НИИСФ Госстроя СССР

Рекомендации

по расчету и конструированию вентилируемых стен промышленных зданий с влажным и мокрым режимами



Москва 1988

gost.e-ecolog.ru

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СТРОИТЕЛЬНОЙ ФИЗИКИ
(НИИСФ) Госстроя СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ

по расчету и конструированию вентилируемых стен промышленных зданий с влажным и мокрым режимами



МОСКВА, СТРОЙИЗДАТ, 1988

УДК 691:539.217.2

Рекомендованы к изданию решением Научно-технического совета НИИСФ Госстроя СССР.

Рекомендации по расчету и конструированию вентилируемых стен промышленных зданий с влажным и мокрым режимами /НИИСФ. — М.: Стройиздат, 1988. — 43 с.

Изложены принципы конструирования наружных вентилируемых стен при естественном и механическом вентилировании и методики теплофизического и аэродинамического расчета параметров таких стен и воздушных прослоек, с помощью которых осуществляется их вентилирование.

Для инженерно-технических работников и проектировщиков научно-исследовательских и проектных организаций.

Табл. 3, ил. 11.

Р $\frac{3202000000-601}{047(01)-88}$ Инструкт.-нормат., 1 вып. — 75—87

© Стройиздат, 1988

ПРЕДИСЛОВИЕ

Производственные помещения с влажным и мокрым режимами составляют около 30 % общего объема промышленных зданий.

Ограждающие конструкции таких зданий находятся в тяжелых условиях эксплуатации. Высокое влагосодержание материала стены, агрессивная или слабоагрессивная производственная среда и переменная во времени температура наружного воздуха приводят к быстрому разрушению наружных стен зданий и снижают их долговечность. Натурные исследования показали, что влагосодержание материала стен оказывает существенное влияние на скорость разрушения: чем выше влагосодержание материала, тем быстрее протекает процесс разрушения наружных стен. На ремонт таких зданий ежегодно расходуется около 2,5 млрд. руб., большая часть которых приходится на ограждающие конструкции.

Одним из направлений по повышению долговечности наружных стен зданий с повышенной влажностью воздуха является устройство вентилируемых воздушных прослоек, обеспечивающих эффективную сушку материалов стен. Натурные исследования вентилируемых стен реконструированных зданий показали значительное снижение влагосодержания материала (керамзитобетона) стен. Эксплуатация этих зданий в течение десяти лет без ремонтов наружных стен является надежным подтверждением повышения долговечности ограждающих конструкций при их вентилировании в зданиях с мокрым режимом.

Теплотехнический расчет параметров воздушной прослойки в наружных стенах обычно осуществляется по методике, основанной на стационарной тепло- и влагопередаче. Однако влажностные процессы, протекающие в ограждающих конструкциях зданий с высокой влажностью воздуха, являются существенно нестационарными, что и учитывается в настоящих Рекомендациях.

В Рекомендациях проведены расчеты теплофизических параметров вентилируемых наружных стен, аэродинамических параметров воздушных прослоек и связанных с ними воздуховодов, обеспечивающих их вентилирование. Даны также рекомендации и по конструированию вентилируемых стен с прослойками или каналами, расположенными как в наружной, так и в средней их частях.

Известные способы вентилирования: наружным воздухом за счет гравитационного перепада давления (естественное вентилирование) и подогретым воздухом при механическом вентилировании, экономически целесообразны. Первый способ вентилирования может применяться для любого типа здания, однако ограждающие конструкции должны быть многослойными с использованием в них эффективных утеплителей, обладающих высоким значением коэф-

фициента паропроницаемости и профилированного защитного экрана на относе с наружной стороны ограждения.

Механическое вентилирование целесообразно использовать в зданиях с высоким уровнем технологического тепловыделения с применением рекуперации тепла вентиляционных выбросов для подогрева и таким образом высушивания (понижения относительной влажности) наружного воздуха, подаваемого на вход вентилируемых воздушных прослоек или каналов. При механическом вентилировании прослойки образуются либо с внутренней стороны с помощью экрана на относе, либо в средней части ограждающей конструкции преимущественно в форме каналов. В Рекомендациях рассматриваются расчет и конструирование вентилируемых стен с расположением воздушных прослоек в их средней части. Для вентилируемых стен с воздушной прослойкой, расположенной с внутренней стороны, представлен только их теплофизический расчет.

Рекомендации разработаны НИИСФ Госстроя СССР (кандидаты техн. наук В. И. Лукьянов, А. Ф. Хомутов, инж. Ю. К. Попова) совместно с ЦНИИПромзданий Госстроя СССР (канд. техн. наук В. Н. Макарцев, В. В. Пономарева, инж. А. И. Звягина).

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Рекомендации предназначены для проектирования вентилируемых промышленных зданий с влажным или мокрым режимом помещений. Мокрый и влажный режимы помещений определяются в соответствии с табл. 1 СНиП II-3-79** «Строительная теплотехника».

1.2. Основным конструктивным отличием вентилируемых стен является наличие воздушной прослойки, обеспечивающей эффективное удаление избыточной влаги из стеновых материалов, что позволяет повысить долговечность конструкций стен зданий с влажным или мокрым режимом.

1.3. Расчет вентилируемых стен при их проектировании должен включать в себя:

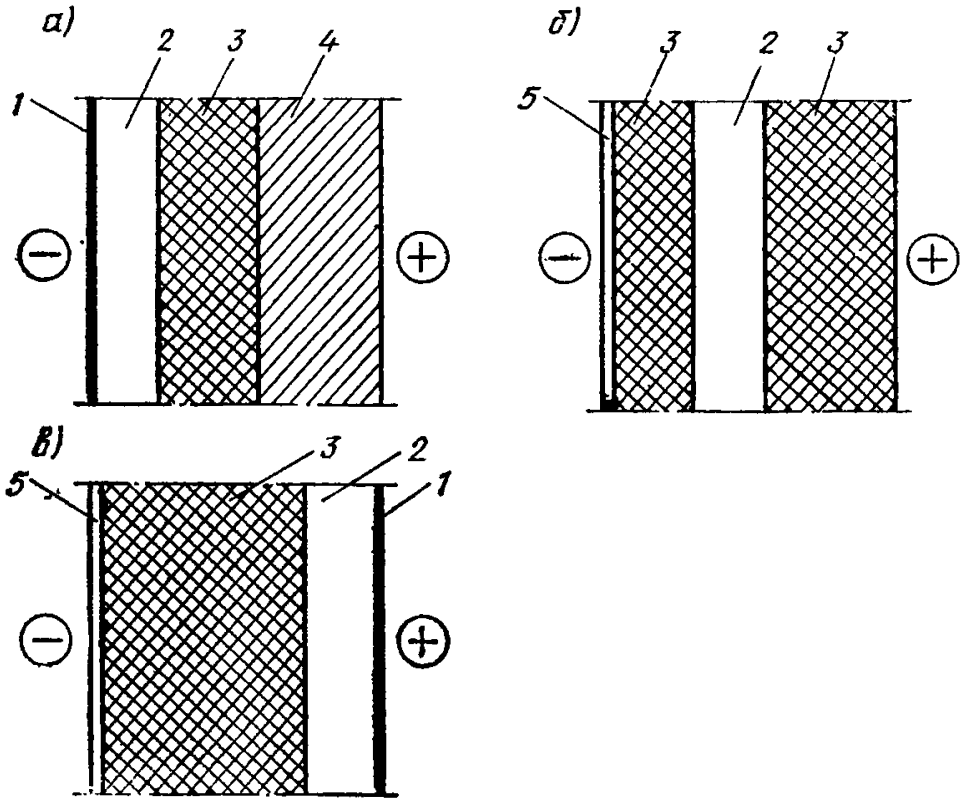


Рис. 1. Схемы стен с различным расположением воздушной прослойки

а — 1-й тип — воздушная прослойка снаружи утеплителя; *б* — 2-й тип — воздушная прослойка в теплозащитном слое; *в* — 3-й тип — воздушная прослойка с внутренней стороны стены между теплозащитным слоем и экраном;
1 — защитный металлический экран; *2* — воздушная прослойка; *3* — теплозащитный слой, 2-го и 3-го типов одновременно являющийся несущим элементом стены; *4* — несущий элемент стены, *5* — наружный защитный слой

определение требуемой толщины элементов стены из условий: невыпадения конденсата на ее внутренней поверхности и обеспечения экономически целесообразного сопротивления теплопередаче стены (в соответствии со СНиП II-3-79**);

расчет параметров вентилируемой воздушной прослойки.

1.4. В промышленных зданиях с влажным или мокрым режимом следует применять стены с наружным расположением экрана и естественным вентилированием воздушных прослоек или каналов наружным воздухом (рис. 1, *а*). В зданиях с высоким уровнем технологического тепловыделения при соответствующем экономическом обосновании допускается применение также двух других типов стен с расположением прослойки или каналов в их средней части (рис. 1, *б*) или экраном с внутренней стороны (рис. 1, *в*).

1.5. Вентилируемые стены рекомендуется проектировать в соответствии с основными положениями глав (СНиП 2.03.01—84). «Бетонные и железобетонные конструкции», СНиП II-3-79** «Строительная теплотехника», СНиП 2.03.11—85 «Защита строительных конструкций от коррозии», СНиП 2.01.02—85 «Противопожарные нормы», СНиП 2.01.07—85 «Нагрузки и воздействия», СНиП 2.09.02—85 «Производственные здания», а также настоящих рекомендаций.

2. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТЫ ВЕНТИЛИРУЕМЫХ СТЕН ПРИ ИХ ЕСТЕСТВЕННОМ ВЕНТИЛИРОВАНИИ

2.1. Температура наружного воздуха $t_н$ принимается равной средней температуре наиболее холодной пятидневки, устанавливаемой по табл. СНиП 2.01.01—82 с обеспеченностью 0,92 для соответствующего района строительства.

2.2. Температура $t_в$ и относительная влажность $\varphi_в$ воздуха в помещении устанавливаются в соответствии с нормами по проектированию соответствующих зданий и сооружений. При наличии соответствующих экспериментальных данных $t_в$ и $\varphi_в$ принимаются равными температуре и относительной влажности воздуха на уровне входа в воздушную прослойку.

2.3. Значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_в$ внутренней поверхности стены принимается по табл. 4 СНиП II-3-79**.

2.4. Значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_н$ наружной поверхности стены принимается равным среднему коэффициенту теплоотдачи поверхности воздушной прослойки для зимних условий, т. е. 10,8 Вт/(м^2 · °С).

2.5. Требуемое сопротивление теплопередаче $R_0^{тр}$ слоев наружной стены с воздушными прослойками или каналами, представленной на рис. 2, рассчитывается для сечения на уровне входа в воздушную прослойку по п. 2.2 СНиП II-3-79**.

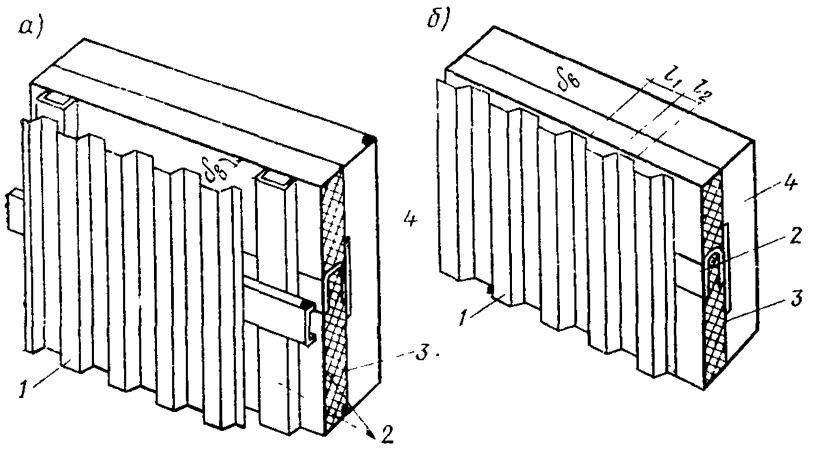


Рис. 2. Вентилируемая стена 1-го типа с защитным экраном с наружной стороны
а — на относе; *б* — прикрепленным вплотную
1 — экран; *2* — швеллер; *3* — утеплитель; *4* — бетонная плита

2.6. В помещениях с относительной влажностью воздуха $\varphi_в > 80$ % необходимо нанесение слоя дополнительной пароизоляции на внутреннюю поверхность наружной стены с сопротивлением паропроницанию $R_п^д$ не менее 0,3 м²·ч·Па/мг. При этом для расчета этой стены причимается $\varphi_в = 80$ %, а наносимый слой пароизоляции должен обладать хорошей адгезией и быть достаточно долговечным.

2.7. Экономически целесообразное сопротивление теплопередаче $R_0^{эк}$ вентилируемой стены определяется по п. 2.12 изменений и дополнений к СНиП II-3-79**.

2.8. Толщина слоя, выполняющего роль несущего элемента, из конструкционного материала назначается такой, чтобы сопротивление паропроницанию этого слоя $R_п$ было не менее 1,6 м².ч.Па/мг, чему соответствует толщина слоя: 5 см из тяжелого бетона или 20 см из керамзитобетона $\gamma_0 = 1200$ кг/м³.

Примечания: 1. Толщина слоя несущего элемента должна удовлетворять также конструктивным требованиям к ограждению. 2. Термическое сопротивление R_1 слоя конструкционного материала определяется по п. 2.5 СНиП II-3-79** с учетом расчетного массо-

вого отношения влаги в материале $\omega_м$, соответствующего условиям эксплуатации $А$ (по прил. 3 этой главы СНиП). 3. Значения коэффициентов паропроницанию легких и ячеистых бетонов принимаются равными $^1/_2$ от значений соответствующих коэффициентов, указанных в прил. 3 СНиП II-3-79**.

2.9. Требуемое термическое сопротивление эффективного утеплителя $R_{ут}^{тр}$ рассчитывается по формуле

$$R_{ут}^{тр} = R_0^{тр} - R_1 - 1/\alpha_в - 1/\alpha_н \qquad (1)$$

и его значение должно быть не менее расчетного значения $R_{ут}^{рас}$ найденного из условия, что температура t_1 границы примыкания утеплителя к конструкционному материалу должна быть не менее —5°С при температуре наружного воздуха $t_н$. При этом отношение термического сопротивления $R_{ут}^{тр}$ слоя утеплителя вентилируемых стен к их сопротивлению теплопередаче $R_0^{тр}$ не должно быть меньше $R_{ут}^{рас} / R_0^{тр}$, определяемого по таблице.

Таблица

Отношение минимального термического сопротивления слоя утеплителя к сопротивлению теплопередаче	Средняя температура наиболее холодной пятидневки, °С				
	Ниже—40	От—40 до—30	От—30 до—20	От—20 до—10	Свыше—10
$R_{ут}^{рас}/R_0^{тр}$	0,6	0,55	0,5	0,35	0,15

В формуле (1) коэффициенты теплоотдачи $\alpha_в$ и $\alpha_н$ имеют тот же смысл, что и в пп. 2.3 и 2.4, а $t_н$, $t_в$ и R_1 — соответственно в пп. 2.1, 2.2 и 2.8.

Примечание. Если $R_0^{тр} < R_0^{эк}$, в формуле (1) $R_0^{тр}$ следует заменить на $R_0^{эк}$.

2.10. Рекомендуется применять такое сочетание эффективного утеплителя с конструкционным материалом, при котором отношение их коэффициентов паропроницаемости $\mu_{ут}$, $\mu_{кон}$ с учетом примеч. 3 к п. 2.8 было бы не менее 3:1.

2.11. Толщина слоя утеплителя устанавливается по формуле

$$\delta_{ут} \geqslant R_{ут}^{тр} \lambda_{ут}, \qquad (2)$$

где $\lambda_{ут}$ — коэффициент теплопроводности утеплителя, принятый

по прил. 3 СНиП II-3-79** для условий эксплуатации A, Вт/(м · °С).

2.12. Длина воздушной прослойки H принимается равной высоте помещения для участков стены, не содержащих оконных проемов в вертикальном направлении, от уровня расположения технологического оборудования, являющегося источником влаги. Для остальных участков с учетом протяженности окон: от указанного уровня до нижнего уровня окна и от верхнего уровня окна до карниза крыши.

2.13. Вентилируемые воздушные прослойки создаются с помощью защитного экрана (см. рис. 2):

профилированным или плоским листом на относе от основной стены на расстоянии $\delta_{в1}$ при средней температуре наружного воздуха наиболее холодной пятидневки $t_н$ ниже —25°С;

профилированным листом вплотную при $t_н$ от —25°С и выше.

В последнем случае в области $t_н$ от —25°С до —15°С устанавливается высота гофра $\delta_{в2}$, ширина участка плотного примыкания к стене l_2 не более 50 мм и шириной l_1 гофра не менее 200 мм, в области $t_н$ св. —15°С — $\delta_{в3}$, l_2 не более 100 мм и l_1 не менее 150 мм.

2.14. Толщина $\delta_{в1}$ воздушной прослойки устанавливается на основе положения о том, что наименьший расход воздуха v на метр ширины должен быть не меньше следующей величины:

$$v \geqslant 0{,}028 + 0{,}0019\ (H - 10), \qquad (3$$

где v — измеряется в м²/с.

H, м — длина воздушной прослойки между входным и выходным отверстиями (щелями). При этом минимальную толщину воздушной прослойки $\delta_{в1}$, м определяют с учетом только гравитационного давления (ветровой напор не учитывается) по формуле (см. прил. 1).

$$\delta_{в1} \geqslant (0{,}06 + 0{,}3/H)\sqrt{(0{,}06\ H + 0{,}3)\ R_2 \Sigma \xi/(t_в - t_н)}, \qquad (4)$$

где R_2 — сопротивление м² · °С/Вт теплопередаче части наружной стены, расположенной между воздушной полостью и помещением (R_2 практически равно R_0); $t_н$, $t_в$ — то же, что и соответственно в пп. 2.1 и 2.2, °С; $\Sigma\xi$ — сумма местных аэродинамических сопротивлений течению воздуха.

Толщины $\delta_{в2}$ и $\delta_{в3}$ воздушной прослойки устанавливают на уровне

$$\delta_{в3} = \delta_{в2} = 1{,}2\ \delta_{в1}, \qquad (5$$

причем $\delta_{в1}$, м определяют по формуле (4).

Примечания: 1. Минимальные значения толщин $\delta_{в1}$, $\delta_{в2}$, $\delta_{в3}$ устанавливаются равными соответственно 0,04; 0,05 и 0,05 м. 2. Для стен, содержащих оконные проемы, толщины $\delta_{в1}$, $\delta_{в2}$, $\delta_{в3}$ принимаются равными наибольшему значению из полученных.

2.15. Сумму аэродинамических сопротивлений определяют по формуле

$$\Sigma \xi = \xi_{вх} + \xi_{пов} + \xi_{к} + \xi_{пов} + \xi_{вых}, \qquad (6)$$

где $\xi_{вх}, \xi_{пов}, \xi_{к}, \xi_{вых}$ — устанавливают в зависимости от принятой конструкции входных и выходных участков (рис. 3).

Для этих конструкций $\xi_{вх}$ =0,57 (при наличии сетки на входе с живым сечением $F_{ж,с}/F \geqslant 0{,}9$); $\xi_{пов}$ =1—1,5; $\xi_{вых}$ =0,9 (при наличии сетки, без нее — 0,5).

$\xi_{к}$ определяют по формуле (43) с учетом (44). При этом для упрощения расчетов вторым слагаемым правой части формулы (43) пренебрегаем.

В начале расчетов (см. прил. 3, примеры 1 и 2) принимаем:

для H=от 15 до 30 м $\delta_{в1}$ =0,06 м ($d_{к}$=0.12);

» H=от 3 до 15 м $\delta_{в1}$ =0,04 м ($d_{к}$=0,08).

Для увеличения точности расчетов рекомендуется использовать метод итераций, т. е. полученное значение $\delta_{в1}$ подставить в формулу (43) и вновь произвести расчет.

2.16. Для оценки максимальной скорости воздуха w_{max} в вентилируемой воздушной прослойке ее расчет производится с учетом ветрового напора по прил. 2.

3. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВЕНТИЛИРУЕМЫХ СТЕН ПРИ ИХ МЕХАНИЧЕСКОМ ВЕНТИЛИРОВАНИИ

3.1. Экономически целесообразнее создавать воздушную прослойку 2-го типа (см. рис. 1, *б*) по сравнению с прослойкой 3-го типа (см. рис. 1, *в*).

3.2. При выборе наружной стены 3-го типа расчет требуемого сопротивления теплопередаче $R_0^{тр}$ необходимо проводить по п. 2.1 СНиП II-3-79**. Нормативный перепад температуры $\Delta t^{н}$, °С принимается равным

$$\Delta t^{н} = t_{вх} - \tau_{0,8} = 0{,}146\ (80 - \varphi_{вх}), \qquad (7)$$

где $t_{вх}$, °С, $\varphi_{вх}$ % — соответственно температура и относительная влажность воздуха, подаваемого на вход воздушной прослойки, $\tau_{0,8}$ — температура поверхности, при которой достигается относительная влажность воздуха 80 %, °С; коэффициент теплоотдачи

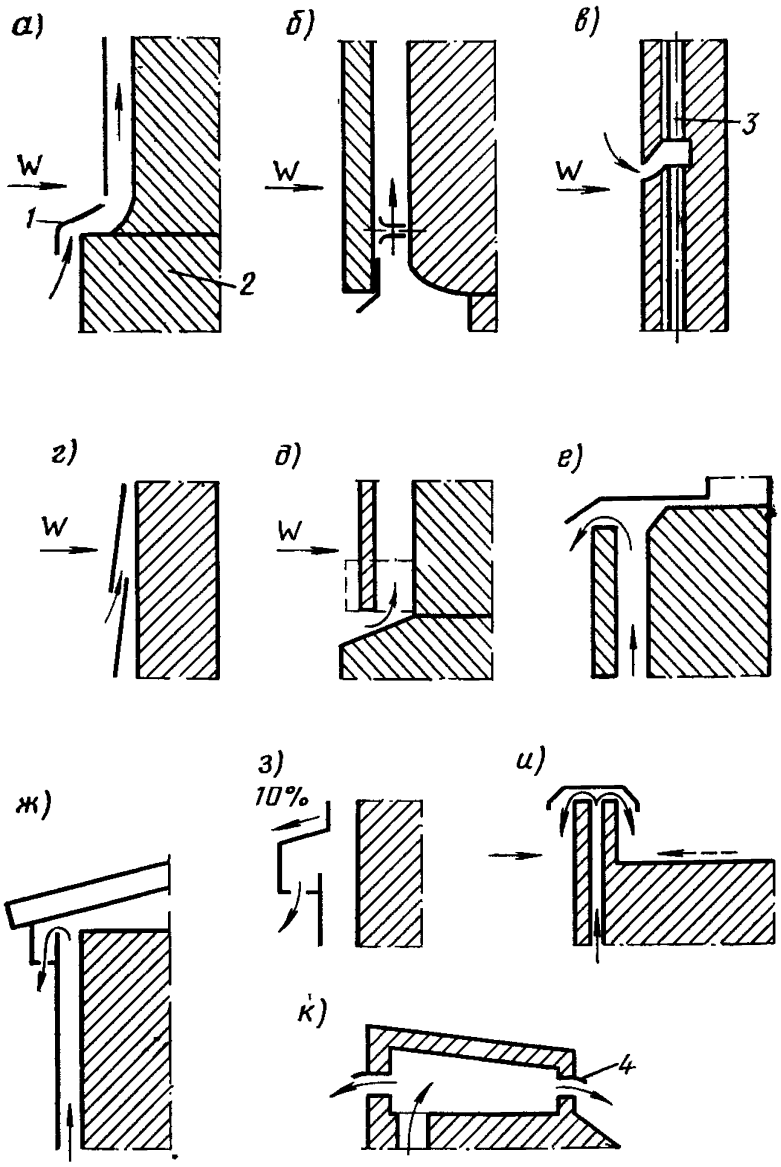


Рис. 3. Вентиляционные отверстия входа и выхода воздуха

а—д— отверстия входа воздуха; *а, д* — у цоколя; *б* — над оконным проемом; *в* — к каналу в массиве стены; *г* — при чешуйчатом экране; *е* — *к* — отверстия выхода воздуха; *е* — под оконным проемом; *ж* — *к* — для вариантов кровель; *1* — слив; *2* — цоколь; *3* — канал в массиве стены;

внутренней поверхности $\alpha_в$ заменяется на коэффициент теплоотдачи поверхности воздушной прослойки $\alpha_{пр}$.

3.3. Температуру воздуха $t_{вх}$, подаваемого в воздушную прослойку, следует выбирать равной расчетной температуре воздуха

$t_в$ в помещении (температуре воздуха на уровне расположения машин).

3.4. Коэффициент теплоотдачи поверхности прослойки $\alpha_{пр}$ принимают равным 12 Вт/(м² · °С).

3.5. Относительную влажность воздуха $\varphi_{вх}$, %, подаваемого в воздушную прослойку, рассчитывают с учетом термического сопротивления наружной части стены $R_0^{эк}$, м² · °С/Вт (по отношению к прослойке), полученного по п. 2.15 СНиП II-3-79**, по формуле

$$\varphi_{вх} \leqslant 80 - 12\ (t_в - t_н)/(R_0^{эк}\ \alpha_{пр}). \qquad (8)$$

3.6. Минимальный расход воздуха, подаваемого в воздушную прослойку, равен 0,05 м²/с на один метр ширины вентилируемой стены. При задании толщины воздушной прослойки $\delta_в$, м, находят расчетную скорость движения воздуха w, м/с, из соотношения

$$w\ \delta_в = 0{,}05. \qquad (9)$$

3.7. При выборе наружной стены 2-го типа расчет требуемого сопротивления теплопередаче $R_1^{тр}$, м² · °С/Вт, наружного слоя осуществляется по формуле

$$R_1^{тр} = C + \sqrt{C^2 + D}, \qquad (10)$$

где

$$C = (t_в - t_{вх})/6\alpha_в A - 1/3B; \qquad (11)$$

$$D = (t_в + 2\ t_{вх} - 3\ t_н)/(9A\ B\ \alpha_в); \qquad (12)$$

$$A = (1 - 0{,}0095\ \varphi_в)\ \Delta t; \qquad (13)$$

$$B = \rho c_р\ w\ \delta_в / H, \qquad (14)$$

где $t_в$, $\varphi_в$ — то же, что и в п. 3.2; $t_н$, $t_{вх}$ — то же, что и соответственно в п. 2.1 и 3.3; $\alpha_в$ — то же, что и в п. 2.3; $\Delta t = 14{,}6$°С; ρ, кг/м³, $c_р$, Дж/(кг · °С), w, м/с — соответственно плотность и теплоемкость воздуха при $t = 0$°С и его скорость; $\delta_в$, H, м — соответственно толщина и длина воздушной прослойки.

При расчете требуемого сопротивления $R_1^{тр}$ наружного слоя принято, что воздушная прослойка делит наружную стену так, что сопротивления теплопередаче R_2 и R_1 относятся как $R_2 : R_1 = 3:1$.

3.8. Расход воздуха v, подаваемого в воздушную прослойку, на метр ширины стены, устанавливают на уровне

$$v = w\ \delta_в \geqslant 0{,}1 + 0{,}0025\ (H - 20), \qquad (15)$$

где v измеряется в м²/с.

При этом толщина воздушной прослойки $\delta_в$ определяется по формуле

$$\delta_в \geqslant 0{,}04 + 0{,}001\ (H - 10), \qquad (16)$$

где $\delta_в$ и H в м.

Если высота H меньше 10 м, толщина $\delta_в$ принимается равной 0,04 м.

Скорость воздуха w, м/с определяют из соотношения (15).

3.9. Расчетные значения температуры $t_в$ и относительной влажности $\varphi_в$ воздуха принимают равными, соответственно температуре и относительной влажности воздуха в помещении в зоне расположения производящих машин.

3.10. Температура воздуха $t_{вх}$, подаваемого на вход воздушной прослойки, принимается равной 5°С.

Примечание. Если температура наружного воздуха выше 5°С, вентиляция отключается и в воздушную прослойку подается наружный воздух для ее естественного вентилирования. Это должно оговариваться в проекте ограждающих конструкций зданий.

3.11. Толщины наружного δ_1, м и внутреннего δ_2, м слоев находят по формулам:

$$\delta_1 \geqslant \lambda_1 (R_1^{тр} - 1/\alpha_н - 1/\alpha_{пр}); \quad (17)$$

$$\delta_2 \geqslant \lambda_2 (3\ R_1^{тр} - 1/\alpha_в - 1/\alpha_{пр}), \quad (18)$$

где λ_1, λ_2 — коэффициенты теплопроводности материалов соответственно наружного и внутреннего слоев, Вт/(м · °С); $\alpha_н$ — коэффициент теплоотдачи наружной поверхности для зимних условий, равный 23,2 Вт/(м² · град); $\alpha_{пр}$ — коэффициент теплоотдачи поверхностей воздушной прослойки, равный 10,8 Вт/(м² · град); $\alpha_в$ — то же, что и в п. 2.3.

Примечание. Толщины наружного δ_1 и внутреннего δ_2 слоев должны удовлетворять конструктивным требованиям к ограждению этого типа.

3.12. Относительную влажность воздуха $\varphi_{вх}$, %, на входе прослойки рассчитывают по формуле

$$\varphi_{вх}^{*} \leqslant 95 \exp [0{,}07 (t_{вых}^{х.п} - t_{вх})], \quad (19)$$

в которой температура холодной поверхности воздушной прослойки на уровне ее выхода $t_{вых}^{х.п}$, °С, определяется по формуле

$$t_{вых}^{х.п} = t_{вых} - (t_{вых} - t_н)/(R_1 \alpha_{пр}), \quad (20)$$

где

$$R_1 = \delta_1/\lambda_1 + 1/\alpha_н + 1/\alpha_{пр}. \quad (21)$$

---

* Относительная влажность воздуха $\varphi_{вх}$, подаваемого в воздушную прослойку, должна быть не более 50 %.

3.13. Температуру воздуха на выходе из прослойки $t_{вых}$, °С, находят по формуле

$$t_{вых} = (B + 1/2\ R_1 + 1/2\ R_2)^{-1}\ \{\ [B - (1/2R_1 + 1/2\ R_2)]\ t_{вх} + t_н/R_1 + t_в/R_2\},\qquad (22)$$

где

$$R_2 = \delta_2/\lambda_2 + 1/\alpha_в + 1/\alpha_{пр}.\qquad (23)$$

Коэффициент B находят по формуле (14).

3.14. Для вентилируемой стены с каналами (рис. 4) расчет требуемого сопротивления теплопередаче $R_1^{тр}$ наружного слоя толщиной δ_1, м осуществляется с учетом п. 3.7 по формуле

$$K\ R_1^{тр} + b = \exp\ (-\ B/R_1^{тр}),\qquad (24)$$

где

$$B = \frac{(4l_1 + 4l_2 + 6\delta_в)H}{3\rho c_p w l_1 \delta_в};\qquad (25)$$

$$b = \frac{(3l_1 + 3l_2 + 6\delta_в)(t_в - t_н)}{(4l_1 + 4l_2 + 6\delta_в)t_{вх} - (l_1 + l_2)t_в - (3l_1 + 3l_2 + 6\delta_в)t_н};\qquad (26)$$

$$K = -\frac{3(4l_1 + 4l_2 + 6\delta_в)\alpha_в A}{(4l_1 + 4l_2 + 6\delta_в)t_{вх} - (l_1 + l_2)t_в - (3l_1 + 3l_2 + 6\delta_в)t_н};\qquad (27)$$

ρ, $c_в$, w, H, $\varphi_в$, $\alpha_в$, A, Δt — то же, что и в п. 3.7; l_1, l_2, $\delta_в$ — измеряются в м; $t_в$, $t_н$, $t_{вх}$ в °С.

Графическое решение этого трансцендентного уравнения приведено на рис. 5.

3.15. Геометрические параметры вентилируемых каналов определяются следующим образом. Минимальное значение l_1 равно 0,1 м, максимальное значение l_1 и минимальное значение l_2 ограничиваются конструктивными требованиями; максимальное l_2 равно 0,15 м; ширина канала $\delta_в$ равна 0,05 м.

3.16. Расчетные значения температуры $t_в$, °С и влажности $\varphi_в$, %, принимают по п. 3.9.

3.17. Расчетное значение температуры воздуха $t_{вх}$, °С на входе в воздушную прослойку принимается по п. 3.10.

3.18. Расход воздуха v, м²/с, подаваемого на вход вентилируемых каналов, устанавливается формулой (15). Скорость воздуха w, м/с, определяют из следующего соотношения:

$$w = v/(l_1 \delta_в\ n),\qquad (28)$$

где n, 1/м — количество каналов на погонный метр стены устанавливается при конструировании стены с учетом п. 3.15 и равно:

$$n = (l_1 + l_2)^{-1}.$$

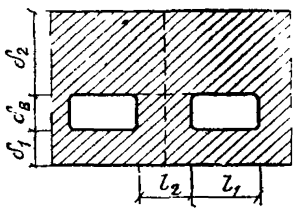


Рис. 4. Схема расположения вентилируемых каналов в наружных стенах

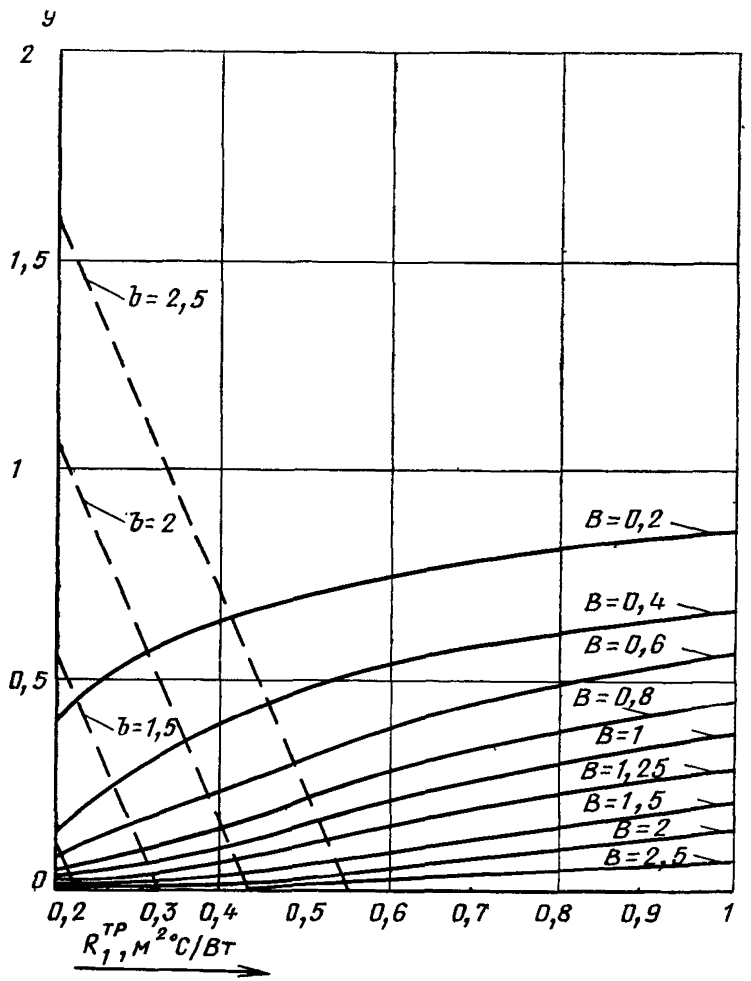
Рис. 5. Графическое решение трансцендентного уровня

$$y = b + KR_1^{тр} = \exp\left(-\frac{B}{R_1^{тр}}\right)$$

____ — семейство кривых: $\exp\left(-B/R_1^{тр}\right)$

_ _ _ _ — семейство кривых: $b + KR_1^{тр}$

$K = -4{,}55$ Вт/ (м²·°С)



3.19. Толщины наружного δ_1 и внутреннего δ_2 слоев находят по п. 3.11.

Примечание. Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{пр}$ в вентилируемом канале следует принимать равным 10,8 Вт/(м²·°С).

3.20. Относительную влажность воздуха $\varphi_{вх}$ на входе каналов определяют по формуле (19).

3.21. Температуру воздуха $t_{вых}$, °С на выходе каналов находят по формуле

$$t_{вых} = t_{эф} + (t_{вх} - t_{эф})\exp[-CH/(\rho c_р w l_1 \delta_в)]; \quad (29)$$

$$C = \frac{l_1}{R_2} + \frac{l_2}{R_2 - 1/\alpha_{пр}} + \frac{l_1}{R_1} + \frac{l_2}{R_1 + \delta_в/\lambda_1} + \frac{l_2}{R_1 + \delta_в/\lambda_1 - 1/\alpha_{пр}}; \quad (30)$$

$$t_{эф} = \frac{1}{C}\left[\left(\frac{l_1}{R_2} + \frac{l_2}{R_2 - 1/\alpha_{пр}}\right) t_в + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{l_1}{R_1} + \frac{l_2}{R_1 + \delta_в/\lambda_1} + \frac{l_2}{R_1 + \delta_в/\lambda_1 - 1/\alpha_{пр}}\right) t_н\right]. \quad (31)$$

R_1 находят по формуле (21), а R_2 — по формуле (23); ρ, $c_р$, w, H — то же, что и в п. 3.7; $\alpha_{пр}$, λ_1 — то же, что и в п. 3.11; l_1, l_2, $\delta_в$ — то же, что и в п. 3.14.

4. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВОЗДУХОВОДОВ СТЕН ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ВЕНТИЛИРОВАНИИ

4.1. Рекомендуется следующая схема движения воздуха (рис. 6.): вентилятор *1* подает подготовленный воздух из коллектора *9* с параметрами $t_{вх}$ и $\varphi_{вх}$ в воздуховод *2* с шибером *3*, далее через подводящий воздуховод *4* в раздающий коллектор *5* и выходит через каналы *6*, расположенные в стене *8*, в сборный коллектор *7* и выводится наружу. Выход воздуха осуществляется аналогично выходу при естественной вентиляции (см. рис. 3).

Способ раздачи воздуха по каналам определяется конструктивными соображениями.

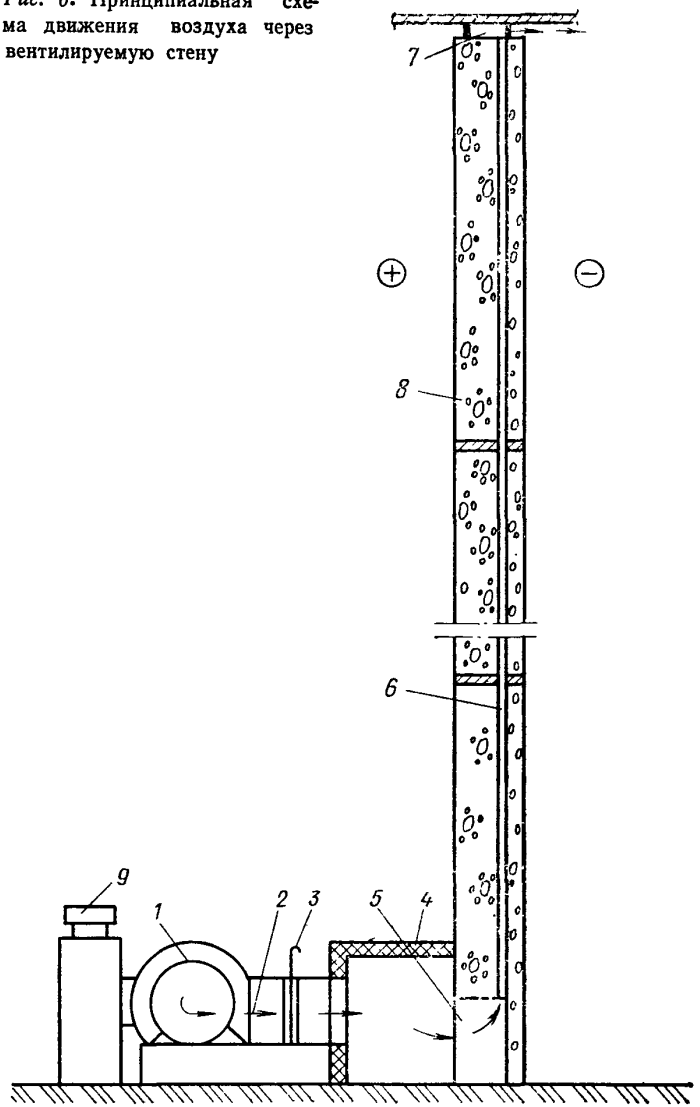
4.2. В ходе расчета определяется расход вентиляционного воздуха на одну систему V_1, м³/с:

$$V_1 = vL_1, \quad (32)$$

где L_1 — длина участка вентилируемой стены, м; v — удельный расход, м²/с, определяемый по формуле (15); $-\Delta P_в$ — напор вентилятора, Па, определяемый по формуле

$$\Delta P_в = 0{,}6\rho(\zeta_{вых}\omega^2_{вых} + \zeta_{р.к}\, w^2_{р.к} + \zeta_к w^2_к + \zeta_ш w^2_{диф}), \quad (33)$$

Рис. 6. Принципиальная схема движения воздуха через вентилируемую стену



где $\zeta_{вых}$, $w_{вых}$ — коэффициент сопротивления и скорость воздуха на выходе из системы; $\zeta_{р.к}$, $w_{р.к}$ — то же, раздающего коллектора; $\zeta_к$, $\omega_к$ — то же, каналов; $\zeta_ш$ — коэффициент сопротивления шибера; $w_{диф}$ — скорость на выходе из диффузора вентилятора, м/с.

Потери давления в сети определяются для наиболее удаленного канала.

4.3. Скорость воздуха $w_{вых}$, м/с, на выходе из системы определяется по формуле

$$w_{вых} = 4V/(\pi d^2_{с.к}), \tag{34}$$

где $d_{с.к}$, м — эквивалентный гидравлический диаметр сборного коллектора, который равен:

$$d_{с.к} = 4F/П, \tag{35}$$

где F — площадь сечения канала, м²; П — периметр сечения канала, м.

4.4. Скорость воздуха $w_{р.к}$, м, на входе в раздающий коллектор

$$w_{р.к} = 4V_1/\pi d^2_{н.к}, \tag{36}$$

где $d_{п.к}$, м — эквивалентный гидравлический диаметр подводящего коллектора, определяемый аналогично $d_{с.к}$ по формуле (35).

4.5. Скорость воздуха $w_{диф}$, м, на выходе из диффузора вентилятора равна:

$$w_{диф} = 4V/(\pi d^2_{диф}), \tag{37}$$

где $d_{диф}$, м — эквивалентный гидравлический диаметр выходного отверстия диффузора.

4.6. Коэффициенты аэродинамического сопротивления $\zeta_{вых}$ $\zeta_{р.к}$, $\zeta_к$, $\zeta_ш$ определяются в зависимости от режима течения, шероховатости каналов и их геометрии.

4.7. $\zeta_{вых}$ определяется с учетом поворота потока на 90°, внезапного расширения $\zeta_{вых} = 4—5$.

4.8. Коэффициент местного сопротивления коллектора определяется зависимостью.

$$\zeta_{р.к} = (0{,}788\bar{A} + 0{,}029\bar{B} + 0{,}115F_{р.к}/F_{с.к} - 0{,}13\bar{A}\bar{B} - 0{,}353\bar{A}F_{р.к}/F_{с.к} - 0{,}09)^{-1}, \tag{38}$$

где

$$\bar{A} = \frac{\bar{f}}{\sqrt{0{,}6 + (\bar{f}/\bar{f}_{с.к})^2}}; \tag{39}$$

$\overline{B} = 1 - F_к / F_{р.к}$ — коэффициент степени сужения раздающего канала; (40)

$$\overline{f} = F_к / F_{р.к}; \quad (41)$$

$$\overline{f}_{с.к} = F_к / F_{с.к}; \quad (42)$$

где $F_к$ — площадь канала, м²; $F_{р.к}$ — площадь раздающего канала, м²; $F_{с.к}$ — площадь сборного канала, м².

4.9. $\zeta_к$ — потери давления на трение в прямых свободных каналах определяются по формуле

$$\zeta_к = \overline{\lambda} H / d_к, \quad (43)$$

где $\overline{\lambda}$ — коэффициент сопротивления трению; H — высота каналов, м; $d_к$ — эквивалентный гидравлический диаметр канала, м.

4.10. Для труб круглого сечения при турбулентном режиме коэффициент $\overline{\lambda}$ рассчитывается по приближенной формуле:

$$\overline{\lambda} = 0{,}11(\overline{\Delta} + 68/\mathrm{Re})^{0{,}25}, \quad (44)$$

где $\overline{\Delta}$ — относительная шероховатость труб ($\overline{\Delta} = \Delta / d_к$);

Δ — шероховатость труб, зависящая от материала труб;

Re — критерий Рейнольдса ($\mathrm{Re} = wd/\nu$).

Для труб, выполненных в железобетонных панелях, $\Delta = 2{,}5$ мм, для бетонных труб $\Delta = 3$—9 мм и т. д.

Для труб некруглого поперечного сечения —

$$\overline{\lambda}_н = \overline{a\lambda}. \quad (45)$$

Для труб прямоугольного сечения $a_{пр} = 1{,}0$—$1{,}1$; для квадратного сечения $a = 1{,}0$; для плоской щели $a_{пл} = 1{,}1$.

4.11. При наличии дроссельных задвижек коэффициент гидравлического сопротивления возрастает на величину $\zeta_{др}$. Коэффициент местного сопротивления шибера $\zeta_{др} = 1{,}3$.

4.12. Производительность вентилятора $V_в$ устанавливается равной $1{,}1\ V$.

4.13. При установлении периметра L вентилируемых стеновых ограждений необходимо учитывать, что длины участков с оконными проемами должны быть удвоены.

4.14. В зависимости от полученных расчетом величин $V_в$ и $\Delta P_в$ устанавливается необходимый вентилятор, как правило Ц4-70 № 8.

4.15. Геометрическая форма вентиляционных каналов в стене устанавливается по возможности правильной формы (круглой, овальной, прямоугольной).

Плоские поверхности канала следует ориентировать вдоль панели и располагать ближе к наружной стене.

5. КОНСТРУИРОВАНИЕ ВЕНТИЛИРУЕМЫХ СТЕН ПРИ ИХ ЕСТЕСТВЕННОМ ВЕНТИЛИРОВАНИИ

5.1. При естественном вентилировании стен целесообразно применять многослойную конструкцию, состоящую из основной стены и наружного экрана.

5.2. Основная стена выполняется из двухслойных панелей, объединяющих несущий бетонный слой и теплоизолирующий.

5.3. Технология изготовления двухслойных панелей должна обеспечивать надежность крепления утеплителя и сохранность качества теплоизолирующего слоя.

5.4. Несущую часть двухслойных панелей следует выполнять из конструкционного тяжелого бетона или легкого (например, керамзитобетона).

5.5. Расчет многослойной панели выполняется с учетом работы только внутренней железобетонной панели как плиты, опертой по балочной схеме на две опоры в местах крепления к колоннам каркаса.

5.6. Теплоизолирующий слой двухслойных панелей необходимо выполнять в соответствии с п. 2.10 из эффективных крупнопористых материалов или минераловатных плит с коэффициентом паропроницаемости не менее $10 \cdot 10^{-2}$ мг/(м·ч·Па) с полностью не более 200 кг/м^3. Толщина слоя утеплителя устанавливается расчетом по п. 2.8. и 2.11.

5.7. Крепление двухслойных панелей к каркасу здания, а также горизонтальные и вертикальные швы следует выполнять в соответствии с действующими типовыми сериями (серия 2.432-2).

5.8. Изготовление многослойных вентилируемых стен с экраном следует выполнять в следующей последовательности:

изготовление двухслойной панели;

установка крепежных элементов для монтажа экрана;

крепление наружного экрана.

5.9. Крепежные элементы многослойных вентилируемых панелей, осуществляющие связь основной стены с наружным экраном, не должны препятствовать сквозному вертикальному движению воздуха (рис. 7).

5.10. Крепежные элементы должны быть рассчитаны на растяжение и срез с учетом влияния отрицательного давления ветра, имеющего направление от поверхности продольной стены и положительного давления, например, на торец здания, вызывающего воздействие горизонтальных сил вдоль продольной оси здания.

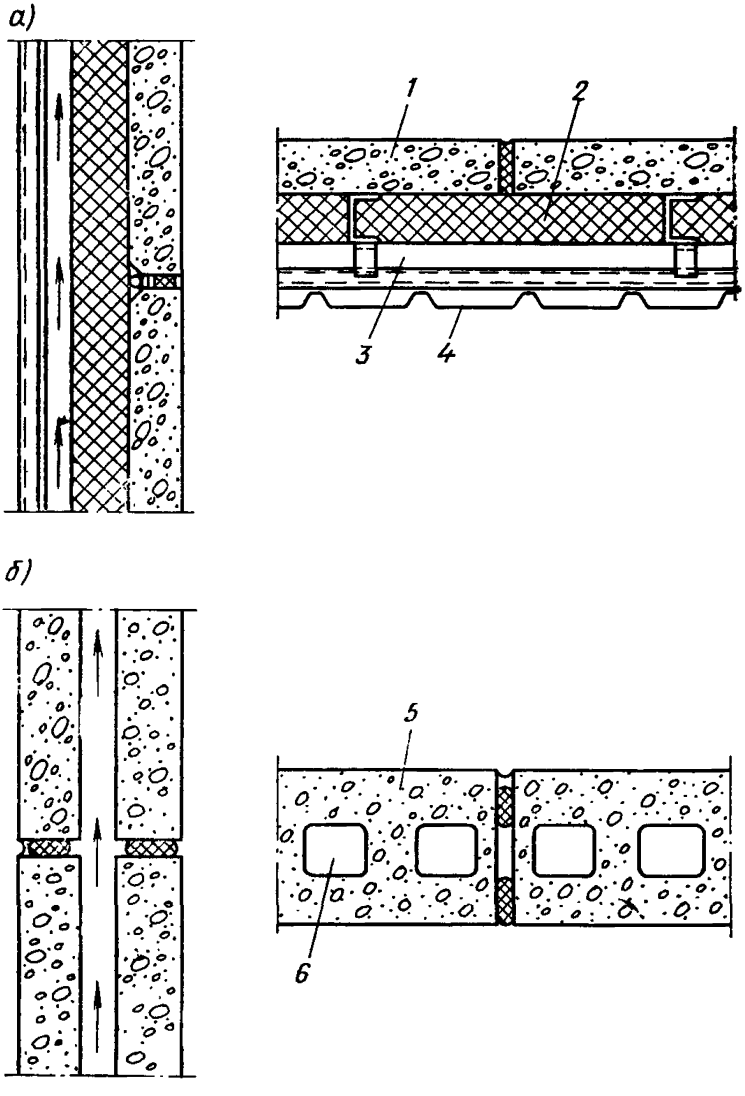


Рис. 7. Схемы обеспечения непрерывности воздушного потока в вентилируемых стенах

а — многослойных со сплошной воздушной прослойкой; *б* — однослойных с каналами; *1* — бетонная плита; *2* — утеплитель; *3* — воздушная прослойка или канал; *4* — наружный экран; *5* — легкий или ячеистый бетон; *6* — канал

5.11. В качестве материалов для крепежных элементов могут быть рекомендованы гнутые стальные профили с антикоррозионной защитой и деревянные антисептированные бруски.

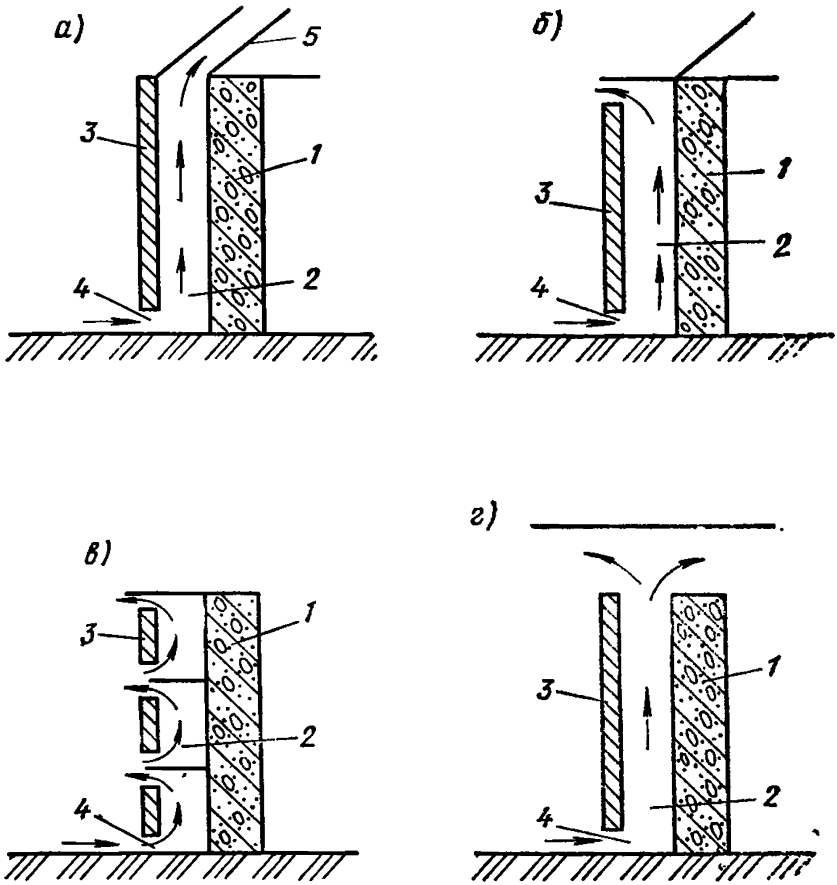


Рис. 8. Аэродинамические схемы вентилируемых стен

а — при расположении стены с наветренной стороны; *б* — при расположении стены с заветренной стороны; *в* — с несколькими местами входа и выхода воздуха; *г* — с веерным выходом воздуха; *1* — стена; *2* — воздушная прослойка; *3* — экран; *4* и *5* — входное и выходное отверстия

5.12. Наружные экраны вентилируемых стен должны обеспечивать создание воздушного зазора и предохранять стену от атмосферных воздействий. В связи с этим экраны должны обладать следующими качествами: влагонепроницаемостью, коррозионной стойкостью, способностью воспринимать ветровые нагрузки.

5.13. Крепление наружного экрана к основной стене следует выполнять вплотную или на относе в соответствии с пп. 2.12—2.14.

5.14. Для экранов вентилируемых стен из выпускаемых в настоящее время листов могут быть рекомендованы:

профили стальные оцинкованные гнутые с трапециевидной

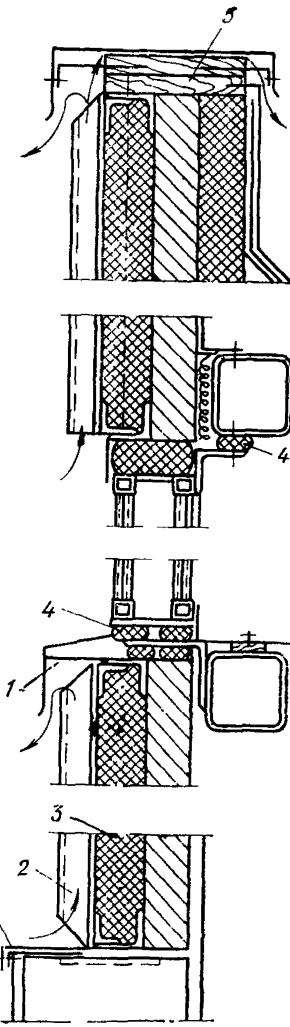


Рис. 9. Узлы сопряжений вентилируемой стены картонной фабрики

1 — костыль, шаг 1000; *2* — металлический экран; *3* — комплексная стеновая панель; *4* — уплотняющая прокладка; *5* — брусок деревянный антисептированный толщиной 40 мм *l* =100 мм, шаг 1000

формой для стен марок: С-50-749 (ТУ-34-13-5914-79) и С-44-1000 (ТУ 67-199-78):

асбестоцементные волнистые листы (ГОСТ 16233—77*).

5.15. В случае агрессивного воздействия атмосферы промплощадки профилированные стальные оцинкованные листы необходимо применять окрашенными с двух сторон, а асбестоцементные листы — покрытиями перхлорвиниловыми эмалями (ГОСТ 6993—79*) или красками (ГОСТ 7313—75*).

5.16 Установка наружного профилированного экрана осуществляется после монтажа основной стены к продольным крепежным элементам с шагом не более 400 мм для металлического экрана и 250 мм для асбестоцементного.

5.17. Забор и выпуск воздуха в прослойке следует осуществлять конструктивными мероприятиями, позволяющими производить воздухообмен по всей высоте вентилируемой стены (рис. 8).

5.18 Вход воздуха в прослойку рекомендуется устраивать в нижней части здания на уровне установки оборудования, выделяющего избыточную влагу, а выход в парапетной части на высоте 0,5 м от карниза крыши.

5.19. Размеры отверстий входа и выхода в воздушную прослойку должны соответствовать (быть не менее) расчетной толщины воздушной прослойки в соответствии с п. 2.14.

5.20. В узлах примыканий оконных проемов к вентилируемой

стене необходимо предусмотреть выход воздуха под оконным проемом и вход воздуха над оконным проемом (рис. 9).

5.21. В узле примыканий вентилируемой стены к парапетной части наиболее целесообразно организовать выход воздуха «веерного» типа (рис. 9).

6. КОНСТРУИРОВАНИЕ ВЕНТИЛИРУЕМЫХ СТЕН ПРИ ИХ МЕХАНИЧЕСКОМ ВЕНТИЛИРОВАНИИ

6.1. При механическом вентилировании стен рационально применять однослойные бетонные панели с каналами на всю высоту панели.

6.2. Проектирование однослойных вентилируемых панелей с каналами целесообразно выполнять с соблюдением следующих основных требований:

точного выполнения геометрических размеров каналов и расстояний между ними в соответствии с п. 3.15.

применения длинномерных вертикальных панелей (например, 6 или 12 м).

6.3. Длинномерные однослойные вертикальные панели с каналами должны быть рассчитаны на изгиб из плоскости от горизонтальной ветровой нагрузки, а также на монтажную и эксплуатационную нагрузки.

6.4. Каналы в однослойных панелях следует выполнять прямоугольного сечения с закругленными вершинами или эллиптического сечения, с расположением их по сечению панели в соответствии с рис. 10.

6.5. Для однослойных панелей с каналами целесообразно применять легкие конструкционные бетоны.

6.6. Вентилирование стен с каналами производится с помощью раздающих и сборных коллекторов, соединенных с каналами (рис. 11).

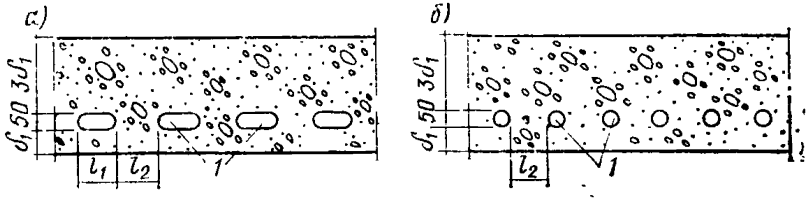


Рис. 10. Схемы расположения каналов в однослойных вентилируемых стенах

а, б — однослойных

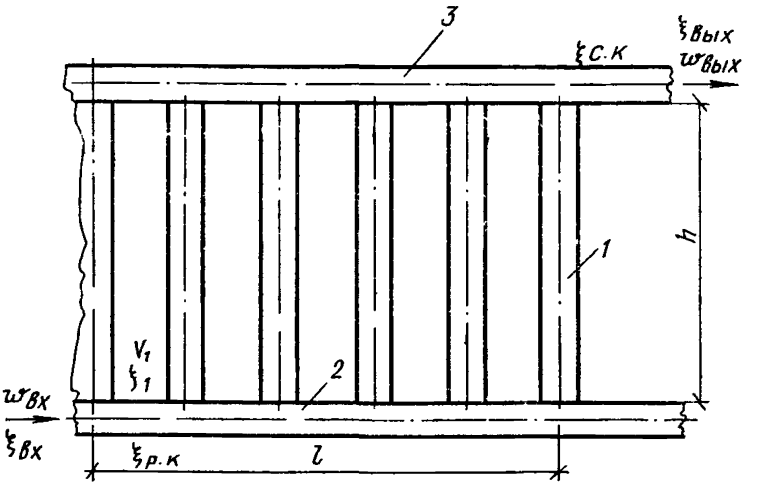


Рис. 11. Каналы со сборным и раздающим коллектором
1 — канал; *2* — раздающий коллектор; *3* — сборный коллектор

6.7. Раздающий коллектор соединяют воздуховодом с вентилятором. Подводящий должен быть оборудован шибером для настройки системы на расчетный расход воздуха (см. рис. 6).

6.8. Раздающий коллектор предпочтительнее выполнять в виде камеры статического давления, обеспечивающей равные скорости воздуха на входе в каналы, т. е. равномерную раздачу воздуха по каналам.

6.9. В случае невозможности по конструктивным соображениям применения камеры статического давления равномерная раздача воздуха обеспечивается путем установки шайб на входе в каналы или дроссельных задвижек.

Расчет минимальной толщины воздушной прослойки

Изменение потока тепла, переносимого вентилируемым воздухом в прослойке шириной $\delta_в$, м, со скоростью воздуха w, м/с равно изменению потока тепла, переносимого через внутренний и наружный слои вентилируемой наружной стены в направлении, перпендикулярном направлению воздушного потока

$$\rho c_р \; w \delta_в \, dt = [(t_в - t)/R_2 - (t - t_н/R_1)] \, dH, \qquad (1)$$

где ρ, кг/м^3; $c_р$, Дж/(кг·°С), dt, °С — соответственно плотность, удельная теплоемкость и изменение температуры воздуха в слое протяженностью dH; $t_в$, $t_н$, t, °С — температура воздуха соответственно внутреннего, наружного и вентилируемой прослойки; R_1, R_2, м^2 °С/Вт — сопротивление теплопередаче соответственно наружного и внутреннего слоев наружной стены.

После несложных преобразований и интегрирования полученного уравнения найдем температуру воздуха на выходе из воздушной прослойки $t_{вых}$:

$$t_{вых} = t_1 - (t_1 - t_{вх}) \exp [-H(1/R_1 + 1/R_2)/(\rho c_р \; w \delta_в)]; \qquad (2)$$

$$t_1 = (t_в R_1 + t_н R_2)/(R_1 + R_2). \qquad (3)$$

Минимальную скорость воздуха в вентилируемой прослойке, обусловленную гравитационным давлением, определяют по формуле

$$w_{min} = \sqrt{2g \beta H (t_{ср} - t_{вх})/\Sigma\xi}, \qquad (4)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с^2; β — коэффициент объемного расширения, °С; $\Sigma\xi$ — сумма местных гидравлических сопротивлений.

Учитывая, что $t_{ср} = (t_{вых} + t_{вх})/2$ получим соотношение, связывающее скорость воздуха с его температурой на выходе из воздушной прослойки:

$$t_{вых} = t_{вх} + (w^2_{min} \Sigma \xi)/(g \beta H). \qquad (5)$$

Учитывая, что $t_{вх} = t_н$, после линеаризации уравнения (2) и исключения $t_{вых}$ из этого уравнения с помощью соотношения (5) получим кубическое уравнение для определения минимальной скорости воздуха в воздушной прослойке:

$$w^3 = -\frac{g \beta H^2}{\rho c_р \delta_в \Sigma \xi} (1/R_1 + 1/R_2)(t_н - t_1); \qquad (6)$$

$$w = \sqrt[3]{\frac{g\,\beta\,H^2(t_в - t_н)}{\rho\, c_р\, \delta_в\, R_2 \Sigma \xi}} = 0{,}031 \sqrt[3]{\frac{H^2(t_в - t_н)}{\delta_в\, R_2 \Sigma \xi}} \qquad (7)$$

при $\rho = 1{,}29$ кг/м³, $c_р = 1000$ Дж/(кг · °С); $\beta = 4{,}10 - 3$ (°С) -1; $g = 10$ м/с².

Для создания нормального влажностного режима наружных вентилируемых стен (по данным расчета их температурных и влажностных полей) необходимо, чтобы расход воздуха на погонный метр ширины стены v, м²/с, был не менее величины, определяемой по формуле:

$$v = v_0 + \Delta v/\Delta H\ (H - H_0), \qquad (8)$$

где v_0 — расход воздуха, необходимый для поддержания нормального влажностного состояния стены высотой H_0, м, шириной 1 м, м²/с;

$\Delta v/\Delta H$ — коэффициент, учитывающий влияние высоты здания на расход воздуха, м/с.

При этом расчетом установлено, что минимальный расход воздуха составляет $v_0 = 0{,}028$ м²/с при $H_0 = 10$ м и $\Delta v/\Delta H = 0{,}0019$ м/с.

Расход воздуха v на 1 м ширины стены равен:

$$v = w\,\delta_в = 0{,}031 \sqrt[3]{\delta_в^2 H^2 (t_в - t_н)/R_2 \Sigma \xi}\ . \qquad (9)$$

Приравнивая правые части (8) и (9), получим формулу для определения минимальной толщины воздушной прослойки $(\delta_в)_{min}$, м:

$$(\delta_в)_{min} = (0{,}06 + 0{,}3/H)\sqrt{(0{,}06H + 0{,}3)(R_2 \Sigma \xi)/(t_в - t_н)}\ . \qquad (10)$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Расчет скорости воздуха в воздушной прослойке с учетом влияния ветра

1. Исходными данными для расчета располагаемого давления при естественной вентиляции стен служат: температура, плотность и скорость наружного воздуха, $t_н$, °С, ρ, кг/м³ и $\overline{W}$, м/с (принимаются по справочным данным для наиболее холодной пятидневки в районе завода); H — высота здания, м.

2. В ходе расчета определяется следующее.

Располагаемое давление воздуха, ΔP, Н/м^2 равно

$$\Delta P = 1/2\ K_3(K_1 - K_2)\ \rho\ W^2, \qquad (1)$$

где K_1, K_2 — аэродинамические коэффициенты на входе и выходе воздуха, определяются в соответствии со СНиП II-6-74.

Для наветренных фасадов всех зданий $K_1 = 0{,}8$, K_2 определяется по табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициента K_3

$\overline{L_3}/\overline{L_2}$	$\overline{L_1}/\overline{L_2}$		
	0,5	1	2
$\leqslant 1$	—0,4	—0,5	—0,6
$\geqslant 2$	—0,5	—0,6	—0,6

Здесь: $\overline{L_1}$ — высота здания до карниза; $\overline{L_3}$ — протяженность фасада, перпендикулярного направлению света; $\overline{L_2}$ — ширина здания в направлении ветра; K_3 — коэффициент учета изменения ветровой нагрузки в зависимости от высоты здания и типа местности, определяемый по табл. 2 (СНиП II-6-74).

Таблица 2

Значения коэффициента K_3

Тип местности	Высота над поверхностью земли, м						
	10	20	40	60	100	200	350 и св.
Открытая местность	1	1,25	1,55	1,75	2,1	2,6	3,1
Города с окраинами (местность, покрытая препятствиями высотой св. 10 м)	0,65	0,9	1,2	1,45	1,8	2,45	3,1

3. Скорость воздуха в воздушной прослойке, w, м/с, определяют по формуле

$$w = \sqrt{2\Delta P/\rho \Sigma \xi}, \qquad (2)$$

где $\Sigma\xi$ — сумма аэродинамических местных сопротивлений течению воздуха, определяемая по п. 2.15.

Примеры расчета

Для проведения расчета необходимо иметь данные о количестве тепла, выделяемого в помещении технологическим оборудованием, температуре $t_в$ и относительной влажности $\varphi_в$ воздуха в помещении, средней температуре наружного воздуха наиболее холодной пятидневки в районе строительства.

В результате расчета вычисляют требуемое сопротивление теплопередаче $R_0^{тр}$ наружной стены, а для стены 2-го и 3-го типов наружной части $R_1^{тр}$, толщины δ_1 и δ_2 соответствующих слоев, толщину воздушной прослойки или каналов $\delta_в$, для стен с каналами также и параметры l_1 и l_2. Для вентилируемых стен при механическом вентилировании, кроме того, определяют скорость воздуха и полное гидравлическое сопротивление в вентилируемых каналах, а также требуемый расход воздуха и тип вентилятора.

Пример 1. Провести теплофизический расчет для климатических условий г. Харькова вентилируемой стены отапливаемого производственного здания высотой 30 м с мокрым режимом.

В отапливаемых зданиях целесообразно использовать вентилируемые стены 1-го типа. Это обусловлено тем, что для стен 2-го и 3-го типов необходим подогрев воздуха, подаваемого в вентилируемые прослойки при механическом вентилировании, что требует дополнительных затрат энергии.

Сначала необходимо установить расчетные параметры $t_в$, $\varphi_в$, $t_н$ и Н. Температура наружного воздуха для наиболее холодной пятидневки $t_н$ в соответствии со СНиП 2.01.01—82 «Строительная климатология и геофизика» равна —23°С. Температура и относительная влажность воздуха в помещении $t_в$ и $\varphi_в$ устанавливаются равными $t_в = 25$°С и $\varphi_в = 80$ % в соответствии с нормами по проектированию соответствующих зданий и сооружений.

Расчет $R_0^{тр}$ выполняют по п. 2.2 СНиП II-3-79**:

$$R_0^{тр} = 1(25+23)/(3,3 \cdot 8,7) = 1,63 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}.$$

Сопротивление теплопередаче наружной стены R_0 определяют в соответствии с п. 2.1 СНиП II-3-79**. Допустим, $R_0^{тр}$ превышает $R_0^{эк}$ (экономический расчет обычно выполняют после выбора материалов, входящих в состав конструкции). В дальнейшем расчет проводится для двух конструкций 1-го типа:

стены, конструкционный слой которой сделан из тяжелого бетона (железобетона);

стены с применением керамзитобетона.

Выберем толщины слоев из конструкционного материала в соответствии с п. 2.8. Для железобетона ($\gamma_0 = 2500$ кг/м^3) — толщина несущего слоя $\delta_1 = 0{,}1$ м; для керамзитобетона ($\gamma_0 = 1200$ кг/м^3) — $\delta_1 = 0{,}2$ м. В соответствии с п. 2.5 СНиП II-3-79** их термические сопротивления равны:

$$R_{\text{ж.б 1}} = 0{,}1/1{,}92 = 0{,}05 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт};$$

$$R_{\text{к.б 1}} = 0{,}2/0{,}44 = 0{,}45 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}.$$

По п. 2.9 определяем термическое сопротивление слоя утеплителя:

для панели с железобетоном

$$R_{\text{ут}}^{\text{тр}} = 1{,}63 - 0{,}05 - 0{,}115 - 0{,}093 = 1{,}37 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт};$$

для панели с керамзитобетоном

$$R_{\text{ут}}^{\text{тр}} = 1{,}63 - 0{,}45 - 0{,}115 - 0{,}093 = 0{,}97 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}.$$

Необходимо провести сравнение полученных значений $R_{\text{ут}}^{\text{тр}}$ с расчетной величиной $R_{\text{ут}}^{\text{рас}}$, определяемой по табл. 1 и равной $0{,}5R_0$. В обоих случаях

$$R_{\text{ут}}^{\text{тр}} > R_{\text{ут}}^{\text{рас}} = 0{,}82 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}.$$

По п. 2.10 выберем утеплитель. Коэффициенты паропроницаемости железобетона и керамзитобетона (с учетом примеч. 3 п. 2.7) равны, соответственно, 0,03 и 0,06 мг/(м·ч·Па). Коэффициент паропроницаемости утеплителя должен быть больше, чем 0,09, для железобетона и 0,18 мг/(м·ч·Па) для керамзитобетона. Минераловатная плита повышенной жесткости на органофосфатном связующем $\gamma_0 = 200$ кг/м^3 (ТУ-21-РСФСР-3,72-76) имеет коэффициент паропроницаемости 0,45 мг/(м·ч·Па) и поэтому удовлетворяет требованию п. 2.9.

По п. 2.11 находим толщину слоя утеплителя:

для железобетона — $\delta_{\text{ут}} = 1{,}37 \cdot 0{,}07 = 0{,}1$ м;

керамзитобетона — $\delta_{\text{ут}} = 0{,}97 \cdot 0{,}07 = 0{,}07$ м.

Затем по п. 2.7 устанавливаем экономически целесообразное сопротивление теплопередаче $R_0^{\text{эк}}$. Если $R_0^{\text{эк}} > R_0^{\text{тр}}$, параметры $\delta_{\text{ут}}$ и $\delta_{\text{в}}$ определяют при $R_0^{\text{эк}}$.

Длина воздушной прослойки H определяется высотой стены здания и равна 29 м (вход на уровне 0,5 м от нулевой отметки и выход на 0,5 м ниже уровня карниза крыши).

По п. 2.13 устанавливаем тип воздушной прослойки: температура $t_{\text{п}} = -23$°С выше —25°С, поэтому необходимо использовать

профилированный лист, прикрепленный вплотную (см. рис. 2, *б*), $l_1=0{,}2$, $l_2=0{,}05$ м.

По п. 2.15 вычислим $\Sigma\xi$. Для этого определим $\overline{\lambda}$, ζ при $H=29$ м и $\Delta=0{,}003$ м:

$$\overline{\lambda}=0{,}11\ (0{,}003/0{,}12)^{0{,}25}=0{,}0437;$$

$$\xi_к=0{,}0437\cdot 29/0{,}12=10{,}5;$$

$$\Sigma\xi=0{,}6+2\cdot 1{,}25+10{,}5+0{,}9=14{,}5.$$

По формуле (4) определим $\delta_{в1}$:

$$\delta_{в1}=(0{,}06+0{,}3/29)\sqrt{0{,}06\cdot 29+0{,}3)\ 1{,}63\cdot 14{,}5/(25+23)}=0{,}07\ м.$$

По формуле (5) — $\delta_{в2}$:

$$\delta_{в2}=1{,}2\cdot 0{,}07=0{,}08\ м.$$

При $H=5$ м проведем аналогичные расчеты $\delta_{в2}$:

$$\overline{\lambda}=0{,}11(0{,}003/0{,}08)^{0{,}25}=0{,}0375;$$

$$\xi_к=0{,}0375\cdot 5/0{,}08=2{,}32;$$

$$\Sigma\xi=0{,}6+2\cdot 1{,}25+3+0{,}9=7;$$

$$\delta_{в1}=(0{,}06+0{,}3/5)\sqrt{(0{,}06\cdot 5+0{,}3)1{,}63\cdot 7/(25+23)}=0{,}045;$$

$$\delta_{в2}=1{,}2\cdot 0{,}045=0{,}054\ м.$$

Выбираем наибольшее значение $\delta_{в2}$. Поэтому $\delta_в=0{,}08$ м.

Проводится экономическая оценка обеих конструкций с использованием действующей Инструкции. Оказалось, что конструкция с железобетоном предпочтительнее.

Таким образом, параметры, необходимые для конструирования вентилируемых стен, соответственно равны: $\delta_1=0{,}1$ м (железобетон); $\delta_{ут}=0{,}1$ м, $H=29$ м, воздушная полость — гофры профилированного экрана $\delta_в=0{,}08$ м, $l_1=0{,}2$ м, $l_2=0{,}05$ м.

Указанные параметры используются при конструировании вентилируемой стены с естественным вентилированием наружным воздухом по пп. 6.2—6.13.

Пример 2. Провести теплофизический расчет вентилируемой стены, указанной в примере 1, для более суровых климатических условий г. Благовещенска.

Как и в примере 1 выбираем вентилируемую стену 1-го типа.

Температура $t_н$ в соответствии со СНиП 2.01.01—82 равна —35°С.

Как и в примере 1 $t_в=25$°С, $\varphi_в=80\%$:

$$R_0^{тр}=1(25+35)/(3{,}3\cdot 8{,}7)=2\ м^2\cdot °С/Вт.$$

Дальнейший расчет проводим для стены с конструкционным материалом — железобетоном.

По примеру 1: $\delta_1=0{,}1$ м, $R_1=0{,}05$ м²·°С/Вт.

По п. 2.9: $R^{тр}_{ут}=2-0{,}05-0{,}115-0{,}093=1{,}74$ м²·°С/Вт.

Расчетная величина сопротивления теплопередаче утеплителя $R^{рас}_{ут}$ по табл. 1 равна: $R^{рас}_{ут}=0{,}55\cdot R_0=1{,}1$ м²·°С/Вт.

Итак, $R^{тр}_{ут}=1{,}74$ м²·°С/Вт$>R^{рас}_{ут}=1{,}1$ м²·°С/Вт,

т. е. условие п. 2.9 выполняется.

По п. 2.10 аналогично примеру 1 в качестве утеплителя выбираем минераловатные плиты повышенной жесткости на органофосфатном связующем $\gamma_0=200$ кг/м³ (ТУ-21-РСФСР—3.72-76).

По п. 2.11 находим толщину слоя утеплителя:

$$\delta_{ут}=1{,}74\cdot 0{,}07=0{,}12 \text{ м}.$$

После проведения экономической оценки по п. 2.7 устанавливают действительные значения толщины слоя утеплителя $\delta_{ут}$ и его термического сопротивления $R_{ут}$. Полагаем, что эти величины остались прежними и $R_{ут}=R^{тр}_{ут}$.

По п. 2.13 устанавливаем тип воздушной прослойки — сплошную воздушную прослойку.

По пп. 2.14 и 2.15 аналогично примеру 1

$$\delta_{в1}=(0{,}06+0{,}3/29)\sqrt{(0{,}06\cdot 29+0{,}3)\ 2\cdot 14{,}5/(25+35)}=0{,}07 \text{ м}.$$

Таким образом, параметры стены соответственно равны: $\delta_1=0{,}1$ м, $\delta_{ут}=0{,}12$ м, $H=29$ м, $\delta_в=0{,}07$ м, воздушная полость— сплошная воздушная прослойка.

Пример 3. Провести теплофизический и аэродинамический расчеты вентилируемой стены производственного здания с высоким уровнем технологического тепловыделения и мокрым режимом для климатических условий г. Орла.

По аналогии с примером 1 в качестве вентилируемой стены можно выбирать стену 1-го типа. Однако в зданиях с высоким уровнем технологического тепловыделения целесообразно использовать тепло вентиляционных выбросов для подогрева наружного воздуха, подаваемого в вентилируемые полости. Поэтому выполним расчет для стен 2-го типа при механическом вентилировании. Теплотехнический расчет рекуперационной системы не производится.

1. Сплошная воздушная прослойка

Расчетные параметры: $t_в = 25°C$, $\varphi_в = 80\ \%$; по табл. 1 СНиП 2.01.01—82 $t_н = -25°C$, материал: керамзитобетон $\gamma_0 = 1000$ кг/м³.

По п. 3.8 устанавливаем необходимый расход воздуха v и определяем толщину воздушной прослойки $\delta_в$ при ее длине $H = 29$ м:

$$v = 0{,}1 + 0{,}0025\ (29 - 20) = 0{,}12\ \text{м}^2/\text{с};$$

$$\delta_в = 0{,}04 + 0{,}001\ (29 - 10) = 0{,}06\ \text{м}.$$

Скорость воздуха w, подаваемого в воздушную прослойку, будет равна 2 м/с. По п. 3.10 задаем $t_{пр} = 5°C$. По п. 3.7 найдем требуемое сопротивление теплопередаче наружного слоя $R_1^{тр}$:

$$A = 14{,}6\ (1 - 0{,}0095 \cdot 80) = 3{,}5°C;$$

$$B = 1{,}29 \cdot 10^3 \frac{2 \cdot 0{,}06}{29} = 5{,}6\ \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot °C);$$

$$C = \frac{25 - 5}{6 \cdot 8{,}7 \cdot 3{,}5} - \frac{1}{3 \cdot 5{,}6} = 0{,}053\ \text{м}^2 \cdot °C/\text{Вт};$$

$$D = \frac{25 + 2.5 - 3(-25)}{9 \cdot 3{,}5 \cdot 5{,}6 \cdot 8{,}7} = 0{,}072\ (\text{м}^2 \cdot °C/\text{Вт})^2;$$

$$R_1^{тр} = 0{,}053 + \sqrt{0{,}003 + 0{,}072} = 0{,}33\ \text{м}^2 \cdot °C/\text{Вт}.$$

По п. 3.11 определяем толщины наружного δ_1 и внутреннего δ_2 слоев:

$$\delta_1 = 0{,}33(0{,}33 - 0{,}044 - 0{,}093) = 0{,}06\ \text{м};$$

$$\delta_2 = 0{,}33(3 \cdot 0{,}33 - 0{,}115 - 0{,}093) = 0{,}26\ \text{м}.$$

Требуется дополнительная оценка на прочность наружной плиты из керамзитобетона $\delta_1 = 0{,}06$ м. Если полученная толщина наружной плиты не удовлетворяет конструктивным требованиям, необходимо увеличить ее до необходимого значения (это положение учитывается при конструировании).

Для определения относительной влажности воздуха $\varphi_{вх}$, подаваемого на вход воздушной прослойки, необходимо вычислить температуры воздуха $t_{вых}$ и холодной поверхности $t_{вых}^{пр}$ на выходе воздушной прослойки.

По п. 3.13 находим температуру воздуха $t_{вых}$:

$$t_{вых} = \frac{[5{,}6 - (1/(2 \cdot 0{,}33) + 1/(2 \cdot 0{,}99)]5 - 25/0{,}33 + 25/0{,}99}{5{,}6 + 1/(2 \cdot 0{,}33) + 1/(2 \cdot 0{,}99)} = -4{,}2°C.$$

По формуле (20) определяем температуру холодной поверхности $t^{\text{х.п}}_{\text{вых}}$ на выходе воздушной прослойки:

$$t^{\text{х.п}}_{\text{вых}} = -4{,}2 - \frac{-4{,}2+25}{0{,}33 \cdot 10{,}8} = -9{,}8°\text{C}.$$

По формуле (19) находим относительную влажность воздуха $\varphi_{\text{вх}}$ на входе в воздушную прослойку:

$$\varphi_{\text{вх}} = 95 \exp[0{,}07(-9{,}8-5)] = 35\,\%.$$

Таким образом, в результате теплофизического расчета получены следующие параметры вентилируемой стены со сплошной воздушной прослойкой при механическом вентилировании: $\delta_1 = 0{,}06$ м; $\delta_2 = 0{,}26$ м; $\delta_{\text{в}} = 0{,}06$ м; $H = 29$ м; $t_{\text{вх}} = 5°\text{C}$; $\varphi_{\text{вх}} = 35\,\%$; $w = 2$ м/с.

2. Вентилируемые каналы

Для стены с каналами параметры $t_{\text{н}}$, $t_{\text{в}}$, $\varphi_{\text{в}}$, H имеют те же значения.

По п. 3.15 определяем параметры каналов: $\delta_{\text{в}} = 0{,}05$ м; $l_2 = 0{,}1$ м (это значение удовлетворяет конструктивным требованиям по керамзитобетону) и принимаем $l_1 = 0{,}2$ м.

По п. 3.17 и см. п. 3.10 задаем температуру воздуха $t_{\text{вх}}$ на входе в воздушную прослойку $t_{\text{вх}} = 5°\text{C}$.

По п. 3.18 с учетом формулы (15) определяется скорость воздуха в каналах:

$$w = \frac{[0{,}1+0{,}0025(29-20)]\ (0{,}2+0{,}1)}{0{,}2 \cdot 0{,}05} = 3{,}6 \text{ м/с}.$$

По п. 3.14 находим требуемое сопротивление теплопередаче $R_1^{\text{тр}}$ наружного слоя δ_1 (см. рис. 4):

$$A = 14{,}6\ (1-0{,}0095 \cdot 80) = 3{,}5°\text{C};$$

$$B = \frac{(4 \cdot 0{,}2+4 \cdot 0{,}1+6 \cdot 0{,}05)\ 29}{3 \cdot 1{,}29 \cdot 10^3 \cdot 3{,}6 \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}05} = 0{,}31 \text{ м}^2 \cdot °\text{C/Вт};$$

$$b = \frac{(3 \cdot 0{,}2+3 \cdot 0{,}1+6 \cdot 0{,}05)\ (25+25)}{(4 \cdot 0{,}2+4 \cdot 0{,}1+6 \cdot 0{,}05)5-(0{,}2+0{,}1)25-(3 \cdot 0{,}2+3 \cdot 0{,}1+} \times$$

$$\times \frac{}{+6 \cdot 0{,}05)\ (-25)} = 2;$$

$$K = -\frac{3\,(4 \cdot 0{,}2+4 \cdot 0{,}1+6 \cdot 0{,}05)\ 8{,}7 \cdot 3{,}5}{(4 \cdot 0{,}2+4 \cdot 0{,}1+6 \cdot 0{,}05)5-(0{,}2+0{,}1)25-(3 \cdot 0{,}2+3 \cdot 0{,}1+} \times$$

$$\times \frac{}{+6 \cdot 0{,}05)(-25)} = -4{,}55 \text{ Вт/(м}^2 \cdot °\text{C)}.$$

На рис. 5 приведено решение трансцендентного уравнения для $b=1{,}94$; $B=0{,}8$; $K=-4{,}55$: на рисунке эти кривые помечены символом *. В нашем примере $b=2$; $B=0{,}31$; $K=-4{,}55$. Поскольку угловой коэффициент K не изменился, из точки для $b=2$ проводим прямую, параллельную уже нанесенным на рис. 5. Пересечение прямой с кривой для $B=0{,}31$, полученную интерполированием между заданными кривыми, дает значение $R_1^{тр}=0{,}33$ м²·°С/Вт.

По п. 3.19 и см. п. 3.11 определяем толщины наружного δ_1 и внутреннего δ_2 слоев (см. рис. 4):

$$\delta_1=0{,}33(0{,}33-0{,}044-0{,}093)=0{,}07 \text{ м};$$

$$\delta_2=0{,}33(3\cdot 0{,}33-0{,}115-0{,}093)=0{,}26 \text{ м}.$$

Для нахождения относительной влажности воздуха $\varphi_{вх}$ определим по п. 3.21 $t_{вых}$, C и $t_{эф}$ с учетом того, что

$$R_1=\frac{0{,}07}{0{,}33}+0{,}044+0{,}093=0{,}35 \text{ м}^2\cdot°\text{С/Вт};$$

$$R_2=\frac{0{,}26}{0{,}33}+0{,}115+0{,}093=1{,}0 \text{ м}^2\cdot°\text{С/Вт}.$$

$$C=\frac{0{,}2}{1}+\frac{0{,}1}{1-0{,}09}+\frac{0{,}2}{0{,}35}+\frac{0{,}1}{0{,}35+0{,}05/0{,}33}+$$

$$+\frac{0{,}1}{0{,}35+0{,}05/0{,}33-0{,}09}=1{,}32 \text{ Вт/(м}\cdot°\text{С)};$$

$$t_{эф}=\frac{1}{1{,}32}\left[\left(\frac{0{,}2}{1}+\frac{0{,}1}{1-0{,}09}\right)25+\left(\frac{0{,}2}{0{,}35}+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\frac{0{,}1}{0{,}35+0{,}05/0{,}33}+\frac{0{,}1}{0{,}35+0{,}05/0{,}33-0{,}09}\right)(-25)\right]=-13{,}3°\text{С};$$

$$t_{вых}=-13{,}3+(5+13{,}3)\exp\left(-\frac{1{,}32\cdot 29}{1{,}29\cdot 10^3\cdot 3{,}6\cdot 0{,}2\cdot 0{,}05}\right)=-5{,}2°\text{С}.$$

По п. 3.12 определяем сначала $t_{вых}^{х.п}$, а затем и $\varphi_{вх}$:

$$t_{вых}^{х.п}=-5{,}2-\frac{-5{,}2+25}{0{,}35\cdot 10{,}8}=-10{,}4°\text{С};$$

$$\varphi_{вх}=95\exp[0{,}07(-10{,}4-5)]=32\%.$$

Таким образом, параметры вентилируемой стены с каналами, необходимые для ее конструировачия, имеют следующие значения: $\delta_1=0{,}07$ м, $\delta_2=0{,}26$ м, $\delta_в=0{,}05$ м, $l_1=0{,}2$ м, $l_2=0{,}1$ м, $H=29$ м, $t_{вх}=5°$С, $\varphi_{вх}=32$ %; $w=3{,}6$ м/с.

Далее производится аэродинамический расчет.

3. Сплошная воздушная прослойка

Расчетные параметры: толщина воздушной прослойки $\delta_в = 0{,}06$ м; длина стены $L = 2\ (36+24) = 120$ м; расход воздуха на метр ширины стены 0,12 м²/с; скорость воздуха в прослойке $w = 2$ м/с.

Допустим, что протяженность участка стены, содержащего оконные проемы, составляет 50 м. В этом случае для участка 70 м требуется только одна система, содержащая собирающий и раздающий коллекторы. Для оставшегося участка 50 м с оконными проемами необходимы даже две таких системы.

Выбираем следующую схему раздачи воздуха: нижняя разводка подводящего коллектора используется для всего участка стены, приходящегося на один вентилятор, верхняя разводка подводящего коллектора — только для участков стены, содержащих оконные проемы, при подаче воздуха в прослойку над окном. Собирающие коллекторы строятся наоборот — верхняя разводка включает прослойки как на участках безоконных проемов, так и с оконными проемами; нижняя разводка под оконными проемами используется только на участках, содержащих оконные проемы.

По п. 4.2 определяем расход воздуха для нижнего подводящего коллектора

$$V_1 = 0{,}12 \cdot 120 = 14{,}4 \text{ м}^3/\text{с}$$

и верхнего коллектора

$$V_2 = 0{,}12 \cdot 50 = 6 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для нижнего коллектора необходимо использовать два вентилятора. Количество вентиляторов для верхней разводки определяется конструкцией здания. Один вентилятор рекомендуется применять в зданиях, в которых оконные проемы располагаются только на одной из стен. В противном случае необходимо использовать два вентилятора. Количество рекуперационных систем определяется системой вентиляции здания. (В данной работе теплотехнический расчет рекуперационных систем не рассматривается).

В дальнейшем расчет проводится только для системы вентилирования, содержащей один вентилятор. Поэтому наибольшая длина участка стены L_1 будет равна 60 м, а наибольший расход воздуха V_1 на одну систему — 7,5 м³/с.

Расстояние между каналами, подводящими воздух к воздушной прослойке, определяется шириной стеновой панели. Пусть эта величина равна 3 м. Оградительная пластина располагается на расстоянии $\delta_{вых} = 0{,}15$ м от верхнего края стены. Гидравлический диаметр подводящего коллектора на его входе принимаем равным 1 м, а на его выходе — 0,6 м.

Для выбора вентилятора необходимо кроме расхода воздуха V_1, вычислить располагаемое давление вентилятора $\Delta P_в$. Для этого определяем значения скоростей воздуха и коэффициентов сопротивления во всех элементах воздуховода.

Наибольшая скорость воздуха на выходе из системы $w_{вых}$ определяется по формуле (34) с учетом того, что площадь сечения собирающего коллектора для плоской щели равна $L_1 \delta_{вых}$:

$$w_{вых}=V_1/(L_1 \cdot \delta_{вых})=7,5/(60 \cdot 0,15)=0,8 \text{ м/с}.$$

Скорости воздуха на входе в подводящий коллектор $w_{р.к}$ и на выходе из вентилятора $w_{диф}$ вычисляем по формуле (37):

$$w_{р.к}=4 \cdot 7,5/(3,14 \cdot 1^2)=9,5 \text{ м/с};$$

$$w_{диф}=1,1 w_{р.к}=1,1 \cdot 9,5=10,5 \text{ м/с}.$$

Определяем коэффициент сопротивления трению воздуха о стенки щели по формуле (45) с учетом (44):

$$\overline{\lambda_к}=1,1 \cdot 0,11(0,003/0,06+68/1,5 \cdot 10^4)^{0,25}=0,054.$$

По формуле (43) вычисляем коэффициент потери давления на трение $\zeta_к$ в прямых каналах при их наибольшей длине с учетом того, что эквивалентный гидравлический диаметр $d_к$ плоской щели равен ее удвоенной толщине, т. е. $d_к=2\delta_в=2 \cdot 0,06=0,12$ м,

$$\zeta_к=0,054 \cdot 29/0,12=13,1.$$

Потери давления на выходе из системы обусловлены поворотом потока на 90° и внезапным расширением. Коэффициент потерь давления на выходе из системы принимают равным: $\zeta_{вых}=4,5$.

Для получения большей точности в расчетах производится полный расчет. Для вычисления коэффициента местного сопротивления коллектора $\zeta_{р.к}$ необходимо определить параметры $\overline{A}$ и $\overline{B}$ соответственно по формулам (39)—(42):

$$\overline{B}=1-(0,6)/1^2=0,64;$$

$$\overline{f}_{р.к}=4 \cdot 0,06 \cdot 60/(3,14 \cdot 1^2)=4,6;$$

$$\overline{A}=4,6/\sqrt{0,6+1}=3,65.$$

Коэффициент местного сопротивления определяем по формуле (38):

$$\zeta_{р.к}=(0,788 \cdot 3,65+0,029 \cdot 0,64+0,115 \cdot 1-0,13 \cdot 3,65 \cdot 0,64-$$
$$-0,353 \cdot 3,65-0,09)^{-1}=0,67.$$

Потери давления на шибер принимаем $\zeta_ш=1,3$.

Располагаемое давление вентилятора определяем по формуле (33):

$$\Delta P_{в} = 0{,}6 \cdot 1{,}29\,[4{,}5\ (0{,}8)^2 + 0{,}67\ (9{,}5)^2 + 13{,}1\ (2)^2 + 1{,}3\ (10{,}5)^2] = 201 \text{ Па } (20{,}5 \text{ кг/м}^2).$$

Полученным параметрам — производительности 7,5 м³/с (25000 м³/ч) и напору 201 Па (20,5 кг/м²) в каталоге соответствует вентилятор Ц4-70 № 8.

Для всего здания потребуется либо три указанных вентилятора, либо два указанных и два с производительностью, в два раза меньшей при том же напоре.

4. Вентилируемые каналы

Расчетные параметры: площадь поперечного сечения канала $\delta_в \times l_1 = 0{,}05 \times 0{,}2$ м²; ширина промежутка каналами $l_2 = 0{,}1$ м; длина стены 120 м; расход воздуха 0,12 м²/с на 1 м длины стены; скорость воздуха в каналах 3,6 м/с.

Схема раздачи воздуха аналогична схеме, рассмотренной в п. 3 примера 3. Воздуховоды, подводящие воздух к каналам от раздающего коллектора, следуют с шагом 0,1 м.

Эквивалентный гидравлический диаметр каналов равен:

$$d_к = 4F_к/П_к = 4 \cdot 0{,}05 \cdot 0{,}2/2(0{,}05 + 0{,}2) = 0{,}08 \text{ м}.$$

Параметры, необходимые для расчетов располагаемого давления и имеющие те же значения, что и в п. 3 примера 3, приведем без дополнительных вычислений:

$$V_1 = 7{,}5 \text{ м}^3/\text{с}; \qquad w_{вых} = 0{,}8 \text{ м/с};$$

$$w_{р.к} = 9{,}5 \text{ м/с}; \quad w_{диф} = 10{,}5 \text{ м/с}; \quad \overline{\lambda}_к = 0{,}054;$$

$$\overline{B} = 0{,}64; \quad \zeta_{вых} = 4{,}5; \quad \zeta_ш = 1{,}3.$$

Количество каналов, приходящихся на 1 м стены, определяется по п. 3.18:

$$n = 1/(0{,}2 + 0{,}1) = 3{,}33.$$

Полное количество каналов N, обеспечиваемое одной системой, равно произведению n на длину участка стены L_1: $N = 3{,}33 \times 60 = 200$.

По формулам (41) и (39) определяем параметры соответственно $f_{р.к}$ и $\overline{A}$:

$$\overline{f}_{р.к} = 4 \cdot 0{,}05 \cdot 0{,}2 \cdot 200/(3{,}14 \cdot 1^2) = 2{,}6;$$

$$\overline{A} = \frac{2{,}6}{\sqrt{0{,}6 + 1}} = 2{,}05.$$

По формуле (38) вычисляем коэффициент местного сопротивления $\zeta_{р.к}$:

$$\overline{\zeta}_{р\,к}=(0,788\cdot 2,05+0,029\cdot 0,64+0,115\cdot 1-0,13\cdot 2,05\cdot 0,64-$$
$$-0,353\cdot 2,05\cdot 1-0,09)^{-1}=1,07.$$

По формуле (43) определяем коэффициент потери давления на трение в каналах $\zeta_к$:

$$\zeta_к=0,054\cdot 29/0,08=19,6.$$

Располагаемое давление вентилятора определяется по формуле (33)

$$\Delta P_в=0,6\cdot 1,29\,[4,5\,(0,8)^2+1,07\,(9,5)^2+19,6\,(3,6)^2+$$
$$+1,3\,(10,5)^2]=385\ \text{Па}\ (39,2\ \text{кг/м}^2).$$

Полученным параметрам — производительности 7,5 м³/с (25000 м³/ч) и напору 385 Па (39,2 кг/м²) в каталоге соответствует вентилятор Ц4-70 № 8.

Для всего здания потребуется, как и в п. 3 примера 3 либо три указанных вентилятора, либо два указанных и два с производительностью, в два раза меньшей при том же напоре.

Пример 4. Провести теплофизический и аэродинамический расчеты вентилируемой стены производственного здания с высоким уровнем технологического тепловыделения и мокрым режимом; имеющего размеры в плане 36×24 м² и высотой 30 м, для климатических условий г. Свердловска.

По аналогии с примером 3 экономически эффективным является 2-й тип вентилируемой стены при механическом вентилировании. Теплотехнический расчет рекуперационной системы здесь не производится.

В качестве материала выберем ячеистый бетон, например, газобетон $\gamma_0=700$ кг/м³, так как вентилирование стены расширяет область применения ячеистого бетона и снижает его влагосодержание до величины, обеспечивающей предполагаемый срок службы здания не менее 50 лет.

1. Вентилируемые каналы.

Ниже производится теплофизический расчет.

Для снижения трудовых затрат при монтаже здания целесообразно собирать наружные стены из панелей с каналами. Расчетные параметры $t_н$, $t_в$, $\varphi_в$, $t_{вх}$, H определяем по аналогии с примером 3. Эти параметры соответственно равны: $t_н=-35$°С, $t_в=25$°С, $\Phi_в=80\%$, $t_{вх}=5$°С, $H=29$ м.

По п. 3.15 определяем параметры каналов: $\delta_в=0{,}05$ м, $l_2=0{,}15$ м, $l_1=0{,}25$ м.

Скорость воздуха в каналах определяем, как и в примере 3, по п. 3.18:

$$w=0{,}12(0{,}25+0{,}15)/(0{,}25\cdot 0{,}05)=3{,}8 \text{ м/с}.$$

По п. 3.14 находим $R_1^{тр}$ наружного слоя δ_1 (как и в примере 3):

$$A=3{,}5°C;$$

$$B=\frac{(4\cdot 0{,}25+4\cdot 0{,}15+6\cdot 0{,}05)29}{3\cdot 1{,}29\cdot 10^3\cdot 3{,}8\cdot 0{,}25\cdot 0{,}05}=0{,}3 \text{ м}^2\cdot°\text{C/Вт};$$

$$b=\frac{(3\cdot 0{,}25+3\cdot 0{,}15+6\cdot 0{,}05)\ (25+35)}{1{,}9\cdot 5-0{,}4\cdot 25-(3\cdot 0{,}25+3\cdot 0{,}15+6\cdot 0{,}05)\ (-35)}=1{,}73;$$

$$K=-\frac{3\cdot 1{,}9\cdot 8{,}7\cdot 3{,}5}{1{,}9\cdot 5-0{,}4\cdot 25-1{,}5\ (-35)}=-3{,}34 \text{ Вт/(м}^2\cdot°\text{C)}.$$

В нашем примере $b=1{,}73$, $B=0{,}3$, $K=-3{,}34$.

Для построения графика прямой необходимо определить две точки этой прямой. Соединив эти точки, прямая пересечет кривую $\exp(-B/R_1^{тр})$ при $B=0{,}3$, проекция точки пересечения на ось $R_1^{тр}$ дает искомое значение $R_1^{тр}=0{,}37$ м²·°С/Вт.

Определим коэффициент теплопроводности ячеистого бетона по СНиП II-3-79** для условий эксплуатации А, так как влагосодержание материала вентилируемых стен приближается к влагосодержанию наружных стен зданий с нормальным режимом. Интерполяция между данными пп. 6.4 и 6.5 прил. 3 СНиП II-3-79** приводит к тому, что $\lambda=0{,}28$ Вт/(м·°С).

По п. 3.19 и см. п. 3.11 определяем δ_1 и δ_2:

$$\delta_1=0{,}28\ (0{,}37-0{,}044-0{,}093)=0{,}06 \text{ м};$$
$$\delta_2=0{,}28\ (3\cdot 0{,}37-0{,}115-0{,}093)=0{,}25 \text{ м}.$$

Ячеистый бетон с $\gamma_0=700$ кг/м³ требует защиты от переувлажнения дождевой влагой, поэтому с наружной стороны панели необходим защитный наружный слой $\delta_н=0{,}02$ м из более плотного материала, например, цементно-песчаного раствора.

По п. 3.21 определяются $t_{вых}$, C и $t_{эф}$ с учетом того, что

$$R_1=\frac{0{,}06}{0{,}28}+\frac{0{,}02}{0{,}76}+0{,}044+0{,}093=0{,}38 \text{ м}^2\cdot°\text{C/Вт};$$

$$R_2=\frac{0{,}25}{0{,}28}+0{,}115+0{,}093=1{,}1 \text{ м}^2\cdot°\text{C/Вт};$$

$$C=\frac{0,25}{1,1}+\frac{0,15}{1,1-0,09}+\frac{0,25}{0,38}+\frac{0,15}{0,38+0,05/0,28}+$$

$$+\frac{0,15}{0,38+0,05/0,28-0,09}=1,62 \text{ Вт/ (м·°С)};$$

$$t_{эф}=\frac{1}{1,62}\left[\left(\frac{0,25}{1,1}+\frac{0,15}{1,1-0,09}\right)25+\left(\frac{0,25}{0,38}+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\frac{0,15}{1,38+0,05/0,28}+\frac{0,15}{0,38+0,05/0,28-0,09}\right)(-35)\right]=-21,2°С;$$

$$t_{вых}=-21,2+(5+21,2)\exp\left(-\frac{1,62\cdot 29}{1,29\cdot 10^3\cdot 3,8\cdot 0,25\cdot 0,05}\right)=$$

$$=-9,1 \text{ °С}.$$

По п. 3.12 находим $t_{вых}^{х.п}$:

$$t_{вых}^{х.п}=-9,1-\frac{-9,1+25}{0,38\cdot 10,8}=-13 \text{ °С},$$

а затем $\varphi_{вх}$

$$\varphi_{вх}=95 \exp [0,07(-13-5)]=27\%.$$

Таким образом, параметры вентилируемой стены с каналами, необходимые для ее конструирования, имеют значения: $\delta_1=0,06$ м; $\delta_2=0,25$ м; $\delta_н=0,02$ м (наружный защитный слой); $\delta_в=0,05$ м; $l_1=0,25$ м; $l_2=0,15$ м; $H=29$ м; $t_{вх}=5°С$; $\varphi_{вх}=27\%$; $w=3,8$ м/с; $v=0,12$ м^2/с; материалы: газобетон $\gamma_0=700$ кг/м^3, цементно-песчаный раствор $\gamma_0=1800$ кг/м^3.

Ниже производится аэродинамический расчет.

Расчетные параметры: площадь поперечного сечения канала $\delta_в \times l_1=0,05\times 0,25$ м^2; ширина промежутка между каналами $l_2=0,15$ м; длина стены $L=120$ м; расход воздуха $v=0,12$ м^2/с; скорость воздуха в каналах $w=3,8$ м/с.

Разводку воздуха осуществляем по аналогии с разводкой воздуха в примере 3 (п. 3). Как и в примере 3, расход воздуха на одну вентиляционную систему принимаем равным 7,5 м^3/с, а наибольшая длина участка стены, обслуживаемого одним вентилятором, равна 60 м. Оградительная пластина располагается на расстоянии $\delta_{вых}=0,15$ м от верхнего края стены. Гидравлический диаметр подводящего коллектора на его входе принимаем равным 1 м, а на его выходе — 0,6 м.

Определим значения скоростей воздуха и коэффициентов сопротивления во всех элементах воздуховода.

Как и в примере 3, по формулам (34) и (37) определяем $w_{вых}$, $w_{р.к}$, $w_{диф}$:

$$w_{вых}=7,5/(60\cdot 0,15)=0,8 \text{ м/с};$$

$$w_{р.к} = \frac{4 \cdot 7{,}5}{3{,}14\ (1)^2} = 9{,}5 \text{ м/с};$$

$$w_{диф} = 1{,}1\ w_{р.к} = 1{,}1 \cdot 9{,}5 = 10{,}5 \text{ м/с}.$$

По аналогии с примером 3 определяем коэффициент сопротивления трению воздуха $\overline{\lambda}_к$ о стенки каналов по формуле (45):

$$\overline{\lambda}_к = 0{,}054.$$

Количество каналов N, входящих в состав одной системы, равно:

$$N = \frac{L_1}{l_1 + l_2} = \frac{60}{0{,}25 + 0{,}15} = 150.$$

Гидравлический диаметр каналов определяем по формуле (35):

$$d_к = 4F_к/П_к = 4 \cdot 0{,}05 \cdot 0{,}25/2\,(0{,}25 + 0{,}05) = 0{,}084 \text{ м}.$$

По формуле (43) вычисляем коэффициент потери давления на трение $\zeta_к$ в прямых каналах:

$$\zeta_к = 0{,}054 \cdot 29/0{,}084 = 18{,}7.$$

Коэффициент потерь давления на выходе из системы $\zeta_{вых}$ по аналогии с примером 3 принимаем равными: $\zeta_{вых} = 4{,}5$.

Параметры $\overline{A}$ и $\overline{B}$ определяем по формулам (39)—(42):

$$\overline{B} = 1 - (0{,}6)^2/1^2 = 0{,}64,$$

$$\overline{f}_{р.к} = 4 \cdot 0{,}05 \cdot 0{,}25 \cdot 150/\ (3{,}14 \cdot 1^2) = 2{,}38;$$

$$\overline{A} = \frac{2{,}38}{0{,}6 + 1} = 1{,}9.$$

Коэффициент местного сопротивления $\zeta_{р.к}$ определяем по формуле (38):

$$\zeta_{р.к} = (0{,}788 \cdot 1{,}9 + 0{,}029 \cdot 0{,}64 + 0{,}115 \cdot 1 - 0{,}13 \cdot 1{,}9 \cdot 0{,}64 -$$
$$- 0{,}353 \cdot 1{,}9 - 0{,}09)^{-1} = 1{,}15.$$

Потери давления на шибер принимаем равными $\zeta_ш = 1{,}3$.

Располагаемое давление вентилятора $\Delta P_в$ определяем по формуле (33):

$$\Delta P_в = 0{,}6 \cdot 1{,}29\,[4{,}5\,(0{,}8)^2 + 1{,}15\,(9{,}5)^2 + 18{,}7\ (3{,}8)^2 +$$
$$+ 1{,}3(10{,}5)^2] = 519 \text{ Па } (53 \text{ к.}/\text{м}^2).$$

Полученным параметрам: производительности 7,5 м³/с (25000 м³/ч) и напору 519 Па (53 кг/м²) в каталоге соответствует вентилятор **Ц4-70 № 8.**

Для всего здания требуется либо три указанных вентилятора, либо два указанных и два производительностью, в два раза меньшей при том же напоре.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3
1. Общие положения 5
2. Теплофизический и аэродинамический расчеты вентилируемых стен при их естественном вентилировании . . . 6
3. Теплофизический расчет вентилируемых стен при их механическом вентилировании 10
4. Аэродинамический расчет воздуховодов стен при механическом вентилировании 16
5. Конструирование вентилируемых стен при их естественном вентилировании 20
6. Конструирование вентилируемых стен при их механическом вентилировании 24
Приложение 1. Расчет минимальной толщины воздушной прослойки 26
Приложение 2. Расчет скорости воздуха в воздушной прослойке с учетом влияния ветра 27
Приложение 3. Примеры расчета 29

Нормативно-производственное издание

НИИСФ ГОССТРОЯ СССР

Рекомендации по расчету и конструированию вентилируемых стен промышленных зданий с влажным и мокрым режимами

Редакция инструктивно-нормативной литературы

Зав. редакцией *Л. Г. Бальян*
Редактор *Н. А. Шатерникова*
Младший редактор *Г. А. Полякова*
Технический редактор *Ю. Л. Циханкова*
Корректор *К. М. Корепанова*

Н/К

Сдано в набор 21.07.87. Подписано в печать 06.04.88. Формат 84×108$^{1}/_{32}$. Бумага тип. № 2. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл. печ. л. 2,52. Усл. кр.-отт. 2,73. Уч.-изд. л: 2,28. Тираж 10000 экз. Изд. № XII—2122. Заказ 546. Цена 10 коп.

Стройиздат 101442, Москва, Каляевская, 23а

Калужское производственное объединение «Полиграфист», 248021, г. Калуга, пл. Ленина, 5

gost.e-ecolog.ru