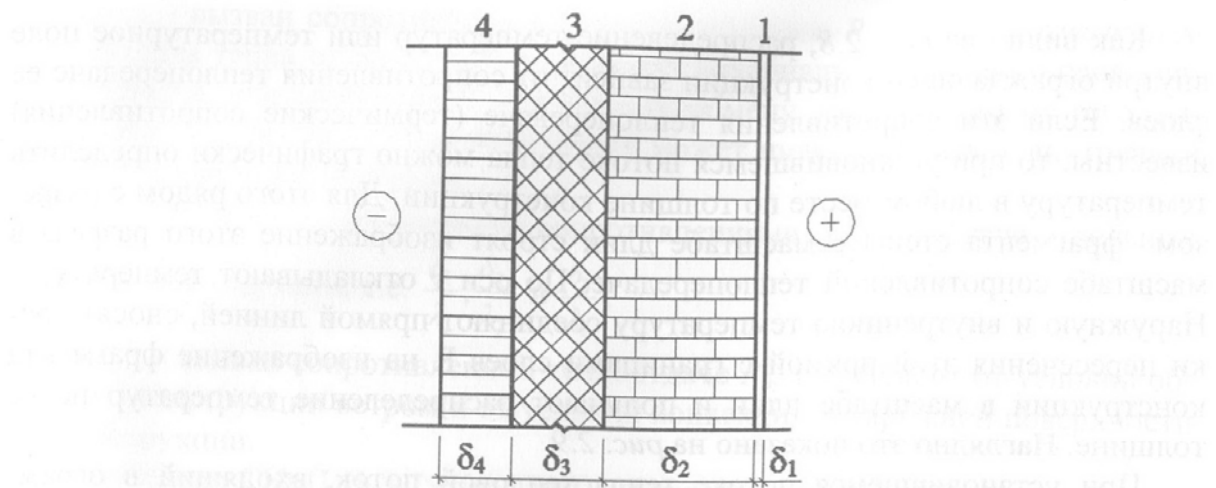


Методические указания по проведению практических занятий
по дисциплине
«Физика среды и ограждающих конструкций»



Пример 1. Определить сопротивление теплопередаче трехслойной наружной стены жилого дома из кирпича с утеплителем и внутренней штукатуркой для жилой комнаты в сухих условиях эксплуатации. Схема конструкции приведена на рис. 2.10.

Штукатурка цементно-песчаная: $\gamma = 1800 \text{ кг/м}^3$; $\delta_1 = 0,02 \text{ м}$; $\lambda_1 = 0,76$.

Кирпичная кладка из сплошного кирпича, глиняного обыкновенного на цементно-песчаном растворе: $\gamma = 1800 \text{ кг/м}^3$; $\delta_2 = 0,38 \text{ м}$; $\delta_4 = 0,12 \text{ м}$; $\lambda_2 = \lambda_4 = 0,70$.

Утеплитель – плиты минераловатные полужесткие на синтетическом связующем:

$\gamma = 100 \text{ кг/м}^3$; $\delta_3 = 0,15 \text{ м}$; $\lambda_3 = 0,056$

По формуле (2.3) находим:

$$R_0 = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,76} + \frac{0,12}{0,70} + \frac{0,15}{0,056} + \frac{0,38}{0,70} + \frac{1}{23} = 0,115 + 0,026 + 0,171 + 2,679 + 0,543 + 0,043 = 3,577 \frac{\text{м} \cdot ^\circ\text{С}}{\text{Вт}}.$$

Стена обладает высоким сопротивлением теплопередаче.

Основным требованием при теплотехническом расчете на зимние условия является:

$$R_0^{\phi} \geq R_0^{mp}. \quad (2.6)$$

Здесь индексы ϕ и mp обозначают фактическое и требуемое сопротивление теплопередаче. Возникает вопрос: каким сопротивлением теплопередаче стена должна обладать? Очевидно, что это зависит от климатических параметров местности. В Краснодаре потребуется гораздо меньшее сопротивление теплопередаче, чем в Иркутске.

СНиП «Строительная теплотехника» предлагает два подхода к определению требуемого сопротивления теплопередаче:

1. Из гигиенических соображений (на поверхности конструкции не должен выпадать конденсат и около нее не должно возникать ощущение холода и сквозняка). Для этого необходимо знать наружную и внутреннюю температуру воздуха и нормируемый перепад температур между внутренним воздухом и внутренней поверхностью стены. Исследования показывают, что для выполнения этих условий этот перепад должен составлять в помещениях жилых и общественных зда-

ний не более 4°C. В СНиП дается таблица перепада температур для различных конструкций и типов зданий (см. табл. 2.5)

2. Из соображений экономии энергии на отопление в зависимости от вида конструкций, продолжительности и средней температуры отопительного периода.

Из двух требуемых значений общего сопротивления теплопередаче выбирается наибольшее, хотя для большинства случаев большим является второе.

Предлагаемые в СНиП два подхода относятся к так называемому поэтапному методу нормирования, когда каждый вид ограждающих конструкций должен иметь общее сопротивление теплопередаче, большее или равное требуемому.

В современных Нормах по строительной теплотехнике Европейского союза EN 832, в современных Нормах ФРГ EnEV, включающих нормы DIN 4108-6 и DIN 4701-10, в Московских городских строительных нормах МГСН 2.01-94 «Энергосбережение в зданиях», а также в СНиП 23-02-2003 применен новый подход, согласно которому общие приведенные теплопотери здания не должны быть больше нормируемой величины. Такой подход особенно целесообразен в случае реконструкции старых зданий с богато декорированными фасадами, когда повышение сопротивления теплопередаче стены с помощью утепления снаружи становится невозможным. Более подробно об этом будет рассказано в последующих параграфах.

Из формулы (2.4):

$$\frac{t_s - t_n}{R_0} = \frac{t_s - \tau_s}{R_s};$$
$$R_0 = \frac{t_s - t_n}{t_s - \tau_s} \cdot R_s; \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{м}^2/\text{Вт},$$

Здесь t_s – нормируемая температура внутреннего воздуха, °C, для жилых зданий $t_s = +20^\circ\text{C}$; t_n – расчетная зимняя температура наружного воздуха, °C, равная средней температуре пяти или трех наиболее холодных суток или средней температуре наиболее холодных суток, которая выбирается в зависимости от массивности конструкции. Величина t_n принимается по СНиП 23-01-99. Для некоторых характерных городов климатические данные приведены в прил. 2.6; $(t_s - \tau_s) = \Delta \tau_s$ – нормативный температурный перепад между внутренним воздухом и внутренней поверхностью ограждающей конструкции, принимаемый по табл. в СНиП (см. прил. 2.5).

Таким образом, требуемая величина сопротивления теплопередаче из гигиенических соображений равна:

$$R_0^{mp} = \frac{(t_s - t_n) \cdot n}{\Delta t_s \cdot \alpha_s}. \quad (2.7)$$

Здесь n – коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху (по таблице в СНиП) (прил. 2.7).

Для стен и чердачных перекрытий с кровлей из штучных материалов (черепица, кровельные листы) $n = 1$.

Из условий энергосбережения величину R_0^{mp} следует принимать по интерполяции по таблице в СНиП (прил. 2.8) в зависимости от типа зданий, вида ограждающих конструкций и величины ГСОП (градусо-сутки отопительного периода) для данного района строительства.

$$ГСОП = (t_e - t_{om.пер.}) \cdot Z_{om.пер.}, \quad (2.8^1)$$

где $t_{om.пер.}$ и $Z_{om.пер.}$ – средняя температура, °С, и продолжительность, сут., периода со средней суточной температурой воздуха ниже или равной 8°С по СНиП 23.01.99.

Следует помнить, что величина R_0^{mp} , определяемая по формуле 2.6 или с помощью формулы 2.8 и табл. прил. 2.8 соответствует условиям установившегося потока тепла и не может отражать процесс постепенного охлаждения конструкции, происходящего в действительности. Об этом более подробно – в параграфе, посвященном нестационарному тепловому режиму и теплоустойчивости.

Пример 2. Определить сопротивление теплопередаче кирпичной стены колодцевой кладки (с вертикальными пустотами-колодцами) при заполнении пустот перлитобетоном плотностью 1000 кг/м³ (см. рис. 2.11).

Кирпич глиняный обыкновенный на цементно-песчаном растворе во влажных условиях эксплуатации (А):

$$\lambda_k = 0,7 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}.$$

$$\text{Перлитобетон: } \gamma_0 = 1000 \text{ кг/м}^3;$$

$$\lambda_{п.б.} = 0,33 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}.$$

1. Разрезаем стену на участки I, II, I, параллельные направлению потока тепла, и рассчитываем величину R_a . Высота участков 1 м.

$$R_{aI} = \frac{\delta_I}{\lambda_k} = \frac{0,62}{0,7} = 0,89 \text{ м}^2 \cdot \text{°С / Вт}; F_I = 0,12 \cdot 1 = 0,12 \text{ м}^2;$$

$$R_{aII} = \frac{\delta_I}{\lambda_k} + \frac{\delta_2}{\lambda_{п.б.}} + \frac{\delta_3}{\lambda_k} = \frac{0,12}{0,7} + \frac{0,25}{0,33} + \frac{0,25}{0,7} = 1,29 \text{ м}^2 \cdot \text{°С / Вт}; F_2 = 0,51 \cdot 1 = 0,51 \text{ м}^2.$$

По формуле (2.9):

$$R_a = \frac{0,12 + 0,51}{\frac{0,12}{0,89} + \frac{0,51}{1,29}} = 1,19 \text{ м}^2 \cdot \text{°С / Вт}.$$

2. Разрезаем стену на участки 1, 2, 3, перпендикулярные потоку тепла, и рассчитываем величину R_b . Высота участков 1 м.

$$R_{b1} = \frac{\delta_1}{\lambda_k} = \frac{0,12}{0,7} = 0,17 \text{ м}^2 \cdot \text{°С / Вт}; F_I = 0,12 \cdot 1 = 0,12 \text{ м}^2;$$

$$R_I = \frac{\delta_I}{\lambda_k} = \frac{0,12}{0,7} = 0,17 \text{ м}^2 \cdot \text{°С / Вт};$$

$$F_{II} = 0,51 \text{ м}^2; \quad R_{II} = \frac{0,51}{0,33} = 1,54.$$

$$R_{b2} = \frac{\frac{F_I + F_{II}}{R_I + R_{II}}}{\frac{0,12}{0,17} + \frac{0,51}{1,54}} = \frac{0,63}{0,71 + 0,33} = 0,61 \text{ м}^2 \cdot \text{°С / Вт}.$$

$$R_{b3} = \frac{\delta_3}{\lambda_k} = \frac{0,25}{0,7} = 0,36 \text{ м}^2 \cdot \text{°С / Вт}.$$

$$R_b = 0,17 + 0,61 + 0,36 = 1,14 \text{ м}^2 \cdot \text{°С / Вт}.$$

Разница между R_a и R_b менее 25%.

$$R_{\kappa}^{np} = \frac{1,19 + 1,14 \cdot 2}{3} = 1,16 \text{ м}^2 \cdot \text{°С / Вт}.$$

Величина общего сопротивления теплопередаче стены с учетом двустороннего оштукатуривания сложным раствором $\delta = 0,02$ м и $\lambda_{шт} = 0,7$ Вт/(м·°С).

$$R_o = \frac{1}{8,7} + \frac{2 \cdot 0,02}{0,7} + 1,16 + \frac{1}{23} = 0,11 + 0,06 + 1,16 + 0,04 = 1,37 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{Вт}.$$

Согласно таблице в СНиП «Строительная климатология» (табл. прил. 2.6 и табл. прил. 2.8) такие стены можно применять только в производственных зданиях с сухим и нормальным режимом при строительстве в г. Сочи Краснодарского края:

$$t_{\text{ср.от.}} = +6,4^\circ\text{C}; Z_{\text{от.}} = 72 \text{ сут.} \quad \text{ГСОП} = (20 - 6,4) \cdot 72 = 979,2.$$

По экстраполяции $R_o^{\text{мп.}} = 1,20 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{Вт} < R_o = 1,37 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{Вт}.$

В других районах России такая стена по Нормам не может быть применена. Для жилых зданий в Московском регионе сопротивление теплопередаче должно быть в 2,3 раза больше.

Рассчитаем температуру внутренней поверхности стены в месте кирпичной перемычки, являющейся неметаллическим теплопроводным включением, по формуле 2.15 (случай Па, рис. 2.12) при $a/\delta = 0,12/0,12 = 1$ и при $\delta_0/\delta_n = 0,25/0,12 = 2,08$.

По таблице прил. 2.11 находим величину эмпирического коэффициента $\eta = 0,73$.

$R_{o,\text{усл.}}$ определяем без учета температурного включения:

$$R_{o,\text{усл.}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,7} + \frac{0,25}{0,7} + \frac{0,25}{0,33} + \frac{0,12}{0,7} + \frac{0,02}{0,7} + \frac{1}{23};$$

$$R_{o,\text{усл.}} = 1,502 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{Вт};$$

$$t_g = +20^\circ;$$

Наружную температуру принимаем для стены средней массивности в г. Москве (средняя температура наиболее холодных трех суток).

$$t_n = -30^\circ. R'_o = 0,89 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{Вт} = R_{al}; \alpha_g = 8,7; n = 1;$$

$$\tau'_g = 20 - \frac{1(20+30)}{1,502 \cdot 8,7} \left[1 + 0,73 \left(\frac{1,502}{0,89} - 1 \right) \right] = 14,25^\circ.$$

Точка росы для жилых зданий при $t_g = +20^\circ$ и $\varphi = 55\%$ по табл. 1,2 МГСН 2.01-94 (см. табл. прил. 2.13) равна: $\tau_p = 10,7^\circ < \tau'_g = 14,25^\circ$.

Это означает, что даже в климатических условиях г. Москвы на такой стене в местах теплопроводных включений конденсат выпадать не будет. Но эта стена не удовлетворяет Нормам по условиям энергосбережения. Затраты энергии на отопление в таком доме будут слишком велики.

По гигиеническим соображениям для г. Москвы:

$$R_o^{\text{мп.}} = \frac{(t_g - t_n)n}{\Delta t_g \cdot \alpha_g} = \frac{(20+30) \cdot 1}{4 \cdot 8,7} = 1,43 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{Вт};$$

$$R_o = 1,37 < 1,43 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{Вт}.$$

Расчет показывает, что хотя внутренняя поверхность стены при наружной температуре -30° останется сухой, находиться вблизи нее будет неприятно. Возникает ощущение холода и сквозняка.

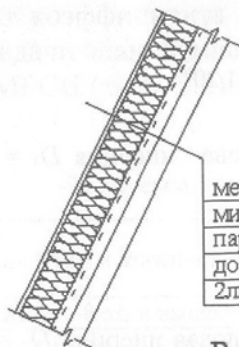
Пример 3. Рассчитать конструкцию невентилируемой крыши мансарды в коттедже, строящемся в районе г. Ставрополя. (Условия эксплуатации сухие).

1. Определить требуемую толщину слоя утеплителя из расчета на теплозащиту в зимних условиях.
2. Проверить соответствие конструкции мансарды на теплоустойчивость в летних условиях.
3. Климатические данные для г. Ставрополя определяем по СНиП 23-01-99.

$$t_{\text{р.июля}} = 21,9^\circ; t_1 = -23^\circ; t_5 = -18^\circ; t_{\text{ср.от.}} = 0,3; Z_{\text{от.}} = 169.$$

$$q_{\text{пах}} = 563 \text{ Вт/м}^2; I_{\text{ср.}} = 180 \text{ Вт/м}^2; (\varphi = 45^\circ \text{ с.ш.}); v = 5,8 \text{ м/с}.$$

$$t_{\text{н.}} = 19,7^\circ$$



металлочерепица	$\delta = 0,002$; $\lambda = 58$; $S = 126,5$
мин. вата, жестк. плиты	$\delta = 0,15$; $\lambda = 0,052$; $S = 0,42$
пароизоляция -ПЭ пленка	
доски подшивки	$\delta = 0,02$; $\lambda = 0,14$; $S = 3,87$
Листа ГКЛ	$\delta = 0,04$; $\lambda = 0,19$; $S = 3,34$

В такой конструкции пароизоляция должна быть выполнена особенно тщательно. В большинстве случаев в таких крышах между металлочерепицей и утеплителем устраивается вентилируемая воздушная прослойка толщиной не менее 50 мм.

Рис. 2.16. Расчетная схема к примеру 3 (крыша мансарды)

Определение требуемой толщины утеплителя из расчета на зимние условия:

$$\Gamma_{\text{СОП}} = (t_B - t_{\text{ср.ом.}}) Z_{\text{ом}} = (20 - 0,3) 169 = 3329,3.$$

По табл. 2.7 по интерполяции находим

$$R_O^{TP} = 3,4 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт.}$$

Состав конструкции: 2 слоя гипсокартона ($\lambda = 0,19$), доски подшивки ($\lambda = 0,14$), ПЭ пленка (в расчете не учитывается), утеплитель ($\lambda = 0,052$), металлочерепица - сталь ($\lambda = 58$)(в расчете не учитывается), см.рис. 2.16.

$$D = \frac{2 \cdot 0,02}{0,19} \cdot 3,34 + \frac{0,02}{0,14} \cdot 3,87 + \frac{0,15}{0,052} \cdot 0,42 + \frac{0,002}{58} \cdot 126,5.$$

Здесь $S_{\text{гк}} = 3,34$; $S_{\text{дерева}} = 3,87$; $S_{\text{мин.вата}} = 0,42$ и $S_{\text{металла}} = 126,5$

$$D = \frac{0,70}{0,19} + \frac{0,55}{0,052} + \frac{1,21}{0,14} + \frac{0,004}{58} = 2,464$$

$$\frac{1}{23} + \frac{x}{0,052} + \frac{0,02}{0,14} + \frac{2 \cdot 0,02}{0,19} + \frac{1}{8,7} = R_O^{TP} = 3,4;$$

$$0,043 + \frac{x}{0,052} + 0,14 + 0,21 + 0,11 = 3,4;$$

$$x = 0,151 \text{ м} \approx 0,15 \text{ м.}$$

Толщина утеплителя должна составлять 15 см.

Проверка конструкции крыши-мансарды на теплоустойчивость в летних условиях.

$$A_{\text{ТВ}}^{TP} 2,5 - 0,1(21,9 - 21) = 2,41^\circ;$$

$$A_{\text{ин}}^{\text{расч}} = 0,5 \cdot 19,7 + \frac{0,8(563 - 180)}{\alpha_n};$$

$$\alpha_n = 1,16(5 + 10\sqrt{5,8}) = 33,74;$$

$$A_{тн}^{расч} = 0,5 \cdot 19,7 + \frac{0,8(563 - 180)}{33,74} = 21,20^\circ.$$

Толщина слоя гипсокартона равна 0,04 м. Его тепловая инерция $D_1 = 0,70 < 1$;
 $R_1 = 0,04/0,19 = 0,21$.

$$Y_1 = \frac{0,21 \cdot 3,34^2 + 8,7}{1 + 0,21 \cdot 8,7} = 3,90.$$

Толщина слоя досок подшивки равна 0,02 м. Его тепловая инерция $D_2 = 0,55 < 1$;
 $R_2 = 0,14$;

$$Y_2 = \frac{0,14 \cdot 3,87^2 + 3,90}{1 + 0,14 \cdot 3,90} = 3,88.$$

Толщина слоя утеплителя равна 0,15 м. Его тепловая инерция $D_3 = 1,21 > 1$; след.
 $Y_3 = S_3 = 0,42$.

Толщина металлочерепицы 0,002 м; $\lambda = 58$; $S_4 = 126,5$.

$$D_4 = \frac{0,002}{58} \cdot 126,5 = 0,004; R_4 = 0,00003;$$

$$Y_4 = \frac{0,00003 \cdot 126,5^2 + 0,42}{1 + 0,00003 \cdot 0,42} = 0,90.$$

$$\nu = 0,9 \cdot 2,718^{\frac{2,464}{\sqrt{2}}} \cdot \frac{(3,34 + 8,7)(3,87 + 3,90)(0,42 + 3,87)(126,5 + 0,42)(33,74 + 0,90)}{(3,34 + 3,90)(3,88 + 3,87)(0,42 + 0,42)(126,5 + 0,90) \cdot 33,74}$$

$$\nu = 0,9 \cdot 5,71 \cdot \frac{12,04 \cdot 7,77 \cdot 4,29 \cdot 126,92 \cdot 34,64}{7,24 \cdot 7,74 \cdot 0,84 \cdot 127,40 \cdot 33,74} = 0,9 \cdot 5,71 \cdot 8,72 = 44,81$$

$$A_{тв} = \frac{A_{тн}^{расч}}{\nu} = \frac{21,20}{44,81} = 0,47^\circ;$$

$$A_{тв} = 0,47^\circ < A_{тн}^{расч} = 2,41^\circ$$

Конструкция мансарды удовлетворяет требованиям по теплоустойчивости в летних условиях для климатических условий г. Ставрополя.

Пример 4. Необходимо провести комплекс мероприятий при реставрации памятника архитектуры без разрушения декора его фасадов с целью обеспечить соблюдение требований МГСН 2.01-94 по энергосбережению.

Возможные мероприятия:

1. Утепление стен изнутри.
2. Замена существующих окон и наружных дверей на современные, утепленные.

3. Утепление чердачного перекрытия.

Из перечисленных мероприятий возможно проведение только второго и третьего. Утепление стен изнутри приведет к нарушению температурного режима стен, к резкому снижению их тепловой инерции. Основной несущий материал стен будет находиться зимой в замороженном состоянии, что приводит к его разрушению. Даже при тщательно выполненной пароизоляции не удастся избежать намокания отдельных участков стен вблизи перекрытий (мостики холода у опирания перекрытий на наружные стены).

Существующее состояние наружных ограждающих конструкций.

Площадь глухих участков стен $A_{cm} = 696,9 \text{ м}^2$; $Ro_{cm} = 1,71$.

Площадь окон $A_{ок} = 103,2 \text{ м}^2$; $Ro_{ок} = 0,42 + 0,11 + 0,04 = 0,61$.

Площадь дверей $A_{дв} = 6,3 \text{ м}^2$; $Ro_{дв} = 0,3 + 0,11 + 0,04 = 0,45$.

Площадь чердачного перекрытия $A_n = 377 \text{ м}^2$; $Ro_n = 0,91$.

Площадь пола подвала $A_{пол} = 377 \text{ м}^2$; $Ro_{пол} = 0,125 + 0,11 + 0,17 = 0,40$.

$\Sigma A = 1560,4 \text{ м}^2$.

Приведенный фактический коэффициент теплопередачи равен:

$$K_{30}^{\phi} = (696,9/1,71 + 103,2/0,61 + 6,3/0,45 + 377/0,91 + 0,5 \cdot 377/0,40)/1560,4$$

$$K_{30}^{\phi} = 1476,26/1560,4 = 0,946 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}) > K_{30}^{mp} = 0,55.$$

Если провести замену окон, дверей и утепления чердачного перекрытия и пола подвала, величина сопротивления теплопередаче этих конструкций будет равна:

$$Ro_{ок} = 0,72 + 0,11 + 0,04 = 0,87;$$

$$Ro_{дв} = 0,95 + 0,11 + 0,04 = 1,1;$$

$$Ro_n = 4,6 + 0,11 + 0,08 = 4,79;$$

$$Ro_{пол} = 4 + 0,11 + 0,17 = 4,28.$$

$$K_{30}^{\phi} = (696,9/1,71 + 103,2/0,87 + 6,3/1,1 + 377/4,79 + 0,5 \cdot 377/4,28)/1560,4;$$

$$K_{30}^{\phi} = (4,7 + 118,63 + 5,7 + 78,71 + 44,04)/1560,4 = 654,07/1560,4 = 0,42;$$

$$K_{30}^{\phi} = 0,42 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}) < K_{30}^{mp} = 0,55 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}).$$

Приведенный коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций здания после проведения указанных мероприятий будет соответствовать требованиям МГСН 2.01-94 по энергосбережению.

Нормами СНиП 23-02-2003 установлены три показателя тепловой защиты здания:

- энергетический, приведенное сопротивление теплопередаче отдельных элементов ограждающих конструкций здания должно соответствовать требованиям экономии энергии (по табл. прил. 2.8 с использованием формулы 2.8);
- санитарно-гигиенический, включающий температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и температурой на поверхности ограждающих конструкций, которая должна быть выше температуры точки росы (см. формулу 2.7);
- удельный расход тепловой энергии на отопление здания, позволяющий варьировать величинами теплозащитных свойств различных видов ограждающих конструкций зданий с учетом объемно-планировочных решений здания и выбора систем поддержания микроклимата для достижения нормируемого значения этого показателя.

Требования тепловой защиты здания будут выполнены, если в них будут соблюдены требования показателей «а» и «б» либо «б» и «в».

Расчетный удельный расход тепловой энергии на отопление зданий за отопительный период $q_{от}$, кДж/(м²·С·сут) или кДж/(м³·С·сут) (на 1 м² отапливаемой площади пола квартир, или полезной площади помещений, или на 1 м³ отапливаемого объема), должен быть меньше или равен нормируемому значению $q_{от}^{норм}$ определяемому по табл. прил. 2.19 и 2.20 (табл. 8, 9 СНиП 23-02-2003):

$$q_{от} \geq q_{от}^{норм}. \quad (2.40)$$

При устройстве в зданиях поквартирных и автономных, в том числе крышных, встроенных и пристроенных котельных или стационарного электроотопления $q_{от}^{норм}$ равен величине определяемой по табл. 2.19 или 2.20, умноженной на коэффициент ε , рассчитываемый по формуле

$$\varepsilon = \varepsilon_{дец} / \varepsilon_{центр}, \quad (2.41)$$

где $\varepsilon_{дец}$ и $\varepsilon_{центр}$ – расчетные коэффициенты энергетической эффективности поквартирных и автономных систем теплоснабжения или стационарного электроотопления и централизованной системы теплоснабжения соответственно, принимаемые по проектным данным, осредненным за отопительный период. Расчет этих коэффициентов приведен в своде правил к СНиП – СП 23-101-2000.

Расчетный удельный расход тепловой энергии на отопление зданий следует определять по формуле

$$q_{от} = 10^3 \cdot Q_{от} / (A_{от} \cdot D_d)$$

или

$$q_{от} = 10^3 \cdot Q_{от} / (V_{от} \cdot D_d), \quad (2.42)$$

где D_d или ГСОП, определяется по формуле (2.8); $A_{от}$ и $V_{от}$ – сумма отапливаемых площадей и объемов в здании, соответственно; $Q_{от}$ – расход тепловой энергии на отопление здания в течение отопительного периода, МДж, определяемый величинами теплотеперь и теплоступлений в здании:

$$Q_{от} = [Q_{mn} - (Q_{в.н.} + Q_{сол.}) \cdot \xi] \cdot \beta_{от}, \quad (2.43)$$

где Q_{mn} – общие теплотепри здания через наружные ограждающие конструкции, МДж.

$$Q_{mn} = 0,0864 \cdot K_o^{зд} \cdot D_d \cdot \sum A_i, \quad (2.44)$$

где $K_o^{зд}$ – общий коэффициент теплопередачи здания, Вт/(м²·°С), определяется по формуле:

$$K_o^{зд} = K_{зд}^{\Phi} + K_{инф}^{\Phi}; \quad (2.45)$$

$$K_{зд}^{\Phi} = \sum_{i=1}^n (A_i / R_i) / \sum A_i, \quad (2.46)$$

где $K_{инф}^{\Phi}$ – условный коэффициент теплопередачи здания, учитывающий теплотепри за счет инфильтрации и вентиляции, Вт/(м²·°С), определяемый по формуле

$$K_{инф}^{\phi} = 0,28 \cdot c \cdot n_a \cdot \beta_v \cdot V_{от} \cdot \rho_a \cdot k / \sum A_i, \quad (2.47)$$

где c – удельная теплоемкость воздуха, равная 1 кДж/(кг·°C); β_v – коэффициент снижения объема воздуха в здании, учитывающий наличие внутренних ограждающих конструкций. При отсутствии данных следует принимать $\beta_v = 0,85$; $V_{от}$ – то же, что и в формуле (2.38); ρ_a – средняя плотность приточного воздуха за отопительный период, кг/м³.

$$\rho_a = 353 / [273 + 0,5(t_e - t_n)] \quad (2.48)$$

где t_e – нормируемая внутренняя температура воздуха; t_n – расчетная наружная температура наружного воздуха в холодный период года, °C, принимаемая равной средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 по СНиП 23.01.99 (прил. 2.6); n_a – средняя кратность воздухообмена здания за отопительный период, ч⁻¹, определяемая по формуле

$$n_a = [(L_v \cdot n_v) / 168 + (G_{инф} \cdot k \cdot n_{инф}) / (168 \rho_a)] / (\beta_v \cdot V_{от}), \quad (2.49)$$

где L_v – количество приточного воздуха в здание при неорганизованном притоке либо нормируемое значение при механической вентиляции, м³/ч.

Для жилых зданий с расчетной заселенностью 20 м² общей площади и менее на человека $L_v = 3A_{жс}$ ($A_{жс}$ – площадь жилых помещений, м²).

Для других жилых зданий: $L_v = 0,35 \cdot 3 \cdot A_{жс}$, но не менее 30 м, где m – число жителей в здании.

Для общественных и административных зданий $L_v = 4A_{жс}$.

Для учреждений здравоохранения и образования $L_v = 5A_{жс}$.

Для спортивных, зрелищных и детских учреждений $L_v = 6A_{жс}$.

Для двух последних категорий зданий вместо жилой площади берется рабочая площадь;

n_v – число часов работы механической вентиляции в течение недели;

168 – число часов в неделе;

$G_{инф}$ – количество инфильтрующегося воздуха в здание через ограждающие конструкции, кг/ч.

Для жилых зданий – количество воздуха, поступающего в лестничные клетки в течение суток отопительного периода, величина $G_{инф}$ определяется по формуле

$$G_{инф} = (A_{обд} / R_{обд}) \cdot (\Delta P_{обд} / 10)^{2/3} + (A_{вд} / R_{вд}) \cdot (\Delta P_{вд} / 10)^{1/2}, \quad (2.50)$$

где $A_{обд}$, $R_{обд}$ и $\Delta P_{обд}$ – соответственно суммарная площадь, м², требуемое сопротивление воздухопроницанию и расчетная разность давлений воздуха для окон и балконных дверей лестничной клетки, Па; $A_{вд}$, $R_{вд}$ и $\Delta P_{вд}$ – то же для входных дверей.

$$\Delta P = 0,55H(\gamma_n - \gamma_e) + 0,03\gamma_n \cdot V^2, \quad (2.51)$$

H – высота здания (от уровня пола первого этажа до верха вытяжной шахты), м; γ_n и γ_e – удельный вес соответственно наружного и внутреннего воздуха, Н/м³, определяемый по формуле

$$\gamma = 3463 / (273 + t), \quad (2.52)$$

где t равно t_n и t_e ; k – коэффициент учета влияния встречного теплового потока в светопрозрачных конструкциях, равный для окон и балконных дверей:

с тройным остеклением – 0,7,
с двойным раздельным – 0,8,
со спаренным остеклением – 0,9,
с одинарным остеклением – 1,0;

$n_{инф}$ – число часов учета инфильтрации в течение недели, ч, равное 168 для зданий со сбалансированной приточно-вытяжной вентиляцией и $(168 - n_v)$ – для зданий, в помещениях которых поддерживается подпор воздуха во время действия приточной механической вентиляции; ρ_a , β_v и $V_{от}$ – то же, что и в формуле (2.47).

Для общественных зданий $G_{инф}$ – количество инфильтрующегося воздуха через неплотности светопрозрачных конструкций и дверей; СНиП допускает принимать в нерабочее время

$$G_{инф} = 0,5 \beta_v \cdot V_{от}. \quad (2.53)$$

$Q_{вн}$ – бытовые теплопоступления в течение отопительного периода, МДж, определяются по формуле

$$Q_{вн} = 0,0864 \cdot q_{вн} \cdot z_{от} \cdot A_{ж}, \quad (2.54)$$

где $q_{вн}$ – величина бытовых теплопоступлений на 1 м² площади жилых помещений или расчетной площади общественного здания, Вт/м².

Для жилых зданий с расчетной заселенностью квартиры 20 м² общей площади и менее на человека $q_{вн} = 17$ Вт/м².

Для жилых зданий с заселенностью 45 м²/чел. и более $q_{вн} = 10$ Вт/м².

Для других жилых зданий в зависимости от расчетной заселенности квартиры – по интерполяции.

Для общественных и административных зданий бытовые тепловыделения учитываются по расчетному числу людей (90 Вт/чел.), находящихся в здании, освещения (по удельной установленной мощности) и оргтехники (10 Вт/м²) с учетом рабочих часов в неделю.

Теплопоступления через окна и фонари от солнечной радиации в течение отопительного периода $Q_{сол}$, МДж для четырех фасадов зданий, ориентированных по четырём направлениям, следует определять по формуле

$$Q_{сол} = \tau_e \cdot \tau_2 \left(\sum_{i=1}^4 A_{ф,i} \cdot J_{ф,i} \right) + \tau_{е.з.ф.} \cdot \tau_2 \cdot A_{з.ф.} \cdot J_{\Gamma}, \quad (2.55)$$

где τ_e и $\tau_{е.з.ф.}$ соответственно – коэффициенты пропускания тепловой радиации остекления окон и зенитных фонарей (табл. 2.18); $A_{ф,i}$ и $A_{з.ф.}$ – площади светопроемов на фасадах здания $i = 1-4$ и площадь зенитных фонарей, м²; $J_{ф,i}$ и J_{Γ} – средняя за отопительный период величина солнечной радиации на вертикальных поверхностях фасадов при действительных условиях облачности в соответствии с их ориентацией и на горизонтальной поверхности, МДж/м², определяется по СНиП 23.01.99.

При расчете здания по показателю удельного расхода тепловой энергии в качестве начальных значений теплозащитных свойств ограждающих конструкций СНиП 23-02-2003 рекомендует задавать нормируемые значения сопротивления теплопередаче R_o^{mp} , определенные по ГСОП и табл. прил. 2.8 для отдельных элементов наружных ограждений. Затем проверяют соответствие величины $q_{от}$, определенное по вышеприведенной методике, нормируемому значению $q_{от}^{mp}$. Если в результате расчета удельный расход тепловой энергии на отопление здания окажется меньше нормируемого значения, то

допускается уменьшение сопротивления теплопередаче R_o^{mp} отдельных элементов ограждающих конструкций здания (светопрозрачных согласно примечанию 4 к табл. прил. 2.8) по сравнению с нормируемым по табл. прил. 2.8, но не ниже R_o^{mp} , определяемого по гигиеническим требованиям.

СНиП в этом случае выдвигает более жесткие требования:
для жилых и общественных зданий

$$R_{o\min}^{mp} = R_o^{mp} \cdot 0,63; \quad (2.56)$$

для промышленных зданий

$$R_{o\min}^{mp} = R_o^{mp} \cdot 0,8, \quad (2.57)$$

где R_o^{mp} определяется из соображений экономии энергии по табл. прил. 2.8.

В некоторых случаях, особенно в случае реконструкции памятников архитектуры и зданий с уникальным лепным декором фасадов, утепление изнутри может привести к разрушению этих стен, несмотря на пароизоляцию. В этих случаях сокращение теплопотерь может быть обеспечено утеплением чердачного перекрытия, заменой окон и утеплением цокольного перекрытия. Утепление стен в этих случаях согласно формуле (2.8) представляется излишним, так как, обычно, их сопротивление теплопередаче превышает гигиенические требования.

СНиП 23-02-2003 вводит критерий – показатель компактности здания:

$$k_e = \sum A / V_{om}. \quad (2.58)$$

Расчетный показатель компактности жилых зданий, как правило, не должен превышать следующих нормируемых значений:

0,25 – для 16-эт. зданий и выше.

0,29 – для 10-15-эт. зданий.

0,32 – для 6-9-эт. зданий.

0,36 – для 5-эт. зданий.

0,43 – для 4-эт. зданий.

0,54 – для 3-эт. зданий.

0,61; 0,54; 0,46 – для 2-, 3- и 4-эт. блокированных и секционных домов соответственно.

0,9 – для 2-эт. и 1-эт. домов с мансардой.

1,1 – для 1-эт. домов.

С целью контроля соответствия нормируемых СНиП 23-02-2003 показателей на разных стадиях создания и эксплуатации здания следует заполнять энергетический паспорт здания, форма которого приведена в СНиП.

Приведенная методика определения удельного расхода тепловой энергии на отопление зданий кажется громоздкой и сложной, однако это – принятый в Европе путь увеличения свободы принятия решений проектировщиками при проектировании ограждающих конструкций.

В состав раздела проекта «Теплозащита здания» должен входить энергетический паспорт, включающий следующие сведения:

- общая информация о проекте;

- расчетные условия;

- сведения о функциональном назначении и типе здания;
- объемно-планировочные и компоновочные показатели здания, которые должны включать: общестроительные данные о геометрии и ориентации здания, его объем, площади помещений, площади наружных ограждающих конструкций, показатель компактности здания k_c ;
- данные о теплозащите здания, включающие приведенный коэффициент теплопередачи и приведенную воздухопроницаемость здания и воздухообмен (о них будет говориться в следующей главе), сводные энергетические показатели: удельный расход тепловой энергии на отопление здания в холодный и переходные периоды года и удельную тепловую характеристику здания:

$$q_m = (K_{30}^{\phi} \cdot \sum A) / V, \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{°C)}, \quad (2.59)$$

где V – объем здания по внешним размерам, м^3 ; K_{30}^{ϕ} – фактический трансмиссионный коэффициент теплопередачи здания;

- сведения о сопоставлении с нормируемыми показателями.

Кроме того, в процессе эксплуатации теплоэнергетический паспорт должен дополняться результатами измерения энергоэффективности и уровня тепловой защиты здания после годичного периода его эксплуатации, а также рекомендациями по повышению энергетической эффективности здания.

Пример 5. Определить разность давлений для расчета наружных ограждений пятиэтажного здания. Температура наружного воздуха $t_n = -20 \text{ °C}$; внутреннего воздуха $t_{в} = +20 \text{ °C}$. Скорость ветра $v = 5 \text{ м/с}$. Высота здания (между центрами окон первого и пятого этажей) $H = 15 \text{ м}$.

$$\gamma_n = \frac{3463}{273 - 20} = 13,96 \text{ н/м}^3$$

$$\gamma_{в} = \frac{3463}{273 + 20} = 11,82 \text{ н/м}^3$$

$$\Delta p = 0,55 \cdot 15(13,96 - 11,82) + 0,031 \cdot 13,96 \cdot 25 = 28,47 \text{ Па.}$$

Для 9-этажного дома $H = 27 \text{ м}$.

$$\Delta p = 0,55 \cdot 27(13,96 - 11,82) + 0,031 \cdot 13,96 \cdot 25 = 42,60 \text{ Па.}$$

Для 16-этажного дома $H = 48 \text{ м}$.

$$\Delta p = 0,55 \cdot 48(13,96 - 11,82) + 0,031 \cdot 13,96 \cdot 25 = 67,31 \text{ Па.}$$

При разности давлений $\Delta p = 50 \text{ Па}$ необходима тщательная герметизация ограждающих конструкций. Даже при безветрии в 16-этажном здании $\Delta p = 56,5 \text{ Па}$. Поэтому здесь требуется особая герметизация окон, дверей, лестничных клеток и т.п.

Воздухопроницаемость ограждающей конструкции зависит от наличия в материале крупных сообщающихся между собой пор, а также от наличия в них

влаги. В материалах, в порах которых имеется влага, удерживаемая давлением в капиллярах, при умеренном давлении Δp воздухопроницаемость меньше, чем в сухих материалах. Если материалы состоят из нескольких компонентов, как, например, бетон, то внутри них возникают микроскопические трещины между цементными камнями и заполнителем. Эти микротрещины повышают воздухопроницаемость. Но в наибольшей мере воздухопроницаемость зависит от плотности поверхностных слоев материала. Поэтому понятие о коэффициенте воздухопроницаемости материала в отличие от коэффициента теплопроводности имеет смысл только при установившемся потоке фильтрации в материалах с однородной структурой, не имеющих плотных поверхностных слоев.

Коэффициент воздухопроницаемости – величина, изменяющаяся в широких пределах для различных материалов. Она определена для различных материалов путем измерений. Для сплошных слоев сопротивление воздухопроницанию R_u прямо пропорционально толщине слоя δ и обратно пропорционально фактическому коэффициенту воздухопроницаемости материала в слое i_c

$$R_u = \frac{\delta}{i_c}, \text{ Па с/кг.} \quad (3.11)$$

В СНиП II-3-79* приведена таблица сопротивления воздухопроницанию материалов и конструкций при их определенной толщине (табл. прил. 3.2). Там же приведены сопротивления воздухопроницанию заполнений световых проемов (окон, балконных дверей и фонарей), (табл. прил. 3.3).

Сопротивление воздухопроницанию выражается разностью давлений воздуха, при которой через 1 м^2 конструктивного слоя проникает 1 кг воздуха за единицу времени.

Количество воздуха G , которое фильтруется через единицу площади ограждающей конструкции в единицу времени, определяется по формуле

$$G = \frac{\Delta P}{R_u} \text{ кг/м}^2 \text{ ч.} \quad (3.12)$$

При нормировании ограничивается величина G для различных конструкций. Нормируемая величина G_n в СНиП приведена в табл. прил. 3.4. Это необходимо, чтобы ограничить дополнительные потери тепла, вызванные воздухопроницанием при расчетной разнице давлений.

$$R_u^{TP} = \frac{\Delta P}{G^H}. \quad (3.13)$$

Сопротивление воздухопроницанию многослойной ограждающей конструкции R_u , $\text{м}^2 \text{ ч Па/кг}$ определяется как сумма R_{ui} слоев:

$$R_u = R_{u1} + R_{u2} + \dots + R_{un}. \quad (3.14)$$

Величина R_{ui} определяется по табл. прил. 3.2 прил. с учетом фактической их толщины.

Фактическое сопротивление воздухопроницанию R_u должно быть больше или равно R_u^{TP} :

$$R_u \geq R_u^{mp}$$

Сопротивление воздухопроницанию окон и балконных дверей жилых и общественных зданий должно быть больше или равно требуемой величине, определяемой по формуле

$$R_u^{TP} = \frac{1}{G^H} \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (3.15)$$

где $\Delta P_0 = 10$ Па – разность давлений воздуха, при которой определяется сопротивление воздухопроницанию R_u в табл. 3.2 и 3.3 приложения.

Для предупреждения чрезмерного охлаждения ограждающей конструкции надо, чтобы ее внешняя часть (до 0,25 общей толщины) имела сопротивления воздухопроницанию не менее $0,33 R_u^{TP}$. Воздухопроницание изменяет распределение температур внутри конструкции и уменьшает ее сопротивление теплопередаче.

Если считать, что температура материала равна температуре воздуха в его порах (это соответствует равномерной скорости воздуха, фильтрующегося через материал с равномерной пористостью) и выделить внутри бесконечно тонкий слой dx , то изменение проходящего через слой количества тепла при воздухопроницании будет равно

$$\frac{dQ}{dx} = -G \cdot c \frac{dt}{dx}, \quad (3.16)$$

где G – количество воздуха, фильтрующегося через конструкцию в единицу времени, (3.12), кг/(м² ч); c – удельная теплоемкость воздуха (при постоянном давлении), равная 1 кДж/(кг °С).

В то же время изменение количества тепла, передаваемого за счет теплопроводности через слой dx , может быть представлено уравнением Лапласа:

$$\frac{dQ}{dx} = -\lambda \frac{d^2 t}{dx^2}. \quad (3.17)$$

Приравнявая правые части уравнений, получим дифференциальное уравнение температурного поля в плоском ограждении при наличии воздухопроницания:

$$\lambda \frac{d^2 t}{dx^2} - G \cdot c \frac{dt}{dx} = 0. \quad (3.18)$$

Если заменить величину dx величиной dR , где R – термическое сопротивление слоя, то решение этого уравнения, полученное Ф.В. Ушковым, дает выражение, по которому можно вычислить температуру t_x в любом сечении ограждающей конструкции:

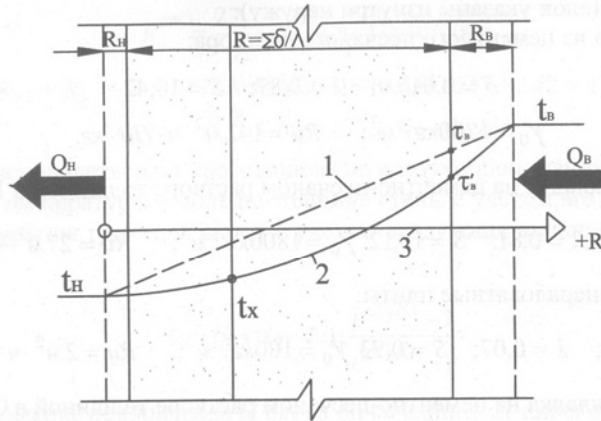


Рис. 3.4. Схема распределения температур и потоков тепла при одномерной установившейся фильтрации холодного воздуха через плоскую стенку из пористых материалов:

1 – распределение температур при отсутствии фильтрации; 2 – распределение температур при фильтрации; 3 – направление расчетных координат; Q_b – поток тепла, входящий в стену; Q_n – поток тепла, выходящий из стены

$$t_x = t_n + (t_b - t_n) \frac{e^{cGRx} - 1}{e^{cGRo} - 1}, \quad (3.19)$$

где t_s и t_n – температуры наружного и внутреннего воздуха, °C; e – основание натуральных логарифмов; R_x – термическое сопротивление ограждающей конструкции от воспринимающей поток холодного воздуха наружной поверхности до рассматриваемого сечения, м² °C/Вт; Ro – общее сопротивление теплопередаче конструкции, °C м²/Вт.

Это уравнение справедливо, если считать, что сопротивление фильтрационному потоку на границах конструктивных слоев отсутствует и что имеет место сквозная фильтрация воздуха через конструкцию.

На рис. 3.4 показано изменение температурного поля в сечении однородной конструкции из-за инфильтрации наружного воздуха. Как видно из рис. 3.4, воздухопроницание может значительно понизить температуру внутренней поверхности ограждающего слоя. Причем величина общего сопротивления теплопередаче при воздухопроницании конструкции равна

$$Ro_{\text{и}} = \frac{1}{c \cdot G} \cdot \frac{e^{cGRo} - 1}{e^{cGRo}}. \quad (3.20)$$

Для сильно воздухопроницаемых конструкций, т.е. когда G велико, выражение второй дроби стремится к 1 и $Ro_{\text{и}} \rightarrow Ru = \frac{1}{cG}$, т.е. при единичной разности давлений теплофизические качества конструкций, имеющих большое количество неплотностей и пор, определяются только свойствами воздухопроницаемости.

Пример 6. Рассчитать величину температуры на внутренней поверхности стены пятиэтажного кирпичного дома при инфильтрации в г. Москве (условия эксплуатации Б).

Состав стены (слои указаны изнутри наружу):

1. Штукатурка из цементного песчаного раствора:

$$\delta = 0,015 \text{ м}; \quad \lambda = 0,87; \quad S = 10,42$$

$$\gamma_0 = 1700 \text{ кг/м}^3; \quad R_u = 142 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па/кг}.$$

2. Кирпичная кладка на цементно-песчаном растворе толщиной в 1,5 кирпича:

$$\delta = 0,38 \text{ м}; \quad \lambda = 0,81; \quad S = 10,12 \quad \gamma_0 = 1800 \text{ кг/м}^3; \quad R_u = 27 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па/кг}.$$

3. Жесткие минераловатные плиты:

$$\delta = 50 \text{ мм}; \quad \lambda = 0,07; \quad S = 0,73 \quad \gamma_0 = 100 \text{ кг/м}^3; \quad R_u = 2 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па/кг}.$$

4. Кирпичная кладка на цементно-песчаном растворе толщиной в 0,5 кирпича:

$$\delta = 0,12 \text{ м}; \quad \lambda = 0,87; \quad S = 10,12 \quad \gamma_0 = 1800 \text{ кг/м}^3; \quad R_u = 2 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па/кг}.$$

Климатические параметры для г. Москвы.

$$t_{\text{ср.от.}} = -2,2^\circ; \quad Z_{\text{от}} = 231 \text{ сут. } t_1 = -32^\circ; \quad t_5 = -25^\circ.$$

Определяем требуемую толщину утеплителя:

ГС ОП = $(20+2,2) \cdot 231 = 5128,2$ По табл. 2.7 по интерполяции находим для стен жилых зданий $R_0^{TP} = 3,19 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$.

$$3,19 = \frac{1}{8,7} + \frac{0,015}{0,87} + \frac{0,38}{0,81} + \frac{X}{0,07} + \frac{0,12}{0,81} + \frac{1}{23};$$

$$R_0 = R_s + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_u$$

$$3,19 = 0,11 + 0,02 + 0,47 + \frac{X}{0,07} + 0,15 + 0,04$$

$$2,4 = \frac{X}{0,07}; \quad X = 0,17 \text{ м}; \quad R_3 = 2,4.$$

Тепловая инерция стены равна:

$$D = \frac{0,015}{0,87} \cdot 10,42 + \frac{0,38}{0,81} \cdot 10,12 + \frac{0,17}{0,07} \cdot 0,73 + \frac{0,12}{0,81} \cdot 10,12$$

$$D = 0,21 + 4,77 + 1,77 + 1,52 = 8,27. \text{ Стена массивная.}$$

Расчетная зимняя температура $t_u = t_5 = -25^\circ$.

Требуемое сопротивление воздухопроницанию:

$$R_u^{TP} = \frac{\Delta p}{G^H}; \quad \text{по табл. 3.4 } G^H = 0,5 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}$$

$$\Delta p = 0,55 \cdot H(\gamma_n - \gamma_v) + 0,03 \gamma_n v^2$$

$$H = 3 \cdot 5 = 15 \text{ м (при высоте этажа 3 м).}$$

$$\gamma_n = \frac{3463}{273 - 25} = 13,96 \text{ Н/м}^3; \quad \gamma_v = \frac{3463}{273 + 20} = 11,82 \text{ Н/м}^3 \quad v = 4,9 \text{ м/с};$$

$$\Delta p = 0,55 \cdot 15(13,96 - 11,82) + 0,03 \cdot 13,96 \cdot 4,9^2 = 27,71 \text{ Па}.$$

$$R_u^{TP} = \frac{27,71}{0,5} = 55,42 \text{ Па} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{ч/кг}.$$

$$R_u = R_{u,1} + R_{u,2} + R_{u,3} + R_{u,4} = 2 + (0,17/0,05) \cdot 2 + 18 \cdot (0,38/0,25) + 142 = 177,8 \text{ Па} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{ч/кг}$$

$$55,42 = R_u^{TP} < R_u = 177,8 \text{ Па} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{ч/кг}.$$

Конструкция удовлетворяет требованиям по воздухопроницанию в СНиП.

Рассчитаем температурное поле по толщине стены с учетом воздухопроницания ее слоев. Температуры на границах слоев с учетом воздухопроницания определяются по формуле (3.19)

$$t_x = t_n + (t_v - t_n) \cdot \frac{e^{cGRx} - 1}{e^{cGRo} - 1},$$

где Rx – сопротивление теплопередаче слоев до сечения x от плоскости, подверженной воздействию холодного воздуха.

Количество воздуха, которое фильтруется через конструкцию в единицу времени:

$$G = \frac{\Delta p}{R_u} = \frac{27,71}{177,8} = 0,16 \text{ кг/м}^2 \text{ ч}.$$

Удельная теплоемкость воздуха в системе СИ: $c = 1$

$$t_v = -25 + (20 + 25) \cdot \frac{e^{1 \cdot 0,16 \cdot 3,08} - 1}{e^{1 \cdot 0,16 \cdot 3,19} - 1} = -25 + 45 \cdot \frac{0,64}{0,17} = 18,25^\circ;$$

$$t_1 = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1 \cdot 0,16 \cdot 3,06} - 1}{0,67} = 17,42^\circ;$$

$$t_2 = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1 \cdot 0,16 \cdot 2,59} - 1}{0,67} = 9,49^\circ;$$

$$t_3 = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1 \cdot 0,16 \cdot 0,19} - 1}{0,67} = -22,93^\circ;$$

$$t_4 = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1 \cdot 0,16 \cdot 0,04} - 1}{0,67} = -24,71^\circ = t_n.$$

Рассчитаем температурное поле по толщине стены без учета воздухопроницания ее слоев.

$$t_x = t_v - \frac{t_v - t_n}{Ro} \cdot Rx.$$

Здесь Rx в отличие от формулы (2.5) – сумма сопротивлений теплопередаче слоев от теплого к расчетному.

$$t_v = 20 - \frac{20 + 25}{3,19} \cdot 0,11 = 18,45^\circ \rangle 18,25^\circ;$$

$$t_1 = 20 - \frac{20 + 25}{3,16} \cdot 0,13 = 18,17^\circ \rangle 17,42^\circ;$$

$$t_2 = 20 - 14,2 \cdot 0,6 = 11,45^\circ \rangle 9,49^\circ;$$

$$\tau_3 = 20 - 14,2 \cdot 3 = -22,60^\circ > -22,93^\circ;$$

$$\tau_4 = 20 - 14,2 \cdot 3,15 = -24,71^\circ = -24,71^\circ.$$

Понижение температуры слоев незначительное. Самое большое понижение — на внутренней границе утеплителя. Оно опасно тем, что плоскость конденсации водяного пара, о которой будет рассказано в следующем параграфе, отодвинется вглубь конструкции и увеличит опасность ее увлажнения.

Если бы не было внутренней штукатурки, то фильтрация воздуха была бы значительно больше:

$$Ro = 3,17; G = \frac{\Delta p}{Ru} = \frac{27,71}{177,8 - 142} = 0,77 \text{ кг/м}^2 \text{ ч};$$

$$\tau_6 = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1-0,77 \cdot 3,06} - 1}{e^{1-0,77 \cdot 3,17} - 1} = -25 + 45 \cdot \frac{9,55}{10,48} = 16,01^\circ;$$

$$\tau_2 = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1-0,77 \cdot 2,59} - 1}{10,48} = 2,25 < 11,45^\circ;$$

$$\tau_3 = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1-0,77 \cdot 0,19} - 1}{10,48} = -24,32^\circ;$$

$$\tau_4 = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1-0,77 \cdot 0,04} - 1}{10,48} = -24,87^\circ = t_n.$$

При наличии штукатурки с наружной стороны стены количество фильтрующегося через стену воздуха было бы таким же, как в случае штукатурки с внутренней стороны стены.

$$G = 0,16 \text{ кг/м}^2 \text{ ч};$$

$$\tau_6 = -25 + 45 \cdot \frac{0,64}{0,67} = 18,25^\circ;$$

$$\tau_2 = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1-0,16 \cdot 2,61} - 1}{0,67} = 9,81^\circ;$$

$$\tau_3 = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1-0,16 \cdot 0,21} - 1}{0,67} = -22,70^\circ;$$

$$\tau_4 = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1-0,16 \cdot 0,06} - 1}{0,67} = -24,35^\circ;$$

$$\tau_H = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1-0,16 \cdot 0,04} - 1}{0,67} = -24,57^\circ.$$

Как показывает расчет, температурное поле внутри конструкции практически не зависит от положения слоя с большим сопротивлением воздухопроницанию.

На самом деле, как показывает опыт строительства крыш-мансард, это не так. Можно высказать предположение, что температура на границе слоя зависит не только от количества проходящего через нее фильтрующегося воздуха, но и от коэффициента теплоусвоения этого слоя, а главное — она зависит от направления потока фильтрующегося воздуха и беспрепятственного его движения сквозь поры утеплителя.

Пример 7. Рассчитать температурное поле по толщине крыши-мансарды при $t_n = -25^\circ$, $t_a = +20^\circ$. Скорость ветра в воздушной прослойке $v = 10 \text{ м/с}$. Состав крыши-мансарды см. рис. 2.13.

Толщину утеплителя принимаем из примера 3. Величины коэффициентов теплопередачи слоев:

$$\alpha_n = 1,16(5 + 10\sqrt{10}) = 42,48 \text{ Вт/(м}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}; R_n = 0,02$$

$$R_{ут} = \frac{0,15}{0,052} = 2,88; R_{подшивки} = \frac{0,02}{0,14} = 0,14; R_{гипсокартона} = \frac{0,04}{0,19} = 0,21$$

$$\alpha_v = 8,7; R_v = 0,11; R_o = 0,02 + 2,88 + 0,14 + 0,21 + 0,11 = 3,36.$$

В расчетах считаем, что воздухонепроницаемый слой пароизоляции отсутствует. Величины сопротивлений воздухопроницанию (по табл. 3.2):

$$R_{и.утепл} = 2 \cdot \frac{150}{50} = 6 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{кг}; R_{и.досок} = 0,1; R_{и.г} / \kappa = 20 \cdot 4 = 80$$

$$R_{и} = 6 + 0,1 + 80 = 86,1$$

Принимаем скорость движения воздуха в воздушной прослойке равной скорости ветра. Скорость поперек кровли при угле наклона кровли 60° составит

$$v = 10 \frac{\text{м}}{\text{сек}} \cdot \cos 60^\circ = 5 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

$$\Delta P = 0,03 \gamma_n \cdot v^2 = 0,03 \cdot 13,96 \cdot 5^2 = 10,47$$

$$G = \frac{\Delta p}{R_{и}} = \frac{10,47}{86,1} = 0,12 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}.$$

Без учета воздухопроницания:

$$\tau_v = 20 - \frac{20 + 25}{3,36} \cdot 0,11 = 18,53^\circ$$

$$\tau_{\text{гран.досок}} = 20 - 13,39 \cdot 0,32 = 15,71^\circ$$

$$\tau_{\text{гран.утепл}} = 20 - 13,39 \cdot 0,46 = 13,84^\circ$$

$$\tau_{\text{внеш.гр.утепл}} = 20 - 13,39 \cdot 3,34 = -24,72^\circ = \tau_n$$

С учетом воздухопроницания:

$$\tau_v = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1 \cdot 0,12 \cdot (3,36 - 0,11)} - 1}{e^{1 \cdot 0,12 \cdot 3,36} - 1} = 18,63^\circ$$

$$\tau_{\text{гран.досок}} = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1 \cdot 0,12 \cdot (3,36 - 0,11 - 0,21)} - 1}{e^{1 \cdot 0,12 \cdot 3,36} - 1} = 14,40^\circ$$

$$\tau_{\text{гран.утепл}} = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1 \cdot 0,12 \cdot (3,36 - 0,11 - 0,21 - 0,14)} - 1}{0,497} = 12,39^\circ$$

$$\tau_{\text{внеш.гр.утепл}} = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1 \cdot 0,12 \cdot (3,36 - 0,11 - 0,21 - 0,14 - 2,88)} - 1}{0,497} = -23,18^\circ$$

Если снять наиболее воздухонепроницаемые слои гипсокартона;

$$R_n = 0,02; R_{ут} = 2,88; R_{подш} = 0,14; R_v = 0,11; R_o = 3,15;$$

$$R_{и.ут} = 6; R_{и.подш} = 0,1; R_{и} = 6,1; \Delta p = 10,47.$$

$$G = \frac{10,47}{6,1} = 1,72 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$$

$$\tau_{\text{в}} = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1-1,72-3,04} - 1}{e^{1-1,72-3,15} - 1} = -25 + 45 \cdot \frac{185,57}{224,43} = 12,41^\circ$$

$$\tau_{\text{гран.досок и утепл.}} = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1-1,72-2,90} - 1}{224,43} = 4,20^\circ$$

$$\tau_{\text{наруж.гран. утепл.}} = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1-1,72-0,02} - 1}{224,43} = -24,98^\circ$$

То есть усиление потока холодного воздуха через конструкцию приведет к сильному охлаждению стены мансарды, несмотря на то что сопротивление теплопередаче практически не изменилось и без учета воздухопроницания крыша-мансарда почти удовлетворяет требованиям СНиП.

Если положить поверх утеплителя обычные бумажные обои, то их сопротивление воздухопроницанию $R_{\text{н.обоев}} = 20$.

$$Ru = 20 + 6 + 0,1 = 26,1; G = 10,47/26,1 = 0,40 \text{ кг/(м}^2 \text{ ч)};$$

$$\tau_{\text{в}} = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1-0,4-3,04} - 1}{e^{1-0,4-3,15} - 1} = 17,39^\circ$$

$$\tau_{\text{гран.досок и утепл.}} = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1-0,4-2,90} - 1}{2,52} = 14,10^\circ$$

$$\tau_{\text{гран.обоев и утеплителя}} = -25 + 45 \cdot \frac{e^{1-0,4-0,02} - 1}{2,52} \cong -24,64^\circ$$

Таким образом, уменьшение воздухопроницания значительно увеличивает теплозащиту конструкции.

Приведенные расчеты позволяют говорить о том, что если в конструкции имеется воздухонепроницаемый слой, то фильтрация воздуха через нее прекращается и температурное поле в ней соответствует температурному полю без учета воздухопроницания. Практика показывает, что это не совсем так. В крышах-мансардах и современных вентилируемых фасадах при большом ветровом напоре в вентилируемых воздушных прослойках движение холодного воздуха в пористом утеплителе идет не только в направлении теплового потока навстречу ему, но и перпендикулярно направлению теплового потока. При этом не обязательно иметь фильтрацию воздуха через всю конструкцию. Для значительного ослабления теплозащитных качеств достаточно, чтобы холодный воздух фильтровался через утеплитель. На практике для защиты утеплителя в вентилируемых крышах-мансардах от продувания применяют специальные пленочные материалы (ТАЙВЕК и др.). Их укладывают поверх утеплителя рулонами сверху вниз с нахлестом снаружи или с проклейкой стыков. Это значительно улучшает теплозащитные качества мансард при воздействии ветра. В расчете надо также учитывать теплоусвоение и теплопередачу границы, разделяющей утеплитель и внутренние более плотные слои ограждающей конструкции, через которые фильтрация резко снижается. Эти вопросы нуждаются в проведении дополнительных исследований.