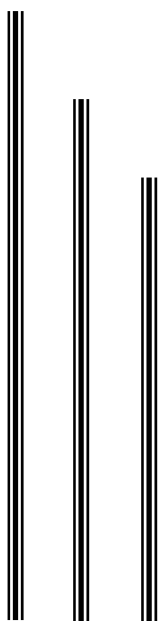


О.Б. ДЕМИН

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Часть 2

ТЕПЛОЗАЩИТА ЗДАНИЙ



ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ

УДК 551.58(075)
ББК Н-113.7я73 Ф-503
Д30

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор

В.П. Ярцев

Доктор технических наук, профессор

В.И. Леденев

Демин О.Б.

Д30 Физико-технические основы проектирования зданий и сооружений: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. Ч. 2. 84 с.

Содержит систематизированные сведения теплофизических расчетов и проектирования ограждающих конструкций гражданских и промышленных зданий. Приведены необходимые справочные данные из строительных нормативов, примеры и расчеты.

Предназначено для использования при изучении дисциплин «Архитектурная физика» и «Строительная физика», а также в курсовом и дипломном проектировании студентами специальностей 270102 «Промышленное и гражданское строительство», 270301 «Архитектура» и 270105 «Городское строительство и хозяйство».

УДК 551.58(075)

ББК Н-113.7я73 Ф-503

ISBN 5-8265-0327-0

© О.Б. Демин, 2004

© Тамбовский государственный
технический университет
(ТГТУ), 2004

Министерство образования и науки Российской Федерации
Тамбовский государственный технический университет

О.Б. ДЕМИН

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ И
СООРУЖЕНИЙ**

Часть 2

ТЕПЛОЗАЩИТА ЗДАНИЙ

Утверждено Ученым советом университета
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по специальностям 290100 «Архитектура»,
290300 «Промышленное и гражданское строительство»,
290500 «Городское строительство и хозяйство»
направления 653500 «Строительство»

Тамбов
Издательство ТГТУ
2004

Учебное издание

ДЕМИН Олег Борисович

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗДАНИЙ И
СООРУЖЕНИЙ**

Часть 2

ТЕПЛОЗАЩИТА ЗДАНИЙ

Учебное пособие

Редактор З.Г. Чернова
Компьютерное макетирование М.А. Филатовой

Подписано в печать 2.12.04
Формат 60 × 84 / 16. Бумага газетная. Печать офсетная.
Гарнитура Times New Roman. Объем: 4,98 усл. печ. л.; 5,0 уч.-изд. л.
Тираж 100 экз. С. 691

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета,
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ВВЕДЕНИЕ

На теплоснабжение зданий и сооружений расходуется 40 % добываемого топлива, поэтому даже незначительное снижение теплопотерь зданиями обеспечивает существенную экономию теплоэнергетических ресурсов. Потери тепла происходят через наружные ограждения, имеющие значительный удельный вес в стоимости здания. Защищая помещения от внешних климатических воздействий, они должны обеспечить требуемые параметры микроклимата, соответствующие условиям протекания в них функциональных процессов. Правильный выбор конструктивных решений ограждений, отвечающих назначению здания и санитарно-гигиеническим условиям внутри него, имеет большое значение для эксплуатации зданий.

При проектировании требуемые теплозащитные и другие эксплуатационные качества ограждений достигаются на основе данных теплофизических расчетов путем целесообразного выбора строительных материалов с учетом их физико-технических свойств и рационального решения конструкций.

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ

1.1 ВИДЫ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛА В ОГРАЖДЕНИЯХ

Передача тепла в среде происходит при наличии разности температур. При этом тепло распространяется из области повышенных температур в область пониженных. Например, зимой в отапливаемых зданиях теплопередача происходит через наружные ограждения из здания, а летом при сильном нагреве поверхностей стен за счет солнечной радиации – в здание. Различают три вида теплопередачи: теплопроводностью, конвекцией, излучением.

Теплопроводность – вид передачи тепла, при котором энергия последовательно передается в твердых телах (диэлектриках) и жидкостях упругими волнами, а в газах – диффузией атомов или молекул. В металлах энергия передается за счет диффузии электронов. Наиболее полно теплопроводность проявляется в сплошных твердых телах.

Конвекция – процесс передачи тепла движущимися массами жидкости и газа. Движение это может быть естественным за счет температурного перепада в пределах среды или искусственным, вызванным каким-либо внешним возбуждением, например, работой вентилятора.

Тепловое излучение – перенос энергии в газообразной среде или пустоте (вакууме) в виде электромагнитных волн. При взаимном облучении двух поверхностей происходит двойной процесс преобразования энергии. Вначале на поверхности излучающего тела происходит преобразование тепловой энергии в лучистую, а затем лучистой в тепловую на поверхности тела, поглощающего лучистое тепло.

Процессы передачи тепла в зданиях и их ограждающих конструкциях связаны со всеми тремя видами теплообмена. При этом в воздушной среде у поверхности ограждений, в воздушных прослойках и пустотах преобладает теплообмен конвекцией и излучением. В твердых материалах конструкций основным видом передачи тепла является теплопроводность.

1.2 ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ. ОСНОВНОЙ ЗАКОН ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ. УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Происходящие процессы теплопередачи приводят к постоянному или изменяющемуся во времени распределению температур в рассматриваемой материальной среде или конструкции. Температура в случае ее временных и пространственных изменений является функцией координат x , y , z и времени τ , т.е.

$$t = f(x, y, z, \tau). \quad (1)$$

Совокупность значений температуры для всех точек пространства в заданный момент времени называется **температурным полем**. Выражение (1) является математической формулировкой поля. При этом, если температура меняется во времени, поле называется **нестационарным**, а если не меняется – **стационарным**. Температура может быть функцией одной, двух или трех координат и, соответственно, поля будут **одно-, двух- и трехмерными**.

При любом температурном поле в материальной твердой среде всегда имеются точки с одинаковой температурой. Геометрическое расположение таких точек в пространстве образует **изотермическую поверхность**. Изотермические поверхности различных температур не пересекаются друг с другом. Все они замыкаются на себя или кончатся на границах тела, следовательно, изменение температуры в среде происходит лишь в направлениях, пересекающих изотермические поверхности (направление x на рис. 1). При этом наибольшее изменение температуры получается в направлении нормали n к изотермической поверхности. Предел отношения изменения температуры Δt к расстоянию между изотермами по нормали Δn называется **градиентом температур** и обозначается как $\partial t / \partial n$ или $\text{grad} t$. Градиент температур является вектором, направленным по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры и имеет размерность $^{\circ}\text{C}/\text{м}$.

Тепловая энергия переносится в среде в сторону убывания температуры. Количество тепла, переносимого через поверхность в единицу времени, называется **тепловым потоком** Q . Поток, отнесенный к единице

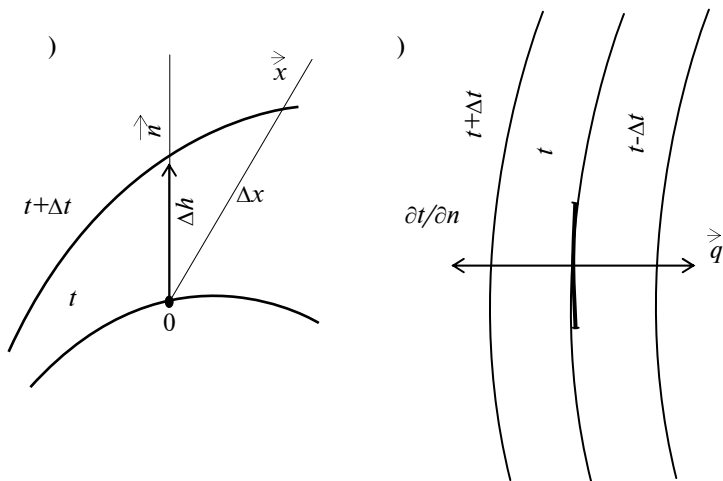


Рис. 1 Определение температурного градиента (а) и закон Фурье (б)

поверхности, называется **плотностью теплового потока** q . Если тепловой поток отнести к единице изотермической поверхности, то величина \vec{q} является вектором, направление которого совпадает с направлением распространения тепла в данной точке и противоположно направлению вектора температурного градиента (рис. 1).

При экспериментальном изучении процесса теплопроводности в твердых телах Фурье установил, что количество передаваемого тепла пропорционально падению температуры, времени и площади сечения, перпендикулярного направлению распространения тепла. Эта зависимость может быть записана как

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad } t. \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности λ в выражении (2) носит название коэффициента теплопроводности. Он характеризует физические свойства рассматриваемой системы с точки зрения протекания в ней процесса теплопроводности. Знак «минус» в выражении (2) показывает, что тепловой поток направлен в сторону, противоположную нарастанию температуры (см. рис. 1).

Уравнение (2) является математическим выражением основного закона теплопроводности – **закона Фурье**. Закон Фурье лежит в основе всех теоретических и экспериментальных исследований теплопроводности.

В частности, на его основе достаточно просто найти потоки тепла и распределения температур в однородной плоской стенке при известных температурах на ее поверхностях.

Рассмотрим однородную стенку (рис. 2) толщиной δ , коэффициент теплопроводности которой постоянен и равен λ . Пусть на наружных поверхностях стенки поддерживаются постоянные температуры t_1 и t_2 . Температура изменяется только в направлении оси x . Температурное поле одномерно, изотермические поверхности плоские и располагаются перпендикулярно оси x .

Выделим внутри стенки слой толщиной dx , ограниченный двумя изотермическими поверхностями. На основании закона Фурье (уравнение (2)) для этого случая можно записать

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

При стационарном тепловом режиме величина q постоянная в любом сечении, поэтому

$$t = -\frac{q}{\lambda} x + C .$$

Постоянная интегрирования C может быть найдена из граничных условий: при $x = 0, t = t_1 = C$; при $x = \delta, t = t_2$. Подставляя эти значения в предыдущее выражение, получаем

$$t = -\frac{q}{\lambda} \delta + t_1 .$$

Тогда мощность теплового потока, проходящего через стенку, определяется как

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t . \quad (3)$$

Используя последнее выражение, можно найти также уравнение температурной линии для стены

$$t_x = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{\delta} x . \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что изменение температуры в стенке происходит по прямой линии.

Выражение (3) можно использовать для определения количества тепла, проходящего через ограждение площадью

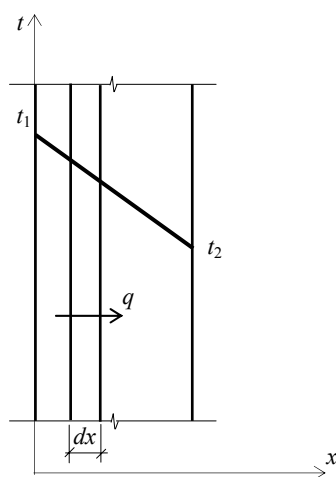


Рис. 2 Схема однородной плоской стенки

1 м^2 толщиной δ при разности температур $t_1 - t_2$ и коэффициенте теплопроводности λ .

Процесс передачи тепла в сложном теле, рассматриваемом в виде сложной среды, описывается дифференциальным уравнением. Для его вывода рассмотрим одномерный случай теплопередачи в плоской стенке (см. рис. 2).

В общем случае при нестационарных условиях теплопередачи величина теплового потока, проходящего через слой dx , будет изменяться. Величина изменения может быть получена при дифференциальном выражении (2) по x :

$$\frac{dq_1}{dx} = -\lambda \frac{d^2 t}{dx^2} . \quad (5)$$

В свою очередь, изменение величины теплового потока связано с поглощением или выделением тепла слоем dx при изменении его температуры во времени. Количество тепла, необходимое для повышения температуры слоя dx на dt градусов за промежуток времени $d\tau$ будет пропорционально теплоемкости слоя, равной $c\gamma dx$, т.е.

$$dq_2 = c\gamma dx \frac{dt}{d\tau} , \quad (6)$$

где c и γ – удельная теплоемкость и плотность материала. Знак «минус» здесь означает, что повышение температуры происходит за счет поглощения тепла и уменьшения величины потока.

Уравнение (6) может быть записано в частных производных в виде

$$\frac{\partial q_2}{\partial x} = -c\gamma \frac{\partial t}{\partial \tau} . \quad (7)$$

При отсутствии внутренних источников тепла величины dq_1/dx и $\partial q_2/\partial x$ равны. Тогда из уравнений (5) и (4) следует

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\gamma} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \quad (8)$$

Выражение (5) представляет собой дифференциальное уравнение теплопроводности для неустановившегося во времени теплового потока. В общем случае, когда тепловой поток распространяется по трем направлениям, оно может быть записано как

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\gamma} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (9)$$

Входящее в уравнение соотношение величин $\lambda/c\gamma = a$ – называется коэффициентом температуропроводности материала и характеризует скорость выравнивания температур в различных точках тела. Чем больше величина a , тем скорее все точки какого-либо тела при его остывании или нагреве достигнут одинаковой температуры.

При стационарных условиях теплопередачи, когда температура не меняется во времени, уравнение (9) имеет вид

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \quad (10)$$

и носит название уравнение Лапласа.

Уравнение дает возможность описать трехмерное температурное поле в ограждениях. Физический смысл его состоит в том, что сумма изменений количества тепла, поступающего к любой рассматриваемой точке конструкции, равна нулю. Следовательно, распределение температур в нем неизменно и имеет установившиеся значения, отвечающие постоянным условиям воздействия внешней среды, окружающей конструкцию.

Для большинства практических расчетов достаточно исследовать плоские температурные поля (в плане или разрезе конструкции). Для двумерных полей уравнение (10) имеет вид

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0. \quad (11)$$

При одномерной задаче (передача тепла через плоскую стенку из однородного материала) уравнение записывается как

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0. \quad (12)$$

Решая уравнение (12) при условии задания температур на границах стенки как на рис. 2, можно получить расчетные формулы (3) и (4), найденные ранее на основе закона Фурье.

Путем интегрирования уравнений (8) – (12) можно получить решения, позволяющие описывать распространение тепла в материальных средах ограждающих конструкций зданий. Так как дифференциальные уравнения в общем случае имеют бесконечное множество решений, для получения конкретного решения необходимо задание условий однозначности: начальных временных и граничных (пространственных условий).

Начальные условия задаются при решении нестационарных задач с использованием уравнений (8) и (9). Поскольку эти уравнения первого порядка по переменной τ , достаточно задания в начальный момент времени некоторой функции температур

$$t_0 = f(x, y, z, 0). \quad (13)$$

На практике чаще всего встречаются нестационарные задачи с простым начальным условием

$$t(x, y, z, 0) = t_0 = \text{const}. \quad (14)$$

К подобному условию сводятся, например, начальные условия вывода ограждения их установившегося стационарного режима, когда известно постоянное во времени распределение температур по объему конструкций, в режиме прогрева или охлаждения.

Кроме начальных условий при решении уравнений (8) и (9) необходимо также задание граничных условий:

Граничные условия 1 рода устанавливают распределение температур на поверхности ограждения и их изменение во времени. Эти граничные условия задаются крайне редко, поскольку обычно температуры поверхности является искомой величиной.

Граничные условия 2 рода задают тепловой поток, проходящий через поверхность его изменения во времени. Решение уравнения в этом случае сводится к определению функции $t(x, y, z, \tau)$, удовлетворяющей внутри области основному уравнению, нормальная производная которой на границе принимает значение

$$\frac{\partial t}{\partial n} = -\frac{Iq}{\lambda}. \quad (15)$$

Граничные условия 3 рода задают линейное соотношение между производной и функцией:

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha(t - t_{cp}). \quad (16)$$

Это граничное условие соответствует теплообмену тела со средой, температура которой t_{cp} задана в пространстве и во времени. Коэффициент α характеризует интенсивность теплового воздействия среды со стенкой. Граничные условия третьего рода наиболее широко применяются на практике при расчетах теплопередачи через ограждающие конструкции.

При теплопередаче в установившихся условиях, когда $\partial t / \partial \tau = 0$, начальные условия исключаются и значение имеют только пространственные.

1.2 КОНВЕКТИВНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

При обмене тепла между поверхностью ограждения и воздухом передача тепловой энергии происходит конвекцией и теплопроводностью в газообразной среде. Это совместное действие конвекции и теплопроводности имеет название конвективного теплообмена. Количество тепла, передаваемого конвекцией, зависит от характера движения газообразной среды, ее плотности и температуры, состояния поверхности ограждения, величины температурного перепада между воздухом и поверхностью и других переменных факторов. Поэтому изучение конвективного теплообмена ведется в основном экспериментально.

При практических расчетах количество тепла, передаваемого при конвективном теплообмене между воздухом и поверхностью, используется формула Ньютона

$$Q_k = \alpha_k(t_b - t_n)F, \quad (17)$$

где Q_k – количество тепла, передаваемого в единицу времени, Вт; α_k – коэффициент конвективной передачи, равный тепловому потоку, приходящемуся на единицу времени при разности температур между воздухом и поверхностью в 1 °С, Вт/(м²·°С); t_b , t_n – соответственно, температуры воздуха и поверхности, °С; F – площадь поверхности, м².

Сложность использования формулы (17) состоит в нахождении коэффициента α_k . Для практических расчетов он принимается на основе экспериментальных данных по эмпирическим формулам.

1.3 ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ИЗЛУЧЕНИЕМ

Теплопередача излучением – это теплообмен, происходящий между различно нагретыми поверхностями твердых тел, разделенными лучепрозрачной средой, например, воздухом.

Нагретое выше 0 К тело испускает лучистую энергию, которая, падая на окружающие тела, частично поглощается или нагревает их, частично отражается и частично проходит через тело. Если поверхность тела поглощает всю падающую лучистую энергию и расходует ее только на повышение температуры тела, то такое тело называется **абсолютно черным**. Если поверхность тела полностью отражает лучистую энергию, то оно называется **абсолютно белым**. Поверхности всех реальных ограждений частично поглощают и частично отражают энергию. Такие тела называются **серыми**.

Чем больше лучистого тепла поглощается телом, тем большее количество тепла оно и излучает. Максимальной излучательной способностью обладает в этой связи абсолютно черное тело. При этом количество тепла, излучаемого единицей поверхности абсолютно черного тела, определяется законом Стефана-Больцмана:

$$Q_n = C_0 \left[\frac{T}{100} \right]^4, \quad (18)$$

где Q_n – количество излучаемого тепла, Вт/м²; $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·°К⁴) – коэффициент излучения поверхности абсолютно черного тела; T – температура поверхности, К.

Формула (18) строго справедлива для абсолютно черных тел, однако она с достаточным приближением по точности может быть применена также и к серым телам.

Из формулы (18) видно, что количество тепла, излучаемого поверхностью ограждения, пропорционально четвертой степени температуры, и следовательно, интенсивность излучения редко возрастает при повышении температуры поверхности тела.

Между двумя поверхностями, имеющими различную температуру, происходит лучистый теплообмен, который зависит от взаимного расположения поверхностей, коэффициентов излучения поверхностей и разностей температур и определяется по соответствующим формулам. Например, для двух параллельных поверхностей, расположенных на сравнительно близком расстоянии друг от друга, количество тепла при лучистом теплообмене может быть определено по формуле

$$Q_{\text{л}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F, \quad (19)$$

где C_1, C_2 – коэффициенты излучения поверхностей, Вт/(м²·°К⁴); T_1, T_2 – абсолютные температуры излучающих поверхностей; F – площадь излучающей поверхности.

1.5 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Теплозащитные качества ограждений зависят от физических и теплотехнических свойств материалов. К ним относятся пористость и плотность материалов, их влажность, теплопроводность и теплоемкость.

Большинство строительных материалов – пористые тела. **Пористость** определяет содержание пор в материале и выражается процентным соотношением объема пор к общему объему материала. Для строительных материалов она изменяется от нуля до 90 %. У материалов типа пенополистирола она может быть еще выше.

Под **плотностью** понимают массу единицы объема материала в том состоянии, в каком он применяется в строительстве. Плотность зависит от пористости, а для сыпучих материалов от степени их уплотнения. Для строительных материалов она изменяется в пределах от 3100 кг/м³ (баритовый бетон) до 20 кг/м³ (пенополистирол).

От плотности и пористости зависят теплофизические качества материалов. По величине плотности можно приблизительно оценивать теплопроводность материала.

Под влажностью материала понимают содержание в нем химически свободной воды. Выражается влажность относительными величинами по массе или по объему:

$$\omega_{\text{м}} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \%, \quad (20)$$

где m_1, m_2 – масса влажного и сухого материала, кг.

Объемная влажность вычисляется по формуле

$$\omega_{\text{о}} = \frac{V_1}{V_2} \cdot 100 \%, \quad (21)$$

где V_1 – объем влаги содержащейся в материале; V_2 – объем сухого материала.

Значения расчетного массового отношения влаги в материале в процентах (массовая влажность) приведены для различных строительных материалов [1, прил. 3*]. Расчетные значения даны для двух условий эксплуатации (А или Б), определяемых по [1, прил. 2*] на основании сведений о влажностном режиме помещений в зоне влажности района строительства.

При одном и том же содержании влаги в образце массовая влажность может быть различной в зависимости от объемной плотности материала. Для материалов с большей объемной плотностью массовая влажность имеет меньший процент, чем для материала с меньшей объемной плотностью. В этой связи объемная влажность дает более наглядное представление о содержании влаги в материале.

Так как определения объемной влажности связаны с рядом трудностей, ее чаще всего находят через влажность по массе, используя соотношение

$$\frac{\omega_{\text{о}}}{\omega_{\text{м}}} = \frac{\gamma_0}{1000}, \quad (22)$$

где γ_0 – плотность материала в сухом состоянии, кг/м³.

Важной теплотехнической характеристикой материала является **теплоемкость** – способность материала поглощать тепло при повышении температуры. Количественно теплоемкость характеризуется удельной теплоемкостью c , равной количеству тепла в Дж, необходимому для повышения температуры 1 кг материала на 1 °С, и имеющей размерность Дж/(кг·°С). Величина c зависит от степени влажности материала: при увеличении влажности, теплоемкость увеличивается. Значения удельной теплоемкости для материалов в сухом состоянии приведены в [1, прилож.3].

Удельная теплоемкость материала при фактической влажности ω_M можно определять, используя зависимость

$$C = \frac{C_0 + 0,01\omega_M}{1 + 0,01\omega_M}. \quad (23)$$

В том случае, если строительный материал состоит из нескольких составляющих, то его удельная теплоемкость может быть определена по формуле

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (24)$$

где C_i – удельная теплоемкость i -й составляющей строительного материала, включающего в себя n составляющих; P_i – весовая часть i -й составляющей.

Теплопроводность материала – это свойство материала проводить тепло через свою массу. Теплопроводность количественно характеризуется коэффициентом теплопроводности λ , численно равным количеству тепла в Дж, проходящему через 1 м² ограждения толщиной в 1 м в единицу времени при разности температур поверхностей ограждения 1 °С, и имеющим размерность Вт/(м·°С). Строительные материалы имеют коэффициенты теплопроводности в пределах от 3,5 (гранит) до 0,04 Вт/(м·°С) (пенополистирол). Определяется λ экспериментальным путем и зависит от плотности, влажности, температуры и структуры материала. Для большинства случаев увеличение плотности, влажности и температуры материала приводит к повышению величины λ .

Значения коэффициентов теплопроводности для сухого материала, λ_0 , а также расчетные значения, используемые в теплофизических расчетах даны в [1]. Выбор значений λ по [1, прил. 3] производится в зависимости от условий эксплуатации ограждений А или Б, определяемых по [1, прил. 2*] на основании сведений о влажностном режиме помещений и зон влажности района строительства.

Пример 1. Определить расчетную величину коэффициента теплопроводности керамзитобетона на керамзитовом песке с $\gamma_0 = 1000$ кг/м³ для наружной стены жилого дома в условиях г. Тамбова. Температура внутреннего воздуха $t_b = 18$ °С, относительная влажность $\varphi_b = 55$ %.

Решение

По [1, табл.1] в зависимости от t_b и φ_b устанавливаем, что влажностный режим помещения нормальный. По карте зон влажности [1, прил. 1*] г. Тамбов относится к сухой зоне. Следовательно, условия эксплуатации А (см. [1, прил. 2*]) и коэффициент λ принимается по [1, прил. 3*] – $\lambda = 0,33$ Вт/(м·°С).

Более подробно с теплофизическими характеристиками строительных материалов и с факторами, влияющими на них, можно ознакомиться в книгах [7, 8].

2 ФИЗИКО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗДАНИЯ. МИКРОКЛИМАТ ПОМЕЩЕНИЯ

2.1 ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛИМАТА, УЧИТЫВАЕМЫЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОГРАЖДЕНИЯ ЗДАНИЙ

Конструкция наружных ограждений, степень их долговечности в значительной мере определяется природно-климатическими условиями района строительства. В процессе эксплуатации на здание оказывают воздействия: температура и влажность наружного воздуха; скорость и направление ветра;

солнечная и ультрафиолетовая радиация и другие факторы природной среды. Сведения о них дает строительная климатология – наука, изучающая климатические факторы, учитываемые при проектировании зданий и населенных пунктов. Подробный анализ климатических факторов, используемых при архитектурно-строительном проектировании выполнены в первой части пособия. Данные о количественных значениях климатических параметров в районе строительства на территории России и других стран СНГ приведены в [2, 3].

Большинство неблагоприятных воздействий на ограждения являются комплексными, т.е. вызываемыми одновременным действием нескольких физических величин, например, низкой температуры и ветра, высокой температуры и солнечной радиации. Совместные действия их приводят к чрезмерному переохлаждению или перегреву конструкции. Однако следует иметь в виду, что при определении необходимых физических свойств конструкции, например, ее сопротивления теплопередаче или теплоустойчивости, приходится учитывать только расчетные величины отдельных наиболее важных факторов, входящих в комплекс воздействий, так как закономерности влияния каждого из них существенно различны по своему физическому действию.

В ряде случаев необходим расчет по нескольким состояниям климатических воздействий, например, по наиболее неблагоприятным условиям воздухопроницания (при сильном ветре и сопровождающей относительно умеренной температуре), по наибольшему возможному охлаждению при низкой расчетной температуре и относительном безветрии, по условиям большой скорости ветра и предельно-низкой температуры (если их совпадение возможно по времени). Выбор сочетаний регламентируется соответствующими главами СНиП. Более подробно с воздействиями климатических факторов на ограждающие конструкции можно ознакомиться в [3].

2.2 ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОКЛИМАТА ПОМЕЩЕНИЙ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К НАРУЖНЫМ ОГРАЖДЕНИЯМ

Внутри помещений в зависимости от их функционального или технологического назначения должны обеспечиваться определяющие микроклимат санитарно-гигиенические условия.

Микроклимат помещений гражданских и промышленных зданий характеризуется температурами воздуха, их колебаниями, температурами на внутренних поверхностях ограждений, относительной влажностью и скоростью движения воздуха в помещении, кратностью воздухообмена, а также гигиеническим состоянием воздуха и наличием или отсутствием агрессивных воздействий на ограждения. Гигиенические требования к режиму помещений регламентируются в соответствующих главах СНиП и учитывают указанные выше факторы, а также вид физической деятельности людей, находящихся в помещении. Например, микроклимат жилых помещений, где человек находится в относительном покое, определяют четыре основных фактора, приведенные в табл. 1.

1 Основные параметры микроклимата в жилых помещениях

Параметры микроклимата	Климатический район			
	I	II	III	IV
<i>Зимний период</i>				

1 Температура воздуха, °С	21...22	18...20	18...19	17...18
2 Относительная влажность воздуха, %	30...45	30...45	35...50	35...50
3 Скорость движения воздуха, м/с	0,08...0,10	0,08...0,10	0,08...0,10	0,08...0,10
4 Средняя радиационная температура поверхностей в помещении, °С, не ниже	21	18	18	17
<i>Летний период</i>				
1 Температура воздуха, °С	23...24	23...24	25...26	25...26
2 Относительная влажность воздуха, %	35...50	35...50	30...60	30...60
3 Скорость движения воздуха, м/с	0,08...0,10	0,08...0,10	0,10...0,15	0,10...0,15
4 Средняя радиационная температура поверхностей в помещении, °С, не выше	26	27	28	30

Из табл. 1 видно, что температура внутреннего воздуха в зимний период в жилых помещениях должна поддерживаться на уровне 18...22 °С.

В это время в производственных помещениях, где люди заняты работой, требующей больших затрат физических усилий, нормальной считается температура 12...15 °С, а при легкой одежде и точной работе, не требующей физического напряжения, температура должна быть в пределах 21...23 °С. Подробнее данные о параметрах микроклимата производственных помещений в зависимости от периода года и вида деятельности приведены согласно [5] в табл. 2.

2 Нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений [5]

Характеристика производственных помещений	Категории работы	Холодный и переходный периоды года (температура наружного воздуха ниже +10 °С)			допустимая температура воздуха, °С вне постоянных рабочих мест
		на постоянных рабочих местах оптимальные / допустимые			
		температура воздуха, °С	относительная влажность воздуха, %	скорость движения воздуха, м/с	
Помещения, характеризующиеся	Легкая	0...22	50...30	Не более 0,2	15...22
		7...22	Не более 75	Не более 0,3	

незначительными избытками явного тепла (20 ккал/м ³ ·ч и менее)	Средней тяжести	17...19	60...30	Не более 0,3	13...20
		15...20	То же	Не более 0,5	
	Тяжелая	16...18	60...30	То же	12...18
		13...18	То же	То же	
Помещения, характеризующиеся значительными избытками явного тепла (более 20 ккал/м ³ ·ч)	Легкая	20...22	60...30	Не более 0,2	15...26
		17...24	Не более 75	Не более 0,5	
	Средней тяжести	17...19	60...30	Не более 0,3	15...24
		16...22	То же	Не более 0,5	
	Тяжелая	16...18	60...30	То же	12...19
		13...17	То же	То же	

Важнейшими характеристиками микроклимата являются влажность и температура. Они взаимосвязаны между собой и определяют **температурно-влажностный режим помещения**, от которого зависят условия эксплуатации ограждений.

При проектировании жилых и общественных зданий температуру и относительную влажность воздуха следует принимать в соответствии с ГОСТ 30494 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях». Параметры воздуха в зданиях производственного назначения следует принимать согласно ГОСТ 12.1.005–88 ССБТ «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны и норм проектирования соответствующих зданий».

Гигиеническое значение обеспечения достаточно высоких температур поверхностей ограждений определяется тем, что большая часть потерь тепла человеческим организмом происходит за счет излучения тепла телом на поверхности с более низкой температурой.

Учитывая изложенное выше, наружные ограждающие конструкции должны иметь теплотехнические параметры, обеспечивающие требуемый температурный режим в помещении, допустимую величину колебаний на внутренней поверхности ограждающей конструкции при изменении температуры наружного воздуха. При этом температура внутренней поверхности ограждающей конструкции не должна вызывать у человека ощущение холода из-за больших радиационных потерь тепла. На ней не должна конденсироваться влага, приводящая к появлению сырости, образованию грибков и разрушению отдельных слоев.

Ограждающие конструкции должны также иметь достаточное сопротивление воздухопроницанию. Это необходимо, потому что проникновение наружного холодного воздуха в ограждение снижает его теплозащитные свойства. Наоборот, при прохождении через конструкцию теплого воздуха помещения в конструкции накапливается избыточная влага.

Материал и конструкция ограждения должны подбираться таким образом, чтобы в толще его при эксплуатации не образовывалась влага, ухудшающая теплозащитные и санитарно-гигиенические качества ограждения.

Таким образом, чтобы обеспечить необходимые комфортные условия в помещении, ограждения должны иметь:

- достаточные теплозащитные свойства для защиты помещений зимой от холода, летом от перегрева;
- температуры внутренних поверхностей, незначительно отличающиеся от температуры внутреннего воздуха;
- воздухопроницаемость, не превышающую допустимые пределы;
- минимальную влажность материалов.

При этом наружные ограждающие конструкции должны обеспечивать минимальные экономически обоснованные теплотери, отвечающие требуемой энергетической эффективности здания.

Теплофизические расчеты и принципы проектирования ограждений, отвечающих этим требованиям, рассмотрены в следующей главе.

3 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ

3.1 ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ОГРАЖДЕНИЙ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОВОМ ПОТОКЕ

3.1.1 Сопротивление теплопередаче ограждений

Стационарные условия теплопередачи характеризуются постоянством во времени теплового потока и температуры внутри и на поверхностях ограждения. Действительные условия обычно отличаются от стационарных. Однако в силу того, что при стационарном режиме расчеты значительно упрощаются, сохраняя необходимую точность, в большинстве случаев принимаются условия теплопередачи при постоянном тепловом потоке.

Процесс передачи тепла через ограждение состоит из трех этапов восприятия тепла внутренней поверхностью от воздуха помещения; передачи его через толщу ограждения и отдачи тепла наружной поверхностью окружающей здание воздушной среде.

Рассмотрим процесс теплопередачи на примере однородной стенки (рис. 3).

На первом этапе тепло от воздуха помещения к внутренней поверхности ограждения передается конвекцией и излучением. При этом поток тепла, падающий на единицу поверхности, определяется как

$$q_b = \alpha_b(t_b - \tau_b). \quad (25)$$

Поток тепла, проходящего через толщу ограждения на втором этапе, определяется в соответствии с формулой (3) как

$$q = \frac{\lambda}{\delta}(t_b - \tau_n). \quad (26)$$

На третьем этапе наружная поверхность ограждения отдает тепло наружному воздуху конвекцией и излучением. При этом тепловой поток определяется по формуле

$$q_n = \alpha_n(t_n - \tau_n). \quad (27)$$

В формулах (25) – (27) принято: δ – толщина конструкции, м; α_b , α_n – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях ограждения, Вт/(м²·°С); t_b – температура воздуха помещения, °С; t_n – температура наружного воздуха, °С; τ_b , τ_n – температуры на внутренней и наружной поверхностях ограждения, °С; λ – расчетный коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·°С).

Сложив уравнения (25) – (27), можно получить формулу потока, проходящего через единицу площади ограждения, учитывающую теплообмен воздуха с поверхностями и теплопередачу через толщу ограждения,

$$q_0 = \frac{t_b - t_n}{\frac{1}{\alpha_b} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_n}} = \frac{t_b - t_n}{R_0}. \quad (28)$$

Величина

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_b} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_n} \quad (29)$$

называется сопротивлением теплопередаче ограждающей конструкции. Как видно из формулы (28), сопротивление теплопередаче ограждений есть тепловой напор (разность температур) между внутренним и наружным воздухом, при котором через 1 м² ограждения толщиной δ с коэффициентом λ в единицу времени проходит единица тепла. Следовательно, сопротивление теплопередаче может служить мерой теплозащитных свойств ограждения. Из формулы (29) видно, что R_0 зависит от коэффициентов теплоотдачи α_b и α_n , толщины ограждения δ и коэффициента теплопроводности материала λ . Величины $R_b = 1/\alpha_b$ и $R_n = 1/\alpha_n$ называют, соответственно сопротивлениями тепловосприятию и теплоотдаче, $R = \delta/\lambda$ – термическим сопротивлением материального слоя конструкции.

Расчет R_0 следует выполнять по формуле

$$R_0 = R_b + R_k + R_n \quad (30)$$

Величина R_b определяет температурный перепад $\Delta t_b = t_b - \tau_b$ (см. рис. 3). Значения R_b зависят от коэффициента теплопередачи α_b , в общем виде определяемого как $\alpha_b = \alpha_{\text{вл}} + \alpha_{\text{вк}}$, где $\alpha_{\text{вл}}$ – коэффициент теплопередачи излучением; $\alpha_{\text{вк}}$ – коэффициент теплопередачи конвекцией. Коэффициент α_b в общем случае зависит от размеров помещения, структуры внутренней поверхности ограждения, ее отделки, положения в пространстве (горизонтальная и вертикальная поверхности), скорости конвекционных потоков воздуха у поверхности, условий лучшего теплообмена и ряда других факторов. Нахождение величины α_b является трудоемкой задачей, поэтому для зданий, у которых разности температур ($t_b - \tau_b$) меняются незначительно, при теплотехнических расчетах используются проверенные опытом значения теплопередачи α_b , приведенные в СНиП II-3-3-79* (см. табл. 4*[1]).

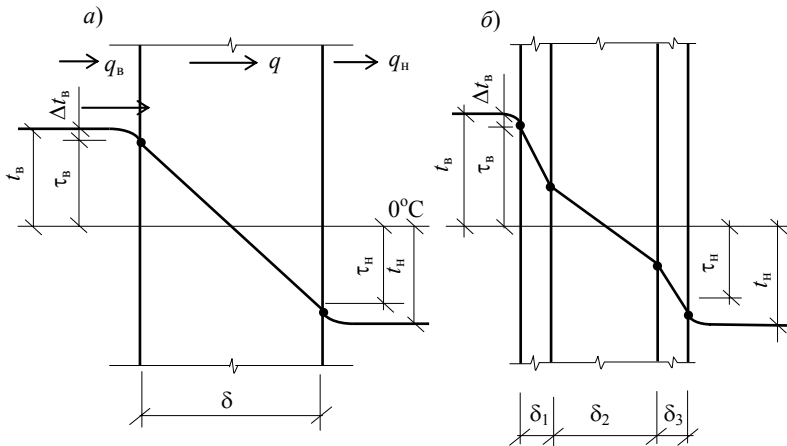


Рис. 3 Распределение температуры в однослойной (а) и многослойной (б) ограждающих конструкциях при стационарном режиме теплопередачи

Величина R_n определяет температурный перепад $\tau_n - t_n$ (см. рис. 3). Значение R_n зависит от коэффициента теплопередачи наружной поверхности α_n , который определяется в основном условиями конвекции наружного воздуха. При теплотехнических расчетах рекомендуется величину α_n принимать по данным СНиП II-3-79* [1, табл. 6*].

Величина термического сопротивления конструкции R_k определяет температурный перепад $\tau_b - t_n$ (см. рис. 3). Значения R_k зависят от коэффициентов теплопроводности материальных слоев конструкции их толщин и наличия в ограждениях замкнутых воздушных прослоек.

Для однослойных ограждений (рис. 3, а) термическое сопротивление R_k определяется как

$$R_k = R = \frac{\delta}{\lambda} \quad (31)$$

Для многослойных ограждений, в которых различные слои материала располагаются параллельно друг другу (см. рис. 3, б), R_k определяется как

$$R_k = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (32)$$

где $R_i = \lambda_i / \delta_i$ – термическое сопротивление i -го слоя, имеющего толщину δ_i и расчетный коэффициент теплопроводности λ_i .

В состав многослойных ограждений часто включаются замкнутые воздушные прослойки, повышающие сопротивление теплопередаче ограждения, так как воздух имеет достаточно низкое значение коэффициента теплопроводности (при $t = 0^\circ\text{C}$, $\lambda_{\text{в}} = 0,025 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{C})$). Величина термического сопротивления прослоек $R_{\text{вп}}$ зависит от их толщины, расположения в ограждении и от направления теплового потока. Термическое сопротивление конструкции, имеющей замкнутую воздушную прослойку, следует определять как

$$R_k = \sum_{i=1}^n R_i + R_{\text{вп}} \quad (33)$$

При курсовом и дипломном проектировании значения $R_{\text{вп}}$ следует принимать по [1, прил. 4].

В случае, когда плоская конструкция неоднородна и состоит из слоев материала, параллельных и перпендикулярных друг другу (например, многослойная каменная стена облегченной кладки, с теплоизоляционным слоем (рис. 4), многослойная асбестоцементная каркасная панель с эффективным утеплителем (рис. 8) и тому подобными, определяется приведенное термическое сопротивление $R_{\text{к}}^{\text{пп}}$, расчет которого производится в нижеследующем порядке.

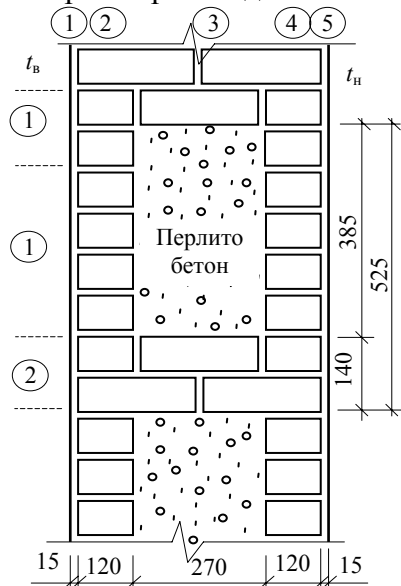


Рис. 4 Разрез по кирпичной стене облегченной кладки (расчетная схема стены к примеру 5)

1 Ограждающая конструкция (или ее часть) условно разрезается на участки плоскостями, параллельными направлению теплового потока. При этом одни участки могут быть однородными (из одного материала), а другие неоднородными (из слоев с различными материалами, расположенными параллельно друг другу). Определяется термическое сопротивление R_a

$$R_a = \frac{F_1 + F_2 + \dots + F_n}{\frac{F_1}{R_1} + \frac{F_2}{R_2} + \dots + \frac{F_n}{R_n}}, \quad (34)$$

где F_1, F_2, \dots, F_n – площади отдельных участков конструкции (или ее части), м^2 ; R_1, R_2, \dots, R_n – термические сопротивления участков конструкции, определяемые для однородных участков по формуле (31), для неоднородных участков по формуле (32).

2 Ограждающая конструкция (или ее часть, принятая для определения R_a) условно разрезается на слои плоскостями, перпендикулярными направлению теплового потока. При этом, одни слои могут быть однородными (из одного материала), другие – неоднородными (из однослойных участков разных материалов). Определяется термическое сопротивление однородных слоев по формуле (31), а неоднородных – по формуле (34). Термическое сопротивление конструкции R_b находится как сумма термических сопротивлений отдельных однородных и неоднородных слоев по формуле (32).

3 Определяется приведенное термическое сопротивление неоднородной ограждающей конструкции

$$R_R^{\text{пп}} = \frac{R_a + 2R_b}{3}. \quad (35)$$

Приведенное сопротивление теплопередаче неоднородной ограждающей конструкции определяется как

$$R_o^{\text{пп}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + R_R^{\text{пп}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}. \quad (36)$$

Следует иметь в виду, что если величина R_a превышает величину R_b более чем на 25 % или ограждающая конструкция не является плоской, то $R_{\text{к}}^{\text{пп}}$ такой конструкции необходимо определять на основании расчета температурного поля

$$R_{\text{к}}^{\text{пп}} = \frac{\tau_{\text{в ср}} - \tau_{\text{н ср}}}{q^{\text{расч}}}, \quad (37)$$

где $q^{\text{расч}}$ – расчетная величина теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$, определяется по формуле

$$q^{\text{расч}} = \alpha_{\text{в}}(t_{\text{в}} - \tau_{\text{в ср}}) = \alpha_{\text{н}}(\tau_{\text{н ср}} - t_{\text{н}}), \quad (38)$$

где $\tau_{\text{в ср}}, \tau_{\text{н ср}}$ – средние температуры внутренней и наружной поверхности неоднородного ограждения, определяемые по результатам расчета температурного поля (см. п. 3.1.2); $t_{\text{в}}, t_{\text{н}}$ – расчетные температуры наружного и внутреннего воздуха; $\alpha_{\text{в}}, \alpha_{\text{н}}$ – то же, что и в формуле (25) и (27).

Приведенное сопротивление теплопередаче R_o неоднородного ограждения можно определять как

$$R_o = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{q^{\text{расч}}}, \quad (39)$$

где $q^{\text{расч}}$ – расчетный тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$, определяемый по формуле (37).

Для наружных панельных стен жилых зданий приведенное сопротивление теплопередаче допускается принимать равным

$$R_o = R_o^{\text{учл}} r, \quad (40)$$

где $R_0^{усл}$ – сопротивление теплопередаче панельных стен, условно определяемое по формуле (30) без учета теплопроводных включений, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; r – коэффициент теплотехнической однородности, принимаемый по [1, прил. 13]. При этом его величина должна быть не меньше значений, приведенных в [1, табл. 6а*].

3.1.2 Нормирование сопротивления теплопередаче наружных ограждений

Так как величина сопротивления теплопередаче R_0 является мерой теплозащитных качеств ограждения, при проектировании наружных ограждений зданий необходимо знать минимальные допустимые значения R_0 , обеспечивающие эти качества.

Нормирование R_0 основано на принципах обеспечения санитарно-гигиенических требований внутри помещения и ограничения теплопотерь в отопительный период. Поэтому, согласно [1] при проектировании наружных ограждений должны соблюдаться условия, при которых их приведенное сопротивление теплопередаче R_0 следует принимать в соответствии с заданием на проектирование, но не менее требуемых значений $R_0^{тп}$, оп-

ределяемых исходя из санитарно-гигиенических и комфортных условий или условий энергосбережения. Выбор конкретного требуемого сопротивления регламентируется в СНиП II-3-79* [1].

По санитарно-гигиеническим условиям требуемое сопротивление теплопередаче $R_0^{тп}$ ограждающих конструкций (за исключением светопрозрачных) определяется по формуле

$$R_0^{тп} = \frac{n(t_b - t_n)}{\Delta t^H \alpha_b}, \quad (41)$$

где t_b – расчетная температура внутреннего воздуха помещения, °C , принимаемая согласно ГОСТ 12.1.005-88 и нормам проектирования соответствующих зданий; t_n – расчетная зимняя температура наружного воздуха, °C , принимаемая равной средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 по СНиП 23-01-99 [2, табл. 1]; α_b – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$, принимаемая по [1, табл. 4*]; Δt^H – нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающих конструкций, °C , принимаемый по [1, табл. 2*]; n – коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающей конструкции по отношению к наружному воздуху в соответствии [1, табл. 3*].

Требуемое сопротивление, определяемое по формуле (41), должно обеспечиваться наружными ограждающими конструкциями в зданиях с влажным и мокрым режимом, в зданиях, предназначенных сезонной эксплуатации (осенью и весной), и в зданиях с расчетной температурой внутреннего воздуха 12 °C и ниже, а также внутренними стенами, перегородками и перекрытиями между помещениями при разности расчетных температур воздуха в этих помещениях более 6 °C . Фактические сопротивления теплопередаче R_0 перечисленных ограждений должно быть не ниже требуемых значений, определяемых по формуле (41), т.е. должно выполняться условие $R_0 \geq R_0^{тп}$.

При определении требуемого сопротивления теплопередаче внутренних ограждающих конструкций, разделяющих помещения с разными температурами воздуха, в формуле (41) следует принимать $n = 1$, а вместо t_n – расчетную температуру воздуха более холодного помещения.

Для зданий с сезонным режимом эксплуатации в формуле (41) в качестве расчетной зимней температуры наружного воздуха t_n следует принимать минимальную температуру наиболее холодного месяца, определяемую по СНиП 23-01-99 [2] с учетом среднесуточной амплитуды температуры наружного воздуха.

По условиям энергосбережения требуемое сопротивление теплопередаче $R_{02}^{тп}$ следует принимать в соответствии с методикой, изложенной в СНиП II-3-79*[1], для всех, кроме перечисленных выше, случаев.

В [1, табл. 1б*] приведены минимальные значения сопротивлений теплопередаче в зависимости от продолжительности и средней температуры наружного воздуха отопительного периода. При проектировании должно выполняться условие $R_0 \geq R_{02}^{тп}$.

Величина R_{02}^{TP} по [1, табл. 1б*] принимаются в зависимости от величины градусо-суток отопительного периода (ГСОП), которую следует определять по формуле

$$\text{ГСОП} = (t_b - t_{оп})z_{оп}, \quad (42)$$

где t_b – то же, что и в формуле (41); $t_{оп}$, $z_{оп}$ – средняя температура, °С и продолжительность, сут., периода со среднесуточной температурой воздуха ≤ 8 °С по СНиП 23-01-99 [2].

При промежуточных значениях ГСОП величины R_0^{TP} определяются интерполяцией.

Требуемое сопротивление дверей (кроме балконных) и ворот должно быть не менее $0,6 R_0^{TP}$ стен зданий и сооружений, которое определяется по формуле (41) при расчетной зимней температуре наружного воздуха, равной средней температуре наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92.

Требуемое сопротивление теплопередаче R_0^{TP} светопрозрачных конструкций (окон, балконных дверей, фонарей) следует определять по [1, табл. 1б*] в зависимости от величины ГСОП района строительства.

Выбор светопрозрачной конструкции производится так, чтобы приведенное сопротивление теплопередаче, полученное в результате сертификационных испытаний, было равно или больше требуемого сопротивления, определяемого по [1, табл. 1б*], из условия энергосбережения. По санитарно-гигиеническим условиям требуемое сопротивление теплопередаче светопрозрачных ограждений следует принимать по [1, табл. 9*] в зависимости от разности температуры внутреннего воздуха и средней температуры наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92.

При отсутствии сертификационных данных допускается использовать при проектировании данные о сопротивлениях теплопередачи конструкций светопрозрачных ограждений, приведенные в [1, прил. 6*].

При проектировании светопрозрачных ограждений жилых и общественных зданий должны также соблюдаться условия, ограничивающие максимальную площадь оконных заполнений. Если приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачных конструкций меньше $0,56 \text{ м}^2\text{°С/Вт}$, суммарная площадь окон должна быть не более 18 % суммарной площади светопрозрачных и непрозрачных ограждающих конструкций стен. При светопрозрачных ограждениях с приведенным сопротивлением теплопередаче не менее $0,56 \text{ м}^2\text{°С/Вт}$ площадь остекления должна составлять не более 25 % общей площади фасадов зданий.

3.1.3 Примеры теплотехнического расчета и проектирования ограждений при стационарном тепловом потоке

Расчеты ограждений с однородными слоями материалов

К плоским однослойным и многослойным однородным ограждениям относятся ограждения, состоящие из одного материала или из нескольких параллельно расположенных слоев разных материалов. Примером таких конструкций могут быть кирпичные стены, конструкции чердачных перекрытий с утеплителем и т.п.

Расчет фактического сопротивления таких конструкций производится по формулам (30) – (33).

Пример 2. Выполнить расчет и проектирование по условиям теплозащиты производственного здания, строящегося в Тамбовской области. Согласно заданию на проектирование стена должна быть выполнена из глиняного обыкновенного кирпича на цементно-песчаном растворе и оштукатурена с двух сторон цементно-песчаным раствором толщиной 2 см. расчетная температура воздуха в помещении $t_b = 10$ °С, относительная влажность воздуха $\phi_b = 75$ %. Схема стены к расчету приведена на рис. 5.

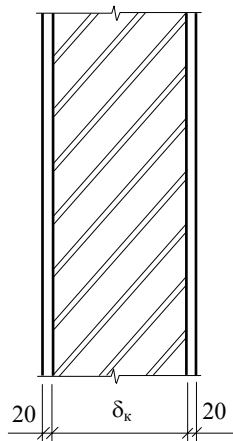


Рис. 5 Схема стены

Решение

1 Исходя из значений $t_b = 10$ °С и $\phi_b = 75$ % по [1, табл. 1] установим, что режим помещения влажный. Следовательно, требуемое сопротивление R_0^{TP} для стены необходимо определять по санитарно-гигиеническим условиям, используя формулу (41).

Величина R_0^{TP} , будет равна

$$R_{01}^{TP} = \frac{n(t_b - t_n)}{\alpha_b \Delta t^H} = \frac{1(10 + 28)}{8,7 \cdot 4,4} = 0,99 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт},$$

где $\alpha_b = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ по [1, табл. 4*]; $n = 1$ по [1, табл. 3*]; $t_n = -28 \text{ °C}$ по [5, табл. 1].

Значение нормируемого температурного перепада согласно [1, табл. 2*] по формуле $\Delta t^H = t_b - t_n = 10 - 5,6 = 4,4 \text{ °C}$. Здесь t_p – температура точки росы при заданной влажности воздуха помещения. Ее определяем согласно методике, изложенной в п. 3.3.3 настоящего пособия, в следующей последовательности: по табл. П.1 находим максимальное парциальное давление пара при расчетной температуре внутреннего воздуха (в данном случае $E = 1225 \text{ Па}$ при $t_b = 10 \text{ °C}$); из соотношения $\phi_b = 100 e/E$ определяем действительное парциальное давление водяного пара ($e_b = 1225 \cdot 75/100 = 918,8 \text{ Па}$ при $\phi_b = 75 \%$); по значению e_b из табл. П.1 находим температуру точки росы ($t_p = 5 \text{ °C}$ при $e = 918,8 \text{ Па}$).

В случае отсутствия таблиц расчет величины E можно выполнять по формуле

$$E = 611 \cdot e^{1,045(\sqrt{t_b + 51,566} - 70,18)}, \quad (42)$$

а температуру точки росы, соответственно, определять как

$$t_p = [\ln(e_b / 611) / 1,0475 + 7,18]^2 + 51,566. \quad (43)$$

2 Устанавливаем условия эксплуатации стены. Так как зона строительства по [1, прил. 1*] сухая, а температурно-влажностный режим помещения влажный [1, табл. 1], условия эксплуатации по [1, прил. 2] – Б.

3 По [1, прил. 3*] определяются расчетные коэффициенты теплопроводности материалов ограждения: для кладки – $\lambda_k = 0,81 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$; для цементно-песчаного раствора – $\lambda_p = 0,93 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$.

4 Определяем толщину кирпичной кладки из условия равенства $R_o = R_{01}^{TP}$. В соответствии с формулами (30) – (32) имеем

$$R_o = \frac{1}{\alpha_b} + 2 \frac{\delta_p}{\lambda_p} + \frac{\delta_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_n} = R_{01}^{TP}.$$

Здесь $\alpha_b = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ – по [1, табл. 4*], $\alpha_n = 23 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ – по [1, табл. 6*].

$$R_o = \frac{1}{8,7} + 2 \frac{0,02}{0,93} + \frac{\delta_k}{0,81} + \frac{1}{23} = 0,99 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}.$$

Откуда $\delta_k = \left(0,99 - \frac{1}{8,7} - 2 \frac{0,02}{0,93} - \frac{1}{23} \right) 0,81 = 0,64 \text{ м}$.

Таким образом, необходимые теплотехнические условия обеспечит стена толщиной 64 см (два с половиной кирпича).

Пример 3. Рассчитать толщину теплоизоляции для чердачного перекрытия двухэтажного жилого дома, строящегося в г. Липецке. Крыша скатная с наслонными стропилами, перекрытие из сплошных железобетонных плит толщиной 16 см. Теплоизоляция должна быть выполнена из минераловатных плит, защищенных стяжкой из цементно-песчаного раствора толщиной 30 мм с армированной сеткой. Схема к расчету приведена на рис. 6. Температура внутреннего воздуха $t_b = 18 \text{ °C}$, относительная влажность воздуха $\phi_b = 45 \%$.



Рис. 6 Схема чердачного перекрытия

Решение

1 По [1, табл. 1] в соответствии с $t_b = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\phi_b = 45 \%$ устанавливаем, что температурно-влажностный режим помещения сухой и требуемое сопротивление, следовательно, определяется из условия энергосбережения по величине ГСОП.

Величина ГСОП будет равна

$$\text{ГСОП} = (t_b - t_{\text{оп}})z_{\text{оп}} = (18 + 3,4) \cdot 202 = 4323 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{сут.},$$

где $t_{\text{оп}} = -34 \text{ }^\circ\text{C}$ – средняя температура отопительного периода [2, табл. 1, гр. 12]; $z_{\text{оп}} = 202 \text{ сут.}$ – продолжительность отопительного периода [2, табл. 1, гр. 11].

По [1, табл. 1б*] для величины ГСОП = 4323 $^\circ\text{C}\cdot\text{сут.}$ путем интерполяции имеем $R_{02}^{\text{тп}} = 4,02 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C/Вт.}$

2 Устанавливаем условия эксплуатации ограждающих конструкций. Так как зона строительства по [1, прил. 1*] сухая, температурно-влажностный режим помещения сухой, условия эксплуатации – А [1, прил. 2]. Коэффициенты теплоотдачи $\alpha_b = 8,7 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$ [1, табл. 4*], где $\alpha_n = 23 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$ [1, табл. 6*].

3 По [1, прил. 3*] определяем расчетные коэффициенты теплопроводности материалов перекрытия: железобетонная плита перекрытия – $\lambda_{\text{ж}} = 1,92 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$; цементно-песчаная стяжка – $\lambda_c = 0,76 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$; минераловатные плиты $\gamma_0 = 100 \text{ кг/м}^3$ (ГОСТ 9573-82) – $\lambda_{\text{п}} = 0,06 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$.

4 Определяем толщину теплоизоляции из условия равенства $R_0 = R_{02}^{\text{тп}}$:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_b} + \frac{\delta_{\text{ж}}}{\lambda_{\text{ж}}} + \frac{\delta_{\text{п}}}{\lambda_{\text{п}}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_n} = R_{02}^{\text{тп}};$$

$$R_0 = \frac{1}{8,7} + \frac{0,16}{1,92} + \frac{\delta_{\text{п}}}{0,06} + \frac{0,03}{0,76} + \frac{1}{23} = 4,02 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C/Вт},$$

откуда $\delta_{\text{п}} = \left(4,02 - \frac{1}{8,7} - \frac{0,16}{1,92} - \frac{0,03}{0,76} - \frac{1}{23} \right) 0,06 = 0,22 \text{ м.}$

Таким образом, для обеспечения требуемой теплоизоляции чердачного перекрытия необходимо уложить по плитам перекрытия минераловатные плиты плотностью 100 м^3 с толщиной слоя не менее 22 см.

Пример 4. Рассчитать толщину теплоизоляции перекрытия первого этажа жилого здания, расположенного над подвальными помещениями. Расчетная температура в помещениях первого этажа $t_b = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, температура в подвальных помещениях $t_{\text{вп}} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Перекрытие над подвалом выполнены из сплошной железобетонной плиты толщиной 16 см. По плите перекрытия необходимо уложить теплоизоляцию из древесноволокнистых плит и уложить деревянный пол по лагам с покрытием из линолеума. Схема к расчету приведена на рис. 7.

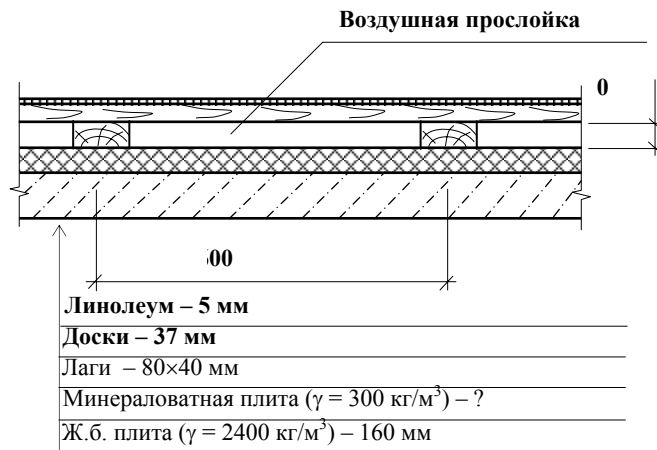


Рис. 7 Схема перекрытия

Решение

1 Так как разность температур $t_{\text{в}} - t_{\text{вп}} = 20 - 5 = 15 \text{ }^\circ\text{C} > 6 \text{ }^\circ\text{C}$, расчет требуемого сопротивления производим по формуле (41).

Величина $R_{\text{o}}^{\text{тп}}$, будет равна

$$R_{\text{o1}}^{\text{тп}} = \frac{n(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})}{\alpha_{\text{в}} \Delta t^{\text{н}}} = \frac{1(20 - 5)}{8,7 \cdot 2} = 0,86 \text{ м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C/Вт},$$

где $\alpha_{\text{в}} = 8,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ по [1, табл. 4*]; $n = 1$ по [1, табл. 3*]; $\Delta t^{\text{н}} = 2,0$ по [1, табл. 2*].

2 Условия эксплуатации – А.

3 По [1, прил. 3*] определяем расчетные коэффициенты теплопроводности материалов перекрытия: железобетонная плита перекрытия – $\lambda_{\text{ж}} = 1,92 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$; древесноволокнистые плиты $\gamma_0 = 800 \text{ кг/м}^3$ (ГОСТ 4998–84*) – $\lambda_{\text{дп}} = 0,19 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$; древесина (сосна поперек волокон) $\gamma = 500 \text{ кг/м}^3$ – $\lambda_{\text{д}} = 0,14 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$; линолеум поливинилхлоридный многослойный (ГОСТ 14632–79) $\gamma_0 = 1800 \text{ кг/м}^3$ – $\lambda_{\text{л}} = 0,38 \text{ Вт/(м} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$.

4 Определяем толщину теплоизоляции из условия равенства $R_{\text{o}} = R_{\text{o1}}^{\text{тп}}$:

$$R_{\text{o}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_{\text{ж}}}{\lambda_{\text{ж}}} + \frac{\delta_{\text{д}}}{\lambda_{\text{д}}} + \frac{\delta_{\text{л}}}{\lambda_{\text{л}}} + \frac{\delta_{\text{дпс}}}{\lambda_{\text{дп}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} = R_{\text{o1}}^{\text{тп}};$$

$$R_{\text{o}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,16}{1,92} + \frac{0,037}{0,14} + \frac{0,005}{0,38} + \frac{\delta_{\text{дп}}}{0,087} + 0,16 + \frac{1}{8,7} = 0,86 \text{ м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C/Вт},$$

$$\text{откуда } \delta_{\text{п}} = \left(0,86 - \frac{1}{8,7} - \frac{0,16}{1,92} - \frac{0,037}{0,14} - \frac{0,005}{0,38} - 0,16 - \frac{1}{8,7} \right) \cdot 0,19 = 0,02 \text{ м}.$$

Следует отметить, что при расчете R_{o} принято $\alpha_{\text{в}} = \alpha_{\text{н}} = 8,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ по [1, табл. 4*] как для внутренних условий помещений. $R_{\text{вп}} = 0,16 \text{ м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C/Вт}$ – термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки под полом, принятое по прил. 4 [1].

Таким образом, для обеспечения требуемой теплоизоляции чердачного перекрытия первого этажа необходимо дополнительно уложить древесноволокнистую плиту с $\gamma_0 = 800 \text{ м}^3$ толщиной 20 мм.

РАСЧЕТ НЕОДНОРОДНЫХ В ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОМ ОТНОШЕНИИ КОНСТРУКЦИЙ С РЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРОЙ

К подобным конструкциям относятся неоднородные конструкции, состоящие из различных слоев материалов, расположенных параллельно и перпендикулярно друг другу с определенной закономерностью (например, многослойная каменная стена облегченной кладки с внутренним теплоизоляционным слоем, разорванным в поперечном направлении кирпичной кладкой; многослойная каркасная панель с эффективным утеплителем (рис. 4) и др.

Расчет подобных конструкций, как указано ранее, можно выполнять на основе данных расчета температурного поля конструкции или приближенными методами по [1, формулы (6) и (7)]. Ниже приведены примеры расчета приближенными методами.

Пример 5. Проверить на соответствие теплотехническим требованиям облегченную кирпичную стену двухэтажного жилого дома, сложенную из глиняного обыкновенного кирпича на цементно-песчаном растворе с заполнением вермикулитобетоном (рис. 4). Стена оштукатурена с внутренней стороны цементно-песчаным раствором, с наружной стороны – сложным известково-цементным раствором.

Исходные данные:

- 1) район строительства – г. Краснодар;
- 2) параметры внутреннего воздуха: температура $t_{в} = 18$ °С относительная влажность внутреннего воздуха $\varphi = 45$ %;
- 3) климатические данные района строительства: средняя температура и продолжительность отопительного периода $t_{оп} = 2,0$ °С, $z_{оп} = 149$ сут. [2, табл. 1];
- 4) необходимые теплотехнические показатели и коэффициенты в формулах:
 $n = 1$ [1, табл. 3]; $\alpha_{в} = 8,7$ Вт/(м²·°С) [1, табл. 4*]; $\alpha_{н} = 23$ Вт/(м²·°С) [1, табл. 6*]; $\Delta t^H = 6$ °С [1, табл. 2*];
- 5) зона влажности – сухая [1, прил. 1*].
- 6) температурно-влажностный режим – сухой [1, табл. 1]. Условия эксплуатации – А [1, прил. 2].
- 5 Коэффициенты теплопроводности материалов: кирпичной кладки – $\lambda_{к} = 0,70$ Вт/(м·°С); вермикулитобетона – $\lambda_{п} = 0,09$ Вт/(м·°С); известково-песчаного раствора – $\lambda_{из} = 0,70$ Вт/(м·°С); цементно-песчаного раствора – $\lambda_{ц} = 0,76$ Вт/(м·°С).

Решение

Определяем сопротивление теплопередаче стены.

Однородность материала стены нарушена как в параллельном, так и в перпендикулярном тепловому потоку направлениях; следовательно, расчет необходимо произвести как для неоднородной конструкции с регулярной структурой по методике, изложенной в СНиП II-3-79* [1].

Сопротивление теплопередаче стены определяем как

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{в}} + R_{к}^{np} + \frac{1}{\alpha_{н}}.$$

Чтобы определить приведенное термическое сопротивление $R_{к}^{np}$ конструкции стены вначале необходимо произвести по формулам (6) и (5) СНиП II-3-79* [1] расчет сопротивления R_a и R_b . Для этого выполним следующие операции.

1 Принимаем в качестве расчетной площади на поверхности стены семь рядов кладки длиной 1 м, т.е. $F_{расч} = 0,525 \cdot 1 = 0,525$ м². Это обусловлено тем, что структура стены не меняется по длине, а по вертикали повторяется через семь рядов.

2 Разрезаем конструкцию плоскостями, параллельными направлению теплового потока, на два участка и по формуле (34) определяем R_a :

$$R_a = \frac{F_1 + F_2}{\frac{F_1}{R_1} + \frac{F_2}{R_2}} = \frac{0,14 + 0,385}{\frac{0,14}{0,77} + \frac{0,385}{3,385}} = 1,78 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт},$$

где $F_1 = 1 \cdot 0,14 = 0,14$ м²; $F_2 = 1 \cdot 0,385 = 0,385$ м² – площади 1 м длины первого и второго участков; R_1 и R_2 – термические сопротивления первого и второго участков,

$$R_1 = \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + \frac{\delta_{к}}{\lambda_{к}} + \frac{\delta_{ц}}{\lambda_{ц}} = \frac{0,15}{0,70} + \frac{0,51}{0,70} + \frac{0,015}{0,76} = 0,77 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт};$$

$$R_2 = \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} + 2 \frac{\delta_{к}}{\lambda_{к}} + \frac{\delta_{ц}}{\lambda_{ц}} + \frac{\delta_{п}}{\lambda_{п}} = \frac{0,015}{0,70} + 2 \frac{0,12}{0,70} + \frac{0,015}{0,76} + \frac{0,27}{0,09} = 3,385 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт}.$$

3 Для определения R_b разрезаем конструкцию плоскостями, перпендикулярными направлению теплового потока в соответствии с ее структурой, на пять слоев. По формуле (31) определяем термическое сопротивление первого, второго, четвертого и пятого однородных слоев:

$$R_1 = \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} = \frac{0,015}{0,70} = 0,021 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт},$$

$$R_2 = R_4 = \frac{\delta_{к}}{\lambda_{к}} = \frac{0,12}{0,70} = 0,17 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт},$$

$$R_5 = \frac{\delta_{ц}}{\lambda_{ц}} = \frac{0,015}{0,76} = 0,019 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Сопротивление третьего неоднородного слоя определяется по [2, формула (6)] как

$$R_3 = \frac{F_1 + F_2}{\frac{F_1}{R_3'} + \frac{F_2}{R_3''}} = \frac{0,14 + 0,385}{\frac{0,14}{0,39} + \frac{0,385}{3,00}} = 1,07 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт},$$

где $R_3' = 2 \frac{\delta_{к}}{\lambda_{к}} = \frac{0,27}{0,70} = 0,39 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ – термическое сопротивление части третьего слоя, состоящей из кирпичной

кладки;

кладки;

$$R_3'' = \frac{\delta_{п}}{\lambda_{п}} = \frac{0,27}{0,09} =$$

$= 3,00 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ термическое сопротивление части третьего слоя, состоящей из вермикулитобетона.

Окончательно термическое сопротивление R_6 будет равно

$$R_6 = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 = 1,021 + 0,17 + 1,07 + 0,17 + 0,019 = 1,45 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

4 Так как величина $R_a = 1,78 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ превышает величину $R_6 = 1,45 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ на 23 %, что меньше 25 %, расчет приведенного термического сопротивления можно выполнять по формуле (35)

$$R_{к}^{пр} = \frac{R_a + 2R_6}{3} = \frac{1,78 + 2 \cdot 1,45}{3} = 1,56 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Приведенное сопротивление теплопередаче стены по формуле (36)

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{в}} + \frac{1}{\alpha_{п}} + R_{к}^{пр} = \frac{1}{8,7} + \frac{1}{23} + 1,56 = 1,72 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Определяем требуемое сопротивление теплопередаче стены. Так как здание жилое и режим помещений сухой, требуемое сопротивление устанавливается из условия энергосбережения по [1, табл. 1б*]. При градусо-сутках отопительного периода, равных ГСОП = $(t_{в} - t_{оп})z_{оп} = (18 - 2,0) \cdot 149 = 2384 \text{ °C} \cdot \text{сут.}$, по [1, табл. 1б*] оно равно $R_{02}^{тр} = 2,23 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$.

Данная конструкция стены не может применяться при строительстве дома, так как не отвечает требованиям энергосбережения

$$R_0 = 1,72 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт} < R_{02}^{тр} = 2,23 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

По изложенной в примере 5 методике можно производить расчет неоднородных конструкций, выполненных в виде панелей. Расчет в данном случае может производиться для площади стены, равной площади панели. Теплотехнический расчет такой панели приведен в примере 6.

Пример 6. Запроектировать стену одноэтажного производственного здания ремонтного предприятия из панелей на деревянном каркасе с асбестоцементными обшивками толщиной по 10 мм и утеплителем из пенополистирола $\gamma = 400 \text{ кг/м}^3$ (рис. 8).

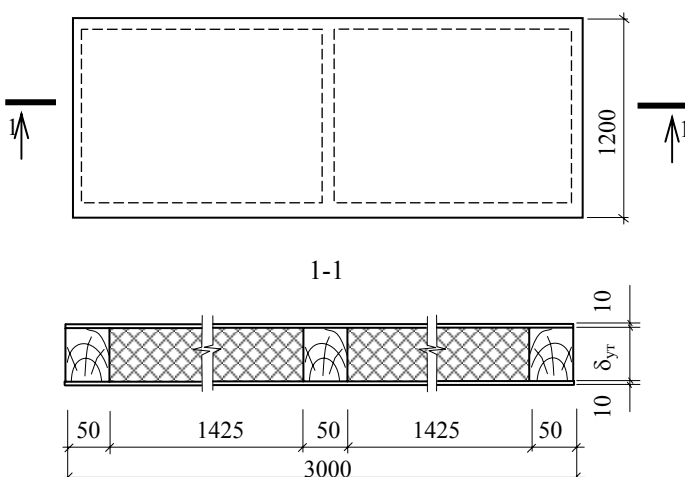


Рис. 8 Схема панели

Исходные данные:

- 1) район строительства – г. Таганрог;
- 2) параметры внутренней среды: температура воздуха $t_{в} = 18$ °С относительная влажность внутреннего воздуха $\phi_{в} = 60$ %; температурно-влажностный режим помещения согласно [1, табл. 1] – нормальный;
- 3) климатические данные района строительства: средняя температура и продолжительность отопительного периода $t_{оп} = -0,4$ °С, $z_{оп} = 167$ сут. [2, табл. 1, гр. 11 и 12];
- 4) зона влажности района строительства – сухая [1, прил. 1*], условия эксплуатации ограждающих конструкций – А. [1, прил. 2];
- 5) теплотехнические показатели материалов по [1, прил. 3*]: для пенополистирола $\gamma = 40$ кг/м³ – $\lambda_{ут} = 0,041$ Вт/(м·°С); для дерева (сосна) – $\lambda_{д} = 0,14$ Вт/(м·°С); для асбестоцемента $\gamma = 1800$ кг/м³ – $\lambda_{а} = 0,47$ Вт/(м·°С).

Решение

1 Определяем требуемое сопротивление теплопередаче стены $R_{0}^{тп}$. Так как режим помещения нормальный, $R_{0}^{тп}$ должно определяться по условию энергосбережения. ГСОП = $(t_{в} - t_{оп})z_{оп} = (18 - (-0,4)) \cdot 167 = 3073$ °С·сут., и соответственно, $R_{0}^{тп} = 1,61$ м²·°С/Вт.

2 Панель проектируем размерами 3×1,2 м. В соответствии с модульным рядом толщин панелей принимаем толщину утеплителя 8 см. Деревянный каркас панели представляет собой бруски сечением 0,05×0,08 м, расположенные по контуру панели и через 1,5 м по длине панели (рис. 8).

3 Панель является неоднородной многослойной конструкцией, и поэтому определяем ее приведенное термическое сопротивление в соответствии с [1, п. 2.8]:

а) по формуле (34) рассчитываем термическое сопротивление

$$R_a = \frac{F_1 + F_2}{\frac{F_1}{R_1} + \frac{F_2}{R_2}} = \frac{3,135 + 0,465}{\frac{3,135}{1,99} + \frac{0,465}{0,61}} = 1,54 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт},$$

где $F_2 = 0,05 \cdot (3 \cdot 2 + 1,1 \cdot 3) = 0,465$ м² – площадь участков панели, занятая деревом каркаса; $F_1 = 3,6 - F_2 = 3,6 - 0,465 = 3,135$ м² – площадь участков панели, занятая утеплителем; R_1 и R_2 – термические сопротивления участков панели с утеплителем и занятых каркасом:

$$R_1 = 2 \frac{\delta_a}{\lambda_a} + \frac{\delta_{ут}}{\lambda_{ут}} = 2 \frac{0,01}{0,47} + \frac{0,08}{0,041} = 1,99 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт};$$

$$R_2 = 2 \frac{\delta_a}{\lambda_a} + \frac{\delta_d}{\lambda_d} = 2 \frac{0,01}{0,47} + \frac{0,08}{0,14} = 0,61 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт};$$

б) рассчитываем термическое сопротивление R_b , для чего определяем термические сопротивления:

– для двух однородных асбестоцементных слоев по формуле (31):

$$R_{одн} = 2 \frac{\delta_a}{\lambda_a} = 2 \frac{0,01}{0,47} = 0,043 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт},$$

– для неоднородного слоя по формуле (34):

$$R_{неодн} = \frac{F_1 + F_2}{\frac{F_1}{R_1} + \frac{F_2}{R_2}} = \frac{3,135 + 0,465}{\frac{3,135}{1,95} + \frac{0,465}{0,57}} = 1,49 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

где R_1 , R_2 – термические сопротивления утеплителя и каркаса панели:

$$R_1 = \frac{\delta_{ут}}{\lambda_{ут}} = \frac{0,08}{0,041} = 1,95 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт},$$

$$R_2 = \frac{\delta_d}{\lambda_d} = \frac{0,08}{0,14} = 0,57 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт},$$

Величину R_b вычисляем по формуле

$$R_b = R_{одн} + R_{неодн} = 0,043 + 1,49 = 1,52 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Окончательно по формуле (15) определяем приведенное термическое сопротивление конструкции:

$$R_k^{тп} = \frac{R_a + 2R_b}{3} = \frac{2,65 + 2 \cdot 1,52}{3} = 2,643 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Величина R_a превышает величину R_b на 1,3 %. В таком случае приведенное термическое сопротивление конструкции определяем по формуле (35):

$$R_k^{np} = \frac{R_a + 2R_6}{3} = \frac{1,54 + 2 \cdot 1,52}{3} = 1,53 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт.}$$

По формуле (36) определяем приведенное сопротивление теплопередаче панели:

$$R_o = \frac{1}{\alpha_v} + \frac{1}{\alpha_n} + R_k^{np} = \frac{1}{8,7} + \frac{1}{23} + 1,53 = 1,69 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт.}$$

4 Данная панель удовлетворяет теплотехническим требованиям, так как ее приведенное сопротивление теплопередаче больше требуемого:

$$R_o = 1,69 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт} < R_{o2}^{tp} = 1,61 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт.}$$

Расчеты трехслойных панелей стен крупнопанельных зданий

В связи с резким повышением требуемого сопротивления теплопередаче стен основными конструкциями наружных стен крупнопанельных зданий, обеспечивающими необходимые теплозащитные качества, являются в настоящее время трехслойные панели. В крупнопанельных жилых зданиях применяются в основном трехслойные бетонные панели, наружный и внутренний слой которых состоит из тяжелого или легкого конструктивного бетона, между которыми заключен эффективный утепляющий слой из минераловатных плит, пенопласта и других высокоэффективных теплоизоляционных материалов. Отделочные слои применяются также как и в однослойных панелях. Связи между внутренними и наружными слоями в панелях могут быть гибкими из металлических элементов или жесткими в виде керамзитобетонных или железобетонных ребер и шпонок.

Температурное поле в таких конструкциях из-за наличия связей между внутренним и наружным слоями неоднородное и, следовательно, фактическое сопротивление теплопередаче оценивается приведенным сопротивлением, определяемым в инженерных расчетах по формуле (40).

Примеры оценки и расчета теплозащитных качеств трехслойных панелей приведены ниже.

Более точное определение величины приведенного сопротивления можно выполнять на основе расчета температурного поля панели или расчетом, аналогичным приведенному в примере 6.

Пример 7. Имеется трехслойная стеновая панель с наружными слоями из керамзитобетона на керамзитовом песке плотностью $\gamma = 1400 \text{ кг/м}^3$ и средним слоем из полистирольного пенопласта $\gamma = 40 \text{ кг/м}^3$. Наружный и внутренний слои панели соединены по контуру панели и оконного проема армированными керамзитобетонными ребрами. Площадь панели (без учета площади окна) $F_1 = 10,35 \text{ м}^2$, площадь ребер $F_2 = 0,83 \text{ м}^2$. Панель имеет внутренний отделочный и наружный защитно-декоративный слои из цементно-песчаного раствора толщиной по 2 см. Общая толщина панели равна 35 см, среднего утепляющего слоя – 15 см.

Определить, может ли применяться данная панель при строительстве девятиэтажного жилого дома в г. Ростов-на-Дону.

Исходные данные:

- 1) параметры внутреннего воздуха: температура $t_v = 18 \text{ °C}$ относительная влажность $\phi_v = 55 \%$;
- 2) режим помещения согласно [1, табл. 1] – нормальный. Зона влажности района строительства – сухая [1, прил. 1*]. Условия эксплуатации ограждающих конструкций – А [1, прил. 2];
- 3) климатические данные района строительства: средняя температура и продолжительность отопительного периода $t_{оп} = -0,6 \text{ °C}$, $z_{оп} = 171 \text{ сут.}$ [2, табл. 1].

Решение

1 Определяем требуемое сопротивление теплопередаче стены. Так как режим помещения нормальный, R_o^{tp} должно определяться по условию энергосбережения. Величину R_{o2}^{tp} принимаем по [1, табл. 16*]. Так

$$\text{как} \quad \text{ГСОП} = (t_v - t_{оп})z_{оп} = (18 - (-0,6)) \cdot 171 = 3180 \quad \text{°C} \cdot \text{сут.}, \quad R_{o2}^{tp} = 2,51 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт.}$$

2 Рассчитываем условное сопротивление теплопередаче панели без учета теплопроводных включений

$$R_o^{усл} = \frac{1}{\alpha_v} + 2 \frac{\delta_p}{\lambda_p} + 2 \frac{\delta_k}{\lambda_k} + \frac{\delta_{п1}}{\lambda_{п1}} + \frac{1}{\alpha_n} = \frac{1}{8,7} + 2 \frac{0,02}{0,76} + 2 \frac{0,08}{0,56} + \frac{0,15}{0,041} + \frac{1}{23} =$$

$$= 4,16 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт},$$

где $\lambda_p = 0,76 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$; $\lambda_k = 0,041 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ – коэффициенты теплопроводности соответственно цементно-песчаного раствора, керамзитобетона и пенополистирола [1, прил. 3*].

Коэффициент теплотехнической однородности определяем как $r = r_1 r_2$ [1, прил. 13*]. При $F_1 / F_2 = 0,83 / 10,35 = 0,08$ $r_1 = 0,70$ [1, прил. 13*, табл. 2]. Тогда $r = r_1 r_2 = 0,70 \cdot 0,9 = 0,63$. В соответствии с [1] коэффициент теплотехнической однородности должен быть не менее значений [1, табл. 6а*]. В данном случае $r = 0,63 > 0,60$. В противном случае, при $r < 0,60$ следовало бы изменить конструкцию панели, например, изменить ширину ребер.

Приведенное сопротивление теплопередаче панели равно

$$R_o = R_o^{ycl} r = 4,16 \cdot 0,63 = 2,62 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}.$$

Данная стеновая панель обладает достаточными теплозащитными свойствами для первого этапа применения норма, так как

$$R_{np} = 2,62 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт} < R_{o2}^{tp} = 2,51 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}.$$

Подбор конструкции окон по условиям теплозащиты

Высокая доля окон в общей площади фасадов большинства зданий (20...30 %) при их низких по сравнению с глухими участками стен теплозащитными качествами приводит к значительным теплопотерям через светопрозрачные элементы среди общих теплопотерь здания. В этой связи при проектировании должны приниматься оконные заполнения с высокими теплозащитными качествами. При невозможности обеспечения этих качеств площадь окон должна быть уменьшена до минимально возможной по условиям освещенности. В соответствии с последним, как было указано в п. 3.12 в гражданских зданиях площадь окон с приведенным сопротивлением теплопередаче меньше $0,56 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ должна быть по отношению к суммарной площади светопрозрачных и непрозрачных ограждающих конструкций стен не более 18 % [1].

Получить окна с более высоким приведенным сопротивлением теплопередаче можно путем применения оконных заполнений с тройным остеклением, а также заполнений из двух- и трехслойных стеклопакетов со стеклами, имеющими специальные покрытия. В ряде случаев могут приниматься конструкции стеклопакетов с заполнением межстекольного пространства аргоном.

Пример 8. Подобрать конструкцию окна жилого дома при следующих исходных данных:

- 1) район строительства – г. Тамбов;
- 2) площадь окон здания – 620 м^2 , суммарная площадь светопрозрачных и непрозрачных ограждающих конструкций стен – 3580 м^2 ;
- 3) расчетная температура внутреннего воздуха $t_b = 18 \text{ °C}$;
- 4) климатические данные района строительства [5]: средняя температура $t_{оп} = -3,7 \text{ °C}$ и средняя продолжительность отопительного периода $z_{оп} = 201$ сут.

Решение

1 Определяем требуемое приведенное сопротивление теплопередаче окон. Из условий энергосбережения, R_{o2}^{tp} определяется по [1, табл. 1б*]. При ГСОП = $(t_b - t_{оп})z_{оп} = (18 - (-3,7)) \cdot 201 = 4362 \text{ °C} \cdot \text{сут.}$, $R_{o2}^{tp} = 0,41 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

Отношение площади окон к суммарной площади стен равно $620 \times 100 / 3580 = 17,3 \% < 18 \%$, следовательно, фактическое приведенное сопротивление теплопередаче должно быть не менее $0,41 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

В соответствии с требованием $R_o \geq R_{o2}^{tp}$ выбираем по [1, прил. 6*] конструкцию оконного заполнения: двойное остекление в деревянных или пластмассовых отдельных переплетах с $R_o = 0,42 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт} > R_{o2}^{tp} = 0,41 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

2 Проверяем соответствие выбранного оконного заполнения требованиям теплозащиты и санитарно-гигиеническим условиям. Для этого, учитывая, что разность температуры внутреннего воздуха и средней температуры наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 в Тамбове составляет $(18...-28) = 46 \text{ °C}$, по [1, табл. 9*] находим $R_{o1}^{tp} = 0,42 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

Следовательно, принятое оконное заполнение удовлетворяет санитарно-гигиеническим условиям $R_o = 0,42 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт} = R_{o1}^{tp} = 0,42 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

Следует иметь в виду, что если площадь окон будет составлять более 18 % общей площади фасадов здания, то окна должны иметь сопротивление теплопередаче не менее $R_{02}^{тп} = 0,56 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ [1, п. 2.17*]. В этом случае, согласно [1, прил. 6*] требуемое сопротивление обеспечится при устройстве окон с заполнением трехслойными стеклопакетами в деревянных или пластмассовых переплетах с мягким селективным покрытием среднего стекла: $R_0^{\phi} = 0,56 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт} > R_{02}^{тп} = 0,56 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

Пример 9. Подобрать конструкцию окна промышленного здания при следующих исходных данных:

- 1) район строительства – г. Тамбов;
- 2) срок строительства – до 2000 года;
- 3) расчетная температура внутреннего воздуха $t_{в} = 15^{\circ}\text{C}$, относительная влажность $\varphi_{в} = 55\%$, режим помещения – нормальный [1, табл. 1];
- 4) климатические данные района строительства [2]: средняя температура $t_{оп} = -3,7^{\circ}\text{C}$ и средняя продолжительность отопительного периода $z_{оп} = 201$ сут.

Решение

1 Требуемое приведенное сопротивление теплопередаче окон по условию энергосбережения при градусо-сутках отопительного периода ГСОП $= (t_{в} - t_{оп})z_{оп} = (15 - (-3,7)) \cdot 201 = 4362 \text{ °C} \cdot \text{сут.}$ по [1, табл. 16*] равно $R_{02}^{тп} = 0,25 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

В соответствии с требованием $R_0 > R_{02}^{тп}$ выбираем по [1, прил. 6*] двухслойные стеклопакеты в металлических переплетах с $R_0^{\phi} = 0,31 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

2 Проверяем соответствие выбранного оконного заполнения требованиям теплозащиты и санитарно-гигиеническим условиям. По [1, табл. 9*] при разности температур $(t_{в} - t_{н5}) = (15 - (-28)) = 43^{\circ}\text{C}$ имеем $R_{01}^{тп} = 0,31 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

Следовательно, конструкция окна удовлетворяет условиям $R_0^{\phi} = 0,31 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт} = R_{01}^{тп} = 0,31 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

3.1.4 Теплотехнические расчеты совмещенных покрытий и крыш с холодным и теплым чердаками

Теплотехнический расчет совмещенных покрытий и чердачных перекрытий с холодным чердаком осуществляется как для многослойных конструкций с однородными слоями (см. примеры 2 и 3). При этом неоднородная конструкция железобетонной панели покрытия толщиной 220 мм с круглыми пустотами может условно заменяться однородной плитой такой же толщины с приведенным коэффициентом теплопроводности $\lambda = 1,41 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ при условиях эксплуатации А и $\lambda = 1,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ – при условиях – Б. Слои ограждения выше воздушной прослойки в совмещенных вентилируемых покрытиях в расчетах не учитываются.

Более сложно рассчитываются **крыши с теплым чердаком** [6].

Требуемое сопротивление теплопередаче конструкции чердачного покрытия (конструкции между чердаком и наружным воздухом) в этом случае принимается максимальным из трех значений, определяемых:

- по санитарно-гигиеническим условиям $R_{01}^{тп}$

$$R_{01}^{тп} = \frac{(t_{ч} - t_{н})R_{пер}}{\left[q_{в} n_1 (t_{вен} - t_{ч}) - F_{ст}^{тп} (t_{ч} - t_{н}) / R_{ст} \right] R_{пер} + (t_{в} - t_{ч}) n_1}, \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}, \quad (44)$$

при температуре воздуха чердака, вычисляемой по формуле

$$t_{ч} = t_{в} - \Delta t^H \alpha_{в} R_{пер}; \quad (45)$$

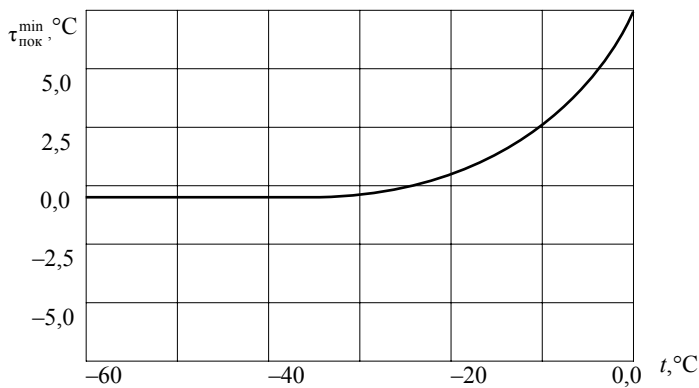
- по условию энергосбережения $R_{02}^{тп}$ рассчитывается по формуле при температуре воздуха чердака

$$t_{ч} = t_{в} - (t_{в} - t_{н}) R_{пер} / R_{эк}; \quad (46)$$

- из условия обеспечения невыпадения конденсата на внутренних поверхностях ограждения чердака $R_{01}^{тп}$

$$R_{03}^{TP} = \frac{R_{пер} [(\tau_{пок}^{min} - t_H) \alpha_B^{пок} + q_B n_1 (t_{вен} - t_H)] + (t_B - t_H) n_1}{\alpha_B^{пок} \left\{ R_{пер} [q_B n_1 (t_{вен} - \tau_{пок}^{min}) - F_{ст}^{np} (\tau_{пок}^{min} - t_H) / R_{ст}] + n_1 (t_B - \tau_{пок}^{min}) \right\}}, \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}. \quad (47)$$

В формулах (44) – (47) приняты обозначения: $R_{ЭК}$ – требуемое сопротивление теплопередаче покрытия из условия энергосбережения по [1, табл. 1б*]; q_B – удельные теплопоступления в чердак с воздухом вентиляции (табл. 3); $F_{ст}$, $F_{пот}$ – площадь стен и потолка чердака в пределах жилой секции; $R_{ст}$, $R_{пер}$, $R_{пот}$ – сопротивления теплопередаче наружной стены чердака, чердачного перекрытия и покрытия; $t_{вен}$ – температура воздуха, поступающего в чердак из вентиляционных каналов $t_{вен} = t_B + 1$; $\alpha_B^{пок}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности потолка [1, табл. 4*]; $F_{ст}^{np} = F_{ст} / F_{пот}$ – приведенная площадь стен чердака; $\tau_{пок}^{min}$ – минимальная температура внутренней поверхности стен чердака (рис. 9); $\alpha_{пок}^{min}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности покрытия (табл.4); t_H – расчетная зимняя температура наружного воздуха. Для зданий до 12 этажей t_H равна температуре наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92, при количестве этажей 12 и более t_H допускается принимать равной средней температуре отопительного периода. Коэффициент $n_1 = 1,1$ учитывает увеличение теплопоступлений в чердак от труб систем отопления и горячего водоснабжения. При отсутствии этих труб на чердаке $n_1 = 1$.



. 9

ная температура внутренней поверхности стен чердака (рис. 9); $\alpha_{пок}^{min}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности покрытия (табл.4); t_H – расчетная зимняя температура наружного воздуха. Для зданий до 12 этажей t_H равна температуре наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92, при количестве этажей 12 и более t_H допускается принимать равной средней температуре отопительного периода. Коэффициент $n_1 = 1,1$ учитывает увеличение теплопоступлений в чердак от труб систем отопления и горячего водоснабжения. При отсутствии этих труб на чердаке $n_1 = 1$.

3 Удельные теплопоступления q_B в чердак с воздухом вентиляции [6, табл. 13]

Этажность здания	Значения q_B Вт/(м ² ·°C), в чердак из кухонь	
	газифицированных	электрофицированных
1	2	3
5	3,4	2,7
9	5,5	4,3
12	7,1	5,6
16	9,2	7,2

4 Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности покрытия чердака [6, табл. 12]

Внутренняя поверхность покрытия	Значения $\alpha_{\text{пок}}^{\text{min}}$, Вт/(м ² ·°С), при этажности здания			
	5	9	12	16
Плоская	8,5	9,5	10,5	11,5
Ребристая	8,0	8,5	9,5	10,5
С перегородками или при устройстве водосточного лотка	7,0	7,5	8,5	9,5

Пример 10. Рассчитать толщину утеплителя теплого чердака жилого девятиэтажного дома.

Исходные данные:

Место строительства – Нижний Новгород; время строительства – до 2000 г.; температура внутреннего воздуха $t_{\text{в}} = 18$ °С; относительная влажность внутреннего воздуха $\phi_{\text{в}} = 55$ %; площадь потолка $F_{\text{пот}} = 200$ м²; площадь стен чердака в пределах секций $F_{\text{ст}} = 80$ м²; температура наиболее холодной пятидневки $t_{\text{н}} = 30,0$ °С, средняя температура $t_{\text{оп}} = -4,1$ °С и продолжительность $z_{\text{оп}} = 171$ сут. отопительного периода [1]; зона влажности района строительства [2] – нормальная. Условия эксплуатации ограждающих конструкций [1] – Б.

Схема к расчету дана на рис. 10.

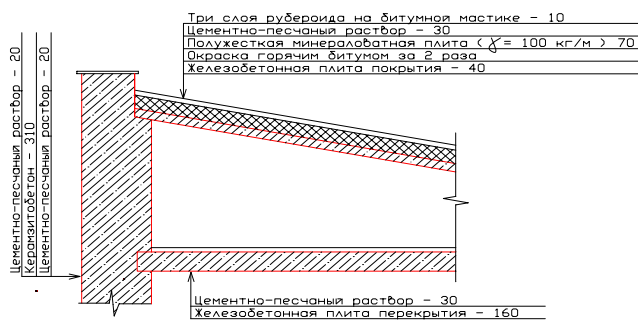


Рис. 10 Расчетная схема

Наименование слоев ограждений и их теплотехнические характеристики приведены в табл. 5 – 7. В табл. 5 приняты обозначения: δ – толщина слоя, м; γ – плотность, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С).

Решение

1 Определяем требуемое сопротивление теплопередаче чердачного перекрытия (табл. 5).

$$R_{\text{пор}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,16}{2,04} + \frac{0,03}{0,93} + \frac{1}{12} = 0,309 \text{ м}^2 \cdot \text{°С/Вт},$$

где $\alpha_{\text{в}} = 8,7$ Вт/(м²·°С) – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности перекрытия [1, табл. 4*]; $\alpha_{\text{н}} = 12$ Вт/(м²·°С) – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности перекрытия [1, табл. 6*].

5 Теплотехнические параметры чердачного перекрытия

Наименование слоев	δ	γ	λ
Железобетон	0,160	2500	2,039
Цементно-песчаный раствор	0,03	1800	0,930

6 Теплотехнические параметры стены чердака

Наименование слоев	δ	γ	λ
Цементно-песчаный раствор	0,020	1800	0,930
Керамзитобетон на керамзитовом песке и керамзитопенобетон	0,310	1200	0,520
Цементно-песчаный раствор	0,020	1800	0,930

7 Теплотехнические параметры покрытия

Наименование слоев	δ	γ	λ
Железобетон	0,040	2500	2,039
Окраска горячим битумом за два раза	0,004	1200	0,220
Полужесткая минераловатная плита		100	0,07
Цементно-песчаный раствор	0,030	1800	0,930
Рубероид	0,01	600	0,170

2 Рассчитываем сопротивление теплопередаче стены чердака (табл. 6)

$$R_{ст} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,93} + \frac{0,31}{0,52} + \frac{0,02}{0,93} + \frac{1}{23} = 0,798 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт},$$

где $\alpha_n = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждения [1, табл. 6*].

3 По формуле (44) определяем требуемое сопротивление теплопередаче

$$R_{01}^{тп} = \frac{(t_{ч} - t_{н})R_{пер}}{\left[q_{в} n_1 (t_{вент} - t_{ч}) - F_{ст}^{тп} (t_{ч} - t_{н}) / R_{ст} \right] R_{пер} + (t_{в} - t_{ч}) n_1} =$$

$$= \frac{(9,9 + 30,0) \cdot 0,309}{\left[5,5 \cdot 1,1(19 - 9,9) - 0,40(9,9 + 30,0) / 0,798 \right] 0,309 + (18 - 9,9) 1,1} =$$

$$= 0,625 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт},$$

где $t_{ч} = t_{в} - \Delta t^H \alpha_n R_{пер} = 18 - 3 \cdot 8,7 \cdot 0,309 = 9,9 \text{ °C}$; $\Delta t^H = 3,0 \text{ °C}$ – нормируемый температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и поверхностью чердачного перекрытия по [1, табл. 2*]; $q_{в} = 5,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ – удельные теплоступления в чердак по табл. 3; $n_1 = 1,1$ – при наличии теплоступлений в чердачное пространство; $F_{ст}^{тп} = F_{ст} / F_{пот} = 80 / 200 = 0,40$ – отношение площади стен и потолка в пределах секции.

4 По формуле (44) определяем требуемое сопротивление теплопередаче $R_{02}^{тп}$:

$$R_{02}^{тп} = \frac{(t_{ч} - t_{н})R_{пер}}{\left[q_{в} n_1 (t_{вент} - t_{ч}) - F_{ст}^{тп} (t_{ч} - t_{н}) / R_{ст} \right] R_{пер} + (t_{в} - t_{ч}) n_1} =$$

$$= \frac{(9,9 + 30,0) \cdot 0,309}{\left[5,5 \cdot 1,1(19 - 12,7) - 0,40(12,7 + 30,0) / 0,798 \right] 0,309 + (18 - 12,7) 1,1} =$$

$$= 1,25 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт},$$

где $t_{ч} = t_{в} - (t_{в} - t_{н}) R_{пер} / R_{эк} = 18 - (18 + 30) 0,309 / 4,07 = 14,4 \text{ °C}$;

5 $R_{эк} = 4,07 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ – требуемое сопротивление теплопередаче покрытия по [1, табл. 1б*] при градусо-сутках отопительного периода ГСОП = $(t_{в} - t_{оп}) z_{оп} = (18 - (-4,1)) \cdot 215 = 4752 \text{ °C} \cdot \text{сут}$.

6 Определяем по формуле (47) требуемое сопротивление теплопередаче $R_{03}^{тп}$:

$$R_{03}^{тп} = \frac{R_{пер} \left[(\tau_{пок}^{\min} - t_{н}) \alpha_{в}^{\text{пок}} + q_{в} n_1 (t_{вент} - t_{н}) \right] + (t_{в} - t_{н}) n_1}{\alpha_{в}^{\text{пок}} \left\{ R_{пер} \left[q_{в} n_1 (t_{вент} - \tau_{пок}^{\min}) - F_{ст}^{тп} (\tau_{пок}^{\min} - t_{н}) / R_{ст} \right] + n_1 (t_{в} - \tau_{пок}^{\min}) \right\}}$$

$$= \frac{0,309 \left[(-0,5 + 30,0) 9,5 + 5,5 \cdot 1,1(19 + 30,0) \right] + (18 + 30,0) 1,1}{9,5 \left\{ 0,31 \left[5,5 \cdot 1,1(19 + 0,5) - 0,4(-0,5 + 30,0) / 0,798 \right] + 1,1(18 + 0,5) \right\}} = 0,466 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}.$$

Из сравнения полученных значений $R_{01}^{тп}$, $R_{02}^{тп}$, $R_{03}^{тп}$ видно, что $R_{03}^{тп} = R_{02}^{тп} = 1,25 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

7 Определяем конструкцию теплоизоляции покрытия. В качестве утеплителя принимаются полужесткие минераловатные плиты на синтетическом связующем ($\gamma = 100 \text{ кг/м}^3$) с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,07 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ [1, прил. 3*]. Требуемую толщину плит определяем из равенства $R_{\text{пок}} = R_0^{\text{тп}}$:

$$R_{\text{пок}} = \frac{1}{9,5} + \frac{0,04}{2,04} + \frac{0,004}{0,22} + \frac{\delta_{\text{плт}}}{0,07} + \frac{0,03}{0,93} + \frac{0,01}{0,17} + \frac{1}{23} = R_{\text{тп}} = 1,2 \text{ м}^2\cdot\text{°C/Вт},$$

где $\alpha_{\text{в}}^{\text{пок}} = 9,5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности покрытия чердака по табл. 4, откуда имеем $\delta_{\text{плт}} = 0,922 \cdot 0,07 = 0,064 \text{ м}$. Принимаем толщину плит равной 7 см.

3.1.5 Оценка распределения температур в ограждениях

При проектировании конструкции ограждения необходимо знать не только величину его сопротивления теплопередаче, но и температуры в любой плоскости ограждения при заданных значениях температур воздуха с одной и с другой стороны ограждения. Эти сведения дают возможность определить условия конденсации влаги в толще конструкции и правильно назначить место расположения пароизоляционных слоев. Особое значение для теплотехнической оценки ограждения имеет величина температур на его внутренней поверхности, так как по ней оценивается возможность образования конденсата на ограждении. Виды графиков распределения температур в однослойной и многослойной ограждающих конструкциях приведены на рис. 3.

Расчет температуры в любой плоскости ограждения выполняется по формуле

$$\tau_x = t_{\text{в}} - \frac{(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})}{R_0} \left(\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \sum R_x \right), \quad (48)$$

где $\sum R_x$ – сумма термических сопротивлений части конструкции от внутренней поверхности ограждения до рассматриваемого сечения x .

Температура на внутренней поверхности ограждения определяется как

$$\tau_x = t_{\text{в}} - \frac{(t_{\text{в}} - t_{\text{н}})n}{R_0 \alpha_{\text{в}}}. \quad (49)$$

Для оценки распределения температур в ограждении используется также графический метод, следующий из формулы (48):

$$\frac{t_{\text{в}} - \tau_x}{1/\alpha_{\text{в}} + \sum R_x} = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_0}.$$

Видно, что падение температуры при стационарном тепловом потоке прямо пропорционально изменению термического сопротивления.

Метод заключается в следующем. По горизонтальной оси, соответствующей нулевой температуре (см. рис. 11), в масштабе последовательно откладывают все термические сопротивления, начиная с $1/\alpha_{\text{в}}$ и кончая $1/\alpha_{\text{н}}$. Сумма всех отрезков дает величину сопротивления теплопередаче ограждения R_0 . Через полученные точки проводят вертикальные линии и на крайних вертикалях в масштабе отмечают отрезки, соответствующие температурам внутреннего $t_{\text{в}}$ и наружного $t_{\text{н}}$ воздуха. Точки $t_{\text{в}}$ и $t_{\text{н}}$ соединяют прямой линией. Пересечения этой прямой с вертикалями дают отрезки, выражающие величины температур в слоях ограждения.

Расчет по формулам (48) и (49) справедлив для плоских стен при направлении теплового потока перпендикулярно к поверхности стены. В этом случае изотермические линии, соединяющие точки с одинаковыми значениями температур (изотермы), располагаются параллельно поверхности ограждения. Изменение температур происходит только в направлении теплового потока и температурное поле (распределение температур в плоскости или в пространстве) ограждения является одномерным. В ограждениях, имеющих углы, выступы, проемы, теплопроводные включения, а также в неоднородных ограждениях температурные поля могут быть двух- и трехмерными (см. рис. 12). Распределение температур в этом случае опреде-

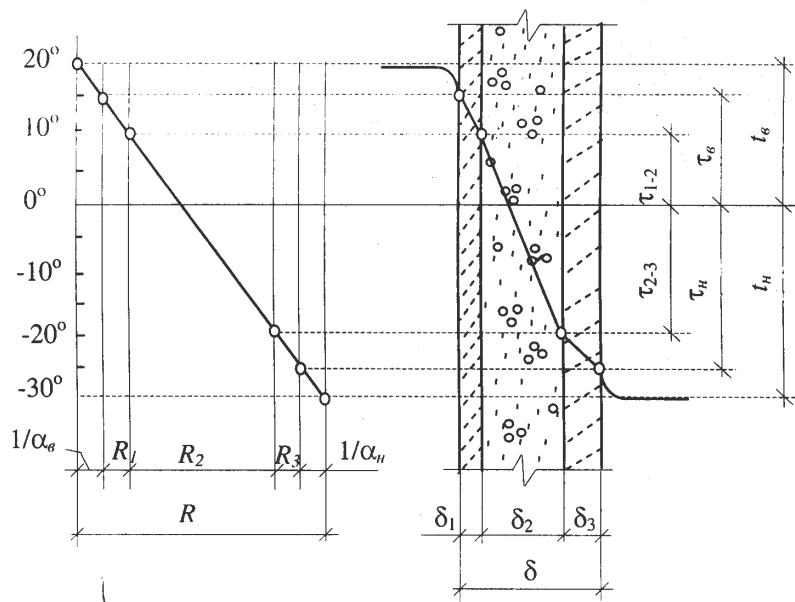


Рис. 11 Графический метод определения температуры в ограждении

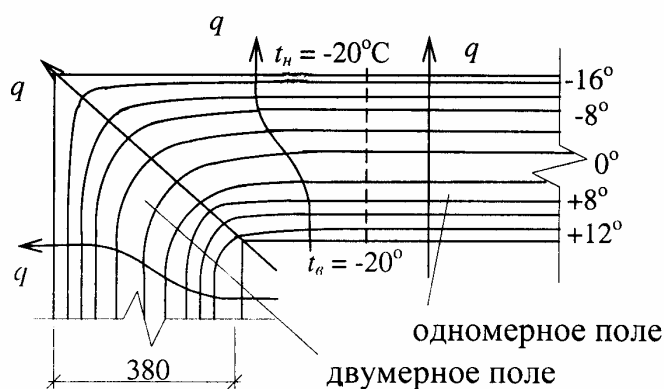


Рис. 12 Пример температурного поля стены для наружного угла

ляется на основе расчета температурных полей. Расчет производится методами конечных разностей или конечных элементов с использованием ЭВМ.

Важное значение при проектировании ограждений имеет определение температур внутренних поверхностей в местах размещения в ограждениях теплопроводных включений.

В общем случае для неоднородных ограждающих конструкций температуру внутренней поверхности по теплопроводному включению следует определять на основании расчета на ЭВМ температурного поля. Однако имеется ряд характерных теплопроводных включений, для которых возможно определять температуру поверхности, используя приближенные формулы. Схемы таких включений приведены в [1, прил. 5*] (см. также рис. 13).

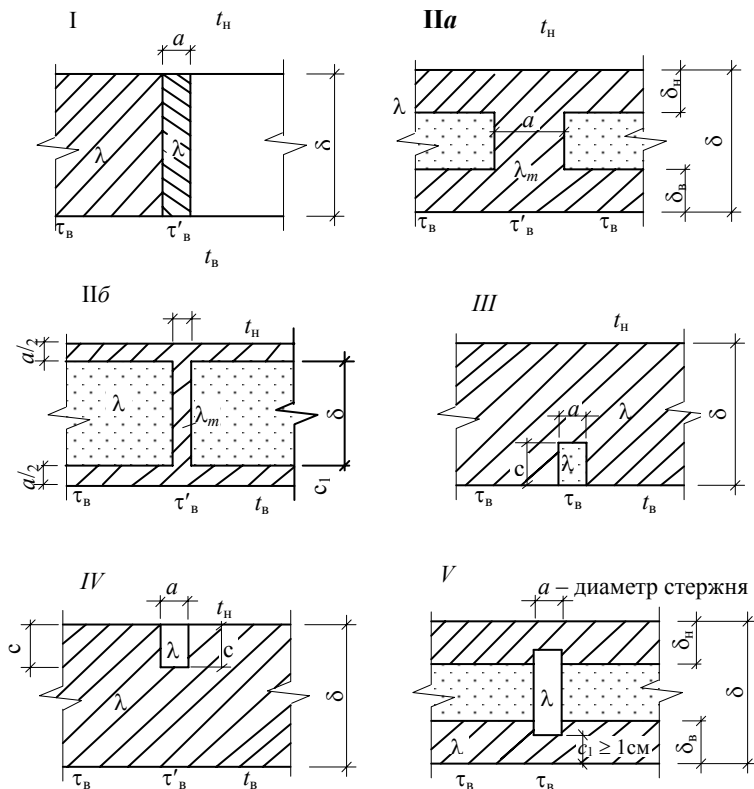


Рис. 13 Схемы теплопроводных включений в ограждающих конструкциях (согласно СНиП II-3-79* [1])

Температура внутренней поверхности ограждающей конструкции в месте теплопроводного включения (диафрагмы, сквозного шва раствора, стыка панелей, жестких связей стен облегченной кладки, элементов фахверка и др.) должны быть не ниже температуры точки росы внутреннего воздуха при расчетной зимней температуре наружного воздуха, равной средней температуре наиболее холодной пятидневки. Относительную влажность внутреннего воздуха в жилых зданиях, больничных учреждениях, школ и детских садов при расчете температуры точки росы принимают равной 55 %, в остальных общественных зданиях – 50 %.

Таблица 8

Схема теплопроводного включения в соответствии с рис. 13	Коэффициент η при a/δ							
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0
I	0,52	0,65	0,79	0,86	0,90	0,93	0,95	0,98
IIa	при $\delta_{в}/\delta_{н}$							
	0,5	0,3	0,46	0,68	0,79	0,86	0,91	0,97
	1,0	0,24	0,38	0,56	0,69	0,77	0,83	0,93
	2,0	0,19	0,31	0,48	0,59	0,67	0,73	0,85
	5,0	0,16	0,28	0,42	0,51	0,58	0,64	0,76
III	при c/δ							
	0,25	3,60	3,26	2,72	2,30	1,97	1,71	1,47
	0,50	2,34	2,26	1,97	1,76	1,62	1,48	1,31
	0,75	1,28	1,52	1,40	1,28	1,21	1,17	1,09

IV	при c/δ									
	0,25	0,16	0,28	0,45	0,57	0,66	0,74	0,87	0,95	
	0,50	0,23	0,39	0,57	0,66	0,77	0,83	0,91	0,95	
	0,75	0,29	0,47	0,67	0,78	0,84	0,88	0,93	0,95	

Таблица 9

		Коэффициент ξ при $a \cdot \lambda / \delta \cdot \lambda$								
		0,25	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0	50,0	150,0
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10
I		0,105	0,160	0,227	0,304	0,387	0,430	0,456	0,485	0,503
IIб		–	–	–	0,156	0,206	0,257	0,308	0,369	0,436
III	при c/δ									
	0,25	0,061	0,075	0,085	0,091	0,096	0,100	0,101	0,101	0,102
	0,50	0,084	0,112	0,140	0,160	0,178	0,184	0,186	0,187	0,188
	0,75	0,106	0,142	0,189	0,227	0,267	0,278	0,291	0,292	0,293

Продолжение табл. 9

		Коэффициент ξ при $a \cdot \lambda / \delta \cdot \lambda$								
		0,25	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0	50,0	150,0
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10
IV	при c/δ									
	0,25	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,005	0,005
	0,50	0,006	0,008	0,011	0,012	0,014	0,017	0,019	0,021	0,022
	0,75	0,013	0,022	0,033	0,045	0,058	0,063	0,066	0,071	0,073
V	при δ_b/δ_n									
	0,75	0,007	0,021	0,055	0,147	–	–	–	–	–
	1,00	0,006	0,017	0,047	0,127	–	–	–	–	–
	2,00	0,003	0,011	0,032	0,098	–	–	–	–	–

Примечание. Для промежуточных значений коэффициенты η и ξ определяются интерполяцией.

Температура внутренней поверхности τ'_b , °С в месте теплопроводного включения принимают на основании расчета температурного поля проектируемой ограждающей конструкции. Для некоторых теплопроводных включений, схемы которых приведены на рис. 13, можно использовать следующие формулы [1]:

- для неметаллических теплопроводных включений

$$\tau'_b = t_b - \frac{n(t_b - t_n)}{R'_o \alpha_b} \left[1 + \eta \left(\frac{R_o^{ycl}}{R'_o} - 1 \right) \right], \quad (50)$$

- для металлических теплопроводных включений

$$\tau_b = t_b - \frac{n(t_b - t_n)}{R_o^{ycl} \alpha_b} \left[1 + \xi R_o^{ycl} \alpha_b \right], \quad (51)$$

где n , t_b , t_n , α_b – то же, что и в формуле (41); R'_o и R_o^{ycl} – сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, м²·°С/Вт, соответственно, в местах теплопроводных включений, определяемые по форму-

ле ξ – коэффициенты, принимаемые по [1, табл. 7* и 8*] (см. табл. 8 и 9).

Пример 11. Определить температуру на внутренней поверхности стены, усиленной железобетонным поясом. Схема стены на участке размещения пояса приведена на рис. 14. Кирпичная кладка выполнена из глиняного обыкновенного кирпича на цементно-песчаном растворе. Стена оштукатурена цементно-песчаным раствором. Температура в помещении $t_B = 18^\circ\text{C}$, относительная влажность воздуха $\varphi_B = 60\%$. Место строительства г. Тамбов.

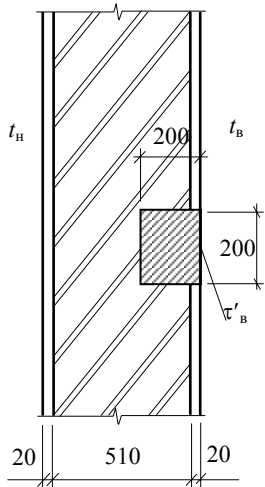


Рис. 14 Схема к расчету температуры на внутренней поверхности теплопроводного включения

Решение

1 Определяем температуру внутренней поверхности в месте теплопроводного включения.

Теплопроводное включение в виде железобетонного пояса соответствует схеме III на рис. 13. Расчет внутренней поверхности стены в этом случае можно определять по формуле (50):

$$\begin{aligned} \tau'_B &= t_B - \frac{n(t_B - t_n)}{R_0^{\text{усл}} \alpha_B} \left[1 + \eta \left(\frac{R_0^{\text{усл}}}{R'_0} - 1 \right) \right] = \\ &= 18 - \frac{1(18 - (-28))}{0,88 \cdot 8,7} \left[1 + 2,39 \left(\frac{0,88}{0,72} - 1 \right) \right] = \\ &= 8,99^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Здесь $t = 18^\circ\text{C}$ – температура внутреннего воздуха; $t_n = -28^\circ\text{C}$ – температура наиболее холодной пятидневки в г. Тамбове по [2, табл. 1]; $n = 1$ – коэффициент положения конструкции по отношению к наружному воздуху по [1, табл. 3*]; $\alpha_B = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ – коэффициент теплоотдачи внутренне поверхности по [1, табл. 4*]; $R_0^{\text{усл}}$ – сопротивление теплопередаче стены вне места теплопроводного включения, определяемое как

$$R_0^{\text{усл}} = \frac{1}{\alpha_B} + 2 \frac{\delta_{\text{шт}}}{\lambda_{\text{шт}}} + \frac{\delta_{\text{кл}}}{\lambda_{\text{кл}}} + \frac{1}{\alpha_n} = \frac{1}{8,7} + 2 \frac{0,02}{0,76} + \frac{0,51}{0,76} + \frac{1}{23} = 0,88 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт},$$

где $\alpha_n = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности перекрытия по [1, табл. 6*]; $\lambda_{\text{шт}} = 0,76 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, $\lambda_{\text{кл}} = 0,76 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, $\lambda_{\text{жб}} = 1,92 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ – коэффициенты теплопроводности, принимаемые по [1, прил. 3*] для условий эксплуатации А [1, прил. 2*], так как температурно-влажностный режим нормальный (см. [1, табл. 1]), а зона влажности г. Тамбова сухая [1, прил. 1*]; R'_0 – сопротивление теплопередаче стены в месте теплопроводного включения, определяемое как

$$\begin{aligned} R'_0 &= \frac{1}{\alpha_B} + 2 \frac{\delta_{\text{шт}}}{\lambda_{\text{шт}}} + \frac{\delta_{\text{кл}}}{\lambda_{\text{кл}}} + \frac{\delta_{\text{жб}}}{\lambda_{\text{жб}}} + \frac{1}{\alpha_n} = \\ &= \frac{1}{8,7} + 2 \frac{0,02}{0,76} + \frac{0,33}{0,76} + \frac{0,20}{1,92} + \frac{1}{23} = 0,72 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}, \end{aligned}$$

где $\eta = 2,39$ – коэффициент, определяемый по табл. 8 (см. также [1, табл. 7*]) для III схемы (рис. 13) при $a/\delta = 0,22/0,55 = 0,4$ и $c/\delta = 0,20/0,55 = 0,36$.

2 Определяем температуру внутренней поверхности вне места теплопроводного включения. Расчет производится по формуле (48)

$$\tau_B = t_d - \frac{n(t_B - t_n)}{R_0^{\text{чел}} \alpha_B} = 18 - \frac{1(18 - (-28))}{0,88 \cdot 8,7} = 12,0^\circ\text{C}.$$

Видно, что наличие железобетонного пояса снижает температуру поверхности $\tau'_B = 8,99^\circ\text{C} < \tau_B = 12,0^\circ\text{C}$.

3 Определяем возможность выпадения конденсата на поверхности ограждения в месте расположения железобетонного пояса. Для этого находим температуру точки росы при $\varphi_B = 60\%$ и $t_B = 18^\circ\text{C}$. Она определяется согласно методике, изложенной в п. 3.3.3, в следующей последовательности: по табл. П.1 находится максимальное парциальное давление пара при $\varphi_B = 50\%$ – $e_B = 2064 \cdot 60/100 = 1238 \text{ Па}$; по значению $e_B = 1238 \text{ Па}$ по табл. П.1 находится температура точки росы – $t_p = 10,10^\circ\text{C}$.

Так как $\tau'_B = 8,99 \text{ }^\circ\text{C} < t_p = 10,10 \text{ }^\circ\text{C}$, на поверхности пояса возможно выпадение конденсата. Для исключения этого необходимо утеплить пояс устройством дополнительной теплоизоляции, размещая его в кладке за поясом.

3.2 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ОГРАЖДЕНИЙ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОВОМ ПОТОКЕ

3.2.1 Общие понятия о теплоустойчивости ограждений

В реальных условиях эксплуатации температуры наружного и внутреннего воздуха не являются постоянными, как принято в разд. 3.1 пособия, а изменяются во времени. Соответственно с этим во времени изменяется и тепловой поток. Передача тепла в подобных условиях носит название нестационарной теплопередачи.

Изменения температуры могут происходить в результате смены холодных и теплых масс наружного воздуха, при периодическом отоплении зданий, под воздействием солнечной радиации летом и т.п. Периодические изменения температур воздуха вызывают изменения температуры внутренней поверхности ограждения. В зимних условиях при небольших значениях R_0 это может приводить к понижению температуры на поверхности ниже температуры точки росы и к образованию на ней конденсата, а летом – к повышению температуры внутреннего воздуха помещения. Данные обстоятельства необходимо учитывать при теплотехнических расчетах и, следовательно, в ряде случаев рассматривать процесс передачи тепла в нестационарных условиях.

В расчетах при нестационарном тепловом потоке, как правило, принимают колебания тепловых потоков и температур гармоническими, происходящими по закону синусоиды, что для большинства практических случаев близко к действительным условиям. Отношения величины амплитуды колебания теплового потока A_Q к величине амплитуды колебания температуры на внутренней поверхности ограждения A_t называется коэффициентом теплоусвоения ограждения

$$Y_B = A_Q / A_t . \quad (52)$$

Величина Y_B зависит от периода колебаний теплового потока и от теплотехнических свойств ограждений. Если ограждение имеет большую толщину и состоит из однородного материала, то теплоусвоение поверхности зависит только от свойств материала и называется коэффициентом теплоусвоения материала S . В общем случае S определяется как

$$S = 2,507 \sqrt{\frac{\lambda \gamma c}{z}} , \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C} , \quad (53)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·°C); γ – объемная плотность материала, кг/м³; c – удельная теплоемкость материала, кДж/(кг·°C); z – период колебания потока, ч.

В расчетах, выполненных по [1], принимается величина S , определяемая при периоде $z = 24$ ч с учетом условий эксплуатации ограждения А или Б [1, прил. 3*].

Изменение температур на поверхности вызывает колебание температур и в толщине ограждения. По мере удаления от поверхности амплитуды колебаний уменьшаются и происходит их запаздывание во времени по отношению к колебаниям температур на поверхности.

В качестве примера на рис. 15 сплошной волнистой линией изображено распределение температур в ограждении в момент времени, соответствующий максимальной температуре поверхности, на которой происходят колебания. Видно, что в толще ограждения образуются температурные волны. Количество волн в ограждении определяет его теплоинерционные качества. В практике теплотехнических расчетов эти качества принято оценивать величиной характеристики тепловой инерции D :

$$D = R_1 S_1 + R_2 S_2 + \dots + R_n S_n , \quad (54)$$

где R_1, R_2, \dots, R_n – термические сопротивления отдельных слоев ограждения, м²·°C/Вт, определяемые по формуле (3); S_1, S_2, \dots, S_n – расчетные коэффициенты теплоусвоения материала отдельных слоев ограждения, Вт/(м²·°C), принимаемые по [1, прил. 3*].

Характеристика тепловой инерции D , как и коэффициент теплоусвоения материала, входящий в формулу, зависит от периода колебаний.

С уменьшением периода колебаний увеличивается характеристика тепло-

вой инерции, в число волн, хаот температурные практик расчетов, значения D , = 24 ч.

Чем выше тепловая теплотехнические ка- характеристика D воз- термического

увеличения толщины материала с большим усвоения. Второй путь случае меньше расход

В зависимости от имеют различную

изменению температур на поверхности. Свойство ограждения сохранять относительное постоянство температуры внутренней поверхности при периодическом изменении проходящего через нее теплового потока называется теплоустойчивостью ограждения. Для характеристики теплоустойчивости огражде- ний О.Е. Власовым [8] введено понятие коэффициента теплоустойчивости ограждения Ψ . Величина Ψ зависит от теплотехнических свойств ограждения, системы отопления и условий ее эксплуатации:

$$\Psi = \frac{R_0}{R_B + m/Y_B}, \quad (55)$$

где R_0 и R_B – соответственно, сопротивления теплопередаче ограждения и теплоотдаче на внутренней поверхности ограждения; Y_B – коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности ограждения; m – коэффициент, учитывающий систему отопления и условия ее эксплуатации.

Из формулы (55) видно, что теплоустойчивость ограждения можно повышать за счет увеличения сопротивления теплопередаче ограждения R_0 ; увеличения коэффициента путем расположения у внут- ренней поверхности материалов, имеющих большой коэффициент теплоусвоения S , или уменьшения периода колебаний теплового потока, отдаваемого отопительным прибором.

Как показывает практика, формулу (55) можно использовать лишь для качественной оценки тепло- устойчивости ограждений [8].

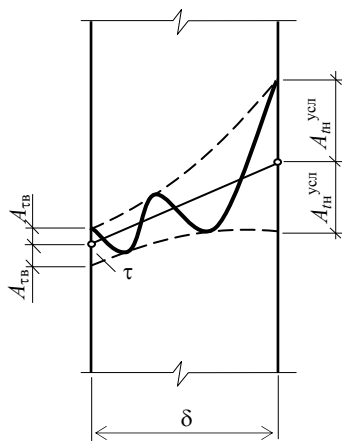


Рис. 15 Схема затухания колебаний условной (с учетом солнечной радиации) температуры наружного воздуха

ограждении располагается большее уменьшается их длина и быстрее зату- колебания в толще ограждения. В выполняемых по [1], используются определенные при периоде колебаний z

инерция ограждения, тем лучше чества ограждения. Повышать можно за счет увеличения сопротивления ограждения путем ограждения, или за счет выбора значением коэффициента тепло- более предпочтителен, так как в этом строительных материалов.

конструктивного решения ограждения способность противодействовать

Нормативные значения $A_{\text{тв}}^{\text{тп}}$ устанавливаются СНиП II-3-79* [1] для районов со среднемесячной температурой июля 21 °С и выше и конструкции стен с тепловой инерцией $D < 4$ и покрытий с $D < 5$ в жилых зданиях, а также больничных учреждений, детских садов, яслей, производственных зданий с жесткими требованиями к параметрам микроклимата.

В указанных выше случаях амплитуда колебаний температуры внутренней поверхности не должна быть более требуемой амплитуды, определяемой по формуле

$$A_{\text{тв}}^{\text{тп}} = 2,5 - 0,1(t_{\text{н}} - 21), \quad (56)$$

где $t_{\text{н}}$ – среднемесячные температуры наружного воздуха за июль, °С, принимаемая по СНиП 23-01-99 [2].

Конструкция имеет достаточную теплоустойчивость, если амплитуда $A_{\text{тв}}$ не превышает допустимую величину $A_{\text{тв}}^{\text{тп}}$. Амплитуда колебаний определяется по формуле

$$A_{\text{тв}} = A_{\text{тн}}^{\text{расч}} / \nu, \quad (57)$$

где $A_{\text{тн}}^{\text{расч}}$ и ν – расчетная амплитуда колебаний температуры наружного воздуха и величина ее затухания в ограждении

$$A_{\text{тн}}^{\text{расч}} = 0,5A_{\text{тн}} + \frac{\rho(J_{\text{max}} - J_{\text{cp}})}{\alpha_{\text{н}}}, \quad (58)$$

где $A_{\text{тн}}$ – максимальная амплитуда суточных колебаний температуры наружного воздуха в июле, принимаемая по [2]; ρ – коэффициент поглощения солнечной радиации материалом наружной поверхности ограждения, принимаемый по [1]; J_{max} , J_{cp} – максимальное и среднее значения суммарной солнечной радиации, принимаемые по [3] для наружных стен – как для вертикальных поверхностей западной ориентации и для покрытий – как для горизонтальной поверхности; $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплопередачи наружной поверхности ограждения для летних условий:

$$\alpha_{\text{н}} = 1,16(5 + 10\sqrt{\nu}), \quad (59)$$

где ν – минимальная из средних скоростей ветра по румбам за июль, повторяемость которых составляет 16 % и более, принимаемая по [5], но не менее 1 м/с.

Величина затухания ν вычисляется как

$$\nu = 0,9e^{D/\sqrt{2}} \frac{(S_1 + \alpha_{\text{в}})(S_2 + Y_1) \dots (S_n + Y_{n-1})(\alpha_{\text{н}} + Y_n)}{(S_1 + Y_1)(S_2 + Y_2) \dots (S_n + Y_n)\alpha_{\text{н}}}, \quad (60)$$

где D – тепловая инерция конструкции; S_i – расчетные коэффициенты теплоусвоения материала слоев конструкции; Y_i – коэффициенты теплоусвоения наружной поверхности слоев конструкции; $\alpha_{\text{в}}$ – то же, что в формуле (41); $\alpha_{\text{н}}$ – то же, что в формуле (59).

При определении коэффициентов Y_i одного слоя конструкции необходимо учитывать следующее. Если слой имеет $D/1$, то $Y = S$. При $D < 1$

$$Y = \frac{RS^2 + Y'}{1 + RY'},$$

где R – термическое сопротивление слоя; S – коэффициент теплоусвоения материала этого слоя; Y' – коэффициент теплоусвоения наружной поверхности предыдущего слоя;

Для первого слоя ограждения с $D < 1$ многослойного ограждения

$$Y_1 = \frac{R_1 S_1^2 + \alpha_{\text{в}}}{1 + R_1 \alpha_{\text{в}}},$$

где и R_1 и S_1 – соответственно, термическое сопротивление и коэффициент теплоусвоения материала первого слоя.

Расчет величины ν по формуле (60) требует больших затрат времени, поэтому в курсовом и дипломном проектировании при ее определении можно использовать для конструкций с $D/1,5$ формулу

$$\nu = 2^D \left(0,83 + 3,49 \frac{R_R}{D} \right) \beta_1 \beta_2, \quad (61)$$

а для конструкций с $D < 1,5$ формулу

$$\nu = R_0 \alpha_{\text{в}}; \quad (62)$$

здесь $\beta_1 = 0,85 + 0,15 S_{\text{ут}}/S_{\text{н}}$ (для однослойной конструкции $\beta_1 = 1$); $\beta_2 = 1 + 0,5 R_{\text{вп}} D/R_{\text{к}}$ (при отсутствии воздушной прослойки $\beta_2 = 1$); $S_{\text{ут}}$, $S_{\text{н}}$ – расчетные коэффициенты теплоусвоения материалов теплоизоляционного и конструктивного слоев; $R_{\text{вп}}$ и $R_{\text{к}}$ – то же, что в формуле (33); R_0 и $\alpha_{\text{в}}$ – то же, что в формуле (30).

Пример 12. Проверить для летнего времени теплоустойчивость стены жилого дома из легкого бетона ($\gamma = 1200$ кг/м³; $\lambda = 0,47$ Вт/(м·°C); $S = 6,95$ Вт/(м²·°C) толщиной 16 см в условиях г. Андижана ($t_{\text{н июля}} = 27,3$ °C)).

Решение. Определяем допустимую температуру внутренней поверхности ограждения по формуле (56):

$$A_{\text{тв}}^{\text{тп}} = 2,5 - 0,1(27,3 - 21) = 1,87, \text{ °C}.$$

Вычисляем тепловую инерцию ограждения

$$D = \frac{\delta}{\lambda} S = \frac{0,16}{0,47} 6,95 = 2,37.$$

Так как конструкция однослойная и $D = 2,37 > 1$, то коэффициент теплоусвоения наружной поверхности равен S , т.е. $Y = S = 6,95$ Вт/(м²·°C).

Величину v определяем по формуле (60). Для однослойной конструкции формула упрощается и имеет вид

$$v = 0,9 e^{D/\sqrt{2}} \frac{(S_1 + \alpha_{\text{в}})(\alpha_{\text{н}} + Y)}{(S_1 + Y_1)\alpha_{\text{н}}}.$$

Значение $\alpha_{\text{в}} = 8,7$ Вт/(м²·°C) [1, табл. 4*]. Согласно формуле (59) $\alpha_{\text{н}} = 1,16 \cdot (5 + 10\sqrt{2}) = 22,2$ Вт/(м²·°C), где $v = 2$ м/с принято по [3]

$$v = 0,9 \cdot 2,718^{2,37/\sqrt{2}} \frac{(6,95 + 8,7)(22,2 + 6,95)}{(6,95 + 6,95)22,2} = 7,11.$$

Теперь необходимо рассчитать величину $A_{\text{тв}}$ по формуле (57). Для чего вычислим значение $A_{\text{тн}}^{\text{расч}}$ по формуле (58):

$$A_{\text{тн}}^{\text{расч}} = 0,5 \cdot 27,3 + 0,7 \frac{(740 - 169)}{22,2} = 37,7 \text{ °C},$$

где значения J_{max} и $J_{\text{ср}}$ приняты для широты Андижана – 40° по [3, прил. 5], ρ по [1, прил. 7].

Тогда $A_{\text{тв}} = 37,7/7,11 = 5,30$ °C.

Из расчета следует, что $A_{\text{тв}} > A_{\text{тв}}^{\text{тп}}$ ($5,30 > 1,87$), т.е. теплоустойчивость стены недостаточна.

Таким образом установлено, что стена, обладающая хорошими теплозащитными качествами для зимних условий ($R_0 > R_0^{\text{тп}}$), не обеспечивает защиту помещения от перегрева в летних условиях. Для увеличения теплоустойчивости необходимо увеличить тепловую инерцию стены D за счет увеличения толщины ее или подбора материала с более высокими значениями S .

Пример 13. Проверить теплоустойчивость совмещенной крыши жилого дома при воздействии на нее солнечной радиации при условиях эксплуатации А. Здание расположено в г. Андижане. Конструкция крыши состоит из железобетонной плиты, слоя утеплителя (пенобетон) и рубероидного ковра.

Решение. Определим и сведем в табл. 10 теплофизические свойства всех слоев ограждения

10 Основные теплофизические характеристики крыши

Наименование слоя	γ , кг/м ³	δ , м	λ , Вт/(м·°C)	S , Вт/(м ² ·°C)	R , м·°C/Вт	D
Железобетонная плита	2500	0,05	1,92	17,98	0,026	0,467
Пенобетон	1000	0,25	0,41	6,13	0,609	3,738
Рубероидный	600	0,01	0,17	3,53	0,059	0,208

ковер						
Σ	-	-	-	-	0,694	4,406

Согласно предыдущему примеру $A_{\text{тв}}^{\text{тп}} = 1,87 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Величину затухания ν определим по формуле (61), так как $D = 4,406 > D = 1,5$. Тогда

$$\nu = 2^{4,406} \left(0,83 + 3,49 \frac{0,694}{4,406} \right) \left(0,85 + 0,15 \frac{6,13}{17,98} \right) \cdot 1 = 26,36.$$

Вычислим $A_{\text{тн}}^{\text{расч}}$ по формуле (58) для горизонтальной поверхности

$$A_{\text{тн}}^{\text{расч}} = 0,5 \cdot 27,3 + 0,9 \frac{(928 - 333)}{22,2} = 37,77 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где J_{max} и $J_{\text{ср}}$ приняты по [3, прил. 5], ρ по [1, прил. 7]. Остальные значения определены аналогично предыдущему примеру. В соответствии с формулой (57).

Тогда $A_{\text{тв}} = 37,7/26,36 = 1,43 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Конструкция покрытия обладает достаточной теплоустойчивостью, так как $A_{\text{тв}} < A_{\text{тн}}^{\text{тп}}$ ($1,43 < 1,87 \text{ } ^\circ\text{C}$).

3.2.3 Нормирование и расчет теплоустойчивости полов

В последнее время в строительной теплофизике большое внимание уделяется нормированию, теплофизическим расчетам и проектированию полов. Это связано с внедрением в практику строительства новых видов материалов для конструкции полов.

Пол как конструктивный элемент здания выполняет несущие и ограждающие функции. Поэтому к нему предъявляются дополнительные требования, связанные с контактным теплообменом между конструкциями пола и объектами, находящимися в помещении. Так как продолжительность контакта участков тела человека с полом незначительны по времени, процессы передачи тепла рассматриваются в нестационарной постановке.

При контакте ног человека с поверхностью пола происходит передача тепловой энергии. Во избежание переохлаждения ног количество тепла, поглощаемого полом должно соответствовать притоку тепла к ногам при работе системы терморегуляции организма. Во всех случаях охлаждение поверхности ног не должно быть ниже температур, допускаемых гигиеническими нормами. Например, при контакте босой ноги с полом температура кожи в течение двух минут не должна опускаться ниже $27 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Теплообмен между ногой и полом определяется величиной тепловой активности материала пола, характеризуемой коэффициентами теплоусвоения. При теплотехнических расчетах полов для характеристики тепловой активности используется показатель теплоусвоения поверхности пола $Y_{\text{п}}$, Вт/(м²·°C). Он показывает какое количество тепловой энергии поглощается единицей поверхности пола за единицу времени при разности температур пола и ноги в один градус. В соответствии с СНиП II-3-79* [1] поверхность пола должна иметь показатель теплоусвоения $Y_{\text{п}}$, не более нормативной величины $Y_{\text{п}}^{\text{н}}$ установленной СНиП II-3-79* [1, табл. 11*].

Расчет показателя теплоусвоения поверхности пола $Y_{\text{п}}$ производится с учетом расположения нижней границы активного слоя, вовлекаемого в теплообмен с ногой. Активным называется слой материала, влияние теплофизических свойств которого на величину количества поглощения тепла составляет 95 % общего воздействия. В СНиП II-3-79*[1] это обстоятельство учитывается величиной тепловой инерции D . Различают два случая определения показателя теплоусвоения поверхности пола:

а) если покрытие пола (первый слой конструкции пола) имеет тепловую инерцию $D = R_1 \cdot S_1 / 0,5$, то показатель теплоусвоения пола определяется по формуле

$$Y_{\text{п}} = 2S_1; \quad (63)$$

б) если первые n слоев конструкции пола ($n \geq 1$) имеют суммарную тепловую инерцию $D_1 + D_2 + \dots + D_n < 0,5$, но тепловая инерция $(n + 1)$ -го слоев $D_1 + D_2 + \dots + D_{n+1} < 0,5$, то показатель тепло-

усвоения поверхности пола Y_n следует определять последовательно расчетом показателей теплоусвоения поверхностей слоев конструкции, начиная с n -го до 1-го:

- для n -го по формуле

$$Y_g = \frac{2R_n S_n^2 + S_{n+1}}{0,5 + R_n S_{n+1}}; \quad (64)$$

- для i -го слоя ($i = n-1; n-2; \dots; 1$) по формуле

$$Y_i = \frac{4R_i S_i^2 + Y_{i+1}}{1 + R_i Y_{i+1}}. \quad (65)$$

Показатель теплоусвоения поверхности пола Y_n принимается равным показателю теплоусвоения поверхности 1-го слоя Y_1 .

В формулах (63) – (65) и неравенствах D_1, D_2, \dots, D_{n+1} – тепловая инерция соответственно 1-го, 2-го, ..., $(n+1)$ -го слоев конструкции пола, определяемая по формуле (54); R_i, R_n – термические сопротивления, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ i -го и n -го слоев конструкции пола, определяемые по формуле (31); S_1, S_2, \dots, S_{n+1} – расчетные коэффициенты теплоусвоения материала 1-го, 2-го, ..., $(n+1)$ -го слоев конструкции пола, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$, принимаемые по [1, прил. 3*] во всех случаях при условии эксплуатации А; Y_{i+1} – показатель теплоусвоения поверхности $(i+1)$ -го слоя конструкции пола, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$.

Пример 14. Определить теплоустойчивость пола в квартире с покрытием из дубового штучного паркета, уложенного по цементно-песчаной стяжке. Условия эксплуатации А.

Решение. Характеристики материалов пола: паркет $\delta_1 = 0,015$ м; $\gamma_1 = 700$ $\text{кг}/\text{м}^3$; $\lambda_1 = 0,18$ $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$; $S_1 = 4,95$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; цементно-песчаная стяжка $\delta_2 = 0,04$ м; $\gamma_2 = 1800$ $\text{кг}/\text{м}^3$; $\lambda_2 = 0,76$ $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$; $S_2 = 9,60$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$. Характеристики приняты по [1, прил. 3*].

Определяем тепловую инерцию D_1 первого слоя пола-паркета:

$$D_1 = R_1 S_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1} S_1 = \frac{0,015}{0,18} 5,00 = 0,42.$$

Так как $D_1 = 0,42 < 0,5$, вычисляем инерцию двух слоев – паркета и стяжки:

$$D_1 + D_2 = R_1 S_1 + R_2 S_2 = 0,42 + \frac{\delta_2}{\lambda_2} S_2 = 0,42 + \frac{0,04}{0,76} 9,60 = 0,93.$$

Так как $D_1 + D_2 = 0,93 > 0,5$, производим расчет показателя теплоусвоения пола по формуле (64)

$$Y_n = \frac{2R_1 S_1^2 + S_2}{0,5 + R_2 S_2} = \frac{2 \frac{0,015}{0,18} 5,00^2 + 9,60}{0,5 + \frac{0,015}{0,18} 9,60} = 10,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}).$$

По [1, табл. 11*] имеем $Y_n^н = 12$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$. Конструкция пола обеспечивает требуемую теплоустойчивость – $Y_n = 10,6 < Y_n^н = 12$.

Пример 15. Определить теплоустойчивость пола в административном помещении с покрытием из линолеума ПВХ на тканевой основе, уложенного по древесноволокнистым плитам, которые в свою очередь уложены по холодной мастике на цементно-песчаную стяжку.

Решение. Характеристики материалов пола: линолеум ПВХ $\delta_1 = 0,003$ м, $\gamma_1 = 1400$ $\text{кг}/\text{м}^3$, $\lambda_1 = 0,23$ $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$, $S_1 = 5,87$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$, древесноволокнистые плиты на холодной мастике $\delta_2 = 0,005$ м, $\gamma_2 = 600$ $\text{кг}/\text{м}^3$, $\lambda_2 = 0,13$ $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$, $S_2 = 3,93$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$, цементно-песчаная стяжка $\delta_3 = 0,04$ м, $\gamma_3 = 1800$ $\text{кг}/\text{м}^3$, $\lambda_3 = 0,76$ $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$, $S_3 = 9,60$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$. Характеристики приняты для условий эксплуатации А по [1, прил. 3*].

Определяем тепловую инерцию D_1 первого слоя пола – линолеума:

$$D_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1} S_1 = \frac{0,003}{0,23} 5,87 = 0,08 < 0,5.$$

Определяем тепловую инерцию двух слоев – линолеума и древесноволокнистых плит:

$$D_1 + D_2 = 0,8 + \frac{\delta_2}{\lambda_2} S_2 = 0,8 + \frac{0,005}{0,13} 3,93 = 0,23 < 0,5.$$

Следовательно, необходимо определить тепловую инерцию всех трех слоев конструкции:

$$D_1 + D_2 + D_3 = 0,23 + \frac{\delta_3}{\lambda_3} S_3 = 0,23 + \frac{0,04}{0,76} 9,60 = 0,74 > 0,5.$$

Расчет в этом случае производится исходя из формул (64) и (65):

$$Y_{\text{п}} = \frac{4R_1 S_1^2 (0,5 + R_2 S_2) + 2R_2 S_2^2 + S_3}{0,5 + R_2 S_3 + R_1 (2R_2 S_2^2 + S_3)}.$$

Тогда

$$Y_{\text{п}} = \frac{4 \frac{0,003}{0,23} 5,87^2 \left(0,5 + \frac{0,005}{0,13} 9,60 \right) + 2 \frac{0,005}{0,13} 3,93^2 + 9,60}{0,5 + \frac{0,005}{0,13} 9,60 + \frac{0,003}{0,23} \left(2 \frac{0,005}{0,13} 3,93^2 + 9,60 \right)} = 12,22 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}).$$

По [1, табл. 11*] для пола в помещениях административного здания $Y_{\text{п}}^{\text{н}} = 14 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$. Так как $Y_{\text{п}} = 12,22 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}) < Y_{\text{п}}^{\text{н}} = 14 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$, пол отвечает требованиям теплоустойчивости.

В случае, если такую конструкцию пола следует применить в жилом здании, необходимо повысить ее теплотехнические качества за счет укладки двух слоев древесноволокнистых плит ($\delta_2 = 0,005 + 0,005 = 0,01 \text{ м}$). Тогда показатель теплоусвоения при расчете по формуле (66) будет равен $Y_{\text{п}} = 10,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$, что меньше $Y_{\text{п}}^{\text{н}} = 12,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

3.3 ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТЬ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

3.3.1 Общие понятия о воздухопроницаемости ограждений

В процессе эксплуатации через ограждения происходит фильтрация воздуха. При движении воздуха в направлении помещения она носит название инфильтрации, при обратном направлении – эксфильтрации. Свойство ограждения или его материала пропускать воздух называется воздухопроницаемостью. С гигиенической точки зрения воздухопроницаемость является положительным качеством, так как способствует естественной вентиляции помещения. С теплотехнической стороны это явление вредно, так как при инфильтрации в помещение попадает холодный воздух и понижается температура на внутренней поверхности ограждения. При эксфильтрации ухудшается влажностный режим конструкции и повышается вероятность конденсации влаги внутри ее.

Причиной воздухопроницаемости материалов является наличие пор. Воздухопроницаемость зависит от структуры материала и влажности. Влажные материалы содержат в порах капиллярную влагу и поэтому имеют меньшую воздухопроницаемость.

Воздухопроницаемость ограждений обуславливается воздухопроницаемостью материала и проникновением воздуха через швы конструкции, трещины, щели и т.п. Она, как правило, отличается по величине от воздухопроницаемости материалов конструкции.

Процесс воздухопроницания возникает при появлении разности давлений воздуха на внутренней и наружной поверхностях ограждения за счет теплового и ветрового напоров (см. рис. 16).

Тепловой напор обусловлен разностью удельных весов теплого воздуха помещения и холодного снаружи здания. Величина максимального теплового напора в зимнее время определяется как

$$\Delta P_t = 0,55H(\gamma_{\text{н}} - \gamma_{\text{в}}), \quad (67)$$

где H – высота здания, м; $\gamma_{\text{н}}$, $\gamma_{\text{в}}$ – удельный вес наружного и внутреннего воздуха, Н/м³.

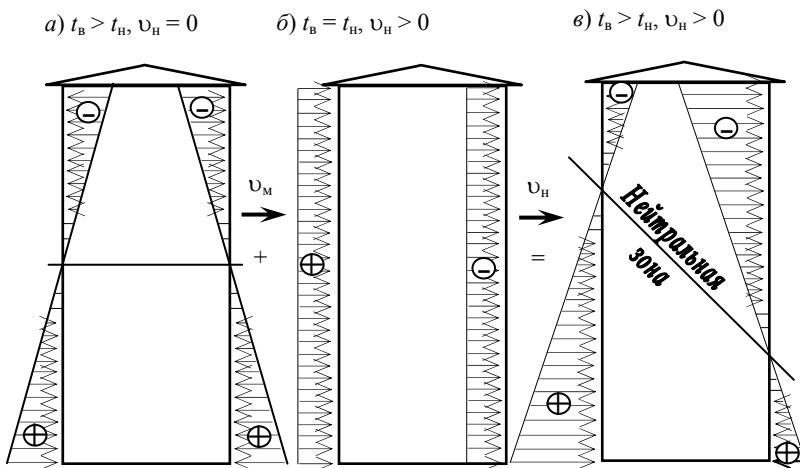


Рис. 16 Эпюры давлений на ограждение при тепловом (а) и ветровом (б) напорах и их суммарном воздействии

Ветровой напор создается за счет действия ветра на ограждение. Величина давления ветра определяется как

$$\Delta P_v = 0,03\gamma_H v^2 \text{ Па}, \quad (68)$$

где v – скорость движения ветра, м/с.

По принципам протекания и воздействия на теплотехнические качества ограждения различают несколько видов фильтрации воздуха. Наиболее распространена **сквозная или поперечная фильтрация**, когда воздух проходит через всю конструкцию. Следствием фильтрации является изменение распределения температур в ограждении при инфильтрации, эксфильтрации и отсутствии фильтрации. На рис. 17 видно, что инфильтрация понижает температуру, а эксфильтрации повышает ее.

Температура в любом сечении ограждения при наличии инфильтрации воздуха может быть найдена по формуле

$$\tau_x = t_H + (t_B - t_H) \frac{e^{cGR_x} - 1}{e^{cGR_0} - 1}, \quad (69)$$

где t_B, t_H – температура внутреннего и наружного воздуха, °С; $c = 1$ – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·С); R_x – термическое сопротивление ограждений от наружной поверхности до рассматриваемого сечения, (м²·°С)/Вт; R_0 – термическое сопротивление при отсутствии фильтрации, м²·°С/Вт; G – количество воздуха, проходящего через ограждение, кг/(м²·ч).

Сопротивление наличии инфильтрации по формуле

$$R_H = \frac{e^{cGR_0} - 1}{cGe^{cGR_0}}. \quad (70)$$

При эксфильтрации со знаком «минус».

При наличии на плотных воздухопроницаемых наружной стороны может **фильтрация**. В этом случае холодный воздух проникает в уходит из нее в верхнюю понижению температуры помещения. Явление учитывать при

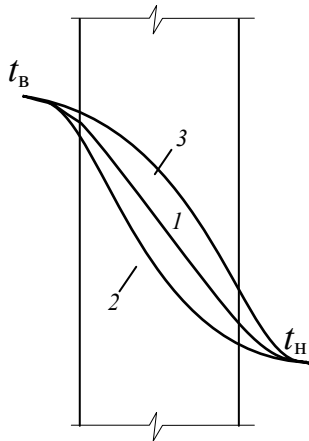


Рис. 17 Схема распределения температур в ограждении при отсутствии воздухопроницаемости (1).

теплопередаче ограждения при уменьшается и может быть определено

величина cG в формулах принимается

внутренней поверхности ограждения слоев и недостаточной защиты с происходит **продольная** через наружную поверхность нижнюю часть стены, нагревается и часть (см. рис. 18, б). Это приводит к охлаждению продольной фильтрации следует проектировании ограждений с целью

принятия мер по защите наружной поверхности от излишней воздухопроницаемости.

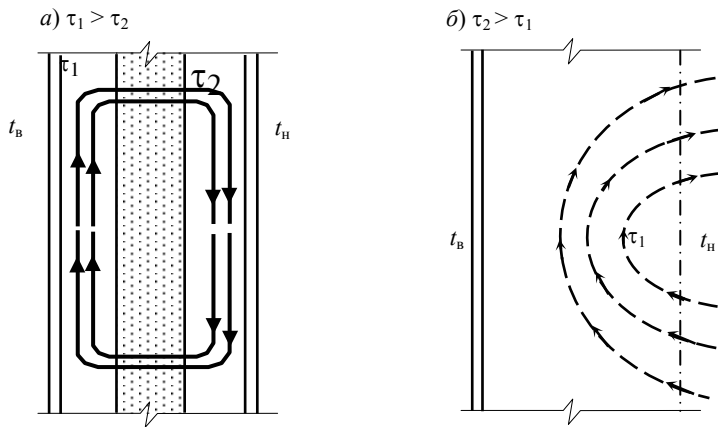


Рис. 18 Схемы внутренней (а) и продольной (б) фильтрации

В многослойных конструкциях с воздушными прослойками может возникать **внутренняя фильтрация** за счет конвекционных токов воздуха через неплотные внутренние слои материала (см. рис. 18, а). Наличие внутренней фильтрации приводит к снижению сопротивления теплопередачи ограждения и к возможной конденсации влаги внутри конструкции. Для предупреждения внутренней фильтрации необходимо по поверхности неплотных материалов устраивать воздухонепроницаемые прослойки из рубероида, полимерных пленок и т.п.

3.3.2 Нормирование и расчет сопротивления воздухопроницанию ограждений

Воздухопроницаемость оценивается сопротивлением воздухопроницанию $R_{и}$, которое для отдельного слоя и отдельной конструкции определяется как $R_{и} = \delta/i$, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{кг}$, где δ – толщина конструкции, м; i – коэффициент воздухопроницаемости, $\text{кг} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$. Сопротивление воздухопроницанию многослойных конструкций определяется как $R_{и} = \sum R_{иj}$, где $R_{иj}$ – сопротивление j -го слоя конструкции. Величины сопротивления воздухопроницанию некоторых материалов и конструкций приведены в [1].

Сопротивление воздухопроницанию ограждений, за исключением заполнений световых проемов, должно быть не менее требуемого сопротивления $R_{и}^{\text{тп}}$, определяемого по формуле

$$R_{и}^{\text{тп}} = \Delta P / G_{и}, \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{кг}. \quad (71)$$

Сопротивление воздухопроницанию окон и балконных дверей жилых и общественных зданий, а также окон и фонарей производственных зданий должно быть не менее требуемого, определяемого по формуле

$$R_{и} = \frac{1}{G_{и}} \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0} \right)^{2/3}, \text{ м}^2 \cdot \text{ч} / \text{кг}. \quad (72)$$

В формулах (71) и (72) $G_{и}$ – нормативная воздухопроницаемость конструкции, $\text{кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, принимаемая по [1, табл. 12*]; ΔP – разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ограждения определяемая как

$$\Delta P = 0,55H(\gamma_{н} - \gamma_{в}) + 0,03\gamma_{н}v^2, \text{ Па}, \quad (73)$$

где v – максимальная из средних скоростей ветра, за январь, повторяемость которых 16 % и более, принимаемая по [8]; $\Delta P_0 = 10$ Па – разность давлений воздуха, при которой определяется сопротивление $R_{и}$. Остальные обозначения те же, что и формуле (67).

Удельный вес воздуха в зависимости от его температуры рассчитывается по формуле

$$\gamma = \frac{3463}{273 + t}, \text{ Н} / \text{м}^3. \quad (74)$$

Пример 16. Проверить воздухопроницаемость кирпичной стены толщиной 51 см, оштукатуренной с внутренней стороны известково-песчаным раствором толщиной 1,5 см, на первом этаже двенадцатиэтажного дома для условий г. Тамбова. Стена с наружной стороны утеплена минераловатной плитой

толщиной 14 см. Отделка наружной поверхности стены выполнена из керамических плит, закрепленных на металлических направляющих. Между плитами и утеплителем имеется вентилируемая воздушная прослойка. При проверке необходимо определить снижение сопротивления теплопередаче стены и температуру внутренней поверхности при инфильтрации.

Решение. Устанавливаем данные, необходимые для расчета:
 $t_b = 18 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_b = 45 \%$; по [1, прил. 1 и 2] условия эксплуатации А; по [1, прил. 3*] принимаем для глиняного кирпича $\gamma_k = 1800 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_k = 0,70 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$; для штукатурки $\gamma_{шт} = 1600 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_{шт} = 0,70 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$; для минераловатной плиты $\gamma_{мп} = 200 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_{мп} = 0,07 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$; по [2] $t_{н,5} = -28 \text{ }^\circ\text{C}$, $v = 5 \text{ м/с}$; $t_{оп} = -3,7 \text{ }^\circ\text{C}$; $z_{оп} = 201 \text{ сут}$; по [1, табл. 1б*] при ГСОП $= (t_b - t_{оп})z_{оп} = (18 - (-3,7)) \cdot 201 = 4362 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{сут}$. равно $R_{02}^{тп}$ =

$= 2,92 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C/Вт}$, по [1] $\alpha_b = 8,7 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$, $\alpha_n = 23 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$.

Определяем фактическое сопротивление теплопередаче стены

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_b} + \frac{\delta_k}{\lambda_k} + \frac{\delta_{шт}}{\lambda_{шт}} + \frac{\delta_{мп}}{\lambda_{мп}} + \frac{1}{\alpha_n} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,51}{0,70} + \frac{0,015}{0,70} + \frac{0,14}{0,07} + \frac{1}{23} = 2,93 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C/Вт}.$$

Так как $R_0 = 2,93 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C/Вт} > R_{02}^{тп} = 2,92 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C/Вт}$, стена удовлетворяет требованию по теплозащите без учета фильтрации воздуха.

Определяем требуемое сопротивление воздухопроницанию. Вначале по формуле (74) вычислим значения γ_n и γ_b :

$$\gamma_n \frac{3463}{273 + (-28)} = 14,13, \text{ Н/м}^3; \quad \gamma_b = \frac{3463}{273 + 18} = 11,87, \text{ Н/м}^3.$$

Тогда по формуле (73)

$$\Delta P = 0,55 \cdot (2,8 \cdot 12)(14,13 - 11,87) + 0,03 \cdot 14,13 \cdot 5^2 = 52,35, \text{ Па}.$$

Принимаем по [1, табл. 12*] $G = 0,5 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{ч)}$ и по формуле (71)

$$R_n^{тп} = \frac{52,35}{0,5} = 104,7, \text{ м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{Па/кг}.$$

По [1, прил. 9*] находим фактическое сопротивление воздухопроницаемости стены

$$R_n = R_{нк} + R_{шт} + R_{мп} = 18 + 142 + 2 \cdot \frac{140}{150} = 166 \text{ м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{Па/кг}.$$

Здесь при определении сопротивления воздухопроницанию минераловатной плиты учтена фактическая толщина плит – 140 мм.

Так как $R_n = 166 \text{ м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{Па/кг} > R_n^{тп} = 104,7 \text{ м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{Па/кг}$, стена отвечает требованиям по защите от воздухопроницаемости.

Определяем снижение сопротивления теплопередаче стены при фильтрации. Для этого находим количество воздуха, проходящего через конструкцию,

$$G = \frac{\Delta P}{R_n} = \frac{52,35}{166} = 0,32 \text{ кг/(м}^2\cdot\text{ч)}.$$

Подставляя полученные значения в формулу (70), вычисляем

$$R_{0,н} = \frac{2,718^{1 \times 0,32 \times 2,93} - 1}{1 \cdot 0,32 \cdot 2,718^{1 \times 0,32 \times 2,93}} = \frac{2,55 - 1}{0,82} = 1,89 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C/Вт}.$$

Таким образом, сопротивление теплопередаче стены при наличии может снизиться на $(2,93 - 1,89) \cdot 100 / 2,93 = 35,5 \%$.

Определим по формуле (69) температуру внутренней поверхности стены при инфильтрации. Вначале вычислим

$$R_x = R_0 - \frac{1}{\alpha_b} = 2,93 - 0,11 = 2,82 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C/Вт}.$$

Тогда

$$t_x = -28 + (18 + 28) \frac{2,718^{1 \times 0,32 \times 2,82} - 1}{2,718^{1 \times 0,32 \times 2,93} - 1} = 15,32 \text{ }^\circ\text{C}.$$

В соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями температура на внутренней поверхности $\tau_{в}$ должна быть не ниже $(t_{в} - \Delta t^{н}) = 18 - 4 = 14^{\circ}\text{C}$. Это условие обеспечивается.

Из полученных результатов видно, что стена обеспечивает защиту от воздухопроницания ($R_{и} > R_{и}^{тп}$ и $\tau_{в} = (t_{в} - \Delta t^{н})$), однако при инфильтрации резко снижается сопротивление теплопередаче стены. Данное обстоятельство является негативным, и, следовательно, на нижних этажах здания необходимо повысить сопротивление воздухопроницанию стены, например, за счет замены известково-песчаной штукатурки на цементно-песчаную с $R_{шт} = 373 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{кг}$. Эта замена позволит избежать значительного понижения $R_{он}$ и снижения температуры поверхности $\tau_{ви}$.

3.3.3 Теплофизические особенности проектирования светопрозрачных ограждений

Теплофизическими особенностями светопрозрачных ограждений являются их низкие по сравнению со стенами теплозащитные качества и повышенная воздухопроницаемость.

Теплозащитные качества окон характеризуются величиной сопротивления теплопередаче $R_0 = R_b + \sum R_i + R_n$, где $R_b = 1/\alpha_b$; $R_n = 1/\alpha_n$ – соответственно, сопротивление тепловосприятию на поверхности стекла внутреннего переплета и сопротивление теплопередаче поверхности стекла наружного переплета; $\sum R_i$ – сумма термических сопротивлений остекления и воздушной прослойки между стеклами; α_b ; α_n – коэффициенты теплопередачи, соответственно на внутренней и наружной поверхностях оконного заполнения.

Оконное заполнение относится к легким ограждающим конструкциям с малой тепловой инерцией. В отличие от непрозрачных ограждений сопротивление теплопередаче оконных заполнений не может быть повышено обычными конструктивными мероприятиями, так как оно в основном определяется теплозащитными свойствами воздушной прослойки, в которой передача тепла осуществляется за счет конвекции и теплового излучения. Существенное влияние на передачу тепла оказывает также степень фильтрации воздуха через притворы переплетов. Поэтому теплотехнический расчет окон изложенными выше методами не дает должного результата. Величины сопротивлений теплопередаче оконных заполнений устанавливаются экспериментальным путем. В процессе проектирования, при выборе конструкций окон с необходимыми теплозащитными качествами следует руководствоваться данными, приведенными в [1, прил. 6*]. Выбранная конструкция окна должна иметь сопротивление теплопередаче не менее нормируемого значения, принимаемого по [1] (см. разд. 3.1.2).

Воздухопроницаемость окон характеризуется величиной сопротивления воздухопроницанию $R_{и}$. Величину сопротивления воздухопроницанию выбранного по теплозащите типа светопрозрачной конструкции

$R_{и}$, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} / \text{кг}$, определяют согласно [4] по формуле

$$R_{и} = \frac{1}{G_S} \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0} \right)^n, \quad (75)$$

где G_S – воздухопроницаемость светопрозрачной конструкции, $\text{кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ при $\Delta P_0 = 10 \text{ Па}$, полученная в результате сертификационных исследований; n – показатель режима фильтрации светопрозрачной конструкции, полученной в результате сертификационных испытаний.

Пример 17. Определить, удовлетворяет ли требованиям воздухопроницания принятые по условиям теплозащиты в примере 8 окна с двойным остеклением в пластмассовых отдельных переплетах с $R_0 = 0,42 \text{ м}^2 \cdot \text{C} / \text{Вт}$. Жилое 12-ти этажное здание построено в г. Тамбове. Высота здания 34 м. Согласно сертификату воздухопроницаемость оконного блока при $\Delta P_0 = 10 \text{ Па}$ равна $G_S = 4,0 \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, а показатель режима фильтрации $n = 0,55$.

Решение. Для Тамбова согласно [2] расчетная скорость ветра в январе равна $v = 5 \text{ м} / \text{с}$, а наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью $0,92 - t_{н5} = -28^{\circ}\text{C}$. Расчетная температура воздуха внутри жилых помещений $t_{в} = 18^{\circ}\text{C}$.

Вычисляем по формуле (74) удельные веса наружного и внутреннего воздуха

$$\gamma_n = \frac{3463}{273 + (-28)} = 14,13, \text{ Н/м}^3; \gamma_n = \frac{3463}{273 + 18} = 11,87, \text{ Н/м}^3.$$

Определяем расчетную разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхности окна первого этажа по формуле (73)

$$\Delta P = 0,55 \cdot 34(14,13 - 11,87) + 0,03 \cdot 14,13 \cdot 5^2 = 52,86 \text{ Па.}$$

Находим по формуле (72) требуемое сопротивление воздухопроницанию окон в рассматриваемом доме

$$R_n^{\text{тp}} = \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{52,86}{10} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,61 \text{ м}^2 \cdot \text{ч/кг}.$$

Определяем по формуле (75) сопротивление воздухопроницанию оконного блока

$$R_n = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{52,86}{10} \right)^{0,55} = 0,62 \text{ м}^2 \cdot \text{ч/кг}.$$

Таким образом, выбранный оконный блок удовлетворяет требованиям СНиП II-3-79* [1] $R_n = 0,62 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па/кг} > R_n^{\text{тp}} = 0,61 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па/кг}$.

При традиционных конструкциях окон с деревянными переплетами снижение воздухопроницаемости и его вредного влияния на теплозащитные качества окон достигается уплотнением притворов различными упругими материалами (полушерстяной шнур, губчатая резина, пенополиуретан и пр.), заделкой паклей, шлаковатой и другими уплотняющими материалами зазоров между оконной коробкой и поверхностью проема, высоким качеством изготовления элементов оконного заполнения. При проектировании в случае отсутствия сертификационных данных R_n для различных конструкций окон с деревянными переплетами и с различными типами уплотняющих прокладок допускается принимать по табл. 11.

11 Сопротивление воздухопроницанию заполнений световых проемов

Заполнение светового проема	Число уплотнений притворов заполнения	Сопротивление воздухопроницанию R_n , м ² ·ч·Па/кг (при $\Delta P_o = 10$ Па) заполнений световых проемов с деревянными переплетами с уплотнением прокладками из		
		пенополиуретана	губчатой резины	полушерстяного шнура
1 Одинарное остекление или двойное остекление в спаренных переплетах	1	0,26	0,16	0,12
2 Двойное остекление в отдельных переплетах	1	0,29	0,18	0,13
	2	0,38	0,26	0,18
3 Тройное остекление в раздельно-спаренных переплетах	1	0,30	0,18	0,14
	2	0,44	0,26	0,20
	3	0,56	0,37	0,27

Пример 18. Подобрать конструкцию уплотнения деревянных переплетов, обеспечивающую требуемое сопротивление воздухопроницанию окон семиэтажного жилого дома в г. Тамбове. Окна приняты по условиям теплозащиты с двойным остеклением в деревянных раздельных переплетах (см. пример 8). Все необходимые исходные данные приведены в примере 17.

Решение. Определяем расчетную разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях окна первого этажа по формуле (73) при высоте этажа 2,8 м.

$$\Delta P = 0,55 \cdot 2,8 \cdot 5(14,13 - 11,87) = 24,36 \text{ Па.}$$

Находим по формуле (72) требуемое сопротивление воздухопроницанию окон в рассматриваемом доме

$$R_n^{\text{тp}} = \frac{1}{5} \left(\frac{24,36}{10} \right)^{2/3} = 0,36 \text{ м}^2 \cdot \text{ч/кг.}$$

По табл. 11 для обеспечения условия $R_n \geq R_n^{\text{тp}}$ принимаем уплотнение двух переплетов пенополиуретановыми прокладками $c = 0,39 \text{ м}^2 \cdot \text{ч/кг}$

3.4 Влажностное состояние ограждающих конструкций

3.4.1 Общие понятия о влажностном режиме наружных ограждений

Влажностный режим ограждений существенно влияет на их теплофизические качества. Увлажненные материалы имеют более высокие коэффициенты теплопроводности. Повышенная влажность ограждений неприемлема и с гигиенической точки зрения, так как создает неблагоприятные условия для развития в них плесени, грибов и других биологических процессов и способствует повышению влажности воздуха в помещении. От степени увлажнения конструкций зависит также их долговечность (морозостойкость, прочность, коррозиестойкость и пр.).

По способу проникновения в конструкции различают влагу: строительную, грунтовую, метеорологическую, эксплуатационную, гигроскопическую (сорбционную) и конденсационную. Наибольшую опасность для ограждений представляют гигроскопическое конденсационное увлажнение. Гигроскопическое увлажнение происходит вследствие способности материала поглощать влагу из воздуха, а конденсационное – при конденсации водяных паров на внутренней поверхности ограждения или в его толще.

Влажность воздуха может быть охарактеризована его абсолютной влажностью, выражаемой количеством влаги в граммах, содержащейся в 1 м^3 воздуха. Однако, для расчетов, связанных с конденсацией влаги, удобнее пользоваться величиной парциального давления водяного пара, называемой упругостью водяного пара e и измеряемой в паскалях. Чем больше абсолютная влажность воздуха, тем больше и упругость водяного пара. В воздухе при каждой конкретной температуре может содержаться определенное максимально возможное количество влаги. Этому предельному значению соответствует максимальная упругость водяного пара E , Па. Величина E зависит от температуры воздуха: чем выше температура, тем больше значение E , т.е. тем большее предельное количество влаги может содержаться в воздухе.

Действительная упругость водяного пара e не дает представления о степени насыщения воздуха влагой. Для этого ее нужно сравнивать с максимальной упругостью водяного пара E при данной температуре исследования. В практике оценки степени насыщения воздуха влагой используется относительная влажность воздуха φ , выраженная в процентах отношением действительной упругости водяного пара e к максимальной упругости его E при конкретной температуре помещения, т.е.

$$\varphi = \frac{e}{E} 100 \% . \quad (76)$$

Если температура воздуха с данной влажностью повысится, то его относительная влажность понизится, так как величина упругости водяного пара e останется без изменения, а значение максимальной упругости E увеличится с повышением температуры. Наоборот, при охлаждении воздуха по мере понижения температуры относительная влажность его будет увеличиваться вследствие уменьшения величины E . При температуре, когда E станет равной e относительная влажность воздуха будет $\varphi = 100 \%$, т.е. воздух будет предельно насыщен водяным паром и при дальнейшем понижении его температуры начнется конденсация влаги. Эта температура называется температурой точки росы t_p . Взаимосвязь величин t , e , E , t_p и φ показана на рис. 19.

Так как внутренние поверхности наружных ограждений в зимних условиях имеют температуры ниже температур воздуха помещения, при соприкосновении воздуха с поверхностями происходит его

охлаждение, и следовательно, повышение величины φ . Если эти поверхности имеют температуры ниже температуры точки росы t_p , то возможно выпадение на них конденсата. В связи с этим при проектировании необходимо проверять условия возможной конденсации. Конденсат на поверхности не образуется, если ее температура τ_b больше температуры t_p . Величина τ_b находится по формуле (49).

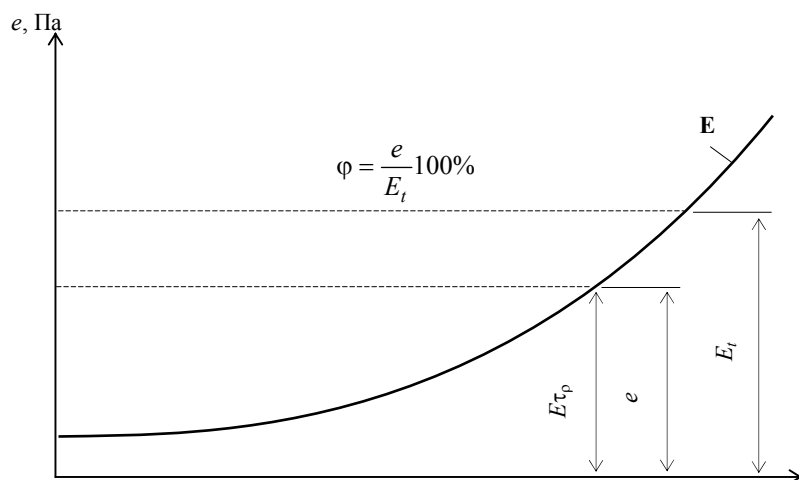


Рис. 19 Взаимосвязь t , e , E , t_p , φ

Пример 19. Проверить возможность выпадения конденсата на внутренней поверхности стены жилого дома, имеющей $R_0 = 0,9 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; при $t_{н5} = -28 \text{ °C}$; $t_b = 18 \text{ °C}$ и $\varphi = 55 \%$ и установить предельную величину относительной влажности, при которой возможно выпадение конденсата.

Решение. Подставляя исходные данные в формулу (49), получим температуру внутренней поверхности

$$\tau_b = 18 - \frac{18 - (-28)}{8,7 \cdot 0,90} = 12,1 \text{ °C}.$$

По табл. П.1 для $t_b = 18 \text{ °C}$ находим $E_{t_b} = 2064 \text{ Па}$. Тогда из формулы (76) $e = 55 \times 2064 / 100 = 1135 \text{ Па}$. Температуру, при которой e станет значением максимальной упругости E , то есть температуру точки росы, определяем по табл. П.1 для $E = 1135 \text{ Па}$ — $t_p = 8,8 \text{ °C}$.

Конденсации влаги на поверхности не будет, так как $t_p = 8,8 \text{ °C} < \tau_b = 12,1 \text{ °C}$.

Конденсация возможна, когда действительная упругость e станет равной максимальной упругости для $\tau_b = 12,1 \text{ °C}$ — E_{τ_b} . По табл. П.1 находим $E_{\tau_b} = 1412 \text{ Па}$ и вычисляем

$$\varphi = \frac{E_{\tau_b}}{E_{t_b}} 100 \% = \frac{1412 \cdot 100}{2064} = 68,4 \%$$

СЛЕДОВАТЕЛЬНО, В ДАННОМ СЛУЧАЕ КОНДЕНСАЦИЯ ВОЗМОЖНА ПРИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА 68,4 % И ВЫШЕ.

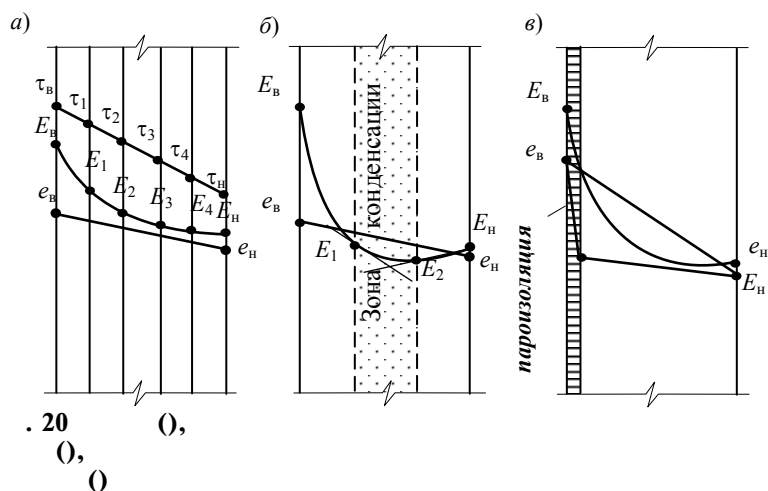
Отсутствие конденсации влаги на внутренней поверхности ограждения не дает полную гарантию отсутствия увлажнения, так как последнее может происходить вследствие сорбции и конденсации водяных паров в толще ограждения. В большинстве случаев это является главной причиной повышения влажности материалов.

При разности парциальных давлений водяных паров внутреннего и наружного воздуха в толще ограждения возникает поток водяного пара, направленный в сторону меньшего давления. По мере прохождения влажного воздуха через конструкцию упругость водяного пара падает, но одновременно с этим и понижается его температура, что приводит в ряде случаев к образованию конденсата в материале.

Вероятность конденсации в толще ограждения можно проверить графическим способом. Для этого необходимо разделить условно всю толщину однородного ограждения на ряд слоев и построить линию распределения температур τ внутри конструкции. По полученным значениям τ по табл. П.1 определяются значения E и наносятся на график (см. рис. 20). Зная величину действительной упругости водяного пара e внутри помещения и снаружи, строится линия падения e . Если линии E и e не пересекаются ($e < E$), то конденсации в ограждениях нет (см. рис. 20, а). если линии пересекаются, то в толще огражде-

ния может возникать конденсация. Зона конденсации определяется точками касания касательных, проведенных из точек e_B и e_H к линии E (см. рис. 20, б).

Кроме зоны конденсации существует также понятие плоскости возможной конденсации, показывающей в конструкции место наиболее вероятного выпадения конденсата. В однородной конструкции она располагается на расстоянии равном $2/3$ толщины конструкции от ее внутренней поверхности, а в многослойных конструкциях совпадает с наружной поверхностью утеплителя.



При проектировании конструкции необходимо предусматривать конструктивные меры против конденсации влаги на поверхности и внутри ограждения. Как отмечалось ранее, во избежание конденсации влаги на внутренней поверхности достаточно повысить ее температуру выше температуры точки росы. Повышение температуры достигается за счет увеличения сопротивления теплопередаче ограждения R_0 . В углах помещений, где температура поверхностей ниже чем на остальной глади стены и, следовательно, возможность конденсации более высока, следует размещать стояки отопления или повышать термическое сопротивление за счет дополнительного утепления. В помещениях с мокрым режимом (бани, прачечные и т.п.) это обеспечить не удастся, так как температура точки росы t_p близка к температуре воздуха помещения и, следовательно, для выполнения условия $t_p < \tau_B$ необходимы очень большие значения R_0 . В этом случае поверхности необходимо облицовывать водонепроницаемыми покрытиями (керамическими или стеклянными плитками, слоем торкрет-раствора и т.п.).

Основным конструктивным мероприятием для обеспечения защиты от конденсации влаги внутри ограждения является рациональное расположение в ограждении слоев различных материалов. Необходимо, чтобы с внутренней стороны располагались плотные, теплопроводные и малопроницаемые материалы, а с наружной — пористые, малотеплопроводные. В этом случае падение упругости водяного пара будет наибольшим в начале ограждения, а падение температуры, наоборот, в конце ограждения. Это позволит предохранить конструкцию не только от конденсации влаги, но и от сорбционного увлажнения. Если такое расположение слоев невозможно, то следует устраивать пароизоляционные слои, располагая их в конструкции до зоны конденсации. Например, в случае, приведенном на рис. 20, б, для этого чтобы избежать конденсации следует поставить с внутренней стороны ограждения слой материала (пароизоляцию), резко снижающий действительную упругость водяного пара на границе основного материала конструкции (см. рис. 20, в). При этом линия e опускается значительно ниже линии E и конденсации влаги не будет.

В том случае, если в ограждении в качестве утеплителя используются рыхлые или пористые материалы, можно предусматривать пароизоляцию с двух сторон. При таком решении необходимо обеспечивать высокую степень сухости изоляционного материала. В противном случае влага, сохраняющаяся в нем, в зимнее время будет конденсироваться и существенно понижать теплозащитные качества и долговечность ограждения. В качестве пароизоляции можно применять мастики, лаки, смолы, рубероид, толь и т.п.

3.4.2 Нормирование и расчет сопротивления паропроницанию ограждений

Свойство материала пропускать водяные пары называется паропроницаемостью. Прохождение паров зависит от сопротивления материалов паропроницанию $R_{п}$. Для отдельного слоя или для однородного ограждения $R_{п} = \delta/\mu$, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$, где δ – толщина слоя, м; μ – коэффициент паропроницаемости, $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$. Для многослойных конструкций сопротивление отдельных слоев. Расчетные величины $R_{п}$ некоторых листовых материалов приведены в [13, прил. 11].

При проектировании необходимо обеспечить условия, чтобы сопротивление $R_{п}$ ограждающей конструкции в пределах от внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации было не менее наибольшего из двух требуемых сопротивлений $R_{п1}^{\text{тп}}$ и $R_{п2}^{\text{тп}}$.

Сопротивление $R_{п1}^{\text{тп}}$ определяется из условия недопустимости накопления влаги в ограждения конструкции за годовой период эксплуатации

$$R_{п1}^{\text{тп}} = \frac{(e_{в} - E)R_{пн}}{E - e_{н}}. \quad (77)$$

Сопротивление $R_{п2}^{\text{тп}}$ определяется из условия ограничения накопления влаги в ограждающей конструкции за период с отрицательными среднемесячными температурами наружного воздуха

$$R_{п1}^{\text{тп}} = \frac{0,0024z_0(e_{в} - E)}{\gamma_{\omega}\delta_{\omega}\Delta\omega_{\text{ср}} + \eta}. \quad (78)$$

В формулах (77) и (78): $e_{в}$ – упругость водяного пара внутреннего воздуха, Па; $e_{н}$ – средняя упругость водяного пара наружного воздуха, Па, за годовой период, определяемая по [8], E – упругость водяного пара в плоскости конденсации за годовой период эксплуатации, определяемая как

$$E = \frac{E_1z_1 + E_2z_2 + E_3z_3}{12}, \quad (79)$$

z_1, z_2, z_3 – продолжительность в месяцах зимнего, весеннего и летнего периодов, определяемая по [3] с учетом того, что к зимнему периоду относятся месяцы со средними температурами воздуха ниже -5°C , к весенне-осеннему – месяцы со средними температурами от -5°C до $+5^{\circ}\text{C}$, к летнему – месяцы со средними температурами выше $+5^{\circ}\text{C}$; E_1, E_2, E_3 – упругости водяного пара, Па, принимаемые по температуре в плоскости возможной конденсации, определяемые при средней температуре наружного воздуха соответственно зимнего, весенне-осеннего и летнего периодов; $R_{пн}$ – сопротивление паропроницанию, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$, части ограждающей конструкции, расположенной между наружной поверхностью и плоскостью возможной конденсации; z_0 – продолжительность в сутках периода влагонакопления, принимаемая равной периоду с отрицательными среднемесячными температурами наружного воздуха; E_0 – упругость водяного пара, Па, в плоскости возможной конденсации, определяемая при средней температуре наружного воздуха периода месяцев с отрицательными зимними температурами; γ_{ω} – плотность материала увлажняемого слоя, $\text{кг}/\text{м}^3$, принимаемая равной γ_0 по [1, прил. 3*]; δ_{ω} – толщина увлажняемого слоя ограждающей конструкции, м, принимаемая равной $2/3$ толщины однослойной стены или толщине теплоизоляционного слоя многослойной конструкции; $\Delta\omega_{\text{ср}}$ – предельно допустимое приращение расчетного массового отношения влаги в материале увлажняемого слоя, %, за период влагонакопления z_0 , принимаемое по [1, табл. 14*].

$$\eta = \frac{2,4(E_0 - e_{но})z_0}{R_{пн}}, \quad (80)$$

где $e_{но}$ – средняя упругость водяного пара наружного воздуха, Па, периода с отрицательными среднемесячными температурами.

Сопротивление паропроницанию чердачного покрытия или части конструкции вентилируемого покрытия, расположенной между внутренней поверхностью покрытия и воздушной прослойкой в зданиях со скатами кровли шириной до 24 м, должно быть не менее требуемого сопротивления $R_{п}^{\text{тп}}$, определяемого по формуле

$$R_{п}^{\text{тп}} = 0,0012(e_{в} - e_{но}), \quad (81)$$

где $e_{в}$ и $e_{но}$ – то же что и в формулах (78) – (80).

Для помещений с сухим и нормальным влажностным режимом не требуется определять сопротивление паропроницанию однородных, а также двухслойных наружных стен, если внутренний слой стены имеет сопротивление паропроницанию более $1,6 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$.

Для защиты от увлажнения теплоизоляционного слоя в покрытиях зданий с влажным и мокрым режимами следует предусматривать пароизоляцию, располагая ее ниже утеплителя и учитывая ее при определении сопротивления паропрооницанию покрытия.

Пример 20. Выполнить расчет сопротивления паропрооницанию невентилируемого совмещенного покрытия производственного здания с $t_{в} = 16 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_{в} = 60 \%$ для условий г. Мурманска. Конструкция покрытия приведена на рис. 21. В результате расчета установить необходимость устройства пароизоляции и выбрать ее конструкцию. Устанавливаем данные, необходимые для выполнения расчета.

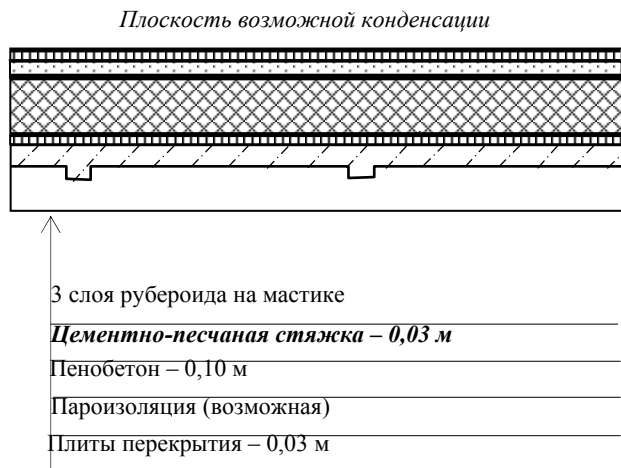


Рис. 21 Схема совмещенного невентилируемого покрытия

Решение. В соответствии с [1, табл. 1] в здании обеспечивается нормальный влажностный режим, района строительства по [1, прил. 1*] относится к влажной зоне и, следовательно, условия эксплуатации конструкций по [1, прил. 2] – Б. Теплофизические характеристики материалов слоев покрытия принимаем по [13, прил. 3]: железобетон – $\gamma_{ж} = 2500 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_{ж} = 2,04 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$; $\mu_{ж} = 0,03 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$; пенобетон $\gamma_{п} = 1000 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_{п} = 0,47 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$; $\mu_{п} = 0,11 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$; цементно-песчаная стяжка – $\gamma_{ст} = 1800 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_{ст} = 0,93 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{C)}$; $\mu_{ст} = 0,09 \text{ мг/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па)}$.

Определяем требуемые сопротивления $R_{п1}^{тп}$ и $R_{п2}^{тп}$. Для этого находим значения всех величин, входящих в формулы (77) и (78).

По формуле (76) $e_{в} = 0,01\varphi_{в}\cdot E_{в} = 0,01 \times 60 \times 1817 = 1090 \text{ Па}$. Здесь $E_{в}$ определена по табл. П.1 для $t_{в} = 16 \text{ }^{\circ}\text{C}$. $e_{н} = (2,5 + 2,6 + 3,0 + 4,3 + 5,5 + 8,0 + 10,3 + 10,6 + 8,1 + 5,8 + 4,3 + 3,3) / 12 = 5,7 \text{ ГПа}$ – согласно [3, прил. 3].

Для расчета по формуле (79) величины E определяем по [2] продолжительность периодов z_1, z_2, z_3 и средние за эти периоды температуры наружного воздуха.

К зимнему периоду в данном случае относятся I, II, III и XII месяцы, к весенне-осеннему – IV, V, X, XI, к летнему – VI, VII, VIII, IX. Тогда $z_1 = 4, z_2 = 4, z_3 = 4$ и $t_{н\text{ ср } z_1} = (-10 - 10,1 - 7 - 8,3) / 4 = -9,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{н\text{ ср } z_2} = (-1,7 + 3,1 + 0,2 - 4,7) / 4 = -0,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{н\text{ ср } z_3} = (8,4 + 12,4 + 10,8 + 6,3) / 4 = 9,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для определения E_1, E_2, E_3 , входящих в формулу (79), находим сопротивление теплопередаче R_0 и в соответствии с формулой (48) вычисляем температуры в плоскости возможной конденсации (верхняя поверхность утеплителя) при средних температурах наружного воздуха периодов $t_{н\text{ ср } z}$

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_{в}} + \frac{1}{\alpha_{н}} + \frac{\delta_{ж}}{\lambda_{ж}} + \frac{\delta_{ут}}{\lambda_{ут}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} =$$

$$= \frac{1}{8,7} + \frac{1}{23} + \frac{0,03}{2,04} + \frac{0,10}{0,47} + \frac{0,02}{0,93} = 0,41 \text{ м}^2 \cdot \text{C/Вт};$$

$$\begin{aligned}\tau_{z1} &= t_B - \frac{t_B - t_{н\text{ср}z}}{R_0} \left(\frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_{ж}}{\lambda_{ж}} + \frac{\delta_{yt}}{\lambda_{yt}} \right) = \\ &= 16 - \frac{16 - (-8,5)}{0,41} \left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,03}{2,04} + \frac{0,10}{0,47} \right) = -4,32 \text{ } ^\circ\text{C}; \\ \tau_{z2} &= 16 - \frac{16 - (-0,8)}{0,41} 0,34 = 2,07 \text{ } ^\circ\text{C}; \\ \tau_{z3} &= 16 - \frac{16 - 9,8}{0,41} 0,34 = 10,86.\end{aligned}$$

По табл. П.1 для значений τ_{zi} находим $E_1 = 425$ Па, $E_2 = 710$ Па, $E_3 = 1300$ Па.

Тогда $E = (425 \times 4 + 710 \times 4 + 1300 \times 4) / 12 = 817$ Па.

По [2] определяем период влагонакопления z_0 за месяцы со среднемесячными отрицательными температурами и температуру $t_{н\text{ср}z_0}$. К периоду влагонакопления относятся I – IV, XI и XII месяцы. Тогда $z_0 = 30 \times 6 = 180$ сут., $t_{н\text{ср}z_0} = (-10 - 10,1 - 7 - 1,7 - 4,7 - 8,3) / 6 = -7,0$ °C.

Аналогично предыдущему вычисляем упругость водяного пара E_0 в плоскости возможной конденсации при средней температуре наружного воздуха $t_{н\text{ср}z_0}$.

$$\tau_{z_0} = 16 - \frac{16 - (-7,0)}{0,41} 0,34 = -3,07 \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ по табл. П.7 } E_0 = 473 \text{ Па.}$$

По [1, табл. 14] находим $\Delta\omega_{ср} = 6$ %. По [3] определяем среднюю упругость водяного пара наружного воздуха за период с отрицательными среднемесячными температурами $e_{н\text{ю}} = (2,5 + 2,6 + 3 + 4,3 + 4,3 + 3,3) / 6 = 3,3$ ГПа. По [1, прил. 11*] определяем $R_{пн}$, равное сумме сопротивлений паропрооницанию трех слоев рубероида на мастике $R_{пн,руб} = 1,1 \times 3 = 3,3$ м²·ч·Па/мг, $R_{пн} = 3,63$ м²·ч·Па/мг.

По формуле (80) вычисляем

$$\eta = \frac{2,4(473 - 330)180}{3,63} = 17018.$$

По формулам (77) и (78) находим

$$\begin{aligned}R_{п1}^{тп} &= \frac{(1090 - 817)3,3}{817 - 570} = 4,02 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}, \\ R_{п2}^{тп} &= \frac{2,4 \cdot 180 \cdot (1090 - 817)}{1000 \cdot 1000 \cdot 0,10 \cdot 6 + 17018} = 0,43 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}.\end{aligned}$$

Вычисляем сопротивление паропрооницанию части покрытия от внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации

$$R_{п} = \frac{\delta_{ж}}{\mu_{ж}} + \frac{\delta_{yt}}{\mu_{yt}} = \frac{0,03}{0,03} + \frac{0,10}{0,11} = 1,91 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}.$$

Из сравнения сопротивления $R_{п1}$ с $R_{п2}^{тп}$ видно, что накопление влаги в конструкции за период с отрицательными среднемесячными температурами наружного воздуха не превышает допустимой нормы, но так как $R_{п} < R_{п1}^{тп}$ влага, накопленная в конструкции за этот период, не сможет полностью удалиться из нее за время с положительными температурами наружного воздуха.

Таким образом, в процессе эксплуатации в утеплителе покрытия будет систематически из года в год накапливаться влага, что приведет в последующем к понижению теплозащитных свойств утеплителя и к разрушению стяжки и рулонного ковра покрытия. Для уменьшения влагонакопления необходимо ограничить поступление влаги в утеплитель из воздуха помещения путем устройства пароизоляционного слоя по плите покрытия. Сопротивление пароизоляции должно быть не менее $R_{п1}^{тп} - R_{п} = 4,02 - 1,91 = 2,11$ м²·ч·Па/мг. В соответствии с данными [1, прил. 11*] принимаем пароизоляцию из двух слоев рубероида с $R_{п} = 2,2$ м²·ч·Па/мг.

Пример 21. Выполнить расчет сопротивления паропрооницанию вентилируемого совмещенного покрытия производственного здания

$t_{в} = 16 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\varphi_{в} = 60 \%$ для условий г. Мурманска. Конструкция покрытия приведена на рис. 22. В результате расчета установить необходимость устройства пароизоляции.



Рис. 22 Схема совмещенного вентилируемого покрытия

Все исходные данные, необходимые при расчете, даны в предыдущем примере.

Решение

По формуле (81) определяем требуемое сопротивление паропрооницанию

$$R_{п}^{тp} = 0,0012(1090 - 330) = 0,91 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}.$$

В формуле (81) значения $e_{в}$ и $e_{нo}$ приняты по данным примера 20.

Необходимо, чтобы сопротивление паропрооницанию плиты перекрытия и утеплителя было больше, чем $R_{п1}^{тp}$.

$$R_{п} = \frac{\delta_{ж}}{\mu_{ж}} + \frac{\delta_{ут}}{\mu_{ут}} = \frac{0,03}{0,03} + \frac{0,10}{0,11} = 1,91 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}.$$

Так как $R_{п} = 1,91 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг} > R_{п1}^{тp} = 0,91 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$ в конструкции не нужно устраивать дополнительную пароизоляцию.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП II-3-79*. Строительная теплотехника / Минстрой России. М.: ГУП ЦПП, 1996. 29 с.
2. СНиП 23-01.-99. Строительная климатология / Госстрой России. М.: ГУП ЦПП, 2000. 57 с.
3. СНиП 2.01.01.-82. Строительная климатология и геофизика. М.: Стройиздат, 1983. 136 с.
4. СП 23-101.-2000 Проектирование тепловой защиты зданий / Госстрой России. М.: ГУП ЦПП, 2001. 96 с.
5. СН 245-71. Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий. М.: Стройиздат, 1972. 97 с.
6. Расчет и проектирование ограждающих конструкций зданий / НИИ строит.физики. М.: Стройиздат, 1980.
7. Ильинский В.М. Строительная теплофизика. М.: Высшая школа, 1974. 319 с.
8. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: Стройиздат, 1973. 287 с.

**П.1 Значения максимальной упругости водяного пара E , Па
в зависимости от температур воздуха**

Темп ера- тура t , °С	Максимальная упругость водяного пара E , Па									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
35	5624	5654	5685	5717	5749	5781	5813	5845	5877	5909
34	5320	5349	5378	5409	5440	5469	5500	5530	5561	5592
33	5030	5058	5088	5116	5144	5173	5202	5232	5261	5290
32	4754	4782	4808	4836	4864	4890	4918	4946	4974	5002
31	4493	4518	4544	4570	4596	4622	4648	4673	4701	4728
30	4242	4268	4292	4317	4341	4366	4390	4416	4441	4466
29	4005	4029	4052	4076	4100	4122	4146	4170	4194	4218
28	3780	3801	3824	3846	3869	3890	3913	3936	3960	3982
27	3565	3586	3608	3628	3649	3672	3693	3714	3736	3758
26	3361	3381	3401	3421	3441	3461	3482	3502	3523	3544
25	3168	3186	3205	3224	3244	3263	3283	3301	3321	3341
24	2984	3001	3020	3038	3056	3074	3093	3112	3130	3149
23	2809	2826	2842	2860	2877	2894	2913	2930	2940	2962
22	2644	2660	2676	2692	2709	2725	2742	2758	2776	2793
21	2486	2502	2517	2533	2548	2564	2580	2596	2612	2628
20	2338	2352	2366	2381	2395	2410	2426	2441	2456	2486
19	2197	2210	2224	2238	2252	2266	2280	2294	2312	2325
18	2064	2076	2089	2102	2116	2142	2142	2156	2169	2182
17	1937	1949	1961	1974	1986	2000	2013	2025	2037	2050
16	1817	1829	1841	1853	1865	1877	1889	1901	1913	1925
15	1705	1716	1727	1739	1749	1760	1772	1783	1796	1806
14	1598	1608	1619	1629	1640	1651	1661	1672	1683	1694
13	1497	1507	1517	1527	1537	1547	1557	1567	1577	1588
12	1403	1412	1421	1431	1440	1449	1459	1468	1477	1487
11	1312	1321	1330	1339	1348	1357	1366	1375	1384	1393
10	1228	1236	1244	1252	1261	1269	1277	1286	1295	1304

Продолжение табл. П.1

Темп ера- тура t , °С	Максимальная упругость водяного пара E , Па									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

