

ГЛАВА 5. ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТЬ ОГРАЖДЕНИЙ И ПОМЕЩЕНИЙ

Тепловой режим помещения определяется не только поступлениями или потерями теплоты через наружные ограждения, работой отопительно-охладительных и вентиляционных систем, бытовыми и технологическими тепловыделениями, но также теплофизическими свойствами ограждений, мебели и оборудования. Источники и стоки теплоты имеют обычно периодический характер и могут быть представлены в виде повторяющихся колебаний, поэтому и тепловой режим помещения часто является периодически изменяющимся. Системой кондиционирования микроклимата могут ассимилироваться избытки теплоты, компенсироваться ее потери и поддерживаться относительное постоянство температуры помещения. В помещениях, где температура не регулируется, под влиянием колебаний поступлений и потерь теплоты происходят заметные периодические изменения температуры, определяемые как характером тепловыделений, так и теплоустойчивостью помещения. Отклонения тепловыделений от средних значений приводят к колебаниям температуры воздуха и поверхностей.

5.1 Показатели теплоусвоения и теплопоглощения

Свойство поверхности ограждения в большей или меньшей степени воспринимать теплоту при периодических колебаниях теплового потока или температуры воздуха называется *теплоусвоением*.

Отношение величины амплитуды колебания теплового потока A_q к величине амплитуды колебания температуры внутренней поверхности ограждения A_t называется *коэффициентом теплоусвоения* внутренней поверхности ограждения Y_v , т.е.

$$Y_v = \frac{A_q}{A_t}. \quad (5.1)$$

Коэффициент Y_v зависит от периода колебания температуры или теплового потока T и от теплофизических характеристик материала ограждения и является важной характеристикой ограждения в отношении воздействия на него периодических колебаний температуры или теплового потока. Чем больше будет величина коэффициента теплоусвоения внутренней поверхности ограждения Y_v при одной и той же величине A_q , тем

меньше будет амплитуда колебания температуры A_T на внутренней поверхности.

В средней части однородного слоя достаточно большой толщины, где практически не сказывается влияние условий на поверхности, коэффициент теплоусвоения зависит только от свойств материала слоя. В пределах этой части (ее называют зоной «регулярных» колебаний) величина Y равна коэффициенту теплоусвоения материала S , Вт/(м²·К). Величина S связана с другими теплофизическими характеристиками материала зависимостью

$$S = \sqrt{2\pi\lambda c\rho/T}, \quad (5.2)$$

При $T=24$ ч

$$S = 0,51\sqrt{\lambda c\rho}. \quad (5.3)$$

При $T=12$ ч численный коэффициент в формуле (5.3) равен 0,72.

Таким образом, по мере удаления от поверхности колебания в толще стремятся к «регулярным», т.е. таким, какими они были бы в бесконечной толще.

Слой материала около поверхности, в котором происходит переход к регулярным колебаниям, называют активным. Его толщину определяют с помощью характеристики тепловой инерции (или условной толщины) слоя D_n . Характеристика D_n величина безразмерная и равная

$$D_n = R_n S_n, \quad (5.4)$$

где R_n – термическое сопротивление слоя, К·м²/Вт;

S_n – удельный коэффициент теплоусвоения материала слоя, Вт/(м²·К).

Слоем резких колебаний принято считать слой, для которого $D=1,0$ и толщина равна

$$\delta = \frac{\lambda}{S}. \quad (5.5)$$

Слой меньшей толщины называют «тонким», а большей «толстым».

Характеристику тепловой инерции D используют для оценки теплоустойчивости ограждения и называют показателем тепловой массивности

ограждения. Величина D для многослойного ограждения равна сумме D_n его отдельных материальных слоев

$$D = \sum D_n = \sum R_n S_n. \quad (5.6)$$

При определении характеристик теплоусвоения удобнее нумеровать слои в направлении распространения температурной волны (рис. 5.1).

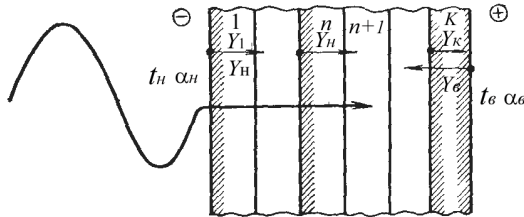


Рис. 5.1 – Расположение, нумерация слоев и порядок определения характеристик теплоусвоения в многослойных ограждениях.

При расчете коэффициента теплоусвоения в многослойных ограждениях учитывают только активную часть ограждения, которую захватывает слой резких колебаний ($D = 1,0$).

При определении Y_n произвольного сечения n в ограждении могут встретиться следующие характерные случаи (на примере передачи температурных колебаний в сторону помещения).

1) Условная толщина однородного материального слоя n от заданного сечения n в конструкции ограждения равна или больше 1, т.е. $D_n \geq 1$, тогда

$$Y_n = S_n. \quad (5.7)$$

Обозначение слоя и сечения, от которого он начинается, принято одинаковым.

2) Слой резких колебаний захватывает второй от заданной поверхности материальный слой, т.е. только $D_n + D_{n+1} \geq 1$, тогда

$$Y_n = \frac{R_n S_n^2 + S_{n+1}}{1 + R_n S_{n+1}}. \quad (5.8)$$

3) Если слой резких колебаний захватывает третий, четвертый слой и т.д., т.е. $D_n + D_{n+1} < 1$, тогда необходимо учесть влияние на Y_n всех материальных слоев, которые захвачены резкими колебаниями. В этом случае

$$Y_n = \frac{R_n S_n^2 + Y_{n+1}}{1 + R_n Y_{n+1}}, \quad (5.9)$$

где Y_{n+1} – коэффициент теплоусвоения части ограждения, начиная от поверхности $n+1$ материального слоя. Эта величина должна быть так же определена, как Y_n , по формуле (5.9) с заменой индексов n на $n+1$, а $n+1$ на $n+2$ в зависимости от того, сколько материальных слоев от сечения $n+1$ захватывает слой резких колебаний.

4) Условная толщина всего ограждения меньше единицы, т.е. $\sum D_n < 1$. Расчет ведут так же, как в третьем случае, а коэффициент теплоусвоения последнего k материального слоя в ограждении определяют как

$$Y_k = \frac{R_k S_k^2 + \alpha_g}{1 + R_k \alpha_g}, \quad (5.10)$$

где α_g – коэффициент теплообмена на внутренней поверхности ограждения, который численно равен коэффициенту теплоусвоения внутренней поверхности ограждения при распространении температурной волны в сторону помещения.

5) Если ограждение целиком или отдельный слой ограждения практически не обладает тепловой инерцией (например, окно, воздушная прослойка в ограждении), то коэффициент теплоусвоения для них равен

$$Y_n = \frac{Y_{n+1}}{1 + R_n Y_{n+1}}, \quad (5.11)$$

где Y_{n+1} в случае окна равен α_g , а в случае воздушной прослойки – коэффициенту теплоусвоения поверхности слоя, следующего за воздушной прослойкой.

6) Если ограждение подвержено с обеих сторон воздействию периодических температурных колебаний (внутренние конструкции, перегородки, междуэтажные перекрытия) и условная его толщина меньше двух, т.е. $\sum D_n < 2$, то его делят на две части с одинаковыми условными толщи-

нами. Расчет теплоусвоения ведут с каждой поверхности до слоя m , в пределах которого прошла граница раздела – ось тепловой симметрии. Для поверхности слоя m коэффициент Y_m определяют по общей формуле (5.9), считая на оси симметрии коэффициент теплоусвоения равным нулю, поэтому

$$Y_m = \frac{R_m S_m^2 + 0}{1 + R_m 0} = R_m S_m^2, \quad (5.12)$$

где S_m – коэффициент теплоусвоения материала слоя, через который прошла граница раздела; R_m – термическое сопротивление части слоя m до оси симметрии.

В случае, когда слой состоит из нескольких материальных включений, в расчетах следует пользоваться условным коэффициентом теплоусвоения, считая его равным средневзвешенной величине по площадям отдельных включений.

Коэффициент теплоусвоения Y связывает колебания температуры внутренней поверхности ограждения с колебаниями теплового потока, поступающего на эту поверхность, а характеристикой, связывающей колебания теплового потока с колебаниями температуры внутреннего воздуха помещения является *коэффициент теплопоглощения ограждения B* .

Коэффициент теплопоглощения B равен отношению амплитуды колебания теплового потока A_q , проходящего через поверхность ограждения, к вызвавшей этот поток амплитуде колебания $A_{тв}$ температуры окружающей поверхность среды и он определяется по соотношению

$$B = \frac{A_q}{A_{тв}} = \frac{1}{\frac{1}{Y_1} + \frac{1}{\alpha_г}}, \quad (5.13)$$

где $Y_1 = \frac{A_q}{A_{тг}}$ – коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности ограждения;

$\alpha_г$ – коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности.

Уравнение (5.2) можно представить в виде зависимости между сопротивлениями теплопоглощению, теплоусвоению и теплоотдачи

$$\frac{1}{B} = \frac{1}{Y_1} + \frac{1}{\alpha_s}. \quad (5.14)$$

Следовательно, при поглощении теплоты поверхностью от воздуха необходимо преодолеть сначала сопротивление теплоотдачи, а затем сопротивление теплоусвоению.

Коэффициент теплопоглощения заполнений световых проемов определяется по формуле

$$B = \frac{1}{1,08R_T}, \quad (5.15)$$

где R_T – сопротивление теплопередаче заполнений световых проемов, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

5.2 Расчет теплоустойчивости наружных ограждений

Теплоустойчивость наружного ограждения – это его способность больше или меньше изменять температуру внутренней поверхности при колебаниях температуры воздуха в помещении или температуры наружного воздуха. Чем меньше изменение температуры внутренней поверхности ограждения при определенной амплитуде колебания температуры воздуха, тем оно более теплоустойчиво.

Наиболее распространен случай теплопередачи через ограждение, когда температура наружного воздуха изменяется, а температура внутреннего воздуха постоянна (рис. 5.2).

При правильных гармонических колебаниях температура наружного воздуха t_n изменяется около своего среднего значения $t_{n.o.}$ с периодом T так, что в любой момент времени z , ч, ее величина равна

$$t_n = t_{n.o.} + A_{t_n} \cos \frac{2\pi}{T} z, \quad (5.16)$$

где A_{t_n} – максимальное отклонение температуры от ее среднего значения или амплитуда колебания температуры наружного воздуха.

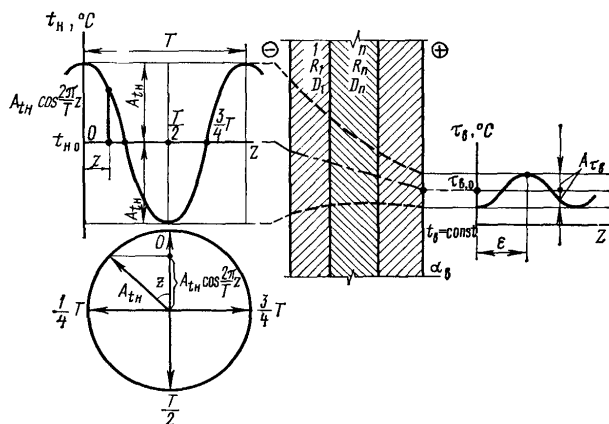


Рис. 5.2 – Затухание температурных колебаний в ограждении (к инженерному методу решения).

Первое слагаемое в формуле (5.16) неизменно во времени, а второе определяет отклонение во времени t_n от $t_{н.о.}$. В принятой форме математической записи эти изменения происходят по косинусоиде, для которой начало отсчета времени $z = 0$ совпадает с началом периода T или в общем виде с началом произвольного периода nT (где $n=0, 1, 2, 3, \dots$). Можно принять начало отсчета времени на ϵ , ч, раньше или позднее начала периода. Тогда изменение температуры определится уравнением

$$t_n = t_{н.о.} + A_{t_n} \cos \frac{2\pi}{T}(z \pm \epsilon). \quad (5.17)$$

Знак минус соответствует случаю, когда колебания запаздывают во времени и начало времени отсчета оказывается позже на ϵ , ч, начала периода.

Второе слагаемое, характеризующее изменение температуры, для дальнейших рассмотрений удобно представлять в векторной форме. Его величина может быть определена как проекция на вертикальную ось вектора, вращающегося против часовой стрелки около начала координат (см. рис.5.2). Размер радиуса-вектора (модуль) равен амплитуде колебания A_{t_n} , угол (аргумент) отклонению во времени z . Если начало отсчета времени z совпадает с началом периода (5.16), то значению $z = 0$ соответствует

вертикальное положение вектора, когда $\cos \frac{2\pi}{T} = 1$, а его проекция равна $A_{t_n} \cos 0 = A_{t_n}$.

Когда вектор отклоняется на четверть периода ($z=T/4$), то $\cos \frac{2\pi}{T} \frac{T}{4} = 0$ и проекция вектора также будет равна нулю. Спустя полпериода ($z = T/2$), проекция вектора будет равна A_{t_n} , при $z=3T/4$ — нулю и, наконец, при $z = T$ снова A_{t_n} . Вектор вернулся в исходное положение, и начинается новый период, в котором повторяются все положения вектора. Если начало отсчета сдвинуто на минус ϵ , ч (5.17), от начала периода и не совпадает с ним во времени или, как принято говорить по фазе, то в момент $z = 0$ вектор находится на ϵ/T периода от его начала и также вращается со скоростью один оборот за T , ч, проходя рассмотренные выше характерные положения с запаздыванием на ϵ , ч. Таким же образом могут быть описаны в виде формул и представлены в векторной форме правильные гармонические изменения температур, тепловых потоков и другие характеристики теплового процесса в любом сечении ограждения.

Колебания температуры наружного воздуха вызовут изменения тепловых потоков и температуры на поверхности и в толще ограждения. Эти изменения будут также правильными гармоническими колебаниями с периодом T .

Амплитуды колебаний температуры в толще ограждения уменьшаются по мере удаления от наружной поверхности. На некотором расстоянии в произвольном сечении x ограждения величина амплитуды A_{t_x} изменения температуры t_x будет в v_x раз меньше A_{t_n}

$$v_x = \frac{A_{t_n}}{A_{t_x}}. \quad (5.18)$$

Во времени (по фазе) колебания будут отставать от изменений температуры наружного воздуха на ϵ_x , ч. Если начало отсчета времени принять совпадающим с началом периода изменения t_n , то изменение температуры в сечении x будет определяться уравнением

$$t_x = t_{x0} + A_{t_x} \cos \frac{2\pi}{T} (z - \epsilon_x), \quad (5.19)$$

где t_{x0} – среднее за период значение температуры в сечении x .

Наряду с температурой изменяются величины тепловых потоков. Они также изменяются около среднего значения по закону косинуса, имея амплитуду A_q .

При расчетах затухания колебаний температуры наружного воздуха особенно важно определить изменение температуры на внутренней поверхности ограждения τ_b . Изменение τ_b подчиняется уравнению

$$\tau_b = \tau_{b0} + A_{\tau_b} \cos \frac{2\pi}{T} (z - \varepsilon), \quad (5.20)$$

где $A_{\tau_b} = A_{t_n} / \nu$.

Для расчета τ_b в уравнении (5.20) имеются неизвестные величины τ_{b0} , ν и ε .

Средние значения величин в периодическом тепловом процессе определяются формулам стационарной теплопередачи, поэтому в формуле (5.20) средняя за период температура внутренней поверхности τ_{b0} равна

$$\tau_{b0} = t_b - \frac{R_b}{R_0} (t_b - t_{n.0}). \quad (5.21)$$

Показатель сквозного затухания многослойного ограждения можно определить в виде произведения

$$\nu = \nu_n \dots \nu_1 \nu_2 \dots \nu_{e.n} \dots \nu_n \dots \nu_k, \quad (5.22)$$

где ν_n – показатель затухания при переходе от наружного воздуха к наружной поверхности ограждения; $\nu_{e.n}$ – то же, в воздушной прослойке; $\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n$ – то же, в отдельных материальных слоях; ν_k – то же, в последнем слое ограждения, граничащем с внутренним воздухом.

Показатели затухания ν_n и $\nu_{e.n}$ рассчитывают по формулам

$$\nu_n = 1 + Y_1 R_n, \quad (5.23)$$

$$\nu_{e.n} = 1 + Y_{e.n} R_{e.n}, \quad (5.24)$$

где R_n и $R_{в.п.}$ – сопротивление теплообмену на наружной поверхности и сопротивление теплопередаче воздушной прослойки;

Y_n и $Y_{в.п.}$ – коэффициенты теплоусвоения наружной поверхности ограждения и поверхности слоя после воздушной прослойки.

Для произвольной поверхности слоя n в толще ограждения u_n равно

$$v_n = e^{\frac{R_n S_n}{\sqrt{2}} \frac{S_n + Y_{n+1}}{S_n + Y_n}}, \quad (5.25)$$

где R_n и S_n – сопротивление теплопроводности слоя n и коэффициент теплоусвоения материала этого слоя;

Y_n и Y_{n+1} – коэффициенты теплоусвоения поверхностей слоев n и $n+1$ (со стороны движения волны).

Когда слой n «толстый», т.е. $R_n S_n > 1$, то $Y_n = S_n$ и формула (5.25) принимает вид

$$v_n = e^{\frac{R_n S_n}{\sqrt{2}} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{Y_{n+1}}{S_n} \right)}. \quad (5.26)$$

Если слой n расположен в зоне «регулярных» колебаний, то $Y_{n+1} = Y_n = S_n$ и

$$v_n = e^{R_n S_n / \sqrt{2}}. \quad (5.27)$$

Имея в виду, что $e^{1/\sqrt{2}} = e^{0,7} = 2,02 \approx 2$ и $R_n S_n = D_n$, уравнение (5.27) можно записать в виде

$$v_n \approx 2^{D_n}. \quad (5.28)$$

Последняя запись удобна для практических расчетов. Из формулы (5.28) видно, что амплитуда колебаний уменьшается в два раза в пределах слоя, условная толщина D которого равна 1. Поэтому если расстояние измерять в условных толщинах, то в пределах каждой единицы толщины амплитуда будет уменьшаться в два раза, как это показано на рис. 5.3. В этом смысле D является показателем «полузатухания» колебаний.

Некоторая особенность есть в опреде-

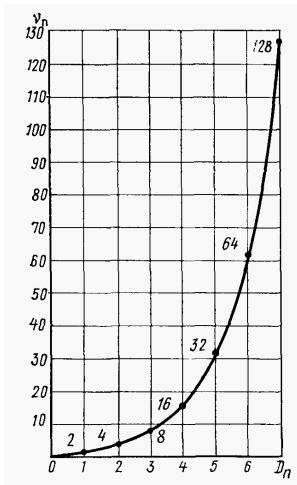


Рис. 5.3 – Затухание u_n в зоне регулярных колебаний.

лении v_k для последнего по ходу волны слоя k , граничащего с внутренним воздухом; v_k равен

$$v_k = e^{\frac{R_k S_k}{\sqrt{2}}} \frac{S_k + \alpha_g}{S_k + Y_k}. \quad (5.29)$$

Для многослойной конструкции уравнение для определения u удобно представить в виде

$$v = e^{\sum RS / \sqrt{2}} \varphi, \quad (5.30)$$

где φ – коэффициент, учитывающий увеличение затухания в реальном ограждении по сравнению с затуханием в слое «регулярных колебаний такой же условной толщины.

Из рассмотренных уравнений (5.22) – (5.25) и (5.29) можно получить множитель φ в виде

$$\varphi = 0,9(1 + Y_1 R_n)(1 + Y_{e,n} R_{e,n}) \frac{S_1 + Y_2}{S_1 + Y_1} \cdot \frac{S_2 + Y_3}{S_2 + Y_2} \dots \frac{S_n + Y_{n+1}}{S_n + Y_n} \dots \frac{S_k + \alpha_g}{S_k + Y_k}. \quad (5.31)$$

Поправочный коэффициент 0,9 в формуле (5.31) приближенно учитывает несовпадение по фазе колебаний, характеристики которых в рассматриваемом здесь решении складываются, делятся и перемножаются без учета этого несовпадения.

Формула (5.31) приближенная, но в то же время довольно сложная.

Рассмотрим возможные пути упрощения решения (5.31). Многослойную конструкцию можно заменить эквивалентной по тепловым свойствам (по величине D и $\sum R$) однородной конструкцией. Для однородной конструкции формулу для φ можно написать в виде

$$\varphi = 0,9(1 + SR_n) \left(\frac{S + 1/R_g}{2S} \right) = 0,45 \left(1 + SR_n + \frac{1}{SR_g} + \frac{R_n}{R_g} \right). \quad (5.32)$$

Для эквивалентной однослойной конструкции $S = D / \sum R$ ($\sum R$ – сумма сопротивлений теплопроводности слоев, а D характеристика тепловой инерции многослойного ограждения). При нормативных значениях $R_{в} = 0,115$ и $R_{н} = 0,04$ формула (5.32) преобразуется к виду

$$\varphi \approx 0,83 + 3,5 \frac{\sum R}{D}. \quad (5.33)$$

Формула (5.33) является приближенной для многослойных ограждений, т.к. в ней не учитывается чередование слоев с разными теплофизическими свойствами. На каждом переходе к слою с большим теплоусвоением происходит дополнительное к подсчитанному по упрощенной формуле затухание колебаний. При расчете теплоустойчивости многослойного ограждения важно учитывать взаимное расположение только двух основных (теплозащитного и конструктивного слоев).

Зависимость от расположения слоев можно учесть введением в формулу (5.33) поправочного коэффициента $\gamma_{сл}$.

Сопоставим двухслойное ограждение с однослойным, значения D и $\sum R$ которых равны. Для упрощения считаем слои ограждений толстыми.

Поправочный коэффициент $\gamma_{сл}$ равен отношению коэффициентов затухания $u_{2сл}/u_{1сл}$ сравниваемых ограждений. Принимая в расчет приближенные выражения (5.28), (5.30), (5.31), получим

$$\gamma_{сл} = \frac{\gamma_{2сл}}{\gamma_{1сл}} \approx \frac{2^D \frac{S_1 + S_2}{2S_1}}{2^D} = 0,5 + 0,5 \frac{S_2}{S_1}. \quad (5.34)$$

Для реальных конструкций, как показывают контрольные расчеты, более приемлемым является аналогичное (5.34) выражение с несколькими численными коэффициентами, а именно

$$\gamma_{сл} = 0,85 + 0,15 \frac{S_2}{S_1}, \quad (5.35)$$

где S_1 и S_2 – коэффициенты теплоусвоения этих двух основных слоев по ходу тепловой волны.

Воздушную прослойку в ограждении нужно учитывать отдельно. Затухание колебаний происходит в слое воздуха, и, кроме того, воздушная прослойка влияет на затухание в слое, расположенном перед ней. В формулу (5.30) нужно ввести дополнительный коэффициент $\gamma_{в.п.}$, учитывающий влияние прослойки.

Так же как и для γ_{cl} , значение поправочного коэффициента $\gamma_{в.п}$ определим из сопоставления двух эквивалентных ограждений: с воздушной прослойкой между толстыми слоями и однородного при равных значениях D и $\sum R$. Отношение $v_{в.п,2cl}$ к v_{1cl} таких ограждений определит значение $\gamma_{в.п}$. Воспользуясь приближенными формулами для ограждения с толстыми слоями, получим

$$\gamma_{в.п.} = \frac{v_{в.п,2cl}}{v_{1cl}} \approx 1 + 0,5R_{в.п.} \frac{D}{\sum R}. \quad (5.36)$$

Формула для приближенного определения v многослойного ограждения окончательно может быть записана в виде

$$v \approx 2^D \left(0,83 + 3,5 \frac{\sum R}{D} \right) \gamma_{cl} \gamma_{в.п.} \quad (5.37)$$

Запаздывание сквозного проникания колебаний во времени для многослойного ограждения может быть также определено по приближенной формуле

$$\varepsilon = \varepsilon_{пов} + \sum \varepsilon_n + \varepsilon_{в.п.} \quad (5.38)$$

Слагаемое $\sum \varepsilon_n$ соответствует запаздыванию колебаний при прохождении n материальных слоев толщи ограждения. Зависимость для определения $\sum \varepsilon_n$, ч, как аргумента имеет вид

$$\sum \varepsilon_n = \frac{T}{2\pi\sqrt{2}} \sum RS = 0,113T \sum RS. \quad (5.39)$$

Эта формула дает точный результат только для ограждений, где все материальные слои толстые, для других ограждений она является приближенной.

Величина $\varepsilon_{пов}$ учитывает сдвиг по фазе, который происходит при переходе колебаний от наружного воздуха к поверхности и от внутренней поверхности к воздуху помещения, приближенно $\varepsilon_{пов}$ равно

$$\varepsilon_{нов} = \left(\operatorname{ractg} \frac{1}{1 + \frac{\alpha_n}{Y_1} \sqrt{2}} - \operatorname{arctg} \frac{1}{1 + \frac{Y_{нов}}{\alpha_g} \sqrt{2}} \right) \frac{T}{360} =$$

$$= \left[B \left(\frac{\alpha_n}{Y_1} \right) - B \left(\frac{Y_{нов}}{\alpha_g} \right) \right] T \quad (5.40)$$

где $Y_{пов}$ – коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности ограждения при противоположном направлении движения волны из помещения.

В постановке задачи принято условие $t_b = \text{const}$. При этом условии передача колебаний через ограждение ускоряется, что учитывается составляющей со знаком минус по формуле (5.40). Значения функции $B(a/b)$ в (5.40) можно определить по следующим данным:

a/b	0	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0
$B(a/b) \cdot 10^2$	12,5	8,43	6,25	4,1	2,38	1,29

Величина $\varepsilon_{пов}$ для реальных конструкций изменяется в небольших пределах: от 0,01Т до 0,06Т. Для инженерных расчетов эту величину можно принять постоянной, равной

$$\varepsilon_{нов} \approx -0,017T. \quad (5.41)$$

Запаздывание колебаний в воздушной прослойке $\varepsilon_{в.п}$ определяется по формуле

$$\varepsilon_{г.п} = \operatorname{arctg} \frac{1}{1 + \frac{1/R_{г.п}}{Y_{г.п}} \sqrt{2}} \frac{T}{360}, \quad (5.42)$$

где $Y_{в.п}$ – коэффициент, определенный для поверхности, следующей за воздушной прослойкой по направлению тепловой волны.

Величина $\varepsilon_{в.п}$ небольшая и ею можно пренебречь. Показатель запаздывания сквозного проникания колебаний σ, τ , таким образом, приближенно равен

$$\varepsilon \approx 0,113TD - 0,017T. \quad (5.43)$$

При $T=24$ ч формула (5.43) приобретает вид

$$\varepsilon \approx 2,7D - 0,4. \quad (5.44)$$

Фильтрация воздуха оказывает существенное влияние на температурные колебания в ограждении. Так, например, если в отсутствие фильтрации амплитуда колебаний в слое с условной толщиной $D = 6$ уменьшается более чем в 100 раз, то при скорости фильтрации 10 м/ч амплитуда уменьшается только в 12 раз.

Для ограждений с условной толщиной $D \geq 1$ при расходе воздуха $j < 5 \text{ м}^3/\text{ч}$ через 1 м^2 поверхности действие фильтрации с достаточной степенью точности может быть учтено введением в расчетную формулу для показателя затухания γ (5.37) множителя γ_ϕ , равного

$$\gamma_\phi = \exp\left(-\frac{cjR_0}{2}\right). \quad (5.45)$$

5.3 Расчет теплоустойчивости помещения

Помещение, оборудованное системой отопления периодического действия, необходимо рассчитывать на теплоустойчивость в отопительный период года.

Теплоустойчивость помещения – это его способность уменьшать колебания температуры внутреннего воздуха при колебаниях теплового потока от отопительных приборов. Чем меньше при прочих равных условиях будет амплитуда колебания температуры воздуха в помещении, тем оно будет более теплоустойчивым. В качестве допустимого предела принято, что амплитуда колебаний температуры внутреннего воздуха в течение суток A_B не должна превышать $\pm 3^\circ\text{C}$ от расчетного значения.

Колебания теплоотдачи нагревательного прибора оцениваются коэффициентом неравномерности теплоотдачи m , определяемым по соотношению

$$m = \frac{A_q}{Q_{cp}}, \quad (5.46)$$

где A_q – амплитуда колебания температуры прибора;

Q_{cp} – средняя теплоотдача прибора, Вт.

Значения m для некоторых систем отопления приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1

Коэффициент неравномерности теплоотдачи системы отопления

Система отопления	Коэффициент неравномерности теплоотдачи m
Центральное водяное	0,1
Паровое или нетеплоемкими печами:	
продолжительность подачи пара или топки печи – 18 ч, перерыв – 6 ч	0,8
то же – 12 ч, “ – 12 ч	1,4
то же – 6 ч, “ – 18 ч	2,2
Поквартирное водяное (продолжительность топки – 6 ч)	1,5
Печное теплоемкими печами при топке их 1 раз в сутки:	
толщина стенок печи в 1/2 кирпича	От 0,4 до 0,9
то же в 1/4 кирпича	“ 0,7 “ 1,4
<i>Примечание</i> — Меньшие значения m соответствуют массивным печам, большие — более легким печам. При топке печей 2 раза в сутки значение m уменьшается для печей со стенками в 1/2 кирпича в 2,5–3 раза, в 1/4 кирпича — в 2–2,3 раза.	

Для расчета амплитуды колебания температуры внутреннего воздуха A_B определим для внутренней поверхности одного из ограждений данного помещения амплитуду колебаний теплового потока A_q , проходящего через эту поверхность

$$A_q = q_{\max} - q_{cp}, \quad (5.47)$$

где $q_{\max} = \alpha_g(t_{\max} - \tau_{\max})$ – максимальная величина теплового потока, проходящего через поверхность, Вт/м²;

$q_{cp} = \alpha_g(t_g - \tau_g)$ – средняя величина теплового потока, проходящего через поверхность, Вт/м²;

α_g – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности, Вт/(м²·°C);

t_{\max}, τ_{\max} – максимальные температуры воздуха и поверхности;

t_B, τ_B – средние температуры воздуха и поверхности.

Следовательно,

$$A_q = \alpha_e A_t - \alpha_e A_\tau, \quad (5.48)$$

где $A_t = (t_{\text{макс}} - t_e)$; $A_\tau = (\tau_{\text{макс}} - \tau_e)$ – амплитуды колебаний температур воздуха и поверхности ограждения.

Из определения коэффициента теплоусвоения внутренней поверхности (5.1) имеем

$$A_\tau = \frac{A_q}{Y_e}. \quad (5.49)$$

Подставив значения A_τ в (5.48), после преобразований получим

$$A_q = \frac{A_t}{\frac{1}{\alpha_e} + \frac{1}{Y_e}}. \quad (5.50)$$

Введя коэффициент теплопоглощения внутренней поверхности $B = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \frac{1}{Y_e}}$, получим $A_q = A_t B$.

Для всех поверхностей данного помещения, включая и поверхности внутренних конструкций, будем иметь

$$A_Q = \sum A_q F_e = A_t \sum B F_e, \quad (5.51)$$

где A_Q – амплитуда колебания теплового потока, отдаваемого отопительным прибором, Вт;

F_B – поверхность ограждения по внутреннему обмеру, м².

Из (5.51) следует, что $A_Q = m \cdot Q_{cp}$, где Q_{cp} – средняя теплоотдача отопительного прибора, равная теплотерям данного помещения.

Окончательная формула для расчета амплитуды колебаний температуры внутреннего воздуха в помещении имеет вид

$$A_t = \frac{a \cdot m \cdot Q_{cp}}{\sum B F_e}, \quad (5.52)$$

где $a=0,7$ – поправочный коэффициент, учитывающий влияние некоторых факторов, снижающих амплитуду внутреннего воздуха (отклонение характера теплоотдачи отопительного прибора от гармонического закона, теплоотдачу излучением отопительного прибора, бытовую теплоту, наличие в помещении оборудования, поглощающего теплоту).

Методические указания

Необходимо усвоить, что тепловой режим помещения существенно зависит не только от колебаний поступлений и потерь теплоты, но и от теплоустойчивости ограждений и помещений, разобраться с показателями теплоусвоения и теплопоглощения, а также методами расчета затухания в толще ограждения амплитуды колебания температуры наружного воздуха и определения амплитуды колебания температуры внутреннего воздуха при колебаниях теплового потока от отопительных приборов.

Вопросы для самопроверки

1. Какое свойство поверхности ограждения называют теплоусвоением?
2. Как определяется коэффициент теплоусвоения внутренней поверхности ограждения?
3. Как определяется характеристика тепловой инерции?
4. Как определяется коэффициент теплопоглощения ограждения?
5. Что такое теплоустойчивость наружного ограждения?
6. Как определяется показатель сквозного затухания многослойного ограждения?
7. Как влияет фильтрация воздуха через ограждение на температурные колебания?
8. Что такое теплоустойчивость помещения?
9. Как определяется коэффициент неравномерности теплоотдачи отопительного прибора?
10. Какова величина допустимого предела амплитуды колебания температуры внутреннего воздуха?