

## ГЛАВА 2. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ ОГРАЖДЕНИЯ

Передача теплоты через наружные ограждения конструкций является основным фактором, влияющим на проектирование теплового режима помещений здания. В случае, когда распределение температур в ограждениях изменяется по координатам, но не меняется во времени, процесс теплопередачи называется *стационарным*. Для анализа этого процесса разработаны простые аналитические приемы, позволяющие определять термическое сопротивление теплопередаче, а, следовательно, и количество теплоты, передаваемой от внутреннего воздуха наружной среде однородных и сложных ограждающих конструкций, при наличии воздушных прослоек и с учетом влажопроводности и воздухопроницаемости ограждений.

Однако, в действительности из-за изменения температур наружного и внутреннего воздуха, направления и силы ветра, интенсивности солнечной радиации, режим теплопередачи через ограждения является *нестационарным*. Аналитический аппарат нестационарной теплопередачи более сложен и только некоторые решения задач с простыми условиями протекания процесса приведены к виду, удобному для практического использования.

Необходимо отметить, что довольно часто, из-за небольших скоростей изменения условий теплопередачи, появляется возможность с достаточной для инженерных расчетов точностью заменить сложный нестационарный процесс более простым стационарным.

Закономерности нестационарного процесса теплопередачи необходимо использовать при расчете периодического отопления, режима регулирования подачи теплоты в помещения, при определении времени натопа при пуске системы, достаточной продолжительности отключения отопления в аварийных условиях, при замерзании и оттаивании влаги в материале ограждения и некоторых других случаях.

### 2.1 Термическое сопротивление теплопередаче однородного многослойного ограждения

Простейшим является одномерное стационарное температурное поле, которое для многослойного ограждения может быть определено дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ I(x) \frac{\partial t}{\partial x} \right] = 0, \quad (2.1)$$

где  $I(x)$  – теплопроводность материальных слоев ограждения.

Если линейный масштаб сечения ограждения заменить масштабом термических сопротивлений  $R = x/I$ , то уравнение (2.1) можно переписать в виде

$$\frac{\partial^2 t}{\partial R^2} = 0. \quad (2.2)$$

Конструкции современных многослойных ограждений характеризуются разделением функций между отдельными материальными слоями (рис.2.1). В общем случае ограждение состоит из конструктивного (несущего) слоя, теплоизоляционного слоя, а также паро- или гидроизоляционного слоя, внутреннего и внешнего фактурных слоев. В отношении режима теплопередачи основными являются конструктивный и теплоизоляционный слои. Конструктивным обычно является слой из плотного, а поэтому обладающего значительной теплопроводностью и плохо проницаемого для водяного пара и воздуха материала. Материал теплоизоляционного слоя обычно пористый, рыхлый, а следовательно малотеплопроводный и хорошо пропускающий водяной пар и воздух.

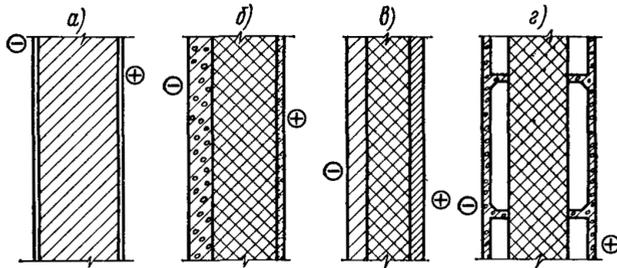


Рис. 2.1 – Характерные типы современных конструкций наружных ограждений зданий: а) однослойная керамзито-бетонная панель с внутренним и внешним фактурными слоями; б) двухслойная панель (бетон, эффективный теплоизоляционный материал с фактурным слоем) в) трехслойная панель; г) трехслойная прокатная панель.

Теплоизоляционный слой может быть расположен с внутренней и внешней сторон ограждения (рис. 2.2). Следует иметь в виду, что с технической точки зрения выгоднее располагать теплоизоляционный слой

с внешней стороны ограждения (рис. 2.2, а), так как в этом случае при прочих равных условиях имеются следующие достоинства:

1) отсутствует возможность выпадения конденсата и накопления жидкой влаги в толще конструкции, а поэтому не требуется устройства дополнительной пароизоляции с внутренней поверхности ограждения; 2) стык между материальными слоями находится при положительных температурах, что исключает периодическое образование в нем льда, нарушающего контакт между слоями; 3) ограждение более теплоустойчиво как к сквозному затуханию колебаний температуры наружного воздуха, так и к колебаниям теплоступлений в помещение.

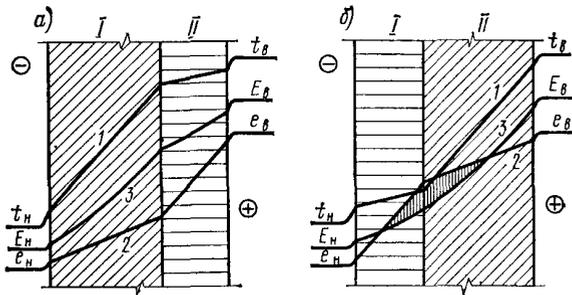


Рис. 2.2 – Кривые распределения температуры  $t$  (1), упругости  $e$  (2) и максимальной упругости  $E$  (3) водяного пара по толщине двухслойного ограждения при расположении теплоизоляционного слоя с наружной (а) и внутренней (б) сторон ограждения (вертикальной штриховкой отмечено условие возможной конденсации); I – теплоизоляционный, II – конструктивный слой.

Недостатком такого решения является влияние атмосферных воздействий непосредственно на теплоизоляционный материал. Так как обычные теплоизоляционные материалы обладают малой коррозионной стойкостью, то это вызывает необходимость в устройстве специального защитного слоя. Устройство плотного защитного слоя может привести к такому положению, когда более выгодной окажется конструкция с расположением теплоизоляции с внутренней стороны ограждения (рис. 2.2, б) с дополнительным при необходимости пароизоляционным слоем на ее внутренней поверхности.

Одномерное температурное поле ограждения может быть рассчитано достаточно просто (рис. 2.3). Его теплозащитные свойства определяются сопротивлением теплопередаче ограждения  $R_0$ , которое равно сумме со-

противлений теплопроводности отдельных материальных слоев  $R_i$ , воздушной прослойки  $R_{e.n.}$  и теплообмену на внутренней  $R_e$  и наружной  $R_n$  поверхностях:

$$R_o = R_e + \sum R_i + R_{e.n.} + R_n \quad (2.3)$$

Распределение температуры в ограждении определяется по формуле

$$t_x = t_e - \frac{R_{e-x}}{R_o} (t_e - t_n), \quad (2.4)$$

где  $t_x$  – температура в произвольном сечении  $x$  ограждения;

$R_{e-x}$  – сопротивление теплопередаче от внутренней среды до сечения  $x$ ;

$t_B$  и  $t_H$  – температура внутренней и внешней сред.

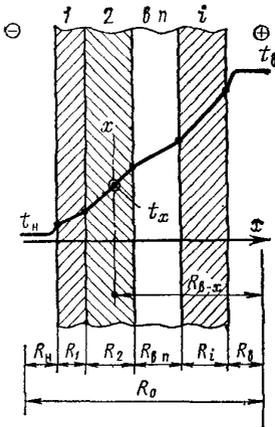


Рис. 2.3 – Одномерное температурное поле многослойного ограждения.

Из формулы (2.4) следует, что перепады температур по сечению ограждения пропорциональны соответствующим термическим сопротивлениям.

## 2.2 Приведенное сопротивление теплопередаче сложного ограждения

Конструкции ограждений современных зданий из крупноразмерных элементов имеют определенное своеобразие. В стенах расположены большие оконные проемы. Размеры помещения небольшие, поэтому на большей части поверхности наружной стены со стороны помещения примыкают перегородки и междуэтажные перекрытия. Конструкции стеновых панелей обычно имеют бетонные ребра и обрамления, которые создают в толще теплоизоляционного слоя теплопроводные включения, т. е. по площади наружной стены практически нет участков, в пределах которых передачу теплоты можно было бы считать проходящей по одномерной схеме. За счет перечисленных конструктивных особенностей потери теплоты по

всей площади ограждения оказываются часто большими, чем теплопотери, рассчитанные в предположении одномерности температурного поля.

Для правильного расчета теплопотерь через ограждения сложной конструкции используют так называемое приведенное сопротивление теплопередаче ограждения  $R_{o,пр}$ . Приведенным называют сопротивление теплопередаче такого условного ограждения с одномерным температурным полем, потери теплоты через которое при одинаковой площади равны теплопотерям сложного ограждения с двумерным температурным полем.

Пользуясь  $R_{o,пр}$ , по формуле (2.7) для одномерного ограждения можно получить потери теплоты сложного ограждения. Характерными для наружной стены двумерными элементами являются: стык внутренних конструкций с наружной стеной, оконные откосы, наружный угол и теплопроводные включения. В результате рассмотрения теплопередачи в двумерных элементах определены факторы формы  $f_i$  для каждого случая.

Значения факторов формы элементов для ширины в два калибра по обмеру:

1) *Наружный угол.* Для наружного угла фактор формы, отнесенный к наружной поверхности ограждения  $f_{гр}=0,68$ . Следовательно, в пределах расстояния, равного двум калибрам от угла ограждения по его внешней поверхности потери теплоты на 32% меньше, чем через такую же площадь на глади стены. Фактор формы, отнесенный к внутренней поверхности наружного угла  $f_{гр}=1,18$ , т.е. через площадь в два калибра внутренней поверхности около наружного угла теряется на 18% теплоты больше, чем через такую же площадь на глади стены.

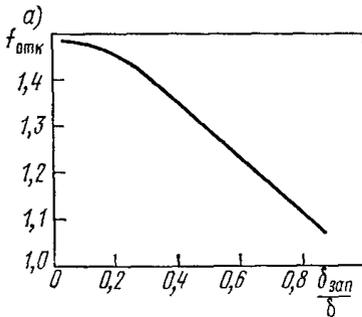


Рис. 2.4 – Характеристика двумерного температурного поля оконного откоса ограждений: зависимость фактора формы откоса проема от степени заполнения откоса оконной коробкой.

2) *Внутренний угол.* Фактор формы по наружному обмеру  $f_{гр}=1,18$ , по внутреннему обмеру  $f_{гр}=0,68$ .

3) *Откос проема в ограждении.* Потери теплоты через ограждение с проемом больше по сравнению с потерями через гладкую стену и на величину этих потерь существенно влияет степень заполнения откоса оконной коробкой. На рис. 2.4 приведен график зависимости фактора формы откоса проема  $f_{отк}$  от степени заполне-

ния откоса оконной коробкой. На рис. 2.4 приведен график зависимости фактора формы откоса проема  $f_{отк}$  от степени заполне-

ния откоса конструкцией окна  $\delta_{зан} / \delta$ , где  $\delta_{зан}$  - толщина оконной коробки, а  $\delta$  - общая толщина ограждения.

4) *Стык внутреннего и наружного ограждения (в одну сторону от оси стыка)*. Стык образуется при примыкании внутренних конструкций (перегородок, перекрытий) к наружному ограждению. На рис. 2.5 приведен график зависимости фактора формы  $f_{ст}$  для стыка наружной стены и внутренней перегородки от отношения толщины внутренней перегородки  $\delta_2$  к толщине наружной стены  $\delta_1$ .

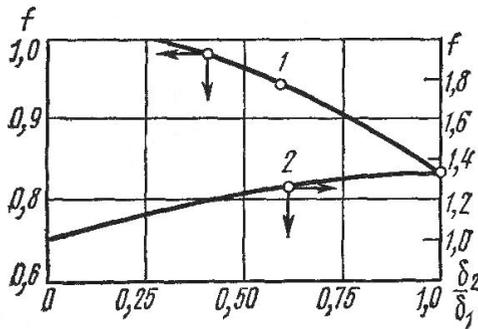


Рис. 2.5 –График зависимости фактора формы  $f_{ст}$  для стыка наружной стены и внутренней перегородки от отношения  $\delta_2/\delta_1$ : 1 – по наружному обмеру; 2– по внутреннему обмеру.

5) *Теплопроводные включения*. Через зону теплопроводного включения потери теплоты больше, чем через гладь стены и их принято относить к 1м длины включения. Относительное увеличение потерь теплоты находят с помощью фактора формы включения  $f_{вкл}$ , который определяется для ширины в два калибра ( $a_f = 2 \cdot l \cdot R_0$ ) в одну сторону от оси симметрии

$$f_{вкл} = 1 + \frac{a}{4\lambda} (K_T - K) \quad (2.5)$$

где  $K_T, K$  – коэффициенты теплопередачи, рассчитанные соответственно по сечениям теплопроводного включения и основной конструкции;

$a$  – ширина включения;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала основной конструкции.

Величины  $f$  показывают, во сколько раз общие теплопотери через единицу длины характерного элемента шириной в два калибра больше основных. Общие потери теплоты ограждениями, имеющими несколько двумерных элементов разной протяженности  $l$  и с различными значениями  $f$ , можно определить в виде суммы:

$$Q = \frac{1}{R_o} F_o (t_g - t_n) + \frac{1}{R_o} \sum a_f l_i (f_i - 1) (t_g - t_n) \quad (2.6)$$

В то же время с помощью приведенного сопротивления теплопередаче  $R_{o,пр}$  величина  $Q$  может быть определена по формуле

$$Q = \frac{1}{R_{o,пр}} F_o (t_g - t_n) \quad (2.7)$$

Приравнивая правые части уравнения (2.6) и (2.7), получим аналитическую зависимость для определения приведенного сопротивления теплопередаче ограждения в виде

$$R_{o,пр} = R_o \frac{1}{1 + \frac{1}{F_o} \sum a_f (f_i - 1) l_i} \quad (2.8)$$

По формуле (2.8) можно определить  $R_{o,пр}$  для ограждения, в котором элементы с двумерными температурными полями соответствуют рассмотренным задачам.

### 2.3 Теплопередача герметичной воздушной прослойки

Устройство воздушной прослойки является распространенным приемом теплоизоляции. Прослойку используют в конструкциях окон, витражей, наружных стен и перекрытий, для экранирования при защите от излучения и как гравитационный побудитель для интенсификации конвективного теплосъема с обогревающих или охлаждающих устройств. В наружных стенах и перекрытиях такой прием часто используют для предупреждения переувлажнения конструкций.

Воздушная прослойка может быть герметичной или вентилируемой; последнюю часто называют воздушным продухом.

Сопrotивление теплопередаче воздушной прослойки  $R_{в.л.}$  не может быть определено только как сопротивление теплопроводности слоя воздуха, т.к. передача теплоты через воздушную прослойку от одной поверхности к другой происходит в основном конвекцией и излучением.

В простейшем случае герметичной воздушной прослойки поток теплоты от одной стенки к другой можно представить в виде суммы

$$q = q_k + q_l, \quad (2.9)$$

где  $q_k$  - конвективная составляющая;

$q_l$  - лучистая составляющая этого потока.

Величина  $q_k$  является собирательной, в нее входит передача теплоты за счет конвективного теплообмена и через воздух посредством теплопроводности, т.к. эти составляющие трудно разделить. Конвективный теплообмен  $q_k$  в воздушной прослойке от одной поверхности к другой равен

$$q_k = \alpha'_k (\tau_1 - \tau_2) \quad (2.10)$$

где  $\alpha'_k$  - коэффициент конвективного теплообмена, отнесенный к разности температур  $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2$  на поверхностях прослойки.

Конвективный теплообмен в прослойке связан с циркуляцией воздуха. В вертикальных воздушных прослойках, если их толщина соизмерима с высотой, восходящие потоки вдоль поверхности с большей температурой и нисходящие потоки на холодной поверхности могут двигаться без взаимных помех. В тонких прослойках они взаимно тормозятся и образуют внутренние циркуляционные контуры, высота которых зависит от ширины щели.

При малых толщинах или при небольших разностях температур имеет место режим параллельно-струйного движения воздуха вдоль стенок прослойки без перемешивания. Экспериментально установлено, что ламинарный режим течения сохраняется в пределах значений произведения критериев  $GrPr < 1000$ . При средней температуре воздуха  $0^\circ\text{C}$  критическому значению соответствует

$$(Gr Pr)_{кр} \approx 10^8 \delta^3 \Delta\tau \leq 1000, \quad (2.11)$$

где  $\delta$  - толщина воздушной прослойки, м.

Из зависимости (2.11) можно получить критическую толщину прослойки  $\delta_{кр}$ , мм, для которой сохраняется ламинарный режим течения:

$$\delta_{кр} \approx 20\Delta\tau^{-1/3}. \quad (2.12)$$

При этом режиме в прослойке

$$\alpha'_к = \lambda_в / \delta, \quad (2.13)$$

т.е. передача теплоты через слой воздуха толщиной  $\delta < \delta_{кр}$  происходит теплопроводностью.

Если  $GrPr > 1000$ , то для критерия  $Nu$ , определенного относительно  $\alpha'_к$  опытным путем, установлена зависимость

$$Nu = 0,18(GrPr)^{0,25} \quad (2.14)$$

Для воздуха при средней температуре  $0^0C$  и  $\delta$ , мм,  $\alpha'_к$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), равно

$$\alpha'_к = 2,8(\Delta\tau / \delta)^{0,25} \quad (2.15)$$

Численный коэффициент в формуле увеличивается приблизительно на 4% при понижении средней температуры на  $10^0C$ .

В горизонтальной прослойке, если верхняя поверхность нагрета больше, чем нижняя, перемешивания воздуха почти не будет, поэтому  $\alpha_к$  при любых прочих условиях будет достаточно точно определяться формулой (2.13). Если поток теплоты направлен снизу вверх, то возникают восходящие и нисходящие токи, образующие циркуляционные контуры, которые в плане имеют вид шестигранных ячеек. Значение  $\alpha_к$  в этом случае возрастает по сравнению с полученным по формуле (2.15). Увеличение  $\alpha_к$  зависит в основном от толщины прослойки и равно: при  $\delta = 10$  мм около 20%, при  $\delta = 50$  мм оно имеет максимальное значение около 45% и далее уменьшается так, что при  $\delta = 100$  мм равно около 25%, при  $\delta = 200$  мм около 5%.

Лучистая составляющая теплопередачи через воздушную прослойку

$$q_{л} = \alpha_{л} (\tau_1 - \tau_2) \quad (2.16)$$

где  $\alpha_{л}$  - коэффициент лучистого теплообмена.

Коэффициент  $\alpha_{л}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), определяется по общей формуле

$$\alpha_{л} = \varepsilon_{np} \cdot C_0 \cdot b \cdot \varphi \quad (2.17)$$

В воздушной прослойке коэффициент облученности  $\varphi = 1,0$ , исключение составляют прослойки в виде отверстий в плитах, кирпичах и т. д. При сечении отверстий, близком к квадратному, за счет дополнительного излучения боковых стенок  $\varphi \approx 1,2$ . При плоской форме каналов и соотношении сторон 1 : 3 и менее  $\varphi \approx 1$ .

Для большинства строительных материалов  $\varepsilon_{np} = 0,85$ . При средней температуре 0<sup>0</sup>С и  $b=0,81$  и

$$\alpha_{л} = 0,85 \cdot 5,77 \cdot 0,81 \cdot 1,0 = 3,97 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} \quad (2.18)$$

Величина  $\alpha_{л}$  заметно больше  $\alpha_{к}$ , поэтому основная теплота через прослойку передается излучением. Уменьшить этот поток и таким путем увеличить сопротивление теплопередаче прослойки можно за счет так называемого «армирования», например алюминиевой фольгой. Покрытие фольгой обычно делают на теплой поверхности для избежания конденсации. Такое покрытие уменьшает лучистый поток приблизительно в 10 раз. Оклейка фольгой второй поверхности практически не изменит результата, т.к.  $\varepsilon_{np}$  при этом почти не изменится. Наиболее эффективным методом увеличения сопротивления прослойки является его экранирование разделением тонкими стенками на ряд узких слоев. При наличии экранов  $\varepsilon_{np}$  нужно определять по формуле

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 + (n+1)(1/\varepsilon_{экр} - 1)}, \quad (2.19)$$

где  $n$ - число экранов;  $\varepsilon_{экр}$  - коэффициент излучения поверхности экранов.

Из формулы (2.19) следует, что даже один экран из того же материала, что и основная конструкция, когда  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_{экр}$ , вдвое уменьшает лучистый поток. Один экран из алюминиевой фольги уменьшает поток в 20 раз. С увеличением числа экранов этот эффект возрастает. На этом принципе

основана теплоизоляция «альфоль», выполненная в виде плоских листов фольги, которые располагают на расстоянии 10-15 мм друг от друга, или в виде мятых, гофрированных листов фольги. Условный коэффициент теплопроводности слоя такой изоляции при гладких листах равен 0,031 Вт/(м<sup>2</sup>·К), при гофрированных 0,028 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Уменьшить  $\alpha_{л}$  можно также за счет приближения прослойки в конструкции к наружной поверхности, т.к. при этом понижается температура, а следовательно, температурный коэффициент  $b$  и коэффициент лучистого теплообмена  $\alpha_{л}$ .

Наиболее эффективная толщина воздушной прослойки без экранов для вертикальных слоев в ограждениях равна 76-95 мм. Для горизонтальной прослойки при передаче теплоты снизу вверх и сверху вниз с увеличением толщины сопротивление теплопередаче возрастает. Обычно в условиях ограждения углощение прослойки более 5 см нерационально, т.к. это незначительно уменьшает теплопередачу.

Характерным примером замкнутой прослойки в конструкции наружных ограждений может быть межстекольное пространство двойного окна. Его тепловой режим может быть достаточно полно охарактеризован температурой внутреннего стекла  $t_{в}$ , воздуха в межстекольном пространстве  $t_{м.ст}$ , коэффициентами конвективного  $\alpha_{к}$ , лучистого  $\alpha_{л}$  и общего теплообмена  $\alpha$  на внутренней поверхности стекла в помещении (дополнительный индекс в) и в межстекольном пространстве (дополнительный индекс м. ст.). Значения этих показателей приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

**Характеристики теплопередачи через окно**

Характеристики	Значения характеристик				
	-60	-40	-10	10	50
$t_{н}$	-60	-40	-10	10	50
$t_{в}$	-7	0	10	17	30
$t_{м.ст}$	-24	-13	3	14	37
$\alpha_{к,в}$	5,7	5,1	4	3,2	3,9
$\alpha_{к,м.ст}$	4,6	4,7	5	5,2	5,5
$\alpha_{л,в}$	10,3	9,8	9	8,4	9,4
$\alpha_{л,м.ст}$	2,8	2,5	1,9	1,3	1,7
$\alpha_{м.ст}$	3,0	3,4	4	4,5	5,7
$\alpha_{м.ст}$	5,8	5,9	5,8	5,8	9,4
$\delta_{кр}$	8	9	13	20	16
$\delta_{опт}$	12	14	19	30	23

Для обычных оконных стекол (толщиной 3-5 мм) изменением температуры по их толщине можно пренебречь, поэтому приведенные в таблице значения  $\tau_b$  есть одновременно и температура внутреннего стекла со стороны прослойки. Там же даны критические значения толщины воздушной прослойки  $\delta_{кр}$ , соответствующие границе перехода теплообмена в воздухе прослойки от теплопроводности (при ламинарном режиме течения) к конвективному (при турбулентном режиме течения), и оптимальные  $\delta_{опт}$  толщины, соответствующие наименьшему значению коэффициента конвективного теплообмена в прослойке  $\alpha_{к,м.см}$ .

Температура воздуха в межстекольном пространстве различная в сечениях по высоте окна. Внизу она более низкая, вверху более высокая. Приведенные в табл. 2.1 данные характеризуют режим теплопередачи в среднем по всей площади окна. Они также соответствуют теплопередаче в сечении на половине высоты окна. Для практических расчетов важно знать распределение температуры по высоте окна и особенно ее значения в наиболее холодной нижней части окна.

Данные наблюдений позволяют считать распределение температуры по высоте окна линейным и приближенно определять относительную избыточную температуру воздуха в межстекольном пространстве  $t_{м.ст}(x)$  на расстоянии  $x$  от низа окна при его высоте  $H$  по формуле

$$\Theta_{м.см} = \frac{t_{м.см}(x) - t_{м.см}}{t_г - t_н} = 0,72 \left( \frac{2x}{H} - 1 \right), \quad (2.20)$$

где  $t_{м.ст}$ - средняя температура воздуха в межстекольном пространстве (по табл. 2.1).

Все остальные данные о распределение температуры в сечении  $x$  окна можно рассчитать по общим формулам (2.3) и (2.4) одномерной теплопередачи, пользуясь значениями коэффициентов теплообмена  $\alpha_г$  и  $\alpha_{м.см}$  в табл. 2.1, соответствующими значениям  $t_{м.ст}(x)$  по формуле (2.20).

Нормативные данные сопротивления теплопередаче воздушных прослоек приведены в табл. 2.2. Эти данные справедливы для строго герметичных прослоек. Обычно же в конструкциях в результате инфильтрации и эксфильтрации через материал и стыки отдельных элементов конструкции прослойки сообщаются с воздухом. Сопротивление теплопередаче с уменьшением герметичности понижается и особенно резко, если прослойка расположена ближе к внутренней поверхности ограждения и в нее попадает наружный воздух.

Таблица 2.2

## Термические сопротивления герметичных воздушных прослоек

Толщина прослойки, мм	Значения $R_{в.п.}, м^2 \cdot К/Вт$			
	для горизонтальных прослоек при потоке теплоты снизу вверх и для вертикальных прослоек		для горизонтальных прослоек при потоке теплоты сверху вниз	
	летом	зимой	Летом	зимой
10	0,13	0,15	0,13	0,155
20	0,14	0,155	0,155	0,19
30	0,14	0,16	0,16	0,21
50	0,14	0,17	0,17	0,22
100	0,15	0,18	0,18	0,23
150	0,155	0,18	0,19	0,24
200-300	0,155	0,19	0,19	0,24

Примечание: Величины  $R_{в.п.}$  соответствуют разности температур на поверхностях прослойки, равной  $10^{\circ}C$ . Для уточнения расчетов необходимо  $R_{в.п.}$  умножить на коэффициент при  $\Delta t = 8^{\circ}C$ - 1,05;  $\Delta t = 6^{\circ}C$ - 1,1;  $\Delta t = 4^{\circ}C$ - 1,25;  $\Delta t = 2^{\circ}C$ - 1,4.

На рис. 2.6 приведен график, который дает представление об изменении  $R_0$  при различном положении прослойки и при инфильтрации через нее наружного воздуха. Попадание внутреннего воздуха в прослойку опасно с точки зрения переноса с воздухом влаги, отсыревания конструкции и снижения в связи с этим ее теплозащитных качеств.

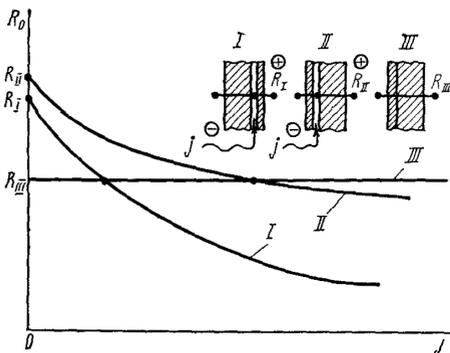


Рис. 2.6 – Характер изменения сопротивления теплопередаче ограждения с негерметичной воздушной прослойкой, расположенной у внутренней (I) или наружной (II) поверхностей, с увеличением инфильтрации наружного воздуха  $j$  через прослойку (III – для ограждения с теми же толщинами слоев, но без воздушной прослойки).

## 2.4 Теплопередача и влагопередача через ограждения с вентилируемой воздушной прослойкой

Экспфильтрация воздуха из помещения через ограждение связана с передачей влаги, которая при наличии в конструкции плотных слоев может привести к переувлажнению ограждения (например, в бесчердачных покрытиях, имеющих с внешней стороны непроницаемый гидроизоляционный ковер). Для предупреждения переувлажнения в конструкциях часто устраивают вентилируемые воздушные прослойки. Вентилируемая прослойка-продук- является элементом конструкций тепловых экранов и воздухоподогревателей. Теплопередача через продукт принципиально отличается от рассмотренной для герметичной прослойки.

Рассмотрим стационарный тепловой режим ограждения с воздушной прослойкой, через которую непрерывно продувается воздух (рис. 2.7). Вентилируемая прослойка отделена от помещения с температурой  $t_b$  внутренней частью конструкции, имеющей коэффициент теплопередачи  $K_b$ . Наружная часть конструкции имеет коэффициент теплопередачи  $K_n$  и отделяет продукт от наружного воздуха с температурой  $t_n$ . Массовый расход воздуха равен  $j$ , кг/ч, через 1 м длины щели. Воздух в прослойку поступает с температурой  $t_0$  (в общем случае отличной от  $t_n$  и  $t_b$ ) и, проходя через нее, изменяет свою температуру. На некотором расстоянии  $l_{кр}$  поток воздуха приобретает некоторую неизменную температуру  $t_{в.п.}$  зависящую от условий передачи теплоты через ограждение и не связанную с его начальной температурой.

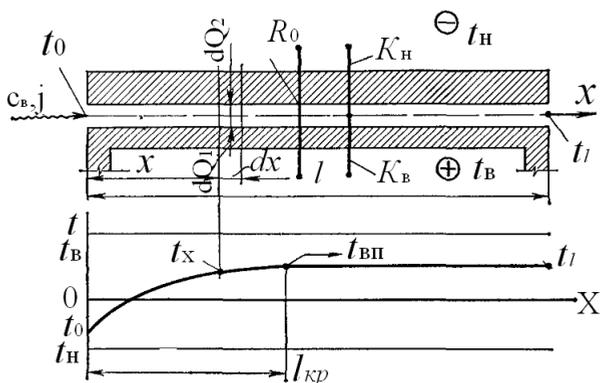


Рис. 2.7 – К выводу уравнения теплопередачи через ограждение с вентилируемой воздушной прослойкой

Задача состоит в определении температуры воздуха  $t_b$  произвольном сечении прослойки и в определении теплопередачи через такую конструкцию.

Приступая к решению задачи, определим температуру  $t_{б.п}$

$$t_{б.п.} = t_г - \frac{1}{K_г R_o} (t_г - t_n) = \frac{K_г t_г + K_n t_n}{K_г + K_n} \quad (2.21)$$

или

$$\Theta_{б.п.} = \frac{t_г - t_{б.п.}}{t_г - t_n} = \frac{1}{K_г R_o} = \frac{K_n}{K_г + K_n}, \quad (2.22)$$

где

$$R_o = \frac{1}{K_г} + \frac{1}{K_n} = \frac{K_г + K_n}{K_г K_n}.$$

При определении  $K_г$  и  $K_n$  учитывают только конвективные составляющие теплообмена на поверхностях прослойки, т.е.

$$K_г = \frac{1}{1/K_г' + 1/\alpha_к}; \quad K_n = \frac{1}{1/K_n' + 1/\alpha_к}, \quad (2.23)$$

где  $K_г'$  и  $K_n'$  - коэффициенты теплопередачи внутренней и наружной частей ограждения от поверхностей воздушной прослойки;

$\alpha_к$  - коэффициент конвективного теплообмена одной поверхности с воздухом, движущимся в прослойке со скоростью  $u$ .

Конвективный теплообмен в канале может быть рассчитан по следующим зависимостям.

Для ламинарного режима движения ( $Re < 2 \cdot 10^3$ ) в канале примем зависимость

$$Nu = 1,4 \left( Re \frac{d}{l} \right)^{0,4} (Pr)^{0,33} \cdot \varepsilon \quad (2.24)$$

По уравнению (2.24) среднее значение коэффициента конвективного теплообмена  $\alpha_к$  для воздуха по длине прослойки равно

$$\alpha_к = \left( 0,896 + 1,51 \cdot 10^{-3} t \right) \frac{\Delta t^{0,1} (v_p)^{0,2}}{d^{0,5}} \varepsilon \quad (2.25)$$

где  $u$  - скорость, м/с;

$\Delta t$  - разность температур воздуха и поверхности воздушной прослойки;

$t$  - средняя из этих температур;

$d$  - эквивалентный диаметр, равный  $4F/P$  ( $F$ -площадь и  $P$ - периметр канала).

Для прослойки (щелевого канала)  $d$  равен двойной ширине щели

$$d = 2\delta \quad (2.26)$$

Значения  $\epsilon$  в зависимости от  $l/d$  следующие:

$l/d$	1	2	5	10	15	20	30	40	50 и более
$\epsilon$	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,0

Для каналов весьма большой длины величина  $Nu$  становится практически постоянной  $Nu=4$ , а

$$\alpha_k = \frac{4\lambda_{возд}}{d} = \frac{4 \cdot 0,0244}{d} \approx 0,1d^{-1} \quad (2.27)$$

Для турбулентной области течения ( $Re > 2 \cdot 10^3$ ) в каналах имеем

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \cdot \epsilon_l \quad (2.28)$$

В начале канала  $\epsilon_l$  принимает значения до 1,65 и далее уменьшается и при  $l/d > 50$  становится равным единице. Для воздуха соотношение упрощается и при  $Pr = 0,71$  принимает вид

$$Nu = 0,018 Re^{0,8} \quad (2.29)$$

Среднее значение  $\alpha_k$  для воздуха при  $t_b = 0^{\circ}C$  равно

$$\alpha_k = \frac{0,018 \cdot 0,0244}{(13,28 \cdot 10^{-6})^{0,8}} v^{0,8} d^{-0,2} = 3,51 v^{0,8} d^{-0,2} \quad (2.30)$$

В технических расчетах изменениями конвективного теплообмена на участке стабилизации (в начале прослойки) в этом режиме можно пренебречь.

Рассмотрим изменение теплопередачи по длине прослойки, относя все величины к ее ширине в 1 м. В произвольном сечении  $x$  уравнение теплового баланса воздуха в воздушной прослойке в пределах элемента  $dx$  (см. рис. 2.7) можно представить в виде

$$dQ_1 + dQ_2 = dQ_3 \quad (2.31)$$

Величина  $dQ_1$  (теплота, передаваемая через внутреннюю часть ограждения) равна

$$dQ_1 = K_e(t_e - t)dx \quad (2.32)$$

Через верхнюю часть конструкции передается  $dQ_2$ , равное

$$dQ_2 = K_n(t_n - t)dx \quad (2.33)$$

Суммарное количество теплоты затрачивается на нагрев воздуха, который на длине  $dx$  меняет свою температуру на  $dt$  при изменении теплосодержания на  $dQ_3$

$$dQ_3 = c_e j dt \quad (2.34)$$

Сумму потоков теплоты через верхнюю и нижнюю части ограждения к воздуху в прослойке с учетом формулы (2.21) можно записать в виде

$$dQ_1 + dQ_2 = (K_e + K_n)(t_{e.n.} - t)dx \quad (2.35)$$

Дифференциальное уравнение (2.31) после подстановки (2.34) и (2.35) получим в виде

$$(K_e + K_n)(t_{e.n.} - t)dx = c_e j dt \quad (2.36)$$

Решение этого уравнения после разделения переменных и интегрирования от  $t_0$  до  $t_x$  и от 0 до  $x$

$$\int_0^x \frac{K_{\theta} + K_H}{c_{\theta} j} dx = \int_{t_0}^{t_x} \frac{dt}{t_{\theta.n.} - t};$$

$$\frac{K_{\theta} + K_H}{c_{\theta} j} x = -\ln(t_{\theta.n.} - t_x) - \ln(t_{\theta.n.} - t_0)$$

$$\frac{K_{\theta} + K_H}{c_{\theta} j} x = -\ln \frac{t_{\theta.n.} - t_x}{t_0 - t_{\theta.n.}}$$

имеет вид

$$\Theta_x = \frac{t_x - t_{\theta.n.}}{t_0 - t_{\theta.n.}} = e^{-Ax}, \quad (2.37)$$

где  $A = (K_{\theta} + K_H) / c_{\theta} j$ .

На рис. 2.8 зависимость (2.37) представлена в виде графика (кривая 1), из которого видно, что при

$$Ax = \frac{(K_{\theta} + K_H)x}{c_{\theta} j} > 3 \quad (2.38)$$

величина  $\Theta_x$  близка к нулю ( $t_x \approx t_{\theta.n.}$ ). Из неравенства (2.38) можно определить протяженность начального участка  $l_{кр}$ , в пределах которого практически заканчивается изменение температуры воздуха в прослойке

$$l_{кр} = \frac{3c_{\theta} j}{K_{\theta} + K_H} \quad (2.39)$$

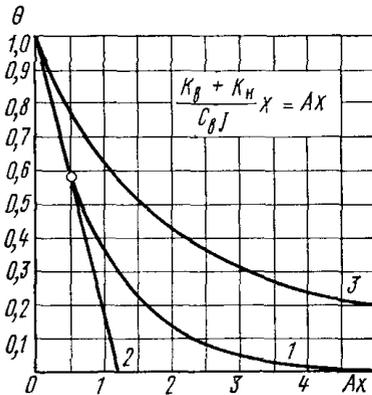


Рис. 2.8 – Изменение относительной избыточной температуры воздуха в прослойке: 1 – локальные значения; 2 – линейная зависимость локальных значений на начальном участке (до  $Ax=0,5$ ); 3 – средние по длине прослойки значения.

При малых расходах воздуха температура  $t_{в.п}$  устанавливается на близком расстоянии от входа в прослойку и остается неизменной по всей длине прослойки. При расчете передачи теплоты через ограждение с вентилируемой прослойкой, если  $l_{кр} \ll l$ , можно считать, что температура воздуха по всей длине равна  $t_{в.п}$ . При определении сопротивления теплопередаче ограждения  $R_o$  величину  $R_{в.п}$  в этом случае нужно принять равной

$$R_{в.п} = \frac{1}{0,5\alpha_k + \alpha_l} \quad (2.40)$$

где  $\alpha_k$ -величина, рассчитываемая по формуле (2.25), (2.28) или (2.30);

$\alpha_l$ , - то же по формуле (2.17)

Если длина прослойки  $l$  соизмерима с  $l_{кр}$ , то средняя температура воздуха в прослойке отличается от  $t_{в.п}$  и равна

$$t_{cp} = \int_0^l t dx / l. \quad (2.41)$$

Средняя по длине прослойки относительная избыточная температура  $\Theta_{cp}$  воздуха может быть определена с учетом (2.41) в виде

$$\Theta_{cp} = \frac{t_{cp} - t_{в.п}}{t_o - t_{в.п}} = \frac{\int_0^l \Theta_x dx}{l} = \frac{1 - e^{-Al}}{Al} \quad (2.42)$$

Зависимость (2.42) показана на рис. 2.8 (кривая 3). Зная среднюю температуру  $t_{cp}$  воздуха в прослойке и коэффициенты теплопередачи внутренней и наружной частей ограждения  $K_v$  и  $K_n$ , можно провести полный расчет передачи теплоты через такую конструкцию. Для точного расчета лучистый теплообмен в прослойке необходимо учитывать отдельно, т.к. в величины  $K_v$  и  $K_n$  формулы (2.23) вошли только конвективные составляющие теплообмена на поверхностях.

Расход воздуха  $j$  (рис. 2.9) в вентилируемой прослойке нужно определять специальным гидравлическим расчетом. Расчет состоит в определении разности давлений  $\Delta P$ , под влиянием которой происходит движение воздуха, и в получении расчетного расхода, при котором гидравлические потери в прослойке  $\Delta H$  оказываются равными  $\Delta P$ .

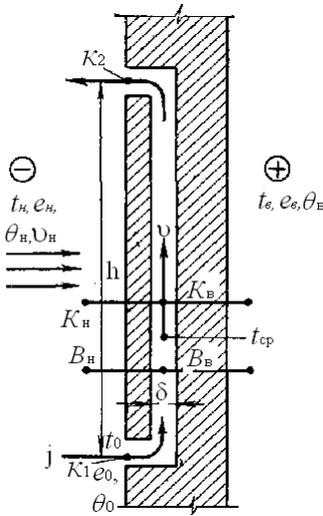


Рис. 2.9 – Теплопередача и влагопередача через ограждение с прослойкой, вентилируемой за счет гравитационных сил и ветра.

Давление  $\Delta P$  в прослойке с естественной циркуляцией (без искусственного побуждения движения воздуха) равно сумме ветрового  $\Delta P_u$  и гравитационного  $\Delta P_t$  давлений

$$\Delta P = \Delta P_u + \Delta P_t \quad (2.43)$$

Величина  $\Delta P_u$  равна разности давлений, создаваемых ветром на входе и выходе из прослойки

$$\Delta P_u = (k_1 - k_2) \frac{\rho v_n^2}{2} \approx (k_1 - k_2) \frac{v_n^2}{1,67} \quad (2.44)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  - аэродинамические коэффициенты на входе в прослойку и выходе из нее;  $v_n$  - скорость ветра.

Гравитационное давление  $\Delta P_t$ , Па ( $\text{кг/м}^2$ ), возникает за счет разности плотностей воздуха в прослойке  $\rho_{cp}$  и наружного воздуха  $\rho_n$

$$\Delta P_t = (\rho_n - \rho_{cp}) gh \approx 49 \cdot 10^{-3} (t_{cp} - t_n) gh \quad (2.45)$$

где  $h$  - разности высот отверстий входа воздуха в прослойку и выхода из нее.

Гидравлическими потерями на трение можно пренебречь при обычно небольших скоростях воздуха. Тогда потери давления определяются только местными сопротивлениями

$$\Delta H = \sum \xi \frac{\rho v^2}{2} \approx \sum \xi \frac{v^2}{1,67} \quad (2.46)$$

где  $\sum \xi$  - сумма коэффициентов местных сопротивлений (ориентировочно 0,5 - на входе, 1,0- на выходе, 1,0- на каждый поворот потока воздуха);

$v$  - скорость в воздушной прослойке, м/с.  
Массовый расход воздуха равен

$$j = 3600 \cdot v \rho \delta \quad (2.47)$$

где  $\delta$  - толщина воздушной прослойки, м.

Из условия равенства располагаемого давления и гидравлических потерь получим приближенную формулу для определения скорости воздуха в прослойке

$$v = \sqrt{\frac{(k_1 - k_2)v_n^2 + 0,08h(t_{cp} - t_n)}{\sum \xi}} \quad (2.48)$$

Если местными сопротивлениями являются только вход и выход воздуха с двумя поворотами потока, т. е.  $\sum \xi = 0,5 + 1,0 + 2,1,0 = 3,5$ , и отверстия вертикальной прослойки расположены на одной стороне здания ( $k_1 \approx k_2$ ), то решение упрощается и формула для определения  $v$  приобретает вид

$$v = 0,15 \sqrt{h(t_{cp} - t_n)} \quad (2.49)$$

где  $t_{cp}$  принимается равной  $t_{в.п.}$  (2.22) или рассчитывается по формуле (2.42).

Изложенный метод позволяет провести совместный расчет взаимосвязанных теплового и аэродинамического режимов вентилируемой прослойки.

Рассмотрим влагопередачу через ограждение с вентилируемой прослойкой. Воздух, проходя через прослойку, способен ассимилировать влагу, поступающую из помещения через внутреннюю часть ограждения. Удельная влагоемкость воздуха (способность 1 кг воздуха ассимилировать определенное количество водяного пара в г при изменении его упругости на 1 Па) определяется формулой

$$\eta = \frac{8,27 \cdot 10^4}{P - 0,387e} \quad (2.50)$$

где  $P$  - полное барометрическое давление, Па;

$e$  - парциальное давление водяного пара, Па.

Если величины  $P$  и  $e$  даны в мм.рт.ст, то  $\eta$  определяется по формуле

$$\eta = \frac{622}{P - 0,387e} \quad (2.51)$$

При  $P= 101,1$  кПа (760 мм.рт. ст.) величина влагоемкости равна приблизительно 0,835.

Процесс влагопередачи через ограждение с вентилируемой прослойкой полностью аналогичен, теплопередаче. В этих процессах имеет место следующее соответствие величин: упругость водяных паров воздуха в прослойке  $e$  соответствует его температуре  $t$ , влагоемкость потока воздуха  $\eta_j$  соответствует его теплоемкости  $c_{\eta j}$ , показатели проводимости пара внутренней и наружной частей  $B_v$  и  $B_n$  ограждения соответствуют  $K_v$  и  $K_n$ . Учитывая это и соответствие условий, решение задачи о влагопередаче через ограждение с вентилируемой прослойкой оказывается полностью одинаковым с рассматриваемым решением о теплопередаче. По аналогии с формулой (2.37) имеем

$$\frac{e_x - e_{e.n.}}{e_o - e_{e.n.}} = e^{-\frac{B_e + B_n x}{\eta_j}}, \quad (2.52)$$

где  $e_{e.n.}$  определяется по формуле, аналогичной (2.21) или (2.22)

Для режима ассимиляции влаги длина  $l'_{кр}$  начального участка, на котором происходит изменение упругости водяных паров, равна

$$l'_{кр} = \frac{3\eta_j}{B_e + B_n}. \quad (2.53)$$

Показатели влагопередачи  $B_v$  и  $B_n$  от воздуха в прослойке к окружающим средам через внутреннюю и наружную части конструкции имеют небольшие численные значения, поэтому в отличие от теплового процесса величина  $l'_{кр}$  обычно значительно больше протяженности продуха. Изменение упругости  $e$  происходит по всей длине прослойки.

Прослойке длиной  $l$  соответствует только близкий к прямолинейному участок кривой (1) на рис.2.9. Это обстоятельство позволяет упростить формулу и вести расчеты упругости водяного пара по длине прослойки, пользуясь линейной зависимостью вида

$$\frac{e - e_{6,n}}{e_o - e_{6,n}} \approx 1 - \frac{B_6 + B_n}{1,2\eta j} x. \quad (2.54)$$

Вентилирование прослойки предупреждает отсыревание конструкций. Увлажнения внутренней части ограждения не будет, если воздух способен ассимилировать влагу на всем протяжении прослойки, т. е. если его упругость остается по всей длине меньше максимальной ( $e < E$ ). Формулы (2.52) и (2.54) справедливы при соблюдении этого неравенства, т.к. изменение максимальной упругости  $E$  определяется только температурой воздуха в прослойке.

В конце прослойки температура равна  $t_l$  и упругость насыщенного воздуха, соответствующая этой температуре, будет  $E_{t_l}$ . Условие отсутствия конденсации в прослойке может быть записано в виде неравенства

$$e_l < E_{t_l} \quad (2.55)$$

Упругость водяных паров в конце канала может быть рассчитана по формуле (2.52), приближенно по (2.54) или определена с помощью рис. 2.8.

Предупреждение конденсации водяных паров может быть достигнуто увеличением пароизоляции внутренней части конструкции, уменьшением протяженности вентилируемой прослойки. Без изменения конструкции предупреждение конденсации обеспечивается достаточным проветриванием прослойки. Требуемый для предупреждения конденсации расход воздуха  $j$  через прослойку может быть определен из формулы (2.54) с учетом (2.50) и (2.55).

На наружной поверхности вентилируемое покрытие здания имеет непроницаемый гидроизоляционный ковер и  $B_n = 0$ . В этом частном случае требуемый расход воздуха  $j_{TP}$  при совместном рассмотрении уравнений равен

$$j_{TP} = \frac{B_6 l}{1,2\eta} \cdot \frac{e_6 - e_n}{e_6 - E_{t_l}}. \quad (2.56)$$

Расход  $j_{TP}$  может быть обеспечен изменением сечения продуха, созданием дополнительного гравитационного давления (подогревом воздуха,

устройством вентиляционной шахты), использованием ветрового давления с помощью дефлектора и т. д.

Рассмотренные положения справедливы для предупреждения отсыревания конструкции до прослойки. Увлажнение внешней части ограждения, которая обычно имеет небольшую толщину, связано с конденсацией водяных паров на наружной поверхности воздушной прослойки. Температура на этой поверхности  $\tau_2$  с учетом формулы (2.4) равна

$$\tau_2 = t_n + \frac{1}{R_o K'_n} (t_g - t_n). \quad (2.57)$$

Конденсации на поверхности не будет, если на всем протяжении  $\tau_2$  будет выше температуры точки росы воздуха в прослойке или если

$$E_{\tau_2} > e_l$$

Процессы тепло- и влагообмена и движения воздуха в прослойке связаны между собой, поэтому необходимо рассматривать их совместно. В реальных условиях влияние влагообмена на теплообмен и на движение воздуха в прослойке оказывается незначительным и его можно учитывать приближенно. Такое положение позволяет сначала рассматривать только тепловой и воздушный режимы, а затем рассчитывать влагопередачу через ограждение с воздушной прослойкой, принимая условия теплопередачи и воздухообмена заданными.

## 2.5 Односторонний нагрев или охлаждение ограждения

Для отопительной техники распространенной является задача о переходном процессе одностороннего нагрева или охлаждения стенки от одного стационарного состояния к другому. При регулярном отоплении помещения и устойчивых зимних температурах в однородной стене устанавливается стационарное линейное распределение температуры. При изменении внешних или внутренних параметров от одних значений к другим в стене возникнет переходный процесс перераспределения температур, соответствующий новым условиям на границах.

Рассмотрим случай, когда нагрев или охлаждение стенки заданы изменением теплового потока, поступающего на поверхность. Такой случай

близок, например, к теплопередаче через ограждение при ступенчатом изменении теплоотдачи нагревательных приборов системы отопления.

Примем следующие условия задачи (рис. 2.10, а, I). Помещение не отапливалось, по сечению ограждения была одинаковая температура  $t(x, z=0)$ , и тепловой поток на внутренней поверхности был равен  $q(0, 0) = 0$ . В момент  $z=0$  включили систему отопления и на внутреннюю поверхность стены ( $x=0$ ) начал подаваться неизменный тепловой поток  $q(x=0, z) = q_w = \text{const}$ . Со временем в толще стены установится линейное распределение температуры, соответствующее стационарной передаче теплоты. В условиях данной задачи примем, что на наружной поверхности ограждения температура остается неизменной, равной начальной:  $t(l, z) = t(l, 0)$ . Температура, которая установится на внутренней поверхности в стационарных условиях при  $z \rightarrow \infty$  будет соответствовать

$$t(0, \infty) - t(l, z) = q_w \frac{l}{\lambda} = q_w R_o. \quad (2.58)$$

Решение этой задачи в виде обобщенного графика приведено на рис. 2.10.б. На графике нанесены кривые изменения относительной избыточной температуры

$$\Theta = \frac{t(x, z) - t(x, 0)}{t(0, \infty) - t(x, 0)} \quad (2.59)$$

в различных сечениях стены  $x/l$  для различных моментов времени  $F_0$ . На графике (рис. 2.10 в) показано изменение относительной избыточной температуры  $\Theta_g$  на внутренней поверхности ограждения.

Решение, приведенное на рис. 2.10, б, в, может быть использовано для расчета теплопередачи при охлаждении, когда после регулярной подачи на поверхность потока теплоты  $q(0, 0) = \text{const}$  с момента времени  $z=0$  поступление теплоты прекратится  $q(0, z) = 0$  (рис. 2.10 а, II). Относительные избыточные температуры  $\Theta_{охл}$  в каждом сечении будут равны

$$\Theta_{охл} = 1 - \Theta.$$

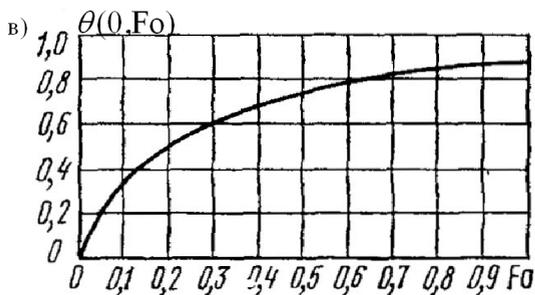
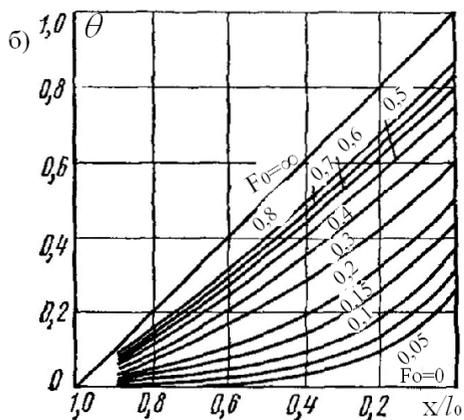
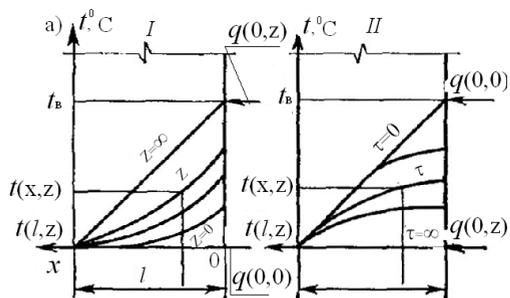


Рис. 2.10 – Односторонний нагрев или охлаждение ограждения из стационарного состояния при изменении теплового потока на поверхности: а – схема распределения температуры при нагреве (I) и охлаждении (II); б – изменение распределения относительной избыточной температуры; в – изменение распределения относительной избыточной температуры на поверхности ограждения.

## 2.6 Теплопроводность при промерзании или оттаивании влаги в материале

Материалы конструкций, ограждающих здание, обычно бывают влажными, поэтому во многих случаях процесс теплообмена в них связан с изменениями фазового состояния влаги.

Процессы фазовых превращений при нестационарной теплопередаче захватывают все ограждение; их интенсивность в отдельных сечениях различна. Однако для упрощения расчетов обычно предполагают, что процесс изменения фазового состояния влаги происходит при температуре, соответствующей промерзанию, оттаиванию, испарению или конденсации. Плоскость, соответствующую этой температуре, называют фронтом фазовых превращений.

Решение задачи о теплопередаче с учетом фазовых превращений влаги имеет большое практическое значение, но оно обычно связано с большими математическими трудностями.

Общую физико-математическую постановку задачи удобно проследить на примере промерзания влажной конструкции. Остальные случаи, (связанные с изменением агрегатного состояния влаги) полностью ему аналогичны.

Если влажная конструкция находится в талом состоянии, то при понижении температуры наружного воздуха ниже температуры замерзания влаги в материале в результате теплообмена на наружной поверхности и теплопроводности в конструкции образуется промерзший слой, толщина которого  $\delta$  изменяется во времени. Величина  $\delta$  является обычно искомой величиной. Изменяющаяся граница мерзлого слоя является фронтом промерзания с постоянной температурой замерзания влаги  $t_f$ . На этом фронте происходит замерзание влаги с выделением теплоты льдообразования  $q$ . На внутренней поверхности конструкции заданы условия теплообмена с воздухом.

Особенность математической формулировки задачи состоит в том, что, во-первых, для мерзлой ( $m$ ) и талой ( $t$ ) зон записывают отдельные уравнения теплопроводности, считая их как бы отдельными слоями с переменной во времени границей. Во-вторых, на подвижной границе стыка этих слоев задают особое условие. Это условие является уравнением баланса теплоты на фронте промерзания: количество теплоты, подводимое к границе из талой зоны, плюс теплота льдообразования, выделяемая при перемещении границы промерзания, равно теплоте, отводимой от этой

границы в мерзлую зону. Обозначая долю замерзающей влаги  $i$ , влажность материала  $u$ , кг/кг, и его плотность в сухом состоянии  $\rho_0$ , кг/м<sup>3</sup>, постановку этой задачи можно записать следующим образом:

уравнение для мерзлой зоны при  $0 < x < \delta$

$$\frac{\partial t_m}{\partial z} = a_m \frac{\partial^2 t_m}{\partial x^2}; \quad (2.60)$$

уравнение для талой зоны при  $\delta < x < l$

$$\frac{\partial t_m}{\partial z} = a_m \frac{\partial^2 t_m}{\partial x^2} \quad (2.61)$$

условие на фронте промерзания при  $x = \delta$

$$-\lambda \left. \frac{\partial t_m}{\partial x} \right|_{x=\delta} + riu\rho_0 \frac{d\delta}{dz} = -\lambda_m \left. \frac{\partial t_m}{\partial x} \right|_{x=\delta} \quad (2.62)$$

Условия теплообмена на поверхностях конструкции остаются неизменными, но следует учесть различие коэффициентов теплопроводности мерзлого материала на внешней и талого на внутренней поверхностях ограждения.

Рассмотрим аналитические решения простейшей задачи о промерзании ограждения. Ограждение в талом состоянии имело постоянную начальную температуру, равную температуре начала замерзания влаги  $t_\phi = 0^\circ\text{C}$

$$t_m(x, z = 0) = t_\phi = 0^\circ = const \quad (2.63)$$

На наружной поверхности температура мгновенно понизилась до постоянной отрицательной величины

$$t_m(x = 0, z) = t_n = const \quad (2.64)$$

Для упрощения решения принимается, что в мерзлой зоне ( $0 < x < \delta$ ) температура изменяется по линейному закону

$$\frac{\partial t_m}{\partial x} = \frac{t_\phi - t_H}{\delta} = -\frac{t_H}{\delta}. \quad (2.65)$$

Последнее предположение близко к обычно наблюдаемым условиям.

Условие на фронте промерзания (2.62) с учетом (2.63) и (2.64) имеет вид

$$riu\rho_o \frac{d\delta}{dz} = -\lambda_m \frac{t_H}{\delta} \quad (2.66)$$

Разделяя переменные в обеих частях, имеем

$$\delta d\delta = \frac{-\lambda_m t_H}{riu\rho_o} dz \quad (2.67)$$

После интегрирования в указанных пределах с учетом начального условия  $\delta=0$  при  $z=0$  найдем

$$\int_0^\delta \delta d\delta = \int_0^z \frac{-\lambda_m t_H}{riu\rho_o} dz \quad (2.68)$$

откуда

$$\frac{\delta^2}{2} = \frac{-\lambda_m t_H}{riu\rho_o} z, \quad (2.69)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{-2\lambda_m t_H z}{riu\rho_o}} = A\sqrt{z}, \quad (2.70)$$

где

$$A = \sqrt{\frac{-2\lambda_m t_H}{riu\rho_o}}. \quad (2.71)$$

По зависимости (2.70) можно определить время промерзания слоя. Для этого необходимо положить  $\delta=l$  и решить уравнение (2.69) относительно  $z$

$$z = \left( \frac{\delta}{A} \right)^2 = \frac{\delta^2 r i u \rho_o}{-2 \lambda_m t_n} \quad (2.72)$$

Знак минус в формулах (2.70) и (2.72) учитывает отрицательное значение температуры  $t_n$ .

Для инженера по отоплению наиболее важна задача о промерзании стены при изменении наружной и постоянной внутренней температурах.

Сравнительно малые толщины и теплоинерционность ограждения позволяют упростить постановку этой сложной задачи по примеру рассмотренного выше решения. Можно предположить, что и в талой и в мерзлой зонах ограждения температура изменяется по линейному закону. Причем на фронте промерзания будет излом этих линий (рис. 2.11, а).

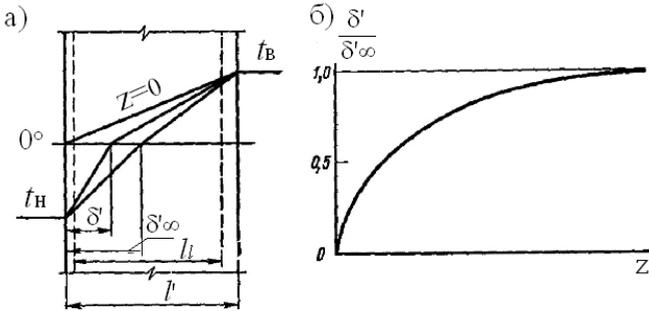


Рис. 2.11 – Постановка задачи о промерзании влажного ограждения при резком понижении температуры наружного воздуха: а – положение границы  $\delta'$  талой и мерзлой зон в конструкции; б – график развития зоны промерзания во времени.

Уравнение для определения положения границы  $\delta$  талой и мерзлой зон можно в этом случае записать в виде

$$\lambda_m \frac{t_\phi - t_n}{\delta'} - \lambda_m \frac{t_\phi - t_\phi}{l' - \delta'} = r i u \rho_o \frac{d\delta'}{dz}. \quad (2.73)$$

Здесь штрихом обозначены толщины стены  $l'$  и мерзлой  $\delta'$  части с учетом эквивалентных слоев (учитывающих теплообмен) на поверхностях ограждения.

Если наружная температура изменяется медленно, как это бывает в годовом цикле, то скорость передвижения фронта промерзания  $d\delta/dz \rightarrow 0$ . В этом случае скрытая теплота пренебрежимо мала и  $\delta$  изменяется медленно. Ее величину можно определить по условию стационарной теплопередачи, приравняв правую часть уравнения нулю.

### **Методические указания**

При изучении теплопередачи через ограждения надо уметь анализировать влияние отдельных составляющих на полное термическое сопротивление теплопередачи, назначение и взаимное расположение отдельных материальных слоев в конструкции современных многослойных ограждений. При расчете теплотерь через ограждения сложной конструкции, используя приведенное сопротивление теплопередачи, необходимо понять как определить факторы формы углов, откосов проемов в ограждении, стыков внутреннего и наружного ограждений, теплопроводных включений, а также расстояния в два калибра. Необходимо усвоить особенности теплопередачи в герметичных воздушных прослойках и факторы, влияющие на величину их сопротивления теплопередачи, понять методику расчета взаимосвязанных теплового и аэродинамического режимов вентилируемой прослойки. Усвоить последовательность расчетов по номограммам процесса одностороннего нагрева и охлаждения стенки при ступенчатом изменении теплопередачи приборов системы отопления, а также процессов промерзания или оттаивания влажного ограждения при изменении температуры наружного воздуха.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Из каких составляющих складывается полное термическое сопротивление однородного многослойного ограждения?
2. Каково назначение отдельных слоев конструкции многослойного ограждения?
3. Место расположения теплоизоляционного слоя в конструкции наружных ограждений?
4. Почему и когда необходимо использовать приведенное сопротивление теплопередачи?

5. Что показывает значение фактора формы?
6. Как определяется ширина в два калибра для характерных элементов сложного ограждения?
7. Для чего используют в ограждениях герметичные воздушные прослойки?
8. Как уменьшить тепловой поток через воздушную прослойку?
9. Для чего используют вентилируемые воздушные прослойки?
10. Как меняется во времени толщина промерзаемого слоя в наружном ограждении?