

## ГЛАВА 4. ВОЗДУШНЫЙ РЕЖИМ ОГРАЖДЕНИЯ

Воздушным режимом здания называют совокупность факторов и явлений, определяющих общий процесс обмена воздуха между всеми его помещениями и наружным воздухом, включающий перемещение воздуха внутри помещений, движение воздуха через ограждения, проемы, каналы и воздуховоды и обтекание здания потоком воздуха.

С позиций специальности «Теплоснабжение и вентиляция» наиболее актуальны следующие явления: инфильтрация и эксфильтрация воздуха через наружные ограждения и проемы (неорганизованный естественный воздухообмен, увеличивающий теплопотери помещения и снижающий теплозащитные свойства наружных ограждений); аэрация (организованный естественный воздухообмен для вентиляции теплонапряженных помещений); перетекание воздуха между смежными помещениями (неорганизованное и организованное).

Воздухообмен в здании происходит под действием естественных сил и работы искусственных побудителей движения воздуха. Наружный воздух поступает в помещения через неплотности ограждений или по каналам приточных вентиляционных систем. Внутри здания воздух может перетекать между помещениями через двери и неплотности во внутренних конструкциях. Внутренний воздух удаляется из помещений за пределы здания через неплотности наружных ограждений и по вентиляционным каналам вытяжных систем (рис. 4.1).

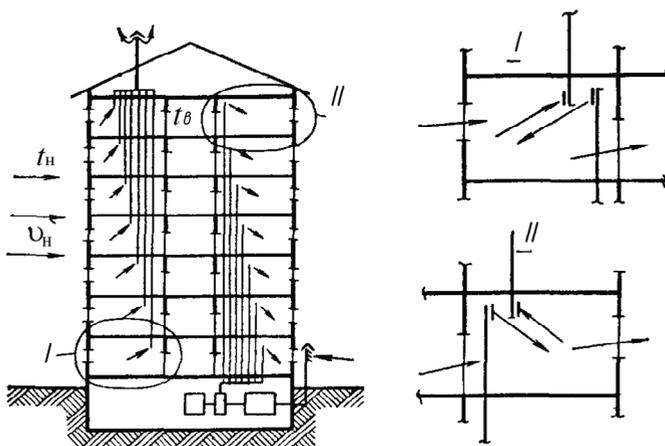


Рис. 4.1– Схема воздухообмена в здании.

Естественными силами, вызывающими движение воздуха в здании, являются гравитационное и ветровое давления. Температура и плотность воздуха внутри и снаружи здания обычно неодинаковы, в результате чего гравитационное давление по сторонам ограждений оказывается разным. За счет действия ветра на наветренной стороне здания создается подпор, а на поверхностях ограждений возникает избыточное статическое давление. На заветренной стороне образуется разрежение и статическое давление оказывается пониженным. Таким образом, при ветре давление с внешней стороны здания отличается от давления внутри помещений. Воздушный режим связан с тепловым режимом здания. Инfiltrация наружного воздуха приводит к дополнительным затратам теплоты на его подогрев. Экcфилтpация влажного внутреннего воздуха увлажняет и снижает теплозащитные свойства ограждений. Положение и размеры зоны инфильтрации и экcфилтpации в здании зависят от геометрии, конструктивных особенностей, режима вентилирования здания, а также от района строительства, времени года и параметров климата.

Между фильтрующимся воздухом и ограждением происходит теплообмен, интенсивность которого зависит от места филтpации в конструкции ограждения (массив, стык панелей, окна, воздушные прослойки и т. д.). Таким образом, возникает необходимость в расчетах воздушного режима здания: определении интенсивности инфильтрации и экcфилтpации воздуха и решении задачи теплопередачи отдельных частей ограждения при наличии воздухопроницания.

#### **4.1 Воздухопроницаемость конструкций**

Воздушный режим здания в большой мере зависит от воздухопроницаемости наружных и внутренних ограждений. Интенсивность филтpации воздуха зависит от разности давлений с двух сторон конструкции и ее свойства проницаемости для воздуха. В технических расчетах применяют различные характеристики воздухопроницаемости. В частности, пользуются понятием коэффициента воздухопроницания  $I$ , кг/(м<sup>2</sup>·ч·Па), и обратной величиной – сопротивлением воздухопроницанию  $R_i = 1/I$ . Коэффициент  $I$  равен количеству воздуха, кг, проходящему через 1 м<sup>2</sup> ограждения (или через 1 м щели, стыка) за 1 ч при разности давлений 1 Па.

Эти понятия предполагают линейную зависимость между расходом воздуха  $j$ , кг/(ч·м<sup>2</sup>), или кг/(ч·м) и разностью давлений  $\Delta p$ . Для большинства конструктивных элементов здания воздухопроницаемость зависит от разности давлений в виде

$$j = s' \cdot \Delta p^{1/n}, \quad (4.1)$$

где  $n=1 \div 2$ .

В диапазоне возможных для здания перепадов давлении фактические зависимости воздухопроницаемости  $j$  от  $\Delta p$ , например для окон и балконных дверей, могут быть достаточно точно аппроксимированы единой формулой

$$j = s \cdot \Delta p^{1/1,5} = s \cdot \Delta p^{2/3}, \quad (4.2)$$

где  $s$  – коэффициент проводимости воздуха (кг/(м<sup>2</sup>·ч·Па<sup>2/3</sup>)).

На рис. 4.2 приведены графики зависимости расхода воздуха  $j$  от  $\Delta p$  для отдельных воздухопроницаемых элементов здания.

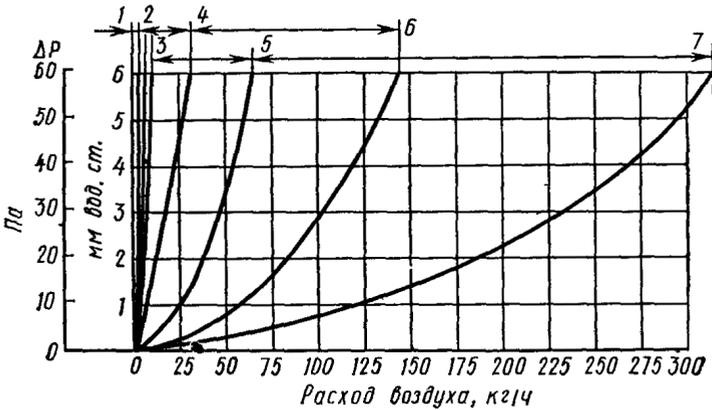


Рис. 4.2 – Кривые граничных значений воздухопроницаения через отдельные элементы здания: 1-2– диапазон воздухопроницаемости для стыковых панелей; 2-4 – то же, для массива ограждения; 3-5– то же, для окон; 4-6– то же, для дверей; 5-7– то же, для воздуховодов.

Между сопротивлением воздухопроницанию  $R$  и сопротивлением проводимости воздуха  $1/s$  при равных расходах имеет место зависимость, из которой следует, что они численно равны между собой при равных рас-

ходах и перепаде давления, равном 1 Па. Поэтому при небольших перепадах давления обычно нормируемые величины можно принимать (при расчете воздушного режима) за сопротивления проводимости воздуха  $1/s$ .

Для стен, стыковых соединений и входных дверей квартир предполагается линейная зависимость между расходом воздуха  $j$ , (кг/м<sup>2</sup>·ч) или (кг/м·ч), и разностью давления  $\Delta p$

$$j = s' \cdot \Delta p = \Delta p / R_u, \quad (4.3)$$

Для открытых отверстий и каналов показатель  $n=2$ , поэтому расход воздуха  $j$ , кг/ч, через всю их площадь равен

$$j = S'' \cdot \Delta p^{1/2}, \quad (4.4)$$

где  $S'$  – показатель проводимости воздуха всей площадью отверстия или канал, кг/(ч·Па).

## 4.2 Воздушный режим здания

Схема движения воздуха в здании показана на рис. 4.1. За счет разности температур под действием гравитационного давления в помещения нижних этажей через ограждения проникает наружный воздух. С наветренной стороны действие ветра усиливает инфильтрацию, с заветренной уменьшает ее. Внутренний воздух с первых этажей стремится проникнуть в верхние помещения. В основном он перетекает через внутренние двери и коридоры, которые соединены с лестничной клеткой. Из помещений верхних этажей воздух уходит через неплотности наружных ограждений за пределы здания. Помещения средних этажей могут находиться в условиях смешанного режима. На естественный воздухообмен в здании накладываются действие приточной и вытяжной вентиляции помещений.

Для определения расходов воздуха через конструктивные элементы ограждений и вентиляционных систем необходимо знать распределение давления внутри и снаружи здания. Для расчета воздушного режима здания должны быть известны его геометрия и внутренняя планировка, температура наружного и внутреннего воздуха, скорость ветра, а также показатели проводимости воздуха.

Формирование избыточного давления внутри здания и на его внешних поверхностях под влиянием естественных гравитационных сил и ветра показано на рис. 4.3.

При отсутствии ветра на поверхностях наружных стен будет действовать разной величины гравитационное давление. По закону сохранения энергии среднее давление по высоте внутри и снаружи здания будет одинаково. Относительно среднего уровня в нижней части здания давление столба теплого внутреннего воздуха будет меньше, чем давление столба холодного наружного воздуха с внешней поверхности стены. Эюра этого избыточного (относительно давления внутри здания) гравитационного давления показана на рис. 4.3,а. На противоположных стенах здания эюры одинаковы. В нижней части здания внешнее давление больше внутреннего и ординаты избыточного гравитационного давления имеют знак плюс.

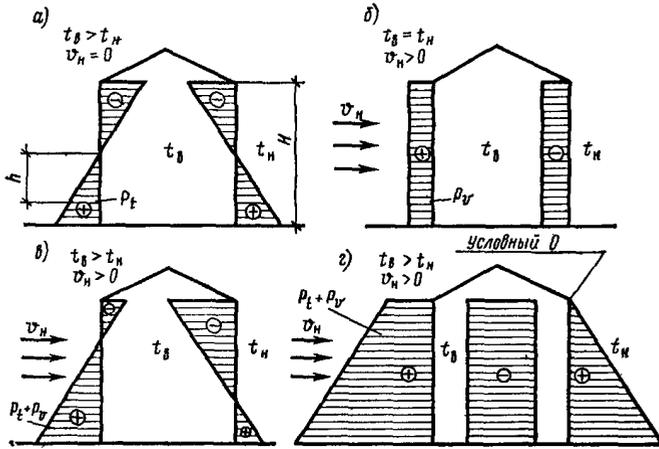


Рис. 4.3 – Построение эюр избыточных давлений.

Вверху здания внутреннее давление больше внешнего, поэтому ординаты эюры имеют знак минус. Величины ординат изменяются по высоте. В среднем сечении избыточное гравитационное давление равно нулю; на этом уровне через отверстие в стене здания движения воздуха не будет. Плоскость нулевого избыточного давления называется *нейтральной плоскостью здания*. Величины ординаты  $P_t$  эюры избыточного гравитационного давления на произвольном уровне  $h$  относительно нейтральной плоскости равны

$$P_t = \pm hg(\rho_n - \rho_g). \quad (4.5)$$

Если здание обдувается ветром, а температуры внутри здания и вне его равны, то на внешних поверхностях ограждений будет создаваться повышенное статическое давление или разрежение. По закону сохранения энергии, давление внутри здания при одинаковой проницаемости будет равно среднему между повышенным с наветренной и пониженным с заветренной сторон. Эпюры избыточного (относительно давления внутри здания) ветрового давления показаны на рис. 4.3, б. Ординаты этих эпюр по высоте здания одинаковы, т.к. предполагается постоянство скорости и аэродинамического режима обтекания по высоте. Для разных сторон здания они равны по абсолютной величине и различны по знаку.

Абсолютная величина избыточного ветрового давления равна

$$|\Delta P_V| = \frac{k_1 - k_2}{2} \cdot \frac{\rho_n \cdot v_n^2}{2}, \quad (4.6)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – аэродинамические коэффициенты соответственно с наветренной и заветренной сторон здания;

$(v_n^2 / 2) \rho_n$  – динамическое давление набегающего на здание потока воздуха.

К рассматриваемому явлению применим принцип независимости действия сил. В связи с этим при совместном действии гравитационных сил ветра величину избыточного давления можно найти простым сложением полученных частных результатов. Результат такого сложения при  $v_n > 0$  и  $t_b > t_n$  показан на рис. 4.3, в. Величины ординат эпюр избыточного давления в этом случае будут равны

$$P = \pm P_t \pm P_V = \pm hg(\rho_n - \rho_g) \pm \frac{k_1 - k_2}{2} \frac{\rho_n v_n^2}{2}. \quad (4.7)$$

Для расчета воздушного режима здания оказывается удобным построить эпюры избыточного давления так, чтобы по всему контуру здания они были одного знака (с плюсом). Для этого нужно за нуль отсчета принять давление, равное наибольшему отрицательному избыточному давлению. Этому давлению на рис. 4.3, в соответствует верхняя точка эпюры давления на заветренной стороне здания. В этом случае давление внутри здания равно

$$P_0 = \frac{Hg}{2}(\rho_n - \rho_e) + \frac{k_1 - k_2}{2} \frac{\rho_n v_n^2}{2} \quad (4.8)$$

Эпюры избыточных давлений на внешнем контуре здания относительно его внутреннего давления имеют вид, показанный на рис. 4.3,г. Ординаты этих эпюр равны  $P_0 + P$ .

В соответствии с этим для расчета инфильтрации воздуха через наружные ограждения разность давления воздуха снаружи и внутри помещения, Па, составит

$$\Delta P = (H_{ш} - H_3)g(\rho_n - \rho_e) + 0,5\rho_n v_n^2(k_1 - k_2)\beta_V - (P_0 - P_e), \quad (4.9)$$

где  $H_{ш}$  – высота устья вентиляционной шахты от уровня земли (отметка расположения точки условного нуля давления);

$H_3$  – высота центра рассматриваемого элемента здания (окна, стены и т. д.) от уровня земли;

$\beta_V$  – коэффициент, вводимый на скоростное давление и учитывающий изменение скорости ветра от высоты здания (для европейской зоны страны ориентировочное изменение скорости ветра (по высоте 0,03–0,015 м/с на 1 м высоты), изменение скорости ветра от наружной температуры зависит от района;

$P_0$  – давление воздуха в помещении, определяемое из условия соблюдения воздушного баланса;

$P_B$  – избыточное относительно  $P_0$  давление в помещении (прирост или уменьшение давления) из-за действия вентиляции.

Для административных зданий, корпусов НИИ и им подобных характерна сбалансированная приточно-вытяжная вентиляция в рабочем режиме или полное отключение вентиляции в нерабочее время  $P_B=0$ . Для таких зданий ориентировочное значение

$$P_0 \cong 0,5H_{ш}g(\rho_n - \rho_e) + 0,25\rho_n v_n^2(k_1 - k_2)\beta_V.$$

Действие вентиляции может изменить давление внутри здания  $P_0$  на величину избыточного вентиляционного давления  $P_B$ . В многоэтажных зданиях определение давления в отдельных помещениях осложняется наличием частично проницаемых для воздуха внутренних ограждений и различной протяженностью каналов вентиляционных систем.

Для оценки влияния воздушного режима здания на тепловой можно воспользоваться упрощенными способами расчета. Можно наметить три простых случая, для которых возможно приближенное решение.

*Случай А.* В многоэтажном здании во всех помещениях вентиляционная вытяжка полностью компенсируется вентиляционным притоком и поэтому  $P_v$  в помещениях равно нулю. К этому случаю относятся здания без вентиляции или с механической приточно-вытяжной вентиляцией всех помещений с равными расходами по притоку и вытяжке. Решение для этого случая соответствует рассмотренному построению эпюр давлений на рис. 4.3,г. Давление  $P_0$  равно давлению в лестничной клетке и в непосредственно соединенных с ней коридорах. Величина давления внутри отдельных помещений  $P_{n,x}$  находится между  $P_0$  и давлением на внешней поверхности ограждения этого помещения  $P_x$ . Принимая, что за счет разности давления  $P_x - P_0$  воздух проходит последовательно через окна и внутренние двери, выходящие в коридоры и лестничную клетку, исходные расходы воздуха и давление внутри помещений можно рассчитать по уравнению

$$\pm S_{ок} (P_x - P_{n,x})^{2/3} \pm S_{дв} (P_0 - P_{n,x}) = 0, \quad (4.10)$$

где  $S_{ок}$  и  $S_{дв}$  – характеристика проницаемости всей площади окон и дверей из помещения в коридор и на лестничную клетку.

Знак плюс соответствует положительному значению разности давлений, минус отрицательному.

*Случай Б.* Все помещения многоэтажного здания имеют естественную вытяжку. Каждое помещение имеет самостоятельный вытяжной вентиляционный канал с заданной характеристикой проницаемости  $S_{вх}$ . В этом случае эпюру избыточного давления по внешнему контуру здания можно построить аналогично рис. 4.3,г. Неизвестными будут давления в лестничной клетке  $P_0$  (с учетом вентиляции  $P_v$ ) и в отдельных помещениях  $P_{n,x}$ . Давление  $P_0$  будет равно средневзвешенному из давлений внутри всех  $k$  отдельных помещений, выходящих на лестницу

$$P_0 \approx \sum P_{n,x} / k. \quad (4.11)$$

Оно будет меньше давления  $P_0$  определенного для случая А. Расчет в этом варианте условий можно выполнить последовательным приближени-

ем, задавая давление  $P_0$  и рассчитывая графически или аналитически давление  $P_{n,x}$  в отдельных помещениях по уравнению

$$\pm S_{ок} (P_x - P_{n,x})^{2/3} \pm S_{дв} (P_0 - P_{n,x}) \pm S_{вх} (P_{выт} - P_{n,x})^{1/2} = 0, \quad (4.12)$$

где  $P_{выт}$  – давление на внешнем контуре здания в месте, где расположена шахта вытяжных систем.

Варианты А и Б соответствовали условию, когда в лестничной клетке давление формировалось только под влиянием выходящих на них одинаковых помещений. Считалось, что воздухопроницаемость наружной двери пренебрежимо мала.

*Случай В.* Предполагается, что давление в лестничной клетке задано. Оно обеспечивается работой приточной системы, поступлениями воздуха через наружную дверь из нижнего этажа, воздушный режим которого отличается от режима верхних этажей, и т. д. В этом случае расходы воздуха и давление внутри отдельных помещений определяются также решением уравнения (4.12).

### 4.3 Теплопередача через ограждения при наличии воздухопроницаемости

В современных многоэтажных зданиях из крупноразмерных элементов воздухопроницаемость существенно влияет на тепловой режим, теплотери помещений и на теплопередачу через отдельные ограждения.

Влияние воздухопроницаемости на теплопередачу для различных элементов ограждений сказывается по-разному. Для окон, которые обладают наименьшим сопротивлением фильтрации воздуха, результатом этого влияния будет увеличение теплотерь. Воздухопроницаемость массива и стыков в основном сказывается на понижении температуры на их внутренних поверхностях. Рассмотрим эти случаи.

**Теплопередача через воздухопроницаемое ограждение.** При фильтрации воздуха температурное поле и теплообмен на поверхностях пористого ограждения заметно изменяются. Происходит это в результате переноса теплоты потоком воздуха. Расходы воздуха, проникающего через ограждения, обычно невелики и составляют до  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$  через  $1 \text{ м}^2$  поверхности. Воздух двигается по порам и капиллярам медленно (числа Рейнольдса порядка 0,05), и его температура во всех сечениях ограждения практически равна

температуре твердого материала. Это обстоятельство значительно упрощает математическое рассмотрение процесса теплопередачи воздухопроницаемого ограждения.

Уравнение стационарного температурного поля плоского пористого ограждения при наличии фильтрации воздуха имеет вид

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dt}{dx} \right) + c_e j \frac{dt}{dx} = 0. \quad (4.13)$$

Для устранения ряда трудностей математического решения дифференциальное уравнение стационарного температурного поля многослойного ограждения при фильтрации удобно записать, пользуясь масштабом термических сопротивлений

$$\frac{d^2 t}{dR^2} + c_e j \frac{dt}{dR} = 0. \quad (4.14)$$

Анализ показывает, что условия тепловосприятия и теплоотдачи на поверхностях при фильтрации могут быть учтены эквивалентными слоями, как и при отсутствии воздухопроницания. При наличии вдува или отсоса воздуха через поверхность теплопередача через пограничные слои воздуха подчиняется также уравнению (4.13). Решение этого уравнения применительно к пограничному слою воздуха как в режиме ламинарного, так и в режиме турбулентного теплообмена показало, что движение воздуха через поверхность изменяет коэффициент теплообмена. При вдуве воздуха через поверхность (например, при инфильтрации на внутренней поверхности ограждения) интенсивность теплообмена уменьшается, а при отсосе (на внутренней поверхности ограждения при эксфильтрации) увеличивается. Коэффициент конвективного теплообмена при наличии фильтрации  $\alpha_\phi$  может быть достаточно надежно определен по упрощенной формуле

$$\alpha_\phi \approx \alpha \pm \frac{c_e j}{2}, \quad (4.15)$$

где плюс – при отсосе и минус – при вдуве.

Решением уравнения (4.14) является функция

$$t = C_1 + C_2 \frac{1}{c_e j} e^{c_e j R}. \quad (4.16)$$

Постоянные интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  могут быть найдены из граничных условий: при  $R=0$   $t=t_n$ ; при  $R=R_0$   $t=t_в$ .

В результате формула для определения  $t$  в произвольном сечении  $R$  принимает следующий вид

$$t = t_n + (t_в - t_n) \frac{e^{c_в j R} - 1}{e^{c_в j R_0} - 1}. \quad (4.17)$$

Формулу для определения теплового потока  $q$  в произвольном сечении ограждения получим, продифференцировав по  $R$  уравнение (4.17)

$$q = \frac{c_в j e^{c_в j R}}{e^{c_в j R_0} - 1} (t_в - t_n). \quad (4.18)$$

При эксфильтрации воздуха из помещения через ограждение в формулах (4.17) и (4.18) величина  $j$  берется со знаком минус.

При отсутствии фильтрации  $j=0$  уравнение (4.17) превращается в неопределенность, раскрыв которую по правилу Лопиталья

$$\lim_{j \rightarrow 0} \frac{e^{c_в j R} - 1}{e^{c_в j R_0} - 1} = \lim_{j \rightarrow 0} \frac{d(c_в j R - 1)/dj}{d(c_в j R_0 - 1)/dj} = \frac{R}{R_0}, \quad (4.19)$$

получим известное уравнение стационарного температурного поля

$$t = t_n + \frac{R}{R_0} (t_в - t_n). \quad (4.20)$$

При инфильтрации, как это следует из (4.18), тепловой поток на внутренней поверхности ограждения оказывается наибольшим. По мере приближения к наружной поверхности  $q$  уменьшается. Такое явление возникает в результате рекуперации (частичного возврата) теплоты на нагрев наружного воздуха, фильтрующегося через ограждение навстречу потоку теплоты (часто это явление называют экономайзерным эффектом). Из уравнения (4.18) следует, что разность тепловых потоков на внутренней  $q_в$  и наружной  $q_n$  границах ограждения равна

$$q_в - q_n = c_в j (t_в - t_n). \quad (4.21)$$



деляются только переносом теплоты воздухом. При эксфильтрации при  $\chi < 4$  трансмиссионные теплотопотери за счет разности наружной и внутренней температур практически отсутствуют. Таким образом, например, при больших расходах инфильтрации воздуха через пористое ограждение потеря теплоты фактически не будет, т.к. трансмиссионная теплота почти целиком используется на нагрев наружного воздуха. В результате оказывается возможным использовать эффект порового нагрева для экономии теплоты при вентиляции помещений. Расход теплоты можно заметно сократить, если вместо обычного проветривания с подогревом наружного воздуха применять проветривание через наружное пористое ограждение.

При обычной вентиляции расход теплоты будет равен сумме потерь теплоты через ограждения и затрат теплоты на нагрев приточного наружного воздуха. На рис. 4.4 нанесена прямая линия 3, соответствующая изменению этого расхода теплоты. На графике даны относительные (к потерям теплоты  $q_0$ ) расходы теплоты. Заштрихованная область показывает тепловой эффект порового проветривания, т. е. экономию теплоты при поровом проветривании по сравнению с суммарным расходом теплоты при обычном проветривании.

Представляет интерес случай сквозного проветривания помещения, когда потоки инфильтрационного и эксфильтрационного воздуха через ограждения равны. В таком случае относительное увеличение теплотопотерь будет определяться средней величиной  $(\epsilon_{инф} + \epsilon_{экс})/2$ , которая медленно возрастает до  $\chi = 1,5$  (см. кривую 6 на рис. 4.4) и затем изменяется приблизительно пропорционально  $\chi$ .

**Теплопередача через ограждение в зоне воздухопроницаемого стыка.** Общая картина теплопередачи воздухопроницаемого стыка показана в виде температурного поля сечения ограждения на рис.4.5,а. Через щель стыка фильтрует воздух. Он нагревается, но температура воздуха на выходе из щели остается ниже температуры на внутренней поверхности ограждения  $\tau_x$  около щели. Панель, прилегающую к стыку, можно рассматривать как полуограниченную пластину. На торце панели происходит теплообмен с воздухом, фильтрующим через щель.

На рис. 4.5, б показана графическая зависимость, с помощью которой можно определить минимальную температуру  $\tau_x$  около воздухопроницаемой щели. Величина снижения температуры внутренней поверхности зависит от количества воздуха, фильтрующегося через стык, и от тепло-

технических качеств утеплителя ограждения. При эффективных утеплителях влияние инфильтрации увеличивается, (чем меньше  $\lambda$ , тем ниже  $\tau_x$ ).

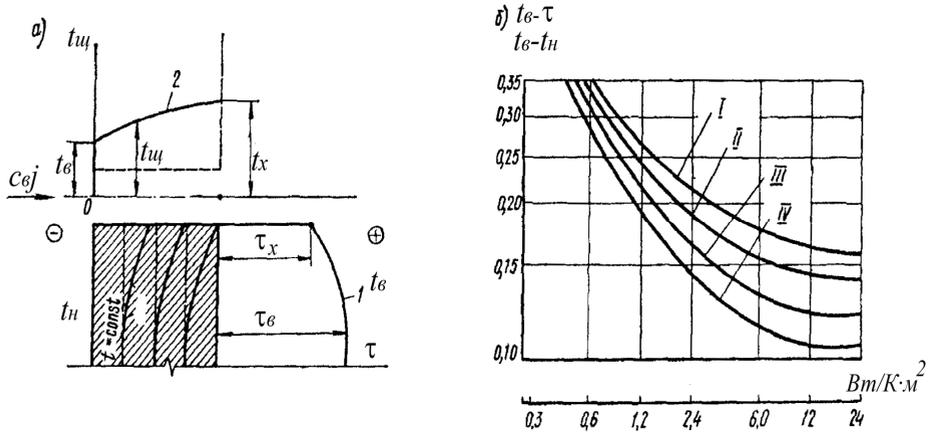


Рис. 4.5 – Тепловой режим воздухопроницаемого стыка (а) и изменение относительной избыточной минимальной температуры  $\tau_x$  поверхности ограждения около стыка от  $c_{\text{в}} j$  (б): 1 – распределение температур поверхности ограждения около стыка; 2– изменение температуры фильтрующегося воздуха через стык воздуха; 3– изотермы в сечении ограждения; I –  $R_0=0,76 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$ ; II –  $R_0=0,86 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$ ; III –  $R_0=1,38 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$ .

Дополнительные теплотопотери от инфильтрации воздуха через стык  $j_{\text{ст}}$  ( на 1м стыкового соединения в Вт/м) можно определить, выразив общие теплотопотери через теплосодержание воздуха по формуле

$$\Delta q_{u.cm} = A_{cm} j_{cm} c_{\text{в}} (t_{\text{г}} - t_{\text{н}}), \quad (4.24)$$

где  $A_{\text{ст}}$ – коэффициент, учитывающий догрев наружного воздуха, проходящего через стык, за счет основных теплотопотерь;  $A_{\text{ст}} \approx 0,7$ .

Обычно дополнительные теплотопотери в результате инфильтрации через стыки панелей и блоков наружных ограждений малы и в общих теплотопотерях их, как правило, не учитывают. Понижение температуры  $\tau_x$  может быть значительным, поэтому задача расчета состоит в основном в определении этой температуры.

**Теплопередача через окно с учетом воздухопроницания.** Конструкция окна обычно допускает некоторое воздухопроницание. Через при-

творы и стыки стекла с переплетом воздух попадает в межстекольное пространство, где нагревается до температуры воздушной прослойки, Через неплотности внутреннего остекления воздух попадает в помещение. Увеличение теплотерь окна при воздухопроницании происходит в результате нагрева воздуха и за счет снижения температуры внутреннего остекления (рис. 4.6, а). Дополнительные теплотери за счет воздухопроницания (в виде дополнительного потока теплоты  $\Delta q$ , отнесенного к  $1\text{ м}^2$  окна) равны

$$\Delta q = \Delta q_{\tau} + \Delta q_j = \frac{\tau_{\sigma} - \tau_{\sigma.u.}}{R_{\sigma}} + c_{\sigma} j (t_{\sigma} - t_{\text{м.ст}}), \quad (4.25)$$

где  $\tau_{\sigma} - \tau_{\sigma.u.}$  – понижение температуры поверхности внутреннего стекла при инфильтрации;

$t_{\text{м.ст}}$  – температура воздуха в межстекольном пространстве.

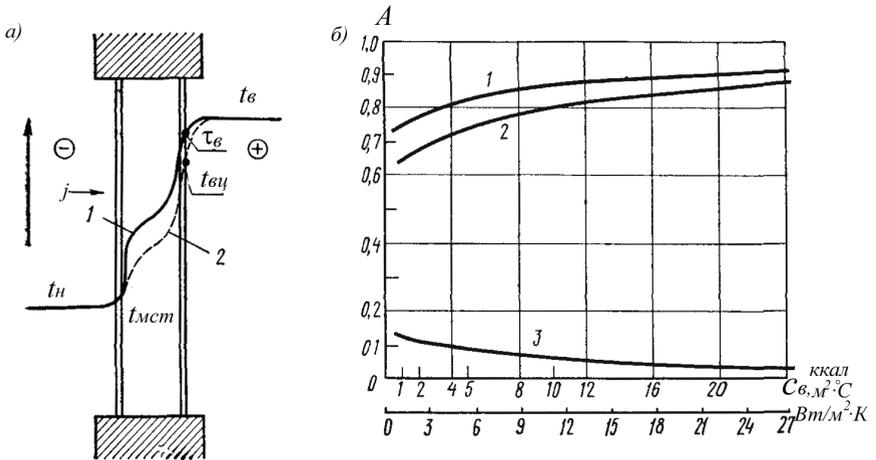


Рис. 4.6 – Теплопередача через воздухопроницаемое окно: а) – схема распределения температуры без инфильтрации (1) и при инфильтрации (2); б) – значения коэффициентов  $A_{\text{ок}}(1)$ ,  $A_j(2)$  и  $A_{\tau}(3)$ .

Величину  $\Delta q$  можно выразить через расчетную разность температур  $(t_{\sigma} - t_H)$ , введя, коэффициенты

$$A_j = \frac{t_{\sigma} - t_{\text{м.ст}}}{t_{\sigma} - t_H} \quad \text{и} \quad A_{\tau} = \frac{\tau_{\sigma} - \tau_{\sigma.u.}}{R_{\sigma} c_{\sigma} j (t_{\sigma} - t_H)}, \quad (4.26)$$

показывающие доли увеличения теплопотерь от инфильтрации за счет нагрева воздуха и понижения температуры внутреннего стекла.

В результате имеем

$$\Delta q = A_{\tau} c_{\tau} j (t_{\tau} - t_n) + A_j c_{\tau} j (t_{\tau} - t_n) = A_{ок} c_{\tau} j (t_{\tau} - t_n), \quad (4.27)$$

где  $A_{ок}$  – коэффициент, показывающий долю от полных затрат теплоты на нагрев воздуха, расходуемую на дополнительные потери теплоты при воздухопроницании через окно.

Для лучшего уяснения физического смысла коэффициента  $A$  в формулах (4.24) и (4.27) удобно сопоставить его с коэффициентом порового охлаждения, зависимость для которого приведена на рис.4.4. Ординаты заштрихованной области теплового эффекта порового охлаждения равны доле от полных затрат теплоты на нагрев воздуха, которая экономится при поровом нагреве воздуха. Эта доля сэкономленной теплоты для воздухопроницаемого пористого ограждения равна  $1 - A_0$ , где  $A_0$  – коэффициент для массива ограждения, соответствующий  $A_{ст}$  для стыка,  $A_{ок}$  – для окна.

Значения коэффициентов  $A_{ок}$ ,  $A_j$  и  $A_{\tau}$  для конструкции окон с двойным неспаренным остеклением приведена на рис. 4.6.б.

#### 4.4 Дополнительные затраты теплоты на нагрев воздуха

Дополнительные затраты теплоты в помещении при наличии воздухопроницаемых ограждений можно рассчитать по формуле

$$\Delta Q = (\sum A_{c_{\tau}} j F + \sum A_{c_{\tau}} j l) (t_{\tau} - t_n), \quad (4.28)$$

$$\Delta Q = \Delta Q_F + \Delta Q_l \quad (4.29)$$

где  $A$  – коэффициенты для разных конструкций;  $j$  – удельные расходы проникающего воздуха;  $F$  – площади окон, стен и т. д.,  $m^2$ ;  $l$  – протяженности стыков, щелей и т. п., м.

Ориентировочно можно принять значения коэффициента  $A$  для массива стен 0,5, для стыковых соединений 0,7, для двойных окон 0,8.

Дополнительные затраты теплоты на нагрев наружного воздуха, поступающего через открытые проемы окон и дверей и через одинарное остекление, определяют при  $A = 1,0$ .

Наибольшая величина  $\Delta Q$  в здании будет у помещений первого этажа, расположенных с наветренной стороны. Некоторое уменьшение основных теплопотерь будет у помещений в зоне эксфильтраций здания, наибольшее – у помещений верхнего этажа на заветренной стороне.

При расчете теплопотерь с учетом инфильтрации следует иметь в виду следующее. Наибольшее увеличение теплопотерь от инфильтрации имеют окна и особенно в промышленных зданиях, где притворы обычно не заклеиваются на зиму. В промышленных зданиях затраты теплоты на инфильтрацию составляют 30–50% от трансмиссионных теплопотерь. Теплопотери через стыки от инфильтрации составляют до 3–5% от основных теплопотерь, через массив ограждения дополнительные потери теплоты еще меньше. Однако при их теплотехническом расчете обязательно следует учитывать инфильтрацию, т.к. она ведет к заметному понижению температуры на внутренней поверхности ограждений.

### **Методические указания**

При изучении воздушного режима здания важно понять факторы и явления, определяющие общий процесс обмена воздуха между всеми его помещениями и наружным воздухом, поскольку инфильтрация наружного воздуха приводит к дополнительным затратам теплоты на его подогрев, а эксфильтрация влажного внутреннего воздуха увлажняет ограждения и снижает их теплозащитные свойства. Необходимо разобраться с методикой построения эпюр избыточных давлений воздуха внутри здания и на его внешних поверхностях под влиянием естественных гравитационных сил и сил ветра, а также влиянием воздухопроницаемости на теплопередачу через наружные ограждения, воздухопроницаемые стыки и окна.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Что называют воздушным режимом?
2. Какие явления являются актуальными для воздушного режима здания?
3. От чего зависит интенсивность фильтрации воздуха через ограждения?
4. Как строятся эпюры избыточных давлений внутри здания и на его внешних поверхностях?
5. Что такое нейтральная плоскость здания?

6. В чем суть эффекта порового нагрева?
7. Как определяются дополнительные теплотери за счет воздухопроницания стыка конструкций и окна?