

## Теплотехнические расчеты

### 1. Введение

Толщина теплоизоляции назначается в соответствии со вторым этапом энергосбережения по СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий» /3/ и с учетом коэффициента теплотехнической однородности.

Влажностный режим рассчитывается в соответствии с «Рекомендациями по проектированию и применению для строительства и реконструкции в г. Москве системы с вентилируемым воздушным зазором «Марморок» (правительство Москвы, Москомархитектура, М,2001г.)/4/ и «Рекомендациями по проектированию и применению для строительства и реконструкции в г. Москве системы с вентилируемым воздушным зазором из алюминиевых профилей ЗАО «Союз Метроспецстрой» (правительство Москвы, Москомархитектура, М,2001г.)/5/ в т. ч. с учетом рассчитываемых скоростей воздуха в прослойке, а также (для худшего случая) при отсутствии движения воздуха в прослойке.

Принципы теплотехнического проектирования включают методы теплотехнических расчетов, расчеты воздухообмена и влагообмена в воздушных прослойках.

Методика теплотехнических расчетов базируется на требованиях /3/.

Основное отличие приведенной в работе методики от теплотехнических норм /3/ в комплексной оценке теплового, воздушного и влажностного режима рассматриваемой системы.

### 2. Основные, используемые в тексте, понятия

Прослойка между стеной и экраном, вентилируемая наружным воздухом; швы, зазоры, щели – приточные, воздухозаборные (полости, отверстия), вытяжные, воздуховыводящие. Такими зазорами могут являться как вертикальные, так и горизонтальные стыковые швы панелей экранов, но преимущественно горизонтальные (при уплотнении вертикальных).

Экраны-панели могут быть из различных атмосферостойких, долговечных материалов, в т. ч. утепленных. В последнем случае температура в прослойке будет выше, чем при не утепленных экранах.

Условный коэффициент паропроницаемости – приведенный коэффициент паропроницаемости, учитывающий сопротивление паропроницанию материалов экрана и швов-стыков между облицовочными панелями.

### 3. Основные положения по проектированию систем навесных фасадов с воздушным зазором

При проектировании зданий с системой навесных фасадов следует учитывать особенности экранизируемых стен.

1. Минимальный размер полости (щели) для притока воздуха составляет 10÷15 мм. Этот размер уточняется нижеприведенным расчетом.

2. Толщина воздушной прослойки должна быть как правило 40 мм, (минимально допустимое расстояние от экрана до ближайшей точки на поверхности утеплителя).

Толщина воздушного зазора при материале экрана с коэффициентом паропроницаемости 0,01 и менее рекомендуется 50-60 мм, а толщина экрана не более 10 мм.

3. Сечение полости (щели) для вытяжки воздуха не должно быть менее сечения полости (щели) для притока.

4. Отверстия следует выполнять так, чтобы не было их закупорки.

5. Минимальная площадь приточных полостей (отверстий) должна быть  $0,003 \text{ м}^2 \div 0,005 \text{ м}^2$  ( $30\text{-}50\text{см}^2$ ) на  $1 \text{ м}^2$  экрана.

**Примечание:** При назначении указанных размеров имеется в виду, что в расчетах условного коэффициента паропроницаемости фасадов с воздушным зазором с учетом стыковых швов учитывается только площадь приточных (либо вытяжных) полостей-швов (отверстий).

#### **4. Правила теплотехнического проектирования наружных ограждений с системой навесных фасадов с воздушным зазором**

Теплотехническое проектирование наружных стен с системой навесных фасадов с воздушным зазором включает в себя два этапа. Причем второй этап применяется, если после первого этапа расчетов не выявится надежность рассматриваемой конструкции в теплотехническом отношении.

##### Первый этап

Назначается конструктивное решение стены, в т. ч. параметры экранов, приточных и выводных щелей с учетом пункта 13.3.

Выполняется теплотехнический расчет наружной стены с экраном, т. е. определяется необходимая толщина теплоизоляции, исходя из требований /3/.

Выполняется расчет влажности режима стены по методике /3/.

Если влажностной режим стены удовлетворяет требованиям норм строительной теплотехники, то на этом теплотехническое проектирование заканчивается.

Если влажностной режим экранированных стен не удовлетворяет требованиям /3/, то подбирается такой материал стены и экрана, чтобы с ним конструкция стены удовлетворяла требованиям /3/.

Если расчет влажностного режима наружного ограждения с вентилируемым фасадом показал не выполнение требований /3/, а другой материал стены и экрана подобрать нельзя, то переходят ко второму этапу теплотехнического проектирования.

##### Второй этап

- 1) Определяется условный коэффициент паропроницаемости экрана с учетом швов по методике раздела 13.5.7.
- 2) С учетом этого коэффициента паропроницаемости проводят расчет по методике /3/.
- 3) Определяется влажностный режим рассматриваемой конструкции в годовом цикле с учетом средних месячных температур по методике данной в разделе 13.5.4.
- 4) С учетом результатов расчета по п. 2, 3 анализируются результаты, при необходимости корректируются материалы и их толщины в конструкции с целью исключения влагонакопления в годовом цикле. В основном, проведенных упомянутых расчетов для определения применимости конструкции, бывает достаточно. В других случаях расчет может быть продолжен в следующей последовательности.

- 5) С учетом этажности здания и района строительство определяется скорость движения воздуха в прослойке за экраном и расход воздуха по разделу 13.5.5.

Для выполнения п. 5 определяется термическое сопротивление воздушной прослойки по формуле (13.16).

- 6) Определяется температура на выходе из воздушной прослойки по формуле (13.15).
- 7) Определяется действительная упругость водяного пара на выходе из прослойки  $P_y$  по формуле (13.18) и проверяется условие  $P_y < E_n$ , где  $E_n$  – максимальная упругость водяного пара на выходе из прослойки. Анализируются результаты расчетов и корректируется конструкция стены.

Определяется область применения стен с вентилируемой воздушной прослойкой.

## 5. Методика теплотехнического расчета наружных стен с системой навесных фасадов с воздушным зазором.

### 5.1 Общие требования

Расчет наружных стен с экраном и воздушным зазором основан на расчете теплотехнических характеристик стен.

Теплотехнический расчет наружных стен с вентилируемой прослойкой в соответствии с настоящим разделом включает в себя: - подбор толщины теплоизоляционного слоя:

- определение влажностного режима в годовом цикле и в соответствии с действующими теплотехническими нормами;
- определение параметров воздухообмена в прослойке;
- определение тепловлажностного режима прослойки;
- определение условного приведенного коэффициента паропроницаемости экранов с учетом швов-зазоров между панелями-экранами.

Таким образом, для определения области применения стен с вентилируемой воздушной прослойкой производится несколько теплотехнических расчетов: расчет теплового режима стен и прослойки и влажностного режима стены и прослойки.

### 5.2. Определение толщины теплоизоляционного слоя.

Методика теплотехнического расчета разработана в соответствии с рядом документов, подготовленных ЦНИИЭП жилища и НИИСФ как авторами /3/ и полностью удовлетворяет нормативным требованиям /3/.

В основу конструктивных решений наружных стен при определении приведенных сопротивлений теплопередаче главных фрагментов принимаются толщины утеплителя, рассчитанные предварительно по формуле:

$$\delta_{ym} = \left( \frac{R_0^{req}}{r} - R_l - R_n - \frac{1}{\alpha_B} - \frac{1}{\alpha_H} \right) \times \lambda_{yT} \quad (13.1)$$

где:  $R_0^{req}$  - требуемое приведенное сопротивление теплопередаче стен,

$\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ ;

г – коэффициент теплотехнической однородности по табл. 11, 12.

Таблица 11

## Значение г кирпичных утепленных снаружи стен

Толщина, м		Коэффициент г при $\lambda$ , Вт/°C		
Стены (без дополнительного утепления)	Утеплителя	0,04	0,05	0,08
0,38	0,1	0,705	0,726	0,73
	0,15	0,693	0,713	0,73
	0,2	0,68	0,7	0,715
0,51	0,1	0,694	0,714	0,73
	0,15	0,682	0,702	0,72
	0,2	0,667	0,687	0,702
0,64	0,1	0,685	0,7	0,715
	0,15	0,675	0,69	0,705
	0,2	0,665	0,68	0,695

Примечания:

1 В таблице даны г для худшего в теплотехническом отношении участка (с оконным проемом).

2 Для получения значений г с учетом глухих участков приведенные в таблице значения умножаются на 1,05.

Таблица 12

## Значения г бетонных (керамзитобетонных) утепленных снаружи стен

Толщина, м		Коэффициент г при $\lambda$ , Вт/°C		
Панели (без дополнительного утепления) при $\gamma_0$	Утеплителя	0,04	0,05	0,08
1	2	3	4	5
$\gamma_0=1000 \text{ кг/м}^3$ 0,3	0,05	0,9	0,92	0,95
	0,1	0,84	0,87	0,88
	0,15	0,81	0,84	0,85
0,35	0,05	0,87	0,9	0,93
	0,1	0,8	0,83	0,86
	0,15	0,78	0,81	0,83
0,4	0,05	0,82	0,87	0,9
	0,1	0,77	0,8	0,83
	0,15	0,75	0,78	0,8
$\gamma_0=1200 \text{ кг/м}^3$ 0,3	0,05	0,89	0,9	0,94
	0,1	0,83	0,86	0,87
	0,15	0,80	0,83	0,84
0,35	0,05	0,86	0,99	0,92

	0,1 0,15	0,79 0,77	0,82 0,80	0,85 0,82
1	2	3	4	5
0,4	0,05 0,1 0,15 0,2	0,81 0,76 0,74 0,73	0,86 0,79 0,77 0,76	0,89 0,82 0,79 0,78

Для проверки правильности принятых толщин утепляющих слоев определяются приведенные сопротивления теплопередаче наружных стен для основных «фрагментов». Каждый рассчитываемый фрагмент делится на отдельные участки, характеризующиеся одним или несколькими видами теплопроводных включений.

Средневзвешенное значение приведенного сопротивления теплопередаче слоистых наружных стен определяется (на секцию) по формуле:

$$R_0^{rec} = \frac{\sum_i^k F_i}{\sum_i^k \frac{F_i}{R_{oi}^r}} \quad (13.2)$$

где:  $\sum_i^k F_i$  - сумма площадей наружных стен ( $k$  - количество фрагментов стен),  $m^2$ ;

$F_i, R_{oi}^r$  - соответственно площадь фрагментов и приведенное сопротивление теплопередаче  $i$ -го фрагмента стен,  $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$ ;

Если  $R_0^{rep} > R_0^{req}$  по табл. 16 /3/, конструкция стены удовлетворяет требованиям теплотехнических норм. Если  $R_0^{rep} < R_0^{req}$ , то следует либо увеличить толщину утепляющего слоя, либо рассмотреть возможность включения в проект энергосберегающих мероприятий (утепление узлов и т. п.).

Для практических расчетов допускается при определении  $R_0^{np}$  и его коэффициента теплотехнической однородности наружных стен с вентилируемой прослойкой применять табл. 11, 12.

Для расчета средневзвешенного значения многослойных наружных стен при наличии в стенах глухих (без проемов) участков может быть также использована формула:

$$R_0^{rec} = R_0^r \times n \quad (13.3)$$

где  $n=1,05$ -коэффициент, учитывающий наличие глухих участков в наружных стенах.

### 5.3. Определение влажностного режима наружных стен

Влажностный режим наружных стен определяется двумя методами: по /3/ и исходя из баланса влаги в годовом цикле. Определение влажностного режима наружных стен в годовом цикле производится в следующей последовательности:

1) Определяются исходные данные для расчета; 2) определяются сопротивления паропроницаемости слоев конструкции наружной стены, параметры внутреннего и наружного воздуха; 3) определяется приток и отток влаги (пара) к рассматриваемому сечению по формуле:

$$\Delta P_1 = \frac{e_{a, \text{int}} e_t}{R_{п.вн.сл.}} \quad \text{и} \quad \Delta P_2 = \frac{e_\tau - e_n}{R_{оп} - R_{п.вн.сл.}} \quad (13.4)$$

где:

$e_v$  – упругость водяного пара внутреннего и наружного воздуха;

$R_{п.вн.сл.}$  – сопротивление паропроницанию от внутренней поверхности до границы зоны возможной конденсации (с учетом пограничного слоя);

$e_\tau$  – определяется по формуле:  $e_\tau = \frac{e_{вн} - e_n}{R_{оп}} (\sum R_{п.сл.})$  (13.5)

$\sum R_{п.сл.}$  – сумма сопротивлений паропроницанию слоев до рассматриваемого сечения;

$R_{оп}$  – сопротивление паропроницанию всей стены.

По указанным формулам определяется упругость водяного пара  $e_i$  в характерных сечениях конструкции в годовом цикле.

Если  $e_i$  окажется больше максимальной упругости водяного пара  $E$ , то в данном сечении появится конденсат. Если в годовом цикле окажется увеличение накопления влаги в конструкции, то её надо корректировать, добиваясь исключения влагонакопления в годовом цикле.

#### 5.4. Определение параметров воздухообмена в воздушном зазоре

Движение воздуха в прослойке осуществляется за счет гравитационного (теплого) и ветрового напора. В случае расположения приточных и вытяжных отверстий на разных стенах скорость движения воздуха в прослойках  $V_{пр}$  может определяться по следующим формулам:

$$V_{пр} = \sqrt{\frac{\kappa(\kappa_n - \kappa_3)V_n^2 + 0,008H(t_{cp} - t_n)}{\sum \xi}} \quad (13.6)$$

где:

$\kappa_n, \kappa_3$  – аэродинамические коэффициенты на разных стенах здания по /2/;

$V_n$  – скорость движения наружного воздуха;

$\kappa$  – коэффициент учета изменения скорости потока по высоте по /2/;

$H$  – разности высот от входа воздуха в прослойку до выхода из неё;

$t_{cp}, t_n$  – средняя температура воздуха в прослойке и температура наружного воздуха;

$\sum \xi$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений.

Другим вариантом определения  $V_{пр}$  служит формула:

$$V_{пр} = \sqrt{\frac{\gamma_n V_n^2 (\kappa_n - \kappa_3) + 2gH(t_{cp} - t_n)}{\gamma_{пр} \sum \xi}} \quad (13.7)$$

где  $\gamma_n, \gamma_{пр}$  – плотности наружного воздуха и в зазоре;

Другой вариант определения  $V_{пр}$  по разности давлений воздуха на входе и выходе:

$$V_{пр} = \sqrt{\frac{\Delta P_\Delta \cdot 2g}{\gamma_{пр} \cdot \sum \xi}} \quad (13.8)$$

где

$$\Delta P_\Delta = \Delta P_{вх} - \Delta P_{вых} \quad (13.9)$$

При расположении воздушной прослойки на одной стороне здания, можно принять  $\kappa_n = \kappa_3$ . В этом случае, если пренебречь изменением скорости ветра по высоте, формула 13.6 примет вид:

$$V_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{0,008H(t_{\text{сп}} - t_{\text{н}})}{\sum \xi}} \quad (13.10)$$

Формула 13.7 примет вид:

$$V_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{2gH(t_{\text{сп}} - t_{\text{н}})}{\gamma_{\text{пр}} \sum \xi}} \quad (13.11)$$

В формуле 13.8.  $\Delta P_{\Delta} = H(\gamma_{\text{н}} - \gamma_{\text{пр}})$ ;  $\gamma_{\text{пр}}$  – плотность воздуха в прослойке.

Указанные формулы применены в технической системе, при этом « $\gamma$ » имеет размерность  $\text{кг}/\text{м}^3$ . В системе СИ в числителе « $g$ » будет отсутствовать, а « $\gamma$ » будет иметь размерность  $\text{Н}/\text{м}^3$ .

Из полученных по указанным формулам скорость движения воздуха выбирается наименьшая, корректируется с учетом потерь давления на трение по известным из курса «Вентиляция» методам.

Расход в воздуха в прослойке определяется по формуле:

$$W = V_{\text{пр}} \cdot 3600 \cdot \delta_{\text{пр}} \cdot \gamma_{\text{пр}} \quad (13.12)$$

где  $\delta_{\text{пр}}$  – толщина воздушной прослойки, м, шириной 1 м, или площади  $F_{\text{пр}}$ ,  $\text{м}^2$ .

### 5.5. Определение параметров тепловлажностного режима прослойки

Температура входящего в прослойку воздуха  $t_0$  определяется по формуле:

$$t_0 = t_{\text{н}} + \frac{t_{\text{в}} \times t_{\text{н}}}{m \times \alpha_{\text{в}} (\sqrt{B_{\text{в}}} + 23B_0)} \quad (13.13)$$

где  $t_{\text{в}}$ ,  $t_{\text{н}}$  – расчетные температуры внутреннего и наружного воздуха;  
 $m$  – коэффициент, равный 0,26 в системе СИ и 0,3 в технической.

Остальные обозначения даны в /4/.

Допускается определять температуру воздуха, входящего в зазор по формуле:

$$t_0 = n \times t_{\text{н}}, \quad (13.14)$$

Температура воздуха по длине прослойки определяется по формуле:

$$t_y = \frac{(k_{\text{в}} \times t_{\text{в}} - k_{\text{н}} \times t_{\text{н}}) + [\tau_0 (k_{\text{в}} + k_{\text{н}}) - (k_{\text{в}} \times t_{\text{в}} + k_{\text{н}} \times t_{\text{н}}) \times e_{\text{сп}}]^{[C_{\text{в}}(k_{\text{в}} + k_{\text{н}})h_y / WC]}}{k_{\text{в}} + k_{\text{н}}} \quad (13.15)$$

где  $k_{\text{в}}$  и  $k_{\text{н}}$  – коэффициенты теплопередачи внутреннего и наружного частей стены до середины зазора;

$h_y$  – расстояние от приточных до вытяжных отверстий, м.

При определении термического сопротивления зазора  $R_{\text{пр}}$  следует пользоваться формулами:

$$R_{\text{пр}} = \frac{1}{\alpha_{\text{пр}}}, \quad (13.16)$$

$$\text{где } \alpha_{\text{пр}} = 5,5 + 5,7V_{\text{пр}} + \alpha_{\text{л}}, \quad (13.17)$$

где  $\alpha_{\text{л}}$  – коэффициент лучистого теплообмена;

$C_{\text{в}}$  – переводной коэффициент: в технической системе равен 1, а в СИ  $C_{\text{в}} = 3,6$ .

Действительная упругость водяного пара на выходе из прослойки определяется по формуле:

$$e_y = \frac{(M_B \times e_B + M_H \times e_H) + [e_0 (M_B + M_H) - (M_B \times e_B + M_H \times e_H)] \times e_{XP}}{M_B + M_H} \quad (13.18)$$

Полученная по данной формуле величина упругости водяного пара на выходе из зазора  $e_y$  должна быть меньше максимальной упругости водяного пара  $E_y$ .

Если  $e_y > E_y$ , то необходимо изменить геометрические параметры прослойки стены здания.

В формуле (13.18)  $M_B$  и  $M_H$  равны соответственно:

$$M_B = \frac{1}{\sum R_{ВП}}; M_H = \frac{1}{\sum R_{ПН}}, \quad (13.19)$$

где  $R_{ВП}$  и  $R_{ПН}$  - сумма сопротивлений паропроницанию от внутренней поверхности до воздушной прослойки и от воздушного зазора до наружной поверхности;

$e_B$  и  $e_H$  - действительная упругость водяного пара с внутренней стороны стены и снаружи;

$e_0$  - упругость водяного пара воздуха, входящего в прослойку;

$$B = \frac{1,058}{1 + t_v / 273} \quad (13.20)$$

## 5.6 Методика определения условного приведенного коэффициента паропроницаемости с учетом швов-зазоров между панелями экранами

Для расчета используются либо коэффициенты паропроницаемости материалов - экрана по /3/, либо полученные экспериментально.

Расчет приведенного коэффициента паропроницаемости экранов с учетом швов-зазоров производится в следующей последовательности:

- 1) Определяется условное сопротивление паропроницанию в стыковых швах по формуле:

$$R_n^1 = \frac{\delta_2}{\left( \frac{v \eta_w}{\sum \xi_w} \right)} \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг} (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{мм рт.ст.}) / \text{ч}, \quad (13.21)$$

где  $v$  - коэффициент перевода из системы СИ в техническую, равен 7.5; в технической  $v=1$ ;

$$\eta_w = 6.5 [\text{мг} / \text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} (\text{г} / \text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{мм рт.ст.})]$$

$\sum \xi_w$  - местные по щели сопротивления проходу воздуха (по таблицам курса «Вентиляция»).

$\delta_2$  - толщина экрана, м.

- 2) Определяется сопротивление паропроницанию плит экрана по его

$$\text{глади по формуле: } R_n = \frac{\delta_2}{\mu_3}, \quad (13.22)$$

где  $\mu_3$  - коэффициент паропроницаемости экрана по /3/.



- 3) Определяется приведенное сопротивление паропрооницанию экрана с учетом стыковых швов  $R_n^{np}$  по формуле:

$$4) \quad R_n^{np} = \frac{\sum F}{\frac{F_{\text{ст}}}{R_n} + \frac{F'}{R_n'}} \quad (13.23)$$

$\sum F$  - суммарная расчетная площадь экрана (как правило принимается  $1 \text{ м}^2$ );

$F_{\text{ст}}$  - площадь экрана без швов,  $\text{м}^2$ ;

$F'$  - площадь зазоров, через которые поступает воздух. Как правило площадь выходных щелей-зазоров в верхней части экрана не учитывается;

$R_n$  и  $R_n'$  - см. выше;

- 5) Определяется условный приведенный коэффициент паропрооницанию экрана с учетом зазоров по формуле:  $\mu = \frac{\delta_{\text{с}}}{R_{\Pi}^{pm}}$ , (13.24)