cdot 2,4 = 1,44\text{ кПа}.$$

При $e = E = 1,44\text{ кПа}$ определим температуру воздуха, при которой он становится насыщенным водяными парами (температуру точки росы). Согласно данным о максимальных парциальных давлениях, приведенных выше, получим для условий примера $\tau_p = 12\text{ }^\circ\text{C}$.

Для практических расчетов можно использовать приближенную формулу определения температуры точки росы τ_p :

$$\tau_p = 20,1 - (5,75 - 2,06 \cdot 10^{-3} e_v),$$

где e_v — действительное парциальное давление внутреннего воздуха, Па.

При понижении температуры воздуха ниже температуры точки росы избыточное количество влаги будет конденсироваться, т. е. превращаться в капельно-жидкое состояние. Аналогичное явление

происходит при контакте воздуха с поверхностью, имеющей температуру ниже температуры точки росы.

Внутренние поверхности наружных ограждений имеют более низкую температуру, чем температура окружающего воздуха. Поэтому имеется опасность конденсации влаги, увлажнения материалов и снижения их прочности, а также увеличения коэффициентов теплопроводности. При расчете теплозащиты строительными нормами предусматривается оценка возможности конденсации влаги на внутренней поверхности.

5.4. Конденсация влаги на внутренней поверхности

Конденсация влаги на внутренней поверхности наружного ограждения будет происходить, если температура ее окажется ниже температуры точки росы внутреннего воздуха, т. е. условие конденсации влаги можно представить неравенством

$$\tau_b < \tau_p. \quad (5.3)$$

Здесь имеется в виду температура внутренней поверхности на глади наружного ограждения, т. е. участка, находящегося на расстоянии 0,9 м от других наружных ограждений и теплопроводных включений.

Следует отметить, что температура угловой части ограждения τ_y ниже, чем температура на внутренней поверхности на глади наружного ограждения τ_b , т. е. $\tau_y < \tau_b$. Это подтверждается данными экспериментальных исследований и электромоделирования температурных полей неоднородных конструкций [5, 7]. В монографии проф. В. Н. Богословского [7] приведена эмпирическая зависимость, позволяющая приближенно рассчитать значение температуры на внутренней поверхности угловой части наружной стены:

$$(\tau_b - \tau_y) / (t_b - t_n) = 0,18 (1 - 0,23R_0),$$

где R_0 — общее сопротивление теплопередаче наружной стены, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

Формула справедлива в интервале $0,5 < R_0 < 2,5$.

Для угловой части наружного ограждения условие конденсации выражается неравенством

$$\tau_b > \tau_p > \tau_y. \quad (5.4)$$

Для защиты угловых частей наружных стен от выпадения конденсата необходимо предусматривать устройство стояков систем отопления в наружных углах.

Наряду с возможностью конденсации, характерной для стационарного режима теплопередачи, может иметь место периодическая конденсация при нестационарных тепловых режимах, связанная с недостаточной теплоустойчивостью помещений. При этом условие конденсации можно записать в виде неравенства

$$\tau_b > \tau_p > \tau_{b, \min}, \quad (5.5)$$

где $\tau_{b, \min}$ — минимальная температура на внутренней поверхности, °С.

В целях предотвращения возможности конденсации влаги на внутренних поверхностях необходимо принимать меры по снижению относительной влажности внутреннего воздуха (до допустимых пределов), обеспечивать устойчивую циркуляцию воздуха вблизи этих поверхностей, а также выполнять расчеты теплозащиты с учетом возможных режимов эксплуатации зданий и сооружений.

В помещениях с влажным и мокрым режимом должны предусматриваться технические решения по предотвращению проникновения влаги в толщу ограждения путем применения специальных покрытий и облицовок внутренних поверхностей.

5.5. Влагопередача

Необходимость расчета влажностного режима вызвана возможностью конденсации влаги и ее накопления в толще ограждения. Задачей расчета является предотвращение накопления влаги за годовой период эксплуатации.

Перемещение влаги через ограждение происходит за счет разности парциальных давлений водяного пара, содержащегося во внутреннем и наружном воздухе. Рассмотрим соотношение этих давлений. В холодный период температура внутреннего воздуха выше температуры наружного воздуха ($t_b > t_n$). Следовательно, максимальное парциальное давление внутреннего воздуха выше, чем наружного и $E_b > E_n$. Тогда и действительное парциальное давление водяного пара с внутренней стороны будет больше, чем с наружной: $e_b > e_n$.

Под действием разности давлений будет происходить поступление водяного пара в ограждение и его перемещение в направлении от большего парциального давления к меньшему.

Схема зон фазовых превращений водяного пара в толще ограждения приведена на рис. 5.1.

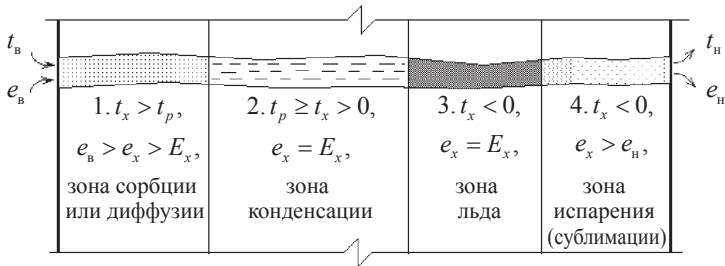


Рис. 5.1. Схема зон фазовых превращений водяного пара

Рассмотрим процесс фазовых превращений, который связан с изменением температуры в ограждении. Поступление влаги на внутреннюю поверхность осуществляется в результате диффузии или сорбции водяного пара (зона 1). При этом происходит поглощение влаги поверхностью. Начиная со слоя, где температура достигает значения температуры точки росы, может происходить конденсация влаги (зона 2). Этот процесс продолжается до слоя, температура которого равна $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. В зоне замерзания 3 происходит переход влаги из жидкого состояния в твердое. Ближе к наружной поверхности начинается процесс испарения (зона 4). Необходимо

заметить, что границы зон подвижны и зависят от периода года и температур наружного воздуха.

Для оценки количества водяного пара, проходящего через наружное ограждение, можно воспользоваться методом аналогии процессов тепло- и массообмена. Использовать аналогию этих процессов можно только на тех участках, где влага находится в газообразном состоянии.

Считая процесс прохождения потока влаги аналогичным процессу теплопроводности, получим аналогично уравнению теплопроводности для однослойного ограждения

$$q = \lambda / \delta (\tau_{в} - \tau_{н})$$

выражение для определения расхода пара

$$m = \mu / \delta (e_{в} - e_{н}), \quad (5.6)$$

где m — расход пара, мг/(м² · ч); μ — коэффициент паропрооницания материала, мг/(м · ч · Па); δ — толщина слоя, м; $e_{в}$, $e_{н}$ — действительные парциальные давления водяного пара внутреннего и наружного воздуха, Па.

Коэффициент паропрооницания материала является теплофизической характеристикой материала. Например, минеральная вата имеет значение $\mu = 0,3$; для железобетона $\mu = 0,03$, а для рубероида $\mu = 0,0014$ мг/(м · ч · Па) [1].

По аналогии с термическим сопротивлением однослойного ограждения $R = \delta / \lambda$ получим сопротивление паропрооницанию $R_{п} = \delta / \mu$. Общее сопротивление паропрооницанию $R_{он}$ для многослойного ограждения определяется по формуле

$$R_{он} = R_{пв} + R_{п1} + \dots + R_{пn} + R_{пн}, \quad (5.7)$$

где $R_{пв}$, $R_{п1}$, ..., $R_{пn}$, $R_{пн}$ — сопротивление паровосприятию, сопротивление паропрооницанию первого слоя, n -го слоя и сопротивление пароотдаче соответственно, Па · ч · м²/мг.

Так как величины сопротивлений паровосприятию $R_{пв}$ и пароотдаче $R_{пн}$ сравнительно малы (0,03 и 0,01 соответственно), в последующих расчетах ими можно пренебречь.

Условием конденсации влаги является равенство действительного парциального давления e_x максимальному E_x :

$$e_x = E_x. \quad (5.8)$$

Следовательно, для оценки возможности конденсации влаги в толще наружного ограждения необходимо определить значения максимального и действительного парциальных давлений в различных сечениях наружного ограждения. Эти расчеты можно проводить в табличной форме или графическим методом, разработанным К. Ф. Фокиным [5]. В зависимости от конструкции наружного ограждения и распределения температур и парциальных давлений по толщине слоев возможны различные варианты влажностного режима для холодного периода года, когда температура наружного воздуха в отапливаемых помещениях существенно ниже температуры внутреннего воздуха (рис. 5.2). Положение графиков парциального давления определяется с учетом изменения температур по толщине наружного ограждения.

Вариант 1 соответствует случаю, когда графики $E_x = f(x)$ и $e_x = f(x)$ не пересекаются, следовательно, в любом сечении «х» действительное парциальное давление e_x меньше максимального E_x , т. е. $e_x < E_x$. Это свидетельствует об отсутствии условий для конденсации влаги в толще ограждения.

Режим, когда графики $E_x = f(x)$ и $e_x = f(x)$ касаются (вариант 2), соответствует случаю возможной конденсации в плоскости, проходящей через точку касания.

Вариант 3, когда графики $E_x = f(x)$ и $e_x = f(x)$ пересекаются, является наиболее сложным. В точках пересечения $E_x = e_x$, следовательно, имеются условия для конденсации влаги в толще ограждения. Область возможной конденсации влаги находится между точками пересечения этих графиков.

Количество влаги, которое может сконденсироваться в толще ограждения, определяется как разность количеств водяного пара, приходящего в зону конденсации m_b и уходящего из нее m_n :

$$\Delta m = m_b - m_n, \quad (5.9)$$

где m_b, m_n — количество приходящего и уходящего пара, мг/(м² · ч).

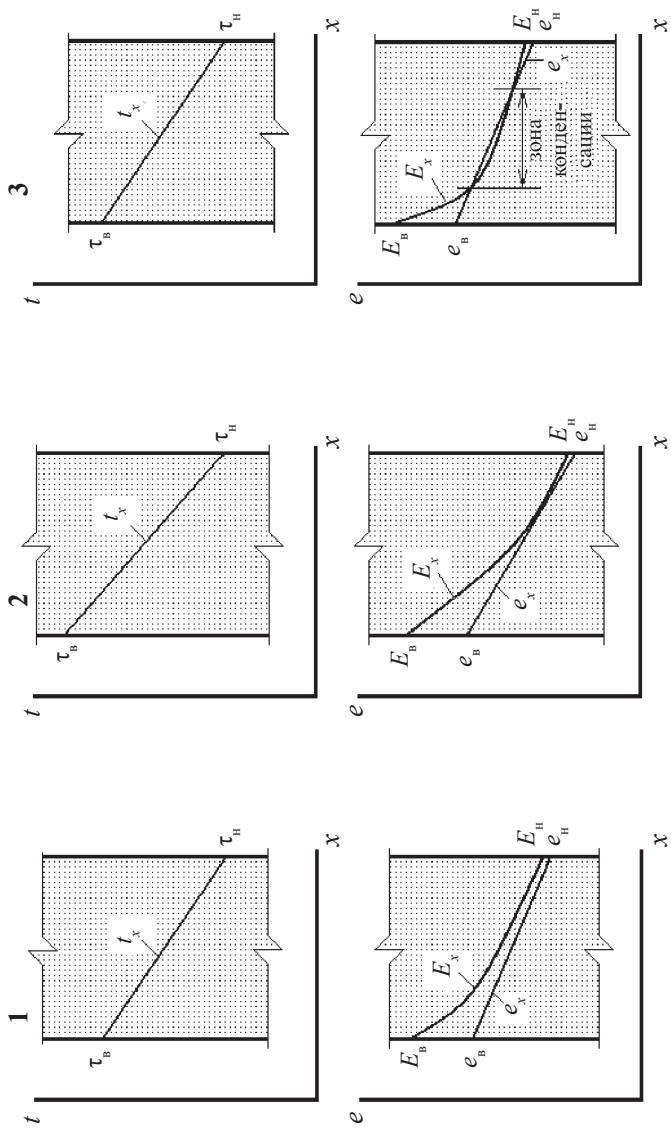


Рис. 5.2. Варианты влажностных режимов в толще ограждения

5.6. Расчет влажностного режима

Расчет возможного влажностного режима заданной конструкции ограждения проводится для стационарного режима. В результате расчета делается вывод о возможности конденсации влаги в толще ограждения. Строительными нормами предусмотрен расчет для трех периодов года: зимнего ($t_{\text{н}} < -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$), осенне-весеннего ($+5 \text{ }^{\circ}\text{C} > t_{\text{н}} > -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) и летнего ($t_{\text{н}} > +5 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Методика расчета приведена в разделе 7.

Расчет влажностного режима включает нахождение распределения температуры по толщине ограждения при заданной температуре наружного воздуха. Для этого можно воспользоваться аналитическим или графическим методом.

Аналитический метод основан на использовании уравнения теплового баланса для стационарных условий (3.1), согласно которому температура τ_x в любом сечении может быть рассчитана по формуле

$$\tau_x = t_{\text{в}} - \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_0} \sum_{i=0}^x R_i = t_{\text{в}} - q \sum_{i=1}^x R_i, \quad (5.10)$$

где τ_x — температура в сечении x , $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в}}$ — расчетная температура внутреннего воздуха, $^{\circ}\text{C}$; R_0 — общее сопротивление теплопередаче наружного ограждения, $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$; $\sum_{i=0}^x R_i$ — сумма термических сопротивлений на участке от воздуха помещения до рассматриваемого сечения, $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$; $q = (t_{\text{в}} - t_{\text{н}})/R_0$ — теплототери через 1 м^2 поверхности наружного ограждения, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Графический метод определения температур также основан на использовании уравнения теплового баланса для стационарных условий (3.1), согласно которому изменение температуры от слоя к слою пропорционально соответствующему сопротивлению. Следовательно, график температур в масштабе сопротивлений имеет вид прямой и может быть построен по двум точкам. Пример графика приведен в разделе 7.

График температур в масштабе сопротивлений $t = f(R)$ представляет прямую линию и может быть построен по двум точкам: при $t = t_{\text{в}} R = 0$ и при $t = t_{\text{н}} R = R_0$. Значения температур на границах слоев определяются точками пересечения наклонной линии изменения температуры с вертикальными линиями, проходящими через границы термических сопротивлений соответствующих слоев.

После нахождения температур определяются значения максимальных парциальных давлений водяных паров на границах слоев ограждения. В диапазоне температур от 0 до 100 °С можно воспользоваться формулой М. И. Фильнея:

$$E = 10^{(658 + 10,2t) / (236 + t)}, \quad (5.11)$$

где E — максимальное давление насыщенного водяного пара, Па; t — температура пара (принимается равной температуре воздуха или слоя), °С.

Действительные парциальные давления водяных паров на границах слоев рассчитывают по формуле

$$e_x = e_{\text{в}} - \frac{e_{\text{в}} - e_{\text{н}}}{R_{\text{по}}} \sum_{i=1}^x R_{\text{п}i} \quad (5.12)$$

или

$$e_x = e_{\text{в}} - m \sum_{i=1}^x R_{\text{п}i}, \quad (5.13)$$

где $e_{\text{в}}$, $e_{\text{н}}$ — действительные парциальные давления водяных паров во внутреннем и наружном воздухе, Па; $R_{\text{по}}$ — общее сопротивление паропроницанию ограждения, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$; $\sum_{i=1}^x R_{\text{п}i}$ — сумма сопротивлений паропроницанию на участке от внутренней поверхности ограждения до рассматриваемого сечения, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$; m — расход пара, проходящего через 1 м^2 поверхности ограждения, $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Действительные парциальные давления водяных паров во внутреннем и наружном воздухе рассчитываются по формулам

$$e_v = E_v \varphi_v; \quad e_n = E_n \varphi_n,$$

где φ_v, φ_n — относительные влажности внутреннего и наружного воздуха соответственно; E_v, E_n — максимальное парциальное давление водяного пара, рассчитанное при t_v и t_n соответственно, Па.

Общее сопротивление паропрооницанию конструкции наружного ограждения состоит из сопротивлений паропрооницанию отдельных слоев:

$$R_{\text{он}} = R_{\text{н1}} + R_{\text{н2}} + \dots + R_{\text{ни}}, \quad (5.14)$$

где $R_{\text{ни}} = \delta_i / \mu_i$ — сопротивление паропрооницанию i -го слоя ограждения, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$; δ_i — толщина i -го слоя ограждения, м; μ_i — коэффициент паропрооницаемости материала i -го слоя, $\text{мг} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$, принимаемый по [1].

По вычисленным значениям e_x строим график $e = f(x)$. Графики изменения максимального и действительного парциальных давлений наносятся на чертеж ограждения. Анализируя взаимное расположение графиков, необходимо сделать вывод о возможности конденсации водяных паров в толще ограждения.

6. ВОЗДУХОПРОНИЦАНИЕ

В процессе эксплуатации зданий между внешней и внутренней средой помимо теплообмена происходит постоянный массообмен. Наружный воздух может проникать в помещения через щели, поры и неплотности в наружных ограждениях и по каналам вентиляционных систем. Внутри зданий воздух проникает из одного помещения в другое через двери, неплотности, лифтовые шахты, мусоропроводы. Удаление воздуха из помещений происходит также через щели, поры и неплотности в наружных ограждениях и по каналам вентиляционных систем. Проникновение воздуха снаружи называется *инфильтрацией*, удаление из помещений — *эксфильтрацией*.

С гигиенической точки зрения инфильтрация необходима, так как дополняет воздухообмен помещения (вентиляцию). Однако поступление наружного воздуха увеличивает теплотери помещений и затраты на отопление. В последние годы находят все более широкое применение новые герметичные конструкции заполнения оконных и дверных проемов, полностью исключающие проникновение наружного воздуха. В связи с этим появились проблемы вентиляции зданий, где предусматривается естественный воздухообмен. Эта проблема особенно актуальна для жилых зданий и требует решения. Возможен переход на механическую приточную вентиляцию или устройство заполнения оконных проемов с клапанами наружного воздуха.

6.1. Воздухопроницаемость наружных ограждений

Основной характеристикой явления воздухопроницания является расход воздуха, проникающего через наружное ограждение. В строительной теплофизике величину этого расхода принято называть воздухопроницаемостью $G_{и}$, измеряемую в $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Установлено, что количество проходящего воздуха зависит от перепада давлений и воздухопроницаемости наружных ограждений, которая различна для заполнений оконных и дверных проемов, стыков конструкций и наружных стен. Зависимость $G_{и} = f(\Delta P)$ для наружных стен, окон, дверей и каналов систем вентиляции можно представить в виде

$$G_{и} = (\Delta P / \Delta P_0)^n / R_{он}, \quad (6.1)$$

где ΔP — перепад давлений на наружной и внутренней сторонах ограждающей конструкции, Па; $\Delta P_0 = 10$ Па — перепад давлений, при которых определяется воздухопроницаемость изделия; $R_{он}$ — общее сопротивление воздухопроницанию, $\text{м}^2 \cdot \text{ч}/\text{кг}$; n — показатель степени, зависящий от вида ограждения: для наружных стен $n = 1$, для заполнений оконных и дверных проемов $n = 2/3$, для каналов вентиляционных систем $n = 1/2$.

Общее сопротивление воздухопроницанию $R_{он}$ является аналогом ранее упоминавшихся общего сопротивления теплопередаче R_0 и общего сопротивления паропроницанию $R_{оп}$.

С учетом этого общее сопротивление воздухопроницанию наружных стен зависит от конструкции и вида материала слоев наружного ограждения и рассчитывается по формуле

$$R_{он} = R_{и1} + R_{и2} + \dots = \Sigma R_{иi} = \Sigma (\delta_i / i_i), \quad (6.2)$$

где $R_{и1}$, $R_{и2}$... — сопротивления воздухопроницанию слоев, $\text{м}^2 \cdot \text{ч}/\text{кг}$; δ_i — толщина слоя, м; i_i — коэффициенты воздухопроницания слоев, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{ч})$.

Для заполнений оконных и дверных проемов общее сопротивление воздухопроницанию $R_{он}$ определяется в зависимости от величины воздухопроницаемости $G_{и}$, приводимой в сертификате изделия, по формуле

$$R_{он} = (1 / G_{и}) / (\Delta P / \Delta P_0)^n, \quad (6.3)$$

где перепад давлений ΔP рассчитывается по формуле (6.9) из раздела 6.3.

6.2. Физические основы процесса

При наличии разности давления воздуха с одной и с другой стороны ограждения может проникать воздух в направлении от большего давления к меньшему. Наружный воздух может поступать в здание через щели, поры и неплотности в наружных ограждениях.

Перепад давления, под действием которого происходит инфильтрация, равен разности давлений с наружной P_n и внутренней P_b стороны наружного ограждения:

$$\Delta P = P_n - P_b.$$

Причинами возникновения перепада давлений с наружной и внутренней стороны наружного ограждения являются различие температур внутреннего и наружного воздуха (тепловое давление), воздействие ветра на здание (ветровое давление) и дебаланс производительности систем приточной и вытяжной вентиляции. Рассмотрим эти явления более подробно.

Тепловое давление

В холодный период года температура наружного воздуха t_n значительно ниже температуры внутреннего воздуха t_b в отапливаемых помещениях. Учитывая, что плотность ρ и удельный вес воздуха γ обратно пропорциональны температуре:

$$\rho = 353/T \text{ и } \gamma = 3463/T,$$

получаем, что удельный вес наружного воздуха γ_n и гравитационное давление $P_n = \gamma_n H$ с наружной стороны будут больше, чем удельный вес внутреннего воздуха γ_b и гравитационное давление $P_b = \gamma_b H$ с внутренней стороны наружного ограждения. Расчетная схема для определения теплового давления приведена на рис. 6.1.

Так как $P_n > P_b$, то возникает перепад давлений $\Delta P_{\text{тепл}}$:

$$\Delta P_{\text{тепл}} = P_n - P_b = H(\gamma_n - \gamma_b), \quad (6.4)$$

где H — высота здания или его части.

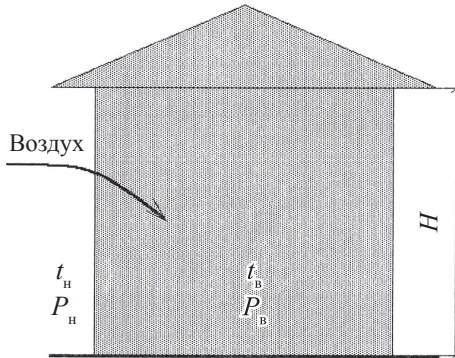


Рис. 6.1. Схема для определения теплового давления

Воздействие ветра

На ограждающие конструкции здания оказывает внешнее воздействие ветер. При этом ветровые давления с наветренной и заветренной стороны здания различны, что объясняется аэродинамикой обтекания здания (рис. 6.2).

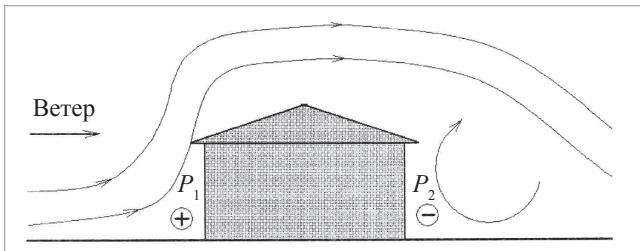


Рис. 6.2. Схема обтекания здания:
 \oplus — наветренная поверхность; \ominus — заветренная поверхность

Ветровое давление рассчитывается по формуле

$$P_{\text{ветр}} = c w_{\text{в}}^2 \rho_{\text{н}} / 2,$$

где c — аэродинамический коэффициент; $w_{\text{в}}$ — скорость ветра, м/с, принимается по [4]; $\rho_{\text{н}}$ — плотность наружного воздуха, кг/м³.

Давление ветрового потока на наветренной поверхности равно

$$P_1 = c_1 w_b^2 \rho_n / 2,$$

а давление ветрового потока на заветренной поверхности

$$P_2 = c_2 w_b^2 \rho_n / 2,$$

где c_1, c_2 — аэродинамические коэффициенты, принимаемые по СНиП «Нагрузки и воздействия» [3] в зависимости от формы и габаритов здания.

Поскольку с наветренной стороны аэродинамические коэффициенты имеют положительные значения, а с заветренной — отрицательные, давление P_1 с наветренной стороны больше давления P_2 . Тогда перепад давлений, вызванный воздействием ветра, определится как

$$\Delta P_{\text{ветр}} = P_1 - P_2 = (c_1 - c_2) w_b^2 \rho_n / 2. \quad (6.5)$$

Дебаланс производительности приточных и вытяжных систем

Дебаланс производительности приточных и вытяжных систем вентиляции приводит к возникновению дополнительного перепада давлений $\Delta P_{\text{вент}}$. Как правило, это явление характерно для промышленных зданий, где воздух, забираемый из помещений на технологические нужды, зачастую не компенсируется соответствующим количеством приточного воздуха. Для жилых и общественных зданий это дополнительное давление не учитывается.

Так как давления, вызывающие инфильтрацию, действуют совместно, перепад давления, под действием которого происходит инфильтрация, определяется как сумма перепадов давления теплового, ветрового и вызванного дебалансом производительности систем механической вентиляции:

$$\Delta P_{\text{инф}} = \Delta P_{\text{тепл}} + \Delta P_{\text{ветр}} + \Delta P_{\text{вент}}. \quad (6.6)$$

Полученное выражение используется в последующих расчетах. Более детально характер распределения давлений в здании рассмотрен в работе [9].

6.3. Проверка ограждающих конструкций на инфильтрацию

Ранее было сказано, что инфильтрация приводит к увеличению затрат тепла на отопление, так как часть тепла идет на нагревание инфильтрующегося воздуха. В целях уменьшения и наиболее точного учета этих затрат производят проверку соответствия ограждающих конструкций требованиям строительных норм по инфильтрации. В расчетах ограждающих конструкций на воздухопроницаемость оценка воздухопроницаемости слоев производится по величине их сопротивлений воздухопроницанию. При этом сопротивление воздухопроницанию ограждающих конструкций зданий и сооружений должно быть не менее требуемого:

$$R_{\text{ои}} \geq R_{\text{ои}}^{\text{тп}}, \quad (6.7)$$

где $R_{\text{ои}}^{\text{тп}}$ — требуемое сопротивление инфильтрации, $\text{м}^2 \cdot \text{ч}/\text{кг}$.

Требуемое сопротивление инфильтрации определяется по формуле

$$R_{\text{ои}}^{\text{тп}} = (1 / G^{\text{н}}) / (\Delta P / \Delta P_0)^n, \quad (6.8)$$

где $G^{\text{н}}$ — нормативная воздухопроницаемость ограждающей конструкции, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, принимаемая по [1] в зависимости от вида наружного ограждения; ΔP — разность давлений на наружной и внутренней поверхностях ограждающей конструкции, Па; $\Delta P_0 = 10$ Па — перепад давлений, при котором определяется воздухопроницаемость изделия или образца материала.

Разность давлений на наружной и внутренней поверхностях ограждающей конструкции определяется по формуле

$$\Delta P = 0,55H(\gamma_{\text{н}} - \gamma_{\text{в}}) + 0,03 \gamma_{\text{н}} w_{\text{в}}^2, \quad (6.9)$$

где H — высота здания, м; 0,55 — коэффициент, учитывающий положение среднего элемента наружного ограждения по высоте.

Фактическое сопротивление воздухопроницанию рассчитывается по формуле (6.2) для наружных стен и по формуле (6.3) для

заполнений оконных и дверных проемов и фонарей производственных зданий.

На основании сопоставления требуемого и фактического сопротивлений воздухопроницанию проверяется выполнение условия (6.7) и делается вывод о соответствии запроектированной конструкции действующим нормативам [1]. При необходимости следует заменить тип заполнения проема или материала одного из слоев наружной стены.

6.4. Определение затрат тепла на нагрев инфильтрующегося воздуха

Затраты тепла на нагрев инфильтрующегося воздуха можно определить по известному уравнению теплового баланса как расход тепла на нагрев определенного объема воздуха:

$$Q_n = c G_n (t_b - t_n), \quad (6.10)$$

где c — теплоемкость воздуха, Дж/(кг · °С); G_n — расход инфильтрующегося воздуха, кг/(м² · ч); t_b , t_n — температуры внутреннего и наружного воздуха, °С.

При расчете затрат тепла на нагрев инфильтрующегося воздуха необходимо определить фактический расход воздуха G_n^ϕ , прорывающегося в помещение:

$$G_n^\phi = (\Delta P^\phi / \Delta P_o)^n / R_{он}^\phi, \quad (6.11)$$

где ΔP^ϕ — фактический перепад давления, Па; $R_{он}^\phi$ — фактическое сопротивление воздухопроницанию, (м² · ч · Па)/кг;

Фактический перепад давления определяется для каждого этажа здания по формуле

$$\Delta P^\phi = (H - h) (\gamma_n - \gamma_b) + 0,05 \gamma_n w_b^2 (c_n - c_3) k, \quad (6.12)$$

где H — высота здания от поверхности земли до верха карниза, м; h — расстояние от уровня земли до оси рассматриваемого ограждения, м; c_n , c_3 — аэродинамические коэффициенты на наветренной

и заветренной сторонах здания соответственно, определяемые по [3]; k — коэффициент, учитывающий высоту здания и тип местности, принимаемый по [Там же].

Так как инфильтрующийся воздух, проходя через щели и неплотности наружных ограждений, несколько нагревается за счет встречного теплового потока, то необходимо включить коэффициенты учета влияния встречного теплового потока: $A_{\text{нс}} = 0,8$; $A_{\text{ок}} = 0,6$.

Таким образом, формула (6.10) после подстановки выражения (6.11), коэффициентов учета влияния встречного теплового потока и площадей наружных ограждений $F_{\text{ок}}$ и $F_{\text{нс}}$ примет вид

$$Q_{\text{и}} = c(G_{\text{и,ок}}^{\phi} A_{\text{ок}} F_{\text{ок}} + G_{\text{и,нс}}^{\phi} A_{\text{нс}} F_{\text{нс}}) (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) / 3600, \quad (6.13)$$

где 3600 — переводной коэффициент на расход воздуха.

Величина затрат тепла на нагрев инфильтрующегося воздуха учитывается при определении тепловой мощности систем отопления.

6.5. Затраты тепла на нагрев вентиляционного воздуха в жилых зданиях

Существующие нормы [6] предусматривают устройство вытяжной вентиляции в жилых зданиях через каналы из помещений вспомогательного назначения (ванные комнаты, кухни, санузлы). Также установлены необходимые объемы удаляемого воздуха [Там же]. Поскольку устройство специальных систем приточной вентиляции для данных зданий в большинстве случаев не предусматривается, компенсация вытяжной вентиляции осуществляется наружным воздухом, на нагрев которого также необходимы затраты тепла. Расчет этих затрат можно производить с использованием формулы (6.10), в которой расход воздуха $G_{\text{в}}$ принимается по нормам воздухообмена [Там же]. Тогда получим

$$Q_b = cG_b(t_b - t_n), \quad (6.14)$$

где Q_b — затраты тепла на нагрев вентиляционного воздуха, Вт; c — теплоемкость воздуха $c = 1000$ Дж/(кг · °С); t_b, t_n — температуры внутреннего и наружного воздуха, °С, принимаемые по [3, 6].

Например, при площади квартиры не более 20 м²/чел. норма воздухообмена по [6] составляет 3 м³/ч на 1 м² площади жилых комнат. При плотности внутреннего воздуха $\rho_b = 1,2$ кг/м³ получим $G_b = 3,6$ кг/(м² · ч) = 10⁻³ кг/с.

Согласно рекомендациям СНиП «Отопление, вентиляция и кондиционирование» [12] в качестве расчетного значения необходимо принимать большее из результатов, полученных по формулам (6.13) и (6.14). При выполнении этих расчетов необходимо иметь данные о конструкции заполнений оконных проемов.

7. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Курсовая работа по дисциплине должна содержать следующие разделы:

1. Исходные данные.
2. Теплотехнический расчет.
3. Расчет теплоустойчивости помещения.
4. Влажностный режим ограждения.

Результаты работы должны быть оформлены в соответствии со стандартом предприятия СТП УГТУ-УПИ 5-1-2003 «Текстовые и графические документы по архитектурно-строительной тематике».

7.1. Исходные данные

Исходные данные для выполнения курсовой работы выбираются по номеру задания, определяемому преподавателем. Местонахождение здания и зона влажности по карте, номер и схема стеновой панели, номер и план комнаты, температуры наружного воздуха, продолжительность отопительного периода приведены в прил. 1–3.

Расчетная температура внутреннего воздуха t_b принимается для жилых комнат в холодный период года равной $t_b = +18\text{ °C}$ при температуре холодной пятидневки $t_n \geq -30\text{ °C}$ и $t_b = +20\text{ °C}$ при $t_n < -30\text{ °C}$; относительная влажность воздуха $\phi = 55\%$.

Капитальные внутренние стены выполнены из силикатного кирпича (плотность $\rho = 1800\text{ кг/м}^3$) толщиной 380 мм, внутренние перегородки — из бетонных плит ($\rho = 2400\text{ кг/м}^3$) толщиной 100 мм. Отделка внутренних поверхностей стен такая же, как у наружной стеновой панели по заданию. Конструкции перекрытий принимаются по прил. 4. Высота помещения между отметками

полов 3,0 м; высота окна 1,8 м; высота двери 2,0 м; толщину деревянной двери принять 40 мм.

Теплотехнические показатели строительных материалов приведены в прил. 5 в зависимости от условий эксплуатации ограждающих конструкций. Условия эксплуатации принимаются с учетом зоны влажности и влажностного режима помещения по табл. 7.1. Зоны влажности городов даны в прил. 1. Влажностный режим для жилых зданий нормальный.

Таблица 7.1

Условия эксплуатации ограждающих конструкций

Влажностный режим помещений	Условия эксплуатации в зонах влажности		
	1 (сухая)	2 (нормальная)	3 (влажная)
Сухой	А	А	Б
Нормальный	А	Б	Б
Влажный	Б	Б	Б

7.2. Теплотехнический расчет

Согласно строительным нормам сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций R_0 следует принимать равным большому из двух: $R_0^{тп}$ (требуемое сопротивление теплопередаче по санитарно-гигиеническим условиям) и $R_0^{эп}$ (сопротивление теплопередаче по условиям энергосбережения).

Следует обратить внимание, что строительные нормы допускают определять уровень теплозащиты по величине сопротивления теплопередаче по санитарно-гигиеническим требованиям для объектов с избыточными тепловыделениями, а также для реконструируемых зданий.

Требуемое сопротивление теплопередаче

Сопротивление теплопередаче $R_0^{тп}$ является наименьшим, при котором обеспечивается допустимая по санитарно-гигиеническим требованиям минимальная температура внутренней поверхности

ограждения при расчетной зимней температуре наружного воздуха; и рассчитывается оно по формуле

$$R_0^{\text{тp}} = \frac{(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})n}{\alpha_{\text{в}}\Delta t^{\text{н}}}, \quad (7.1)$$

где $R_0^{\text{тp}}$ — требуемое сопротивление теплопередаче, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$; $t_{\text{в}}$ — расчетная температура внутреннего воздуха, °C ; $t_{\text{н}}$ — расчетная температура наружного воздуха, равная температуре холодной пятидневки, °C ; n — поправочный коэффициент на расчетную разность температур, зависящий от положения наружной поверхности по отношению к наружному воздуху, для наружных стен $n = 1$; $\Delta t^{\text{н}}$ — нормируемый температурный перепад (разность) между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности стены, принимаемый по табл. 7.2; $\alpha_{\text{в}}$ — коэффициент тепловосприятости внутренней поверхности ограждения, принимаемый для гладких внутренних поверхностей равным $8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$.

Таблица 7.2

Значения нормируемого температурного перепада $\Delta t^{\text{н}}$

Назначение зданий	Значения $\Delta t^{\text{н}}$, °C		
	для наружных стен	для покрытий и чердачных перекрытий	для перекрытий над подвалом и проездами
Жилые, лечебные, детские	4	3	2
Общественные, административные, бытовые	4,5	4	2,5
Производственные с сухим и нормальным режимом	$t_{\text{в}} - t_{\text{п}}$, но не > 7	$0,8(t_{\text{в}} - t_{\text{п}})$ но не > 6	2,5
Производственные с влажным режимом	$t_{\text{в}} - t_{\text{п}}$	$0,8(t_{\text{в}} - t_{\text{п}})$	2,5

Примечание. В табл. 7.2 $t_{\text{п}}$ — температура точки росы при расчетных значениях $t_{\text{в}}$ и относительной влажности воздуха $\phi_{\text{в}}$.

Требуемое сопротивление теплопередаче окон $R_0^{\text{тp}}$ принимается в зависимости от разности температур внутреннего воздуха

и средней температуры наиболее холодной пятидневки ($t_b - t_n$) по табл. 7.3. Значение выбранного сопротивления теплопередаче и соответствующую ему конструкцию остекления следует привести в пояснительной записке.

Для общественных и производственных зданий значения R_0^{TP} окон и фонарей принимаются по [1].

Сопротивление теплопередаче по условиям энергосбережения

Сопротивление теплопередаче по условиям энергосбережения $R_0^{\text{ЭН}}$ принимается по табл. 7.4 в зависимости от назначения здания, вида наружного ограждения и величины градусосуток отопительного периода B (показателя суровости климата). Показатель B рассчитывается по формуле

$$B = (t_b - t_{\text{он}}) Z_{\text{он}},$$

где $t_{\text{он}}$ — средняя температура наружного воздуха за отопительный период, °С; $Z_{\text{он}}$ — продолжительность отопительного периода, сут.

Таблица 7.3

Значения R_0^{TP} и конструкции остекления для окон жилых зданий

$(t_b - t_n), ^\circ\text{C}$	$R_0^{\text{TP}}, \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	Тип остекления
До 25	0,18	Одинарное в деревянных переплетах
Свыше 25 до 44	0,39	Двойное в деревянных спаренных переплетах
Свыше 44 до 49	0,42	Двойное в деревянных отдельных переплетах
Свыше 49	0,53	Тройное в деревянных переплетах (спаренный и одинарный)

Определение толщины утепляющего слоя

Расчетное сопротивление теплопередаче R_0^{P} ограждающей конструкции принимается равным большему из полученных значений R_0^{TP} и $R_0^{\text{ЭН}}$. Из уравнения (7.2) находится термическое сопротивление слоя утеплителя $R_{\text{ит}}$, по величине которого можно определить толщину утепляющего слоя конструкции:

$$R_0^p = 1/\alpha_n + R_1 + \dots + R_{\text{ит}} + \dots + R_n + 1/\alpha_n, \quad (7.2)$$

где $R_1, \dots, R_{\text{ит}}, \dots, R_n$ — термические сопротивления отдельных слоев ограждающей конструкции, определяемые для всех слоев (за исключением воздушных прослоек) как $R_i = \delta_i/\lambda_p, \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$; α_n — коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции; для зимних условий согласно [1] для поверхностей, соприкасающихся с наружным воздухом, $\alpha_n = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$.

Термическое сопротивление замкнутых вертикальных воздушных прослоек при толщине 0,03 ... 0,05 м можно принять согласно [1] $R_{\text{вт}} = 0,16 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}$.

Таблица 7.4

**Сопротивление теплопередаче
по условиям энергосбережения $R_0^{\text{н}}$**

Назначение зданий	Тысячи градусо-суток	Сопротивление теплопередаче $R_0^{\text{н}}, \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$			
		стен	покрытий	перекрытий неотапливаемых помещений	окон
Жилые, лечебные, детские	2	2,1	3,2	2,8	0,35
	4	2,8	4,2	3,7	0,40
	6	3,5	5,2	4,6	0,45
	8	4,2	6,2	5,5	0,50
	10	4,9	7,2	6,4	0,55
	12	5,6	8,2	7,3	0,60
Общественные	2	1,6	2,4	2,0	0,33
	4	2,4	3,2	2,7	0,38
	6	3,0	4,0	3,4	0,43
	8	3,6	4,8	4,1	0,48
	10	4,2	5,6	4,8	0,53
	12	4,8	6,4	5,5	0,58
Производственные	2	1,4	2,0	1,4	0,21
	4	1,8	2,5	1,8	0,24
	6	2,2	3,0	2,2	0,27
	8	2,6	3,5	2,6	0,30
	10	3,0	4,0	3,0	0,33
	12	3,4	4,5	3,4	0,36

Пример 1. Для наружной трехслойной стеновой панели жилого дома (рис. 7.1) определить толщину слоя утеплителя δ_{2yt} из керамзитобетона.

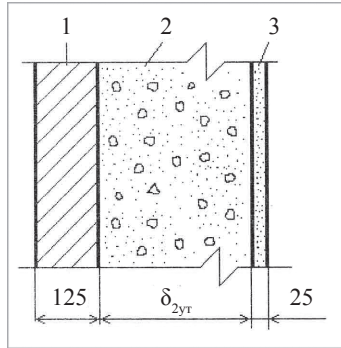


Рис. 7.1. Схема стеновой панели:

- 1 — кирпичная кладка из глиняного кирпича ($\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$);
- 2 — керамзитобетон ($\rho = 800 \text{ кг/м}^3$);
- 3 — известково-песчаная штукатурка ($\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$)

Исходные данные

Температура внутреннего воздуха $t_b = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, температура наружного воздуха $t_n = -28 \text{ }^\circ\text{C}$, средняя температура наружного воздуха за отопительный период $t_{он} = -7,8 \text{ }^\circ\text{C}$, продолжительность отопительного периода 280 суток. Зона влажности — 2, условия эксплуатации Б (см. табл. 7.1).

Значения коэффициентов теплопроводности материалов по прил. 2: для кирпичной кладки $\lambda_1 = 0,81 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$; для керамзитобетона $\lambda_2 = 0,31 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$; для штукатурки $\lambda_3 = 0,81 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$.

Решение

Найдем минимальное сопротивление теплопередаче, требуемое по санитарно-гигиеническим условиям. Согласно уравнению (7.1)

$$R_0^{тp} = \frac{(t_b - t_n)n}{\alpha_b \Delta t^H} = \frac{(20 + 28)1}{8,7 \cdot 4} = 1,38 \text{ м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C/Вт.}$$

Величина градусо-сутки отопительного периода составляет

$$B = (t_{\text{в}} - t_{\text{оп}}) Z_{\text{оп}} = (20 + 7,8) 280 = 7784 \text{ град} \cdot \text{сут.}$$

По табл. 7.4 находим сопротивление теплопередаче по условиям энергосбережения: $R_0^{\text{нн}} = 2,4 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$. Так как большей является последняя величина $R_0^{\text{нн}}$, ее и принимаем в качестве расчетного сопротивления теплопередаче.

Уравнение (7.2) примет вид

$$2,4 = 1/8,7 + 0,125/0,81 + \delta_{2\text{yt}}/0,31 + 1/23.$$

Из последнего соотношения находим толщину утепляющего слоя $\delta_{2\text{yt}} = 0,589 \text{ м}$ и округляем до величины $0,6 \text{ м}$.

7.3. Расчет теплоустойчивости помещения

Тепловой режим помещения, как правило, нестационарный. Это связано с изменениями температуры наружного воздуха, теплоотдачи систем отопления, тепловыделений от оборудования, теплопоступлений от солнечной радиации. При уменьшении теплопоступлений воздух в помещении начинает охлаждаться и его температура со временем уменьшается. Этому препятствует теплоотдача в помещение всех ранее нагретых поверхностей ограждающих конструкций, которые обладают теплоаккумулирующими свойствами.

В курсовой работе необходимо определить амплитуду изменения температуры внутреннего воздуха для заданной комнаты при регулировании работы системы центрального отопления пропусками при $t_{\text{н}} = 0 \text{ °C}$. Режим регулирования принять следующий: $m = 3 \text{ ч}$ — нагон (система отопления работает), $n = 3 \text{ ч}$ — пропуск (система отопления отключена).

Величина $A_{\text{тв}}$ рассчитывается по формуле

$$A_{\text{тв}} = 0,7 M Q_{\text{ср}} / \sum B_i F_i, \quad (7.3)$$

где M — коэффициент неравномерности теплоотдачи нагревательных приборов; $M = (Q_{\text{макс}} - Q_{\text{мин}}) / 2Q_{\text{ср}}$; $Q_{\text{макс}}$ — максимальная

теплоотдача нагревательных приборов, равная теплопотерям через наружные ограждения при температуре наружного воздуха в момент отключения отопления, Вт; $Q_{\text{мин}}$ — минимальная теплоотдача нагревательных приборов, равная нулю при отключении отопления, Вт; $Q_{\text{ср}}$ — средняя во времени теплоотдача нагревательных приборов, Вт; $Q_{\text{ср}} = (mQ_{\text{макс}} + nQ_{\text{мин}})/(m + n)$; m, n — время работы и отключения системы отопления, ч; $\Sigma B_i F_i$ — теплопоглощение внутренних поверхностей ограждающих конструкций, Вт/°С.

Коэффициенты теплопоглощения B внутренних поверхностей ограждений, Вт/(м² · °С) находятся по формуле

$$B = 1/(1/\alpha_b + 1/Y_b), \quad (7.4)$$

где α_b — коэффициент тепловосприятия поверхности со стороны периодического теплового воздействия, Вт/(м² · °С); Y_b — коэффициент теплоусвоения этой поверхности, Вт/(м² · °С).

Способ определения величины Y_b зависит от положения границы слоя резких колебаний температуры. Отметим, что слой резких колебаний — это слой, прилегающий к поверхности со стороны периодического теплового воздействия. На другой его стороне амплитуда колебания температуры составляет половину максимального значения на поверхности ограждения. Установлено, что инерционность слоя резких колебаний численно равна единице ($D_{\text{рк}} = 1$). Здесь используется показатель инерционности D , определяемый как $D = RS$, где S — коэффициент теплоусвоения материала, Вт/(м² · °С).

Нужно иметь в виду, что коэффициент теплоусвоения материала слоя конструкции S , Вт/(м² · °С), характеризующий способность материала усваивать тепло, зависит от теплофизических характеристик материала и периода изменения теплового потока:

$$S = \sqrt{\frac{2\pi\lambda c\rho}{3600Z}}, \quad (7.5)$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала по условиям эксплуатации А или Б, Вт/(м · °С); c — удельная теплоемкость,

Дж/(кг · °С); ρ — плотность, кг/м³; Z — период изменения теплового потока, ч.

При использовании значений коэффициентов теплоусвоения материалов S_{24} для периода изменения теплового потока $Z = 24$ ч по прил. 5 значения коэффициентов теплоусвоения материалов для других значений Z могут быть определены по формуле

$$S = S_{24} \sqrt{24 / Z}. \quad (7.6)$$

Если тепловая инерция первого от внутренней поверхности слоя ограждающей конструкции $D_1 = R_1 S_1 > 1$ (рис. 7.2, а), граница слоя резких колебаний температуры находится в пределах первого слоя ограждения. В этом случае затухание колебаний температуры по толщине ограждения определяется только теплотехническими свойствами материала первого слоя и $Y_b = S_1$.

Если тепловая инерция первого слоя $D_1 < 1$, то следует рассчитать тепловую инерцию второго слоя $D_2 = R_2 S_2$ и определить тепловую инерцию первых двух слоев $D_1 + D_2$. При $D_1 + D_2 > 1$ граница слоя резких колебаний температуры находится в пределах второго слоя конструкции (рис. 7.2, б) и на затухание колебаний температуры оказывают влияние теплотехнические свойства материалов и первого, и второго слоя. В этом случае расчет коэффициента теплоусвоения Y_b производится по формуле

$$Y_b = \frac{R_1 S_1^2 + S_2}{1 + R_1 S_2}. \quad (7.7)$$

Для других случаев положения границы слоя резких колебаний температуры величина Y_b может быть определена по методике, приведенной в [3]. При этом определение Y_b начинается с внутренней поверхности $(n - 1)$ -го слоя, где n — число слоев, имеющих $\Sigma D > 1$ (рис. 7.2, в).

Коэффициент теплоусвоения $(n - 1)$ -го слоя равен

$$Y_{n-1} = \frac{R_{n-1} S_{n-1}^2 + S_n}{1 + R_{n-1} S_n}, \quad (7.8)$$

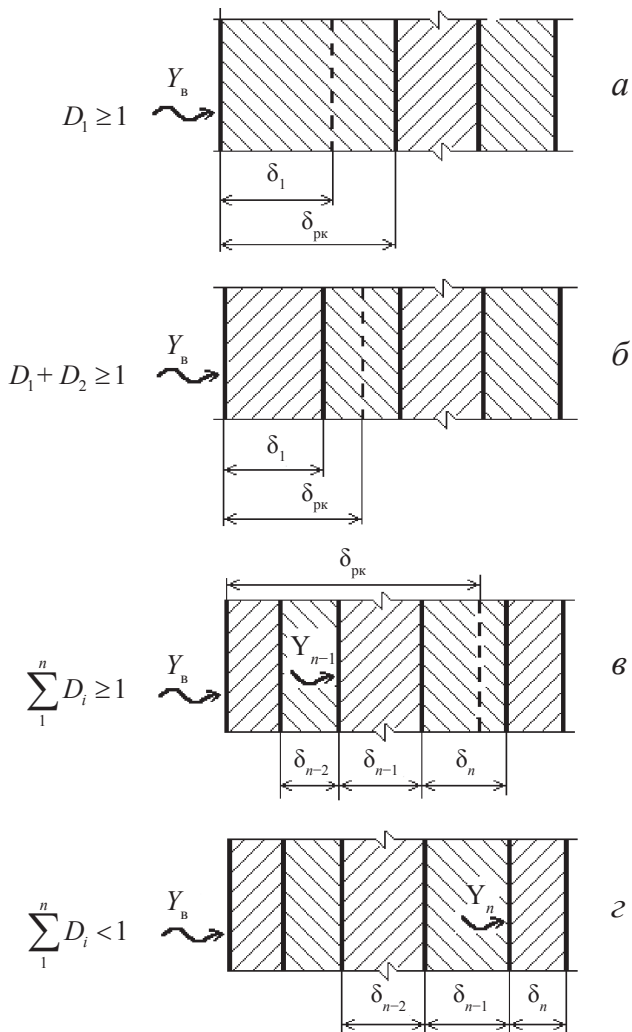


Рис. 7.2. К определению коэффициента теплоусвоения внутренней поверхности Y_B :

- — — — — граница слоя резких колебаний температуры;
- δ_{pk} — толщина слоя резких колебаний температуры

где R_{n-1} — термическое сопротивление $(n - 1)$ -го слоя, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; S_{n-1} , S_n — коэффициенты теплоусвоения материалов $(n - 1)$ -го и n -го слоев, $\text{м}^2 \cdot \text{Вт}/\text{°C}$.

Затем определяется коэффициент теплоусвоения поверхности $(n - 2)$ -го слоя:

$$Y_{n-2} = \frac{R_{n-2}S_{n-2}^2 + Y_{n-1}}{1 + R_{n-2}Y_{n-1}}, \quad (7.9)$$

пока не дойдем до первого слоя ограждения, коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности которого равен искомому

$$Y_b = Y_1 = \frac{R_1S_1^2 + Y_2}{1 + R_1Y_2}. \quad (7.10)$$

Если тепловая инерция всей ограждающей конструкции меньше единицы $\Sigma D < 1$ (рис. 7.2, ε), находим коэффициент теплоусвоения поверхности n -го слоя:

$$Y_n = \frac{R_nS_n^2 + \alpha_n}{1 + R_n\alpha_n}. \quad (7.11)$$

Для $(n - 1)$ -го слоя имеем

$$Y_{n-1} = \frac{R_{n-1}S_{n-1}^2 + Y_n}{1 + R_{n-1}Y_n}. \quad (7.12)$$

Далее расчет продолжается по формуле (7.9).

Исходные данные для расчета теплопоглощения заносятся в табл. 7.5. При подготовке исходных данных для удобства расчетов необходимо придерживаться следующих рекомендаций:

- 1) для ограждений одинаковой конструкции принять суммарную площадь внутренней поверхности;
- 2) несколько одинаковых слоев, разделенных воздушными прослойками, считать одним слоем с суммарной толщиной;
- 3) для указания вида ОК можно использовать условные обозначения: НС — наружные стены; ПЛ — пол; ПТ — потолок;

ВС — внутренние стены и перегородки; ДО — двери одинарные; остекление: ОО — одинарное, ДО — двойное, ТО — тройное.

Подготовленные исходные данные необходимо согласовать с преподавателем.

Таблица 7.5

Исходные данные для расчета

Вид ОК	Площадь $F, \text{ м}^2$	Первый слой			Второй слой		
		$\delta_1, \text{ м}$	$\lambda_1,$ $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$S_1,$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$\delta_2, \text{ м}$	$\lambda_2,$ $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$	$S_2,$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

Результаты расчета теплопоглощения ограждающими конструкциями помещения заносятся в табл. 7.6.

Таблица 7.6

Результаты расчета теплопоглощения

Вид ОК	D_1	$Y_v, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$B, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$BF, \text{ Вт}/^\circ\text{C}$

После расчета теплопоглощения по формуле (7.3) определяется величина $A_{тв}$ и сопоставляется с допустимым значением. Следует сделать вывод о возможности применения данного режима отопления.

7.4. Влажностный режим ограждения

Сопrotивление паропроницанию ограждающей конструкции должно быть не ниже требуемого, определяемого по теплотехническим нормам.

Расчет возможного влажностного режима заданной конструкции ограждения предлагается провести, исходя из стационарного режима и учитывая только диффузию водяных паров через ограждение. В результате расчета необходимо сделать вывод о возможности конденсации водяных паров в толще ограждения.

Сначала необходимо найти распределение температуры по толщине ограждения при температуре наружного воздуха t_n ,

равной температуре наиболее холодной пятидневки $t_{хп}$. Искомые температуры можно определить аналитическим или графическим методом.

В первом случае расчет выполняется по формуле

$$\tau_x = t_e - \frac{t_b - t_n}{R_0} \sum_0^x R_i \quad (7.13)$$

или

$$\tau_x = t_b - q \sum_0^x R_i, \quad (7.14)$$

где τ_x — температура в сечении x , °C; t_b — расчетная температура внутреннего воздуха, °C; R_0 — общее сопротивление теплопередаче ограждения, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; $\sum_0^x R_i$ — сумма термических сопротивлений на участке от воздуха помещения до рассматриваемого сечения, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; $q = (t_b - t_n)/R_0$ — теплопотери через 1 м^2 поверхности стены, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Пример 2. Найти распределение температур по толщине трехслойного ограждения для условий примера 1.

Исходные данные

Термические сопротивления слоев: $R_1 = 0,154$; $R_2 = 1,9$; $R_3 = 0,031 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. Сопротивление тепловосприятию на внутренней поверхности $R_b = 1/\alpha_b = 0,115 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; сопротивление теплоотдаче на наружной поверхности $R_n = 1/\alpha_n = 0,043 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; $t_b = 20 \text{ °C}$, $t_n = -28 \text{ °C}$.

Решение

Общее сопротивление теплопередаче

$$R_0 = R_b + \sum_1^n R_i + R_n = 0,115 + 0,154 + 1,9 + 0,031 + 0,043 = 2,24 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}.$$

Теплопотери через 1 м^2 поверхности стены $q = (20 + 28)/2,24 = 21,4 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Для расчета температуры внутренней поверхности ограждения τ_b сумма термических сопротивлений до внутренней поверхности стены равна R_b . Тогда

$$\tau_b = 20 - 21,4 \cdot 0,115 = 17,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура на границе первого и второго слоев

$$\tau_1 = 20 - 21,4(0,115 + 0,154) = 14,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Аналогично определяются значения остальных температур:

$$\tau_2 = 20 - 21,4 (0,115 + 0,154 + 1,9) = - 26,5 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\tau_n = 20 - 21,4 (0,115 + 0,154 + 0,9 + 0,031) = - 27,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Эта же задача может быть решена графическим методом (рис. 7.3). На миллиметровой бумаге по горизонтальной оси откладываются значения термических сопротивлений R_b, R_1, \dots, R_n в масштабе $1 \text{ м}^2 \cdot \text{C}/\text{Вт} = 10 \text{ см}$, а по вертикальной оси — значения температур в масштабе $10 \text{ } ^\circ\text{C} = 1 \text{ см}$. Со стороны R_b наносится точка t_b , а со стороны R_n находим точку t_n . Эти точки соединяются прямой линией.

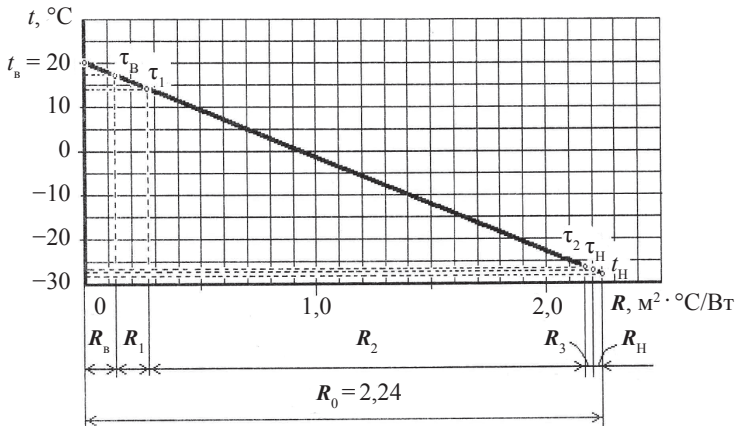


Рис. 7.3. Определение температур в ограждении графическим методом

Значения температур на границах слоев определяются точками пересечения наклонной линии изменения температуры с вертикальными линиями, проходящими через границы термических сопротивлений соответствующих слоев.

График изменения температуры по толщине ограждения наносится также на чертеж ограждения, выполненный в масштабе 1 : 5 (рис. 7.4).

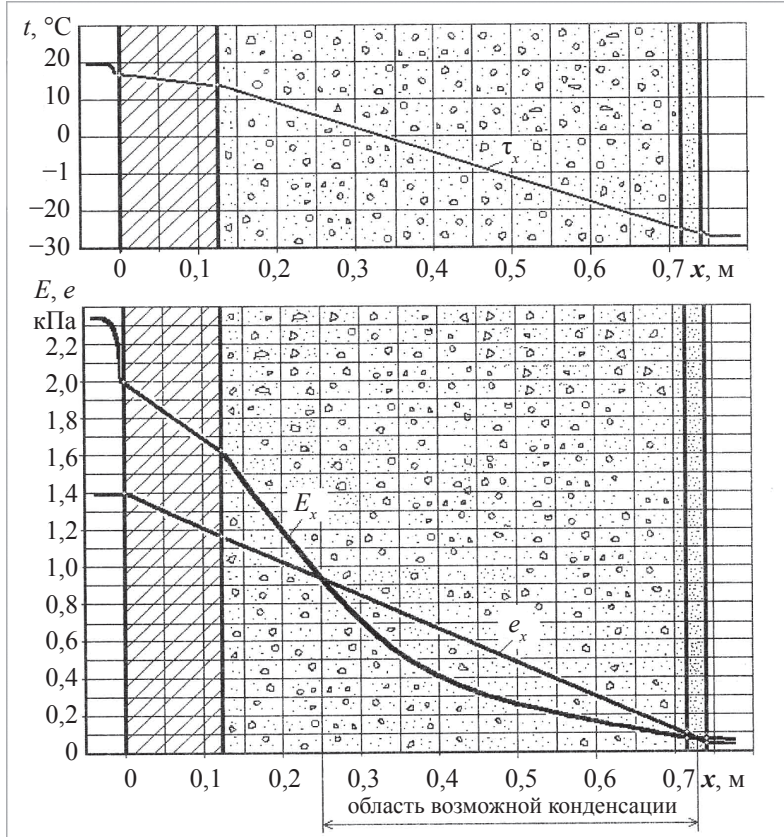


Рис. 7.4. Распределение температуры и парциального давления водяного пара по толщине ограждения

На чертеже в нижней части строится шкала значений парциальных давлений водяных паров в масштабе и производится построение линии максимальных парциальных давлений E .

Значения максимальных парциальных давлений E определяются в зависимости от температур в слоях ограждения по формуле М. И. Фильнея в диапазоне температур $0 \dots 100 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$E = 10^{\frac{658+10,2t}{236+t}}, \quad (7.15)$$

где E — парциальное давление насыщенного водяного пара, Па; t — температура пара (воздуха), $^\circ\text{C}$.

Учитывая криволинейный характер зависимости E от температуры, рекомендуется определять E в трех точках каждого материального слоя ограждения.

График изменения действительных парциальных давлений водяных паров по толщине ограждения может быть построен по вычисленным их значениям в характерных точках ограждения:

$$e_x = e_b - \frac{e_b - e_n}{R_{\text{по}}} \sum_1^x R_{\text{п}i} \quad (7.16)$$

или

$$e_x = e_b - m \sum_1^x R_{\text{п}i}, \quad (7.17)$$

где e_b, e_n — действительные парциальные давления водяных паров во внутреннем и наружном воздухе, Па; $e_b = \varphi_b E_b$; $e_n = \varphi_n E_n$; φ_b, φ_n — относительная влажность внутреннего и наружного воздуха (0,6 и 0,8 соответственно); E_b, E_n — максимальное парциальное давление водяного пара, рассчитанное при температурах t_b и t_n соответственно, Па; $R_{\text{по}}$ — общее сопротивление паропроницанию ограждения, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$; $\sum_1^x R_{\text{п}i}$ — сумма сопротивлений паропроницанию на участке от внутренней поверхности ограждения до

рассматриваемого сечения, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$; $m = (e_b - e_n)/R_{\text{но}}$ — расход пара, проходящего через 1 м^2 поверхности ограждения, $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Общее сопротивление паропрооницанию принятой конструкции ограждения состоит из сопротивлений паропрооницанию отдельных слоев конструкции ограждения

$$R_{\text{но}} = R_{\text{н1}} + \dots + R_{\text{нn}},$$

где $R_{\text{ни}} = \delta_i / \mu_i$ — сопротивление паропрооницанию слоя ограждения; δ_i — толщина слоя ограждения, м; μ_i — коэффициент паропрооницаемости материала слоя, $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$, принимаемый по табл. 7.7.

Для воздушных прослоек и минеральной ваты сопротивления паропрооницанию и воздухопроницанию принять равными нулю.

Если линии e и E на чертеже пересекаются, то в ограждении возможна конденсация водяных паров. Заключение о возможности конденсации водяных паров необходимо включить в пояснительную записку.

Таблица 7.7

Физические характеристики строительных материалов

Наименование материала	Значения коэффициентов	
	паропрооницания μ , $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$	воздухопроницания $10^3 i$, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$
Штукатурка известково-песчаная	0,09	0,11
Штукатурка сухая	0,08	0,50
Листы асбестоцементные	0,03	0,03
Кирпичная кладка	0,11	60
Бетон	0,13	0,005
Газобетон	0,11	0,05
Плиты древесно-волоконистые	0,12	3,0
Пенополиуретан	0,05	1,0
Мрамор	0,008	80

Примечание. Для воздушных прослоек и минеральной ваты сопротивления паропрооницанию и воздухопроницанию принять равными нулю.

7.5. Воздухопроницание

Под влиянием ветра и теплового напора через щели, поры, неплотности, имеющиеся в наружных ограждениях, в помещения может проникать наружный воздух. Это явление, называемое инфильтрацией, приводит к увеличению затрат на отопление, так как часть тепла идет на нагревание инфильтрующегося воздуха. С целью уменьшения и наиболее точного учета этих затрат производят проверку соответствия ограждающих конструкций требованиям строительных норм по инфильтрации и расчет количества тепла на нагревание проникающего в помещение воздуха.

При выполнении расчетов в этом разделе количество этажей в здании принять равным 10, а номер этажа расчетного помещения — по последней цифре номера задания.

Проверка ограждающих конструкций на инфильтрацию

Требуемое сопротивление инфильтрации для стен и окон определяется по формулам

$$R_{и,нс}^{тр} = \Delta P / G^н, \quad (7.18)$$

$$R_{и,ок}^{тр} = \Delta P^{2/3} / G^н, \quad (7.19)$$

где $R_{и,нс}^{тр}$ — требуемое сопротивление инфильтрации для стен, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{кг}$; $R_{и,ок}^{тр}$ — требуемое сопротивление инфильтрации для окон, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{кг}$; ΔP — разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждающих конструкций, Па; $G^н$ — нормативная воздухопроницаемость: для стен $G^н = 0,5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; для окон $G^н = 6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Разность давлений воздуха, под действием которой происходит инфильтрация, определяется по формуле

$$\Delta P = 0,55H (\gamma_n - \gamma_v) + 0,03\gamma_n v^2, \quad (7.20)$$

где H — высота здания, в курсовой работе принять $H = 30 \text{ м}$; γ_n, γ_v — удельный вес наружного и внутреннего воздуха, $\text{Н}/\text{м}^3$,

определяемый как $\gamma = 3462/(273 + t)$ при подстановке t_n для γ_n и t_b для γ_b ; v — скорость ветра, для расчетов принять $v = 5$ м/с.

Рассчитанные значения $R_{он}^{тп}$ сопоставляются с фактическими значениями $R_{он}$, определяемыми в зависимости от вида ограждения.

Для наружных стен фактическое сопротивление воздухопроницанию определяется как

$$R_{он,нс} = R_{и1} + R_{и2} + \dots + R_{ин},$$

где $R_{и1}, R_{и2}, \dots, R_{ин}$ — сопротивления воздухопроницанию слоев ограждения, определяемые как $R_{и} = \delta/i$, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{кг}$; δ — толщина слоя ограждения, м; i — коэффициент воздухопроницания материала слоя, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$, принимаемый по табл. 7.7.

Для заполнений оконных проемов сопротивление воздухопроницанию принимается по табл. 7.8.

Таблица 7.8

Сопротивление воздухопроницанию световых проемов

Наименование светового проема	Количество уплотненных притворов	$R_{и}^{ок}$, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}^{2/3}/\text{кг}$
Одинарное и двойное остекление в спаренных переплетах	1	1,19
Двойное остекление в раздельных переплетах	1	1,33
	2	1,74
Тройное остекление в раздельных и спаренных переплетах	1	1,37
	2	2,02
	3	2,57

На основании сопоставления значений требуемых и фактических сопротивлений воздухопроницанию проверяется выполнение условий

$$R_{он,нс} \geq R_{и,нс}^{тп}, \quad R_{он,ок} \geq R_{и,ок}^{тп}$$

и делается вывод о соответствии запроектированной конструкции действующим нормативам. При необходимости уточняется тип заполнения оконного проема по табл. 7.8.

Расчет затрат тепла на инфильтрацию

В этом разделе работы необходимо определить затраты тепла на нагревание инфильтрующегося воздуха, затраты тепла на компенсацию тепловых потерь через наружные ограждения (стены и окна), а также оценить долю затрат тепла на инфильтрацию в общих теплопотерях помещения.

Расход тепла на нагрев инфильтрующегося воздуха $Q_{\text{и}}$ определяется по формуле

$$Q_{\text{и}} = \frac{c}{3600} (G_{\text{нс}} F_{\text{нс}} A_{\text{нс}} + G_{\text{ок}} F_{\text{ок}} A_{\text{ок}}) (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}),$$

где c — удельная теплоемкость воздуха; $c = 1000$ Дж/(кг · °С); $G_{\text{нс}}$, $G_{\text{ок}}$ — расходы воздуха, инфильтрующегося через наружные стены и окна, кг/(м² · ч); $F_{\text{нс}}$, $F_{\text{ок}}$ — площади наружных стен и проемов остекления, м²; $A_{\text{нс}}$, $A_{\text{ок}}$ — коэффициенты, учитывающие действие встречного теплового потока; $A_{\text{нс}} = 0,8$; $A_{\text{ок}} = 0,6$; $t_{\text{в}}$ — температура внутреннего воздуха, °С; $t_{\text{н}}$ — расчетная температура наружного воздуха для проектирования систем отопления и вентиляции в холодный период года, равная средней температуре наиболее холодной пятидневки ($t_{\text{н}} = t_{\text{хп}}$), °С.

Фактический расход инфильтрующегося воздуха рассчитывается для наружных стен и остекления по формулам

$$G_{\text{нс}} = \Delta P_{\text{ф}} / R_{\text{и,нс}}; \quad G_{\text{ок}} = \Delta P_{\text{ф}}^{2/3} / R_{\text{и,ок}},$$

где $\Delta P_{\text{ф}}$ — фактическая разность давлений воздуха, Па; $R_{\text{и,нс}}$, $R_{\text{и,ок}}$ — фактические сопротивления инфильтрации.

Фактическая разность давлений находится по выражению

$$\Delta P_{\text{ф}} = (H - h) (\gamma_{\text{н}} - \gamma_{\text{в}}) + 0,05 \gamma_{\text{н}} v^2 (C_{\text{н}} - C_3) k,$$

где h — расстояние от уровня земли до оси рассчитываемого ограждения, м; $C_{\text{н}}$, C_3 — значения ветровых коэффициентов на наветренной и заветренной сторонах здания; в расчетах принять $C_{\text{н}} = 0,8$; $C_3 = -0,6$; k — коэффициент, учитывающий высоту здания и тип местности; в расчетах принять $k = 1$.

После определения $Q_{\text{и}}$ следует рассчитать потери тепла через наружные ограждения расчетного помещения $Q_{\text{тп}}$:

$$Q_{\text{тп}} = Q_{\text{тп,нс}} + Q_{\text{тп,ок}} = (F_{\text{нс}} / R_{\text{о,нс}} + F_{\text{ок}} / R_{\text{о,ок}}) (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}),$$

где $R_{\text{о,нс}}$, $R_{\text{о,ок}}$ — общие сопротивления теплопередаче для наружных стен и остекления, принимаемые по данным раздела 7.2.

Общие теплотери расчетного помещения Q_0 равны сумме теплотерь через наружные ограждения и потерь тепла на инфильтрацию:

$$Q_0 = Q_{\text{тп}} + Q_{\text{и}},$$

а доля затрат тепла на инфильтрацию в общих теплотерях составит $Q_{\text{и}}/Q_0$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Свод правил СП 50.13330.12. Тепловая защита зданий: Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. Введ. 01.01.2013. М. : Минрегион России, 2012. 78 с.
2. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. Введ. 01.01.86. М. : АПП ЦИТП, 1986. 36 с.
3. Свод правил СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Введ. 01.01.2013 г. М. : Минрегионразвития, 2013. 113 с.
4. Свод правил СП 60.13330.12. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. Введ. 01.01.2013. М. : Минрегион России, 2012. 80 с.
5. *Фокин К. Ф.* Строительная теплотехника ограждающих частей здания. М. : Стройиздат, 2007. 319 с.
6. Стандарт АВОК. Здания жилые и общественные. Нормы воздухообмена. М. : АВОК-ПРЕСС, 2002. 16 с.
7. *Богословский В. Н.* Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). СПб. : Изд. АВОК Северо-Запад, 2006. 400 с.
8. *Богословский В. Н.* Тепловой режим здания. М. : Стройиздат, 1979. 224 с.
9. *Шумилов Р. Н., Толстова Ю. И.* Расчеты процессов тепло- и массообмена при проектировании вентиляции : учеб. пособие. Екатеринбург : ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2004. 87 с.
10. *Михеев М. А.* Основы теплопередачи. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1956. 392 с.
11. *Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С.* Теплопередача. М. : Энергия, 1975. 488 с.
12. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Введ. 01.01.2004. М. : ФГУП ЦНС, 2004. 54 с.
13. *Гагарин В. Г.* Макроэкономические аспекты обоснования энергосберегающих мероприятий при повышении теплозащиты ограждающих конструкций зданий // Строительные материалы. 2010. № 3. С. 8–16.

14. *Гринфельд Г. И.* Диалектика нормативных требований к сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций // Жилищное строительство. 2012. № 1. С. 22–24.
15. *Кривошеин А. Д., Федоров С. В.* К вопросу о расчете приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций // Инженерно-строит. журн. 2010. № 8. С. 21–27.
16. *Прохоров В. И.* Эксплуатационные затраты энергии, энергетический баланс инженерных систем здания и окупаемость новых энергосберегающих решений // Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции : Третья Международ. науч.-техн. конф. : сб. докл. М. : МГСУ, 2009. С. 30–32.

ПРИЛОЖЕНИЯ

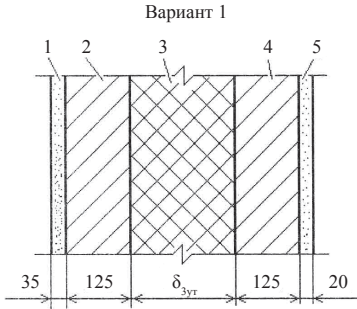
Варианты заданий

Номер варианта	Номер схемы стеновой панели (по прил. 2)	Номер плана комнаты (по прил. 3)	Город и зона влажности по карте [1]	Температура наружного воздуха, °С		Продолжительность отопительного периода $Z_{отп}$, сут
				холодной пятидневки, $t_{хп}$	средняя за отопительный период, $t_{от}$	
1	1	1	Архангельск 1	-31	-4,4	253
2	2	2	Астрахань 3	-23	-1,2	167
3	3	3	Чара 3	-46	-14,8	267
4	4	4	Н. Новгород 2	-31	-4,1	215
5	5	5	Краснодар 3	-19	2	149
6	6	1	Рязань 2	-27	-3,5	208
7	7	2	Чита 3	-38	-11,4	242
8	8	3	Нерчинск 3	-44	-14,1	233
9	9	4	С.-Петербург 1	-26	-1,8	220
10	10	5	Казань 2	-32	-5,2	215
11	1	1	Воронеж 3	-26	-3,1	196
12	2	2	Грозный 3	-18	0,9	160
13	3	3	Екатеринбург 3	-35	-6	230
14	4	4	Иркутск 3	-36	-8,5	240
15	5	5	Омск 3	-37	-8,4	221
16	6	1	Уфа 3	-35	-5,9	213
17	7	2	Белгород 3	-23	-1,9	191
18	8	3	Псков 2	-26	-1,6	212
19	9	4	Братск 3	-43	-8,6	249
20	10	5	Мурманск 1	-27	-3,2	275

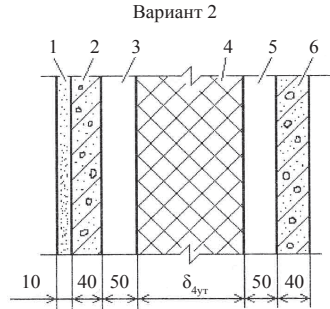
Окончание таблицы

Номер варианта	Номер схемы стеновой панели (по прил. 2)	Номер плана комнаты (по прил. 3)	Город и зона влажности по карте [1]	Температура наружного воздуха, °С		Продолжительность отопительного периода $Z_{отп}$, сут
				холодной пятидневки, $t_{хп}$	средняя за отопительный период, $t_{оп}$	
21	1	1	Новгород 2	-27	-2,3	221
22	2	2	Ростов 3	-22	-0,6	171
23	3	3	Пермь 2	-35	-5,9	229
24	4	4	Тайшет 3	-40	-8,3	257
25	5	5	Смоленск 2	-26	-2,4	215
26	6	1	Калининград 2	-19	1,1	193
27	7	2	Челябинск 3	-34	-6,5	218
28	8	3	Ульяновск 3	-31	-5,4	212
29	9	4	Якутск 3	-54	-20,6	256
30	10	5	Брянск 2	-26	-2,3	205
31	1	1	Вологда 2	-32	-4,1	231
32	2	2	Курск 2	-26	-2,4	198
33	3	3	Волгоград 3	-25	-2,2	178
34	4	4	Улан-Удэ 3	-37	-10,4	237
35	5	5	Сочи 1	-3	6,4	72
36	6	1	Благовещенск 2	-34	-10,6	218
37	7	2	Красноярск 3	-40	-7,1	234
38	8	3	Владивосток 1	-24	-3,9	196
39	9	4	Томск 2	-40	-8,4	236
40	10	5	Новосибирск 3	-39	-8,7	230

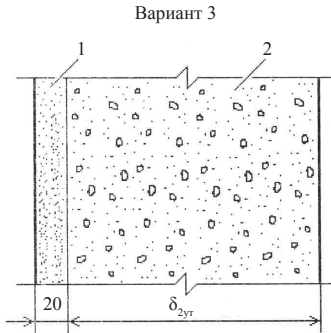
Схемы ограждающих конструкций



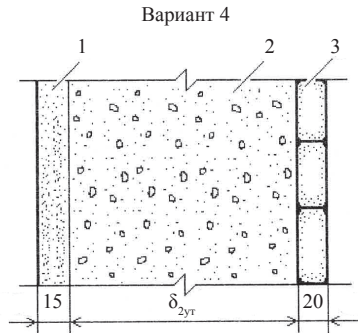
1, 5 — штукатурка известково-песчаная ($\rho = 1600$); 2, 4 — кладка из глиняного кирпича ($\rho = 1600$); 3 — пенополиуретан ($\rho = 80$)



1 — сухая штукатурка ($\rho = 800$); 2, 6 — железобетон ($\rho = 2500$); 3, 5 — воздушная прослойка; 4 — маты минераловатные прошивные ($\rho = 350$)

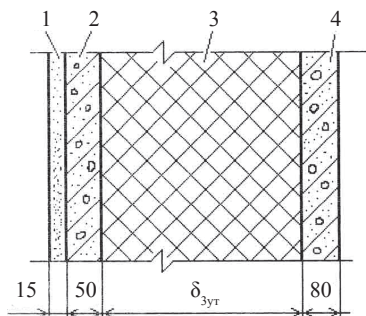


1 — штукатурка известково-песчаная ($\rho = 1600$); 2 — газобетон ($\rho = 400$)



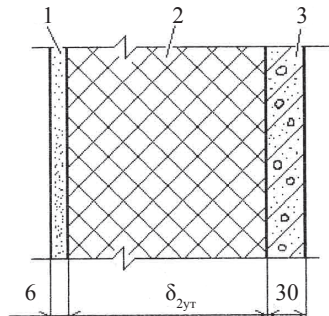
1 — сухая штукатурка ($\rho = 800$); 2 — керамзитобетон ($\rho = 600$); 3 — облицовочная плитка из мрамора ($\rho = 2800$)

Вариант 5



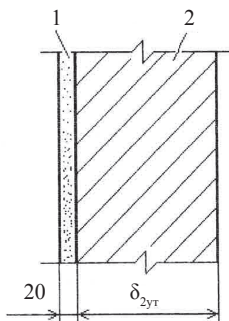
- 1 — сухая штукатурка ($\rho = 800$);
 2, 4 — железобетон ($\rho = 2500$);
 3 — минераловатные плиты жесткие ($\rho = 300$)

Вариант 6



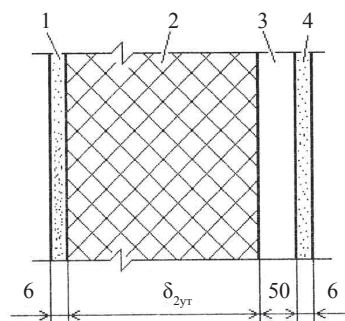
- 1 — асбестоцементный лист ($\rho = 1800$); 2 — минераловатные плиты мягкие ($\rho = 200$);
 3 — железобетон ($\rho = 2500$)

Вариант 7

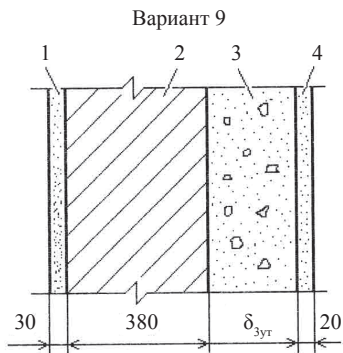


- 1 — штукатурка известково-песчаная ($\rho = 1600$); 2 — кладка из глиняного кирпича ($\rho = 1800$)

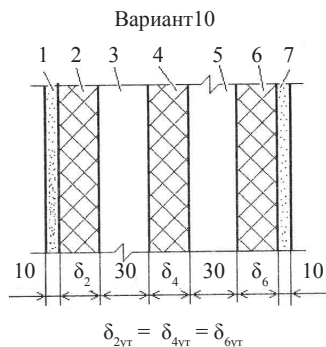
Вариант 8



- 1, 4 — асбестоцементный лист ($\rho = 1800$); 2 — минераловатные плиты мягкие ($\rho = 100$);
 3 — воздушная прослойка



- 1, 4 — штукатурка известково-песчаная ($\rho = 1600$);
- 2 — кладка из силикатного кирпича ($\rho = 1800$);
- 3 — газобетон ($\rho = 400$)



- 1, 7 — асбестоцементный лист ($\rho = 1800$);
- 2, 4, 6 — плиты древесно-волокнистые ($\rho = 200$);
- 3, 5 — воздушная прослойка

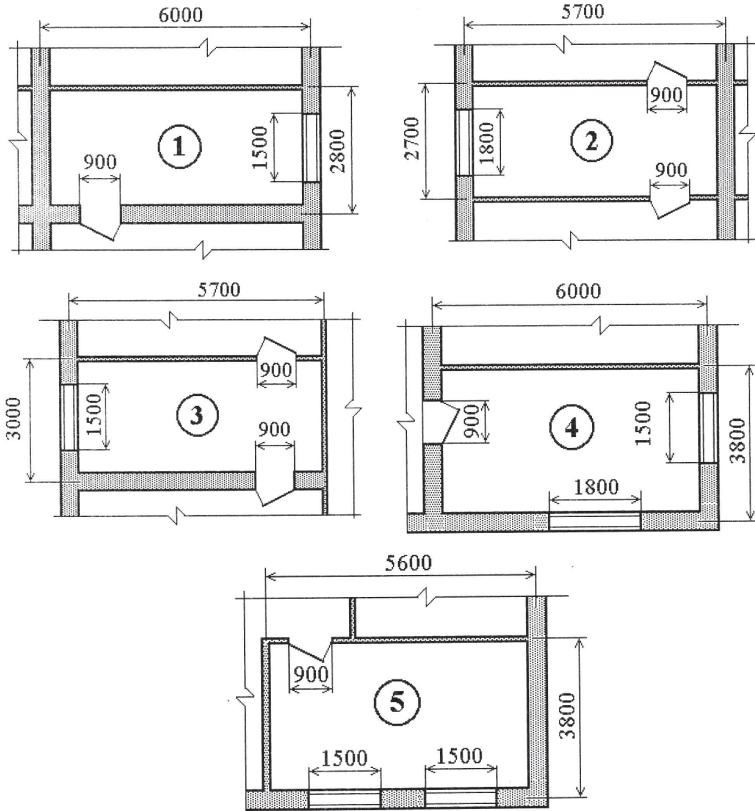
Примечания: 1. Нумерация слоев ограждающих конструкций со стороны помещения.

2. На схемах приведены только те элементы конструкций, которые необходимы для теплотехнического расчета.

3. Плотность материалов ρ указана в $\text{кг}/\text{м}^3$, толщина слоя δ — в мм; $\delta_{\text{ут}}$ — толщина утепляющего слоя, которую предстоит определить на основании теплотехнического расчета.

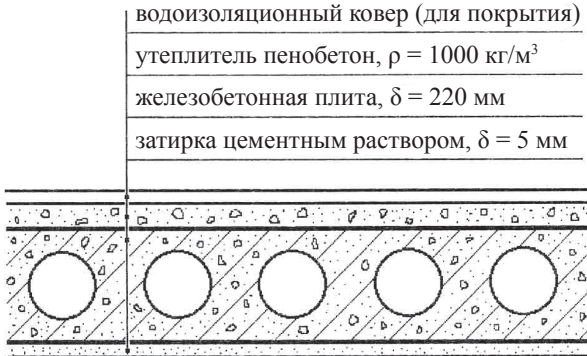
Приложение 3

Планы жилых комнат

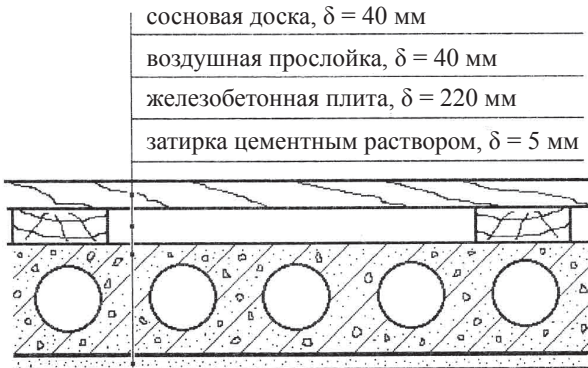


Схемы перекрытий

1. Чердачное перекрытие (покрытие)



2. Междуэтажное перекрытие



3. Перекрытие над неотапливаемым подвалом

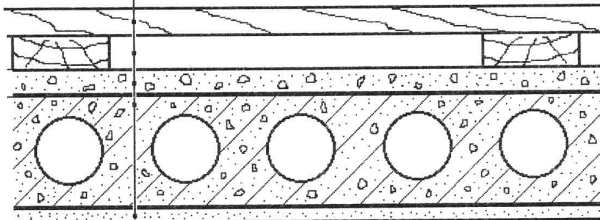
сосновая доска, $\delta = 40$ мм

воздушная прослойка, $\delta = 40$ мм

утеплитель пенобетон, $\rho = 1000$ кг/м³

железобетонная плита, $\delta = 220$ мм

затирка цементным раствором, $\delta = 5$ мм



Приложение 5

Теплофизические характеристики материалов

Наименование материала	Плотность ρ , кг/м ³	Коэффициенты при условиях эксплуатации А и Б			
		теплопроводности λ , Вт/(м · °С)		теплоусвоения S , Вт/(м ² · °С)	
		А	Б	А	Б
Железобетон	2500	1,92	2,04	18,0	17,0
Бетон на гравии	2400	1,74	1,86	16,8	17,9
Керамзитобетон	800	0,24	0,31	3,83	4,77
Газо- и пенобетон	400	0,14	0,15	2,19	2,42
Цементно-песчаный раствор	1800	0,76	0,93	9,6	11,1
Известково-песчаный раствор	1600	0,70	0,81	8,69	9,76
Листы гипсовые обшивочные (сухая штукатурка)	800	0,19	0,21	3,34	3,66
Кирпичная кладка из глиняного кирпича	1800	0,70	0,81	9,2	10,1
	1600	0,58	0,70	8,08	9,23
Кирпичная кладка из силикатного кирпича	1800	0,76	0,87	9,77	10,9
Облицовочная плитка из мрамора	2800	2,91	2,91	22,86	22,86
Сосна и ель поперек волокон	500	0,14	0,18	3,87	4,54
Плиты древесноволокнистые	200	0,07	0,08	1,67	1,81
Минераловатные плиты	350	0,09	0,11	1,46	1,72
	300	0,09	0,09	1,32	1,44
	200	0,08	0,08	1,01	1,11
	100	0,06	0,07	0,64	0,73
Пенополиуретан	80	0,05	0,05	0,67	0,70
Асбестоцементный лист	1800	0,47	0,52	7,55	8,12
Стекло оконное	2500	0,76	0,76	10,80	10,80

Задачи для практических занятий

1. В котором из четырех слоев ограждающей конструкции находится граница слоя резких колебаний температуры? Исходные данные:

Номер слоя	Толщина δ , мм	Коэффициенты для материалов слоев	
		теплопроводности λ , Вт/(м · °С)	теплоусвоения S , Вт/(м ² · °С)
1	10	1,0	10
2	50	0,5	7
3	100	0,4	5
4	10	1,0	10

2. Определить температуру точки росы t_p воздуха в помещении, если температура воздуха в помещении $t_b = 22$ °С, относительная влажность $\phi_b = 60$ %.

Парциальные давления насыщенных водяных паров:

t , °С	12	14	16	18	20	22
E , кПа	1,4	1,6	1,8	2,1	2,3	2,6

3. Определить теплототери Q через ограждающую конструкцию при температуре внутреннего воздуха $t_b = 20$ °С, температуре внутренней поверхности стены $t_{в} = 16$ °С, коэффициенте тепловосприимчивости $\alpha_{в} = 10$ Вт/(м² · °С), площади стены $F = 5$ м².

4. Определить сопротивление воздухопроницанию 1 м² стеновой панели и затраты тепла на нагревание инфильтрующегося воздуха при температуре внутреннего воздуха $t_b = 20$ °С, температуре наружного воздуха $t_n = -30$ °С, перепаде давлений воздуха $\Delta P = 50$ Па, расходе инфильтрующегося воздуха $G_n = 2$ кг/(м² · ч). Удельная теплоемкость воздуха $c = 1000$ Дж/(кг · °С).

5. В результате расчета для стеновой однослойной панели получены величины сопротивлений теплопередаче требуемого $R_0^{тп} = 1,5$ м² · °С/Вт и по условиям энергосбережения $R_0^{эп} = 2,0$ м² · °С/Вт. Выбрать расчетное сопротивление

теплопередаче и определить необходимую толщину стены при коэффициенте тепловосприятости $\alpha_b = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$, коэффициенте теплоотдачи $\alpha_n = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ и коэффициенте теплопроводности $\lambda = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$.

6. Определить количество водяных паров, проходящих через 1 м^2 поверхности однослойной стеновой панели, если толщина стены $\delta = 0,5 \text{ м}$; коэффициент паропроницания материала стены $\mu = 0,1 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$; относительная влажность воздуха в помещении $\varphi_b = 60 \%$; парциальное давление насыщенных водяных паров $E_b = 2 \text{ кПа}$ при температуре воздуха в помещении $t_b = 20 \text{ }^\circ\text{С}$; для наружного воздуха $\varphi_n = 90 \%$, $E_n = 0,6 \text{ кПа}$.

7. Определить термическое сопротивление однослойной стены при температурах, $^\circ\text{С}$, наружного воздуха $t_n = -30$, наружной поверхности $\tau_n = -29$, внутренней поверхности $\tau_b = 11$ и коэффициенте теплоотдачи $\alpha_n = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

8. Определить расход тепла на нагревание инфильтрующегося воздуха при его расходе $0,03 \text{ кг}/\text{с}$, температуре внутреннего воздуха $t_b = 18 \text{ }^\circ\text{С}$, температуре наружного воздуха $t_n = -22 \text{ }^\circ\text{С}$, удельной теплоемкости $c = 1000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$.

9. Определить температуру наружной поверхности стены τ_n , если температура внутренней поверхности $\tau_b = 12 \text{ }^\circ\text{С}$, термическое сопротивление однослойной стены $R = 0,6 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С}/\text{Вт}$, плотность теплового потока $q = 30 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

10. Определить тепловую инерцию двухслойной ограждающей конструкции при следующих характеристиках слоев:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= 100 \text{ мм}; & \lambda_1 &= 0,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С}); & S_1 &= 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}); \\ \delta_2 &= 140 \text{ мм}; & \lambda_2 &= 0,7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С}); & S_2 &= 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}). \end{aligned}$$

11. Из теплового баланса чердака найти температуру воздуха в нем t_x и определить теплопотери через чердачное перекрытие при температуре воздуха в помещении $t_b = 18 \text{ }^\circ\text{С}$, температуре наружного воздуха $t_n = -22 \text{ }^\circ\text{С}$. Сопротивления теплопередаче и площади перекрытия и кровли: $R_{\text{о,пк}} = 2 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С}/\text{Вт}$; $F_{\text{пк}} = 30 \text{ м}^2$; $R_{\text{о,кр}} = 0,5 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С}/\text{Вт}$; $F_{\text{кр}} = 60 \text{ м}^2$.

12. Определить теплотопотери через 10 м^2 однослойной стеновой панели и толщину стены при $t_{\text{в}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\text{н}} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициенты теплообмена на внутренней поверхности $\alpha_{\text{в}} = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$, на наружной поверхности $\alpha_{\text{н}} = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$, температура внутренней поверхности $\tau_{\text{в}} = 16 \text{ }^\circ\text{C}$, коэффициент теплопроводности материала $\lambda = 0,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$.

13. Температура точки росы воздуха в помещении $t_{\text{р}} = 14 \text{ }^\circ\text{C}$ при температуре воздуха $t_{\text{в}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить относительную влажность воздуха. Парциальные давления насыщенных водяных паров:

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	12	14	16	18	20	22
$E, \text{ кПа}$	1,4	1,6	1,8	2,1	2,3	2,6

14. Определить расход инфильтрующегося воздуха $G_{\text{н}}$ через 1 м^2 стеновой панели и затраты тепла на его нагревание при расчетных температурах внутреннего воздуха $t_{\text{в}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, наружного воздуха $t_{\text{н}} = -26 \text{ }^\circ\text{C}$, разности давлений воздуха $\Delta P = 150 \text{ Па}$, сопротивлении инфильтрации $R_{\text{н}} = 750 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{кг}$, удельной теплоемкости воздуха $c = 1000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$.

15. Толщина слоя резких колебаний температуры в однослойном ограждении $\delta_{\text{рк}} = 50 \text{ мм}$. Определить коэффициент теплоусвоения S материала конструкции при коэффициенте теплопроводности его $\lambda = 0,75 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$.

16. Термическое сопротивление однослойной стены $R = 1,85 \text{ м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Расчетная температура внутреннего воздуха $t_{\text{в}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, температура наружного воздуха $t_{\text{н}} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$, коэффициенты теплообмена на внутренней поверхности $\alpha_{\text{в}} = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$, на наружной $\alpha_{\text{н}} = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$. Определить теплотопотери через 10 м^2 поверхности стены, а также температуры на внутренней и наружной поверхности.

17. Из теплового баланса чердачного помещения найти температуру воздуха в нем $t_{\text{х}}$ и определить теплотопотери через чердачное перекрытие при температуре воздуха в помещении $t_{\text{в}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, температуре наружного воздуха $t_{\text{н}} = -20 \text{ }^\circ\text{C}$. Сопротивления

теплопередаче и площади перекрытия и кровли: $R_{o,пк} = 1 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$, $F_{пк} = 10 \text{ м}^2$; $R_{o,кр} = 0,5 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$, $F_{кр} = 20 \text{ м}^2$.

18. Определить общее сопротивление теплопередаче однослойной стены при температуре внутреннего воздуха $t_b = 20 \text{ °C}$, температуре наружного воздуха $t_n = -36 \text{ °C}$, температуре внутренней поверхности стены $t_{вн} = 14 \text{ °C}$, коэффициенте теплообмена на внутренней поверхности $\alpha_{вн} = 8 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$.

19. Для условий задачи 16 определить, будет ли происходить конденсация водяных паров на внутренней поверхности стены при относительной влажности воздуха в помещении $\phi_{вн} = 67 \%$. Парциальные давления насыщенных водяных паров:

$t, \text{ °C}$	12	14	16	18	20	22
$E, \text{ кПа}$	1,4	1,6	1,8	2,1	2,3	2,6

20. Определить количество воздуха, инфильтрующегося через стеновую панель, и расход тепла на его нагревание при температуре внутреннего воздуха $t_b = 20 \text{ °C}$, температуре наружного воздуха $t_n = -20 \text{ °C}$. Разность давлений воздуха $\Delta P = 100 \text{ Па}$, толщина стены $\delta = 120 \text{ мм}$; коэффициент воздухопроницаемости материала $i = 0,06 \text{ кг/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}$, удельную теплоемкость воздуха принять $c = 1000 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОЗАЩИТЫ	4
2. СТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА	7
2.1. Общие понятия	7
2.2. Теплопроводность	8
2.3. Конвекция	10
2.4. Излучение	12
2.5. Теплопередача через наружное ограждение.....	13
2.6. Сопротивление теплопередаче.....	16
2.7. Термическое сопротивление неоднородных конструкций.....	17
3. НОРМИРОВАНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТЫ	22
3.1. Требуемое сопротивление теплопередаче.....	22
3.2. Сопротивление теплопередаче по условиям энергосбережения	26
3.3. Сопротивление теплопередаче из экономических условий	27
3.4. Расчетное сопротивление теплопередаче	31
3.5. Требования строительных норм	32
4. НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА	34
4.1. Примеры нестационарной теплопередачи.....	34
4.2. Теплоустойчивость помещения	36
4.3. Теплоусвоение	39
5. ВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ	42
5.1. Значение влажностного режима	42
5.2. Источники поступления влаги в ограждения	42
5.3. Основные понятия влажностного режима.....	43
5.4. Конденсация влаги на внутренней поверхности.....	46
5.5. Влагопередача.....	47
5.6. Расчет влажностного режима.....	52

6. ВОЗДУХОПРОНИЦАНИЕ	55
6.1. Воздухопроницаемость наружных ограждений.....	55
6.2. Физические основы процесса.....	57
6.3. Проверка ограждающих конструкций на инфильтрацию.....	60
6.4. Определение затрат тепла на нагрев инфильтрующегося воздуха.....	61
6.5. Затраты тепла на нагрев вентиляционного воздуха в жилых зданиях.....	62
7. МЕТОДИКА РАСЧЕТА	64
7.1. Исходные данные.....	64
7.2. Теплотехнический расчет.....	65
7.3. Расчет теплоустойчивости помещения.....	70
7.4. Влажностный режим ограждения.....	75
7.5. Воздухопроницание.....	81
Библиографические ссылки	85
Приложения	87
<i>Приложение 1. Варианты заданий</i>	89
<i>Приложение 2. Схемы ограждающих конструкций</i>	91
<i>Приложение 3. Планы жилых комнат</i>	94
<i>Приложение 4. Схемы перекрытий</i>	95
<i>Приложение 5. Теплофизические характеристики материалов</i>	97
<i>Приложение 6. Задачи для практических занятий</i>	98

Учебное издание

Толстова Юлия Исааковна
Шумилов Рудольф Николаевич

ОСНОВЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ

Учебное пособие

Зав. редакцией *М. А. Овечкина*
Редактор *Т. А. Федорова*
Корректор *Т. А. Федорова*
Компьютерная верстка *Н. Ю. Михайлов*

План выпуска 2014 г. Подписано в печать 15.04.2014.
Формат 60 × 84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Гарнитура Times.
Уч.-изд. л. 5,4. Усл. печ. л. 6,0. Тираж 100 экз. Заказ № 472.

Издательство Уральского университета
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620000, г. Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.
Тел.: +7 (343) 350-56-64, 350-90-13.
Факс +7 (343) 358-93-06.
E-mail: press-urfu@mail.ru



Толстова Юлия Исааковна

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция» Уральского федерального университета. Разработчик 30 учебно-методических пособий по дисциплинам «Тепло-снабжение», «Строительная теплофизика», «Охрана воздушного бассейна» и др. Автор 130 научных работ, опубликованных в специализированных изданиях, в том числе в журналах «Известия вузов. Строительство и архитектура», «Инженерные системы АВОК – Северозапад», «Сантехника, отопление, кондиционирование – СОК». Сфера научных интересов – энергоэффективные системы теплоснабжения и вентиляции.



Шумилов Рудольф Николаевич

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция» Уральского федерального университета, с 1996 по 2008 г. заведующий кафедрой. Автор более 200 научных и учебных изданий, в том числе учебных пособий для студентов и инженерно-технических работников. Научная деятельность связана с изучением закономерностей тепло- и массообмена в помещениях. Внесен большой вклад в развитие теоретических основ строительной теплофизики и вентиляции: разработаны аналитические методы расчета теплообмена излучением, испарения с поверхности нагретых материалов и расплавов, укрытий технологического оборудования.