

Пример теплотехнического расчета наружных стен с вентилируемой воздушной прослойкой.

1.1 Исходные данные.

В г. Челябинск существует 10-этажное кирпичное отдельно стоящее здание. В здании располагаются офисные помещения. Высота здания 30 м.

Конструктивный слой стены – кладка из силикатного кирпича толщиной $\delta_k=0,51$ м, коэффициент теплопроводности кладки $\lambda_k=0,87$ Вт/(м°C).

Утеплитель – минераловатные плиты с коэффициентом теплопроводности $\lambda_v=0,045$ Вт/(м°C).

Ширина вентилируемой прослойки $d_{vp}=0,05$ м.

Используется облицовочный материал – фасадная панель производства ЗАО «ИНСИ», толщиной 0,5 мм.

Количество креплений на квадратный метр конструкции $n_k=1,72$.

1.2 Расчетные характеристики климата района строительства и микроклимата здания.

Средняя температура наиболее холодной пятидневки $t_n=-34$ °С.

Средняя температура отопительного периода $t_{ht}=-6,5$ °С.

Продолжительность отопительного периода $z_{ht}=218$ сут.

Характеристики микроклимата помещения берутся по СНиП 23-02-2003.

Температура внутреннего воздуха $t_{int}=20$ °С по [14]

Относительная влажность внутреннего воздуха $\phi_v=55\%$.

Градусо-сутки отопительного периода по СНиП 23-02-2003 $D_d=(t_{int}-t_{ht})\cdot$

$z_{ht}=(20^\circ\text{C}+6,5^\circ\text{C})\cdot 218 \text{ сут}=5777$ °С·сут.

1.3 Нормируемое значение сопротивления теплопередаче стены.

Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции в соответствии со СНиП 23-02-2003 следует принимать не менее нормируемого значения $R_{reg}=a\cdot D_d+b$. Нормируемое значение сопротивления теплопередаче стен из условий энергоснабжения определяется по таблице 4 СНиП 23-02-2003. Для стен $a=0,0003$; $b=1,2$. $R_{reg}=0,0003\cdot 5777+1,2=2,93$ м²°С/Вт

1.4 Определение требуемой толщины теплоизоляционного слоя.

Толщина теплоизоляционного слоя определяется методом итерации по формуле (3). На первом шаге итерации коэффициент теплотехнической однородности принимается равным единице $r=1$.

Соответствующая толщина теплоизоляционного слоя:

$$\delta_y = \left(\frac{R_{reg}}{r} - \frac{\delta_k}{\lambda_k} - \frac{1}{\alpha_e} - \frac{1}{\alpha_n} \right) \cdot \lambda_y = \left(\frac{2,93}{1} - \frac{0,51}{0,87} - \frac{1}{8,7} - \frac{1}{23} \right) \cdot 0,045 = 0,098 \text{ м.}$$

Для получившейся толщины теплоизоляционного слоя по табл. 1. методом интерполяции определяется коэффициент теплотехнической однородности конструкции:

Второй шаг итерации.

$r=0,980$

$$\delta_y = \left(\frac{R_{reg}}{r} - \frac{\delta_k}{\lambda_k} - \frac{1}{\alpha_e} - \frac{1}{\alpha_n} \right) \cdot \lambda_y = \left(\frac{2,93}{0,98} - \frac{0,51}{0,87} - \frac{1}{8,7} - \frac{1}{23} \right) \cdot 0,045 = 0,101 \text{ м.}$$

На последнем шаге итерации толщина утеплителя изменилась менее чем на 5 мм, значит процесс итерации можно прекратить.

По результатам расчета толщина утеплителя должна быть не менее 0,101 м.

Из конструктивных соображений принимается толщина утеплителя $\delta_y = 0,15$ м.
Коэффициент теплотехнической однородности конструкции $r = 0,95$.

1.5 Определение параметров воздухообмена в прослойке.

Определяется скорость движения воздуха, температура воздуха и коэффициент теплообмена в вентилируемой воздушной прослойке для наиболее холодного месяца. В данном случае наиболее холодный месяц январь и $t_n = -15,8$ °С.

Приточные и вытяжные отверстия воздушной прослойки расположены на одной стороне здания, т.е. $K_n = K_s$.

$$\xi_{\text{эжв}} = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вых}} + \xi_{\text{поворотов}} = 1 + 1 + 0,75 \cdot 2 = 3,5.$$

$$R_b = r \cdot R_0 = 0,95 \cdot (1/23 + 1/8,7 + 0,51/0,87 + 0,15/0,045) = 3,87 \text{ м}^2\text{°С/Вт}.$$

$$R_n = 1/\alpha_n + R_{\text{об}} = 1/23 = 0,043 \text{ м}^2\text{°С/Вт}. (R_{\text{об}} = 0, \text{ пренебрегаем термическим сопротивлением облицовки})$$

На первом шаге интерации принимаем $V_{\text{пр}} = 1$ м/с.

$$\alpha_{\text{пр}} = \alpha_k + \alpha_n.$$

$$\alpha_k = 7,34 \cdot 1^{0,656} + 3,78 e^{-1,9} = 7,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°С}).$$

$$\alpha_s = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0}} \cdot \frac{\left(\frac{t_1 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100}\right)^4}{t_1 - t_2}$$

$c_0 = 4,96$ коэффициент излучения абсолютного черного тела (ккал/м²ч°К)

$c_1 = 1,13$ (сталь оцинкованная)

$c_2 = 4,61$ (кирпич силикатный)

} коэффициенты излучения поверхностей в ккал/м² ч °К

$$\left. \begin{array}{l} t_1 = -32 \text{ °С} \\ t_2 = -34 \text{ °С} \end{array} \right\}$$

температуры излучающих поверхностей

$$t_i = t_e - \frac{t_e - t_n}{R_0} \left(1/\alpha_e + \sum_{n-1} R \right)$$

$$t_1 = 20 - \frac{20 + 34}{4,08} \cdot \left(0,015 + \frac{0,51}{0,87} + \frac{0,15}{0,045} \right) = -32 \text{ °С}$$

$$R_0 = 4,08 \text{ м}^2\text{°С/Вт}$$

$$\alpha_s = \frac{1}{0,88 + 0,22 - 0,2} \cdot \frac{\left(\frac{-32 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{-34 + 273}{100}\right)^4}{-32 + 34} = 1,11 \cdot \frac{33,73 - 32,63}{2} = 0,61 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°С})$$

$$\alpha_{\text{пр}} = 7,9 + 0,61 = 8,51 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°С}).$$

$$t_{\text{пр}} = \frac{\frac{20}{3,87 + 0,118} + \left(\frac{1}{0,043 + 0,118} + 1005 \cdot 1,47 \cdot \frac{0,05}{10} \cdot 1 \right) (-15,8)}{\frac{1}{3,87 + 0,118} + \frac{1}{0,043 + 0,118} + 1005 \cdot 1,47 \cdot \frac{0,05}{10} \cdot 1} = -15,12 \text{ °С}$$

$$V_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{0,08h(t_{\text{пр}} - t_n)}{\sum \xi}} = \sqrt{\frac{0,08 \cdot 10(-15,12 + 15,8)}{3,5}} = 0,39 \text{ м/с}$$

Второй шаг интерации

$$\alpha_k = 7,34 \cdot 0,39^{0,656} + 3,78 e^{-1,9 \cdot 0,39} = 5,76 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°С}).$$

$$\alpha_n = 0,61 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°С}).$$

$$\alpha_{np} = 5,76 + 0,61 = 6,37 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°С}).$$

$$\gamma_{cp} = 353/(273-15,12) = 1,37$$

$$t_{np} = \frac{\frac{20}{3,87 + 0,16} + \left(\frac{1}{0,043 + 0,16} + 1005 \cdot 1,37 \cdot 0,005 \cdot 0,39 \right) \cdot (-15,8)}{\frac{1}{3,87 + 0,16} + \frac{1}{0,043 + 0,16} + 1005 \cdot 1,37 \cdot 0,005 \cdot 0,39} = -14,6 \text{ °С}$$

$$V_{np} = \sqrt{\frac{0,08 \cdot 10(15,8 - 14,6)}{3,5}} = 0,52 \text{ м/с}$$

Третий шаг итерации

$$\alpha_k = 7,34 \cdot 0,52^{0,656} + 3,78 e^{-1,9 \cdot 0,52} = 6,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°С}).$$

$$\alpha_n = 0,61 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°С}).$$

$$\alpha_{np} = 6,2 + 0,61 = 6,81 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°С}).$$

$$\gamma_{cp} = 353/(273-14,6) = 1,37$$

$$t_{np} = \frac{\frac{20}{3,87 + 0,15} + \left(\frac{1}{0,043 + 0,15} + 1005 \cdot 1,37 \cdot 0,005 \cdot 0,52 \right) \cdot (-15,8)}{\frac{1}{3,87 + 0,15} + \frac{1}{0,043 + 0,15} + 1005 \cdot 1,37 \cdot 0,005 \cdot 0,52} = -14,75 \text{ °С}$$

$$V_{np} = \sqrt{\frac{0,08 \cdot 10(15,8 - 14,75)}{3,5}} = 0,49 \text{ м/с}$$

Четвертый шаг итерации

$$\alpha_k = 7,34 \cdot 0,49^{0,656} + 3,78 e^{-1,9 \cdot 0,49} = 6,11 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°С}).$$

$$\alpha_n = 0,61 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°С}).$$

$$\alpha_{np} = 6,11 + 0,61 = 6,72 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°С}).$$

$$\gamma_{cp} = 353/(273-14,75) = 1,37$$

$$t_{np} = \frac{\frac{20}{3,87 + 0,15} + \left(\frac{1}{0,043 + 0,15} + 1005 \cdot 1,37 \cdot 0,005 \cdot 0,49 \right) \cdot (-15,8)}{\frac{1}{3,87 + 0,15} + \frac{1}{0,043 + 0,15} + 1005 \cdot 1,37 \cdot 0,005 \cdot 0,49} = -14,73 \text{ °С}$$

$$V_{np} = \sqrt{\frac{0,08 \cdot 10(15,8 - 14,73)}{3,5}} = 0,49 \text{ м/с}$$

Скорость движения воздуха на последнем шаге итерации изменилась менее чем на 5%, процесс итерации можно прекратить.

Определяется скорость движения воздуха, температура воздуха и коэффициент теплообмена в вентилируемой воздушной прослойке для наиболее жаркого месяца в момент нагрева стены солнцем. В данном случае наиболее жаркий месяц июль и температура наружного воздуха $t_n = 27 \text{ °С}$ (средняя максимальная дневная температура июля). Удельный поток лучистой энергии падающий на стену $q_c = 788 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

$$\xi_{эжв} = 3,5$$

Приходящий удельный поток тепла составляет $q_{np} = \rho_{пн} \cdot q_c$.

$\rho_{пн}$ – коэффициент поглощения солнечной радиации материалом облицовки, принимаемый по таблице 14 СП 23-101-2004. Для стали листовой окрашенной зелёной краской $\rho_{пн} = 0,6$

$$q_{np} = 0,6 \cdot 788 = 466,8 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

$$R_b = r \cdot R_0 = 0,95 \cdot (1/23 + 1/8,7 + 0,51/0,87 + 0,15/0,045) = 3,87 \text{ м}^2\text{°С}/\text{Вт}.$$

$R_n = 1/\alpha_n + R_{06} = 1/23 = 0,043 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$. ($R_{06} = 0$, пренебрегаем термическим сопротивлением облицовки)

Первый шаг итерации

На первом шаге итерации $V_{np} = 1 \text{ м/с}$, $t_{06} = 50 \text{ °C}$. $\alpha_{np} = 11 \text{ Вт/(м}^2\text{°C)}$.

$$t_{np} = \frac{\frac{20}{3,87 + 0,1} + \frac{50}{0,043 + 0,1 - 0,043} + 1005 \cdot 1,47 \cdot 0,005 \cdot 1 \cdot 27}{\frac{1}{3,87 + 0,1} + \frac{1}{0,043 + 0,1 - 0,043} + 1005 \cdot 1,47 \cdot 0,005 \cdot 1} = 39,9 \text{ °C}$$

Второй шаг итерации.

$\alpha_k = 7,34 \cdot 1,72^{0,656} + 3,78 e^{-1,9 \cdot 1,72} = 10,64 \text{ Вт/(м}^2\text{°C)}$.

$\alpha_{np} = 10,64 + 0,61 = 11,25 \text{ Вт/(м}^2\text{°C)}$. = 0,09

$$t_{np} = \frac{\frac{20}{3,87 + 0,09} + \frac{45,05}{0,043 + 0,09 - 0,043} + 1005 \cdot 1,47 \cdot 0,005 \cdot 1,72 \cdot 27}{\frac{1}{3,87 + 0,09} + \frac{1}{0,043 + 0,09 - 0,043} + 1005 \cdot 1,47 \cdot 0,005 \cdot 1,72} = 35,27 \text{ °C}$$

$$t_{об(н.учст)} = \frac{466,8 + \frac{35,27}{0,043 + 0,09 - 0,043} + 23 \cdot 27}{\frac{1}{0,043 + 0,09 - 0,043} + 23} = 43,38 \text{ °C}$$

$$V_{np} = \sqrt{\frac{0,08 \cdot 10(35,27 - 27)}{3,5}} = 1,37 \text{ м/с}$$

Третий шаг итерации.

$\alpha_k = 7,34 \cdot 1,37^{0,656} + 3,78 e^{-1,9 \cdot 1,37} = 9,31 \text{ Вт/(м}^2\text{°C)}$.

$\alpha_{np} = 9,31 + 0,61 = 9,92 \text{ Вт/(м}^2\text{°C)}$.

$$t_{np} = \frac{\frac{20}{3,87 + 0,1} + \frac{43,38}{0,043 + 0,1 - 0,043} + 1005 \cdot 1,47 \cdot 0,005 \cdot 1,37 \cdot 27}{\frac{1}{3,87 + 0,1} + \frac{1}{0,043 + 0,1 - 0,043} + 1005 \cdot 1,47 \cdot 0,005 \cdot 1,37} = 34,96 \text{ °C}$$

$$t_{об(н.учст)} = \frac{466,8 + \frac{34,96}{0,043 + 0,1 - 0,043} + 23 \cdot 27}{\frac{1}{0,043 + 0,1 - 0,043} + 23} = 43,28 \text{ °C}$$

$$V_{np} = \sqrt{\frac{0,08 \cdot 10(34,96 - 27)}{3,5}} = 1,35 \text{ м/с}$$

Скорость движения воздуха на последнем шаге итерации изменилась менее чем на 5%, процесс итерации можно прекратить.

1.6 Расчет защиты от переувлажнения ограждающих конструкций.

Расчет сопротивления паропрооницанию рассматриваемой конструкции производится по методике описанной в разделе 1.6

Так как рассматриваемая конструкция многослойна, то R_{vp} равно сумме сопротивлений паропрооницанию составляющих её слоев.

$$R_{vp} = \sum \frac{\delta}{\mu} = \frac{0,51}{0,11} + \frac{0,15}{0,32} = 5,1 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$$

Расчетная температура для жилых помещений $t_{int} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ [14], относительная влажность внутреннего воздуха для жилых помещений $\phi_{int} = 55\%$ [4]

$$E_{int} = 2338 \text{ Па} [13]$$

$$e_{int} = (55/100)2338 = 1285,9 \text{ Па}$$

$$e_{ext} = 650 \text{ Па} [5]$$

$$z_1 = 5 \text{ мес}, z_2 = 2 \text{ мес}, z_3 = 5 \text{ мес} [13]$$

$$t_1 = -11,32 \text{ }^\circ\text{C}, t_2 = 3,15 \text{ }^\circ\text{C}, t_3 = 14,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\alpha_{int} = 8,7 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}) \text{ по таблице 7 [4];}$$

$$R_{int} = 1/\alpha_{int} = 1/8,7 = 0,15 \text{ м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C} / \text{Вт};$$

$$\sum R = \frac{0,51}{0,87} + \frac{0,15}{0,045} = 3,92 \text{ м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C} / \text{Вт};$$

$$R_0 = \frac{1}{8,7} + \frac{0,51}{0,87} + \frac{0,15}{0,045} + \frac{1}{23} = 4,08 \text{ м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C} / \text{Вт};$$

$$\tau_1 = 20 - \frac{(20 + 11,32)(0,115 + 3,92)}{4,08} = -11,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\tau_1 = 20 - \frac{(20 - 3,15)(0,115 + 3,92)}{4,08} = 3,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\tau_1 = 20 - \frac{(20 - 14,8)(0,115 + 3,92)}{4,08} = 14,85 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$E_1 = 229, E_2 = 775, E_3 = 1689 \text{ Па} [13]$$

$$E = (229 \cdot 5 + 775 \cdot 2 + 1689 \cdot 5) / 12 = 928 \text{ Па}$$

R_{vp} вычислить невозможно, т.к. по п 13.5 примечания 1 [13] сопротивление паро-проницанию воздушной прослойки равно 0 и сопротивление паропрооницанию облицовки из листовой стали также равно 0

$$z_0 = (31 + 28 + 31 + 30 + 31) = 151 \text{ сут.}$$

$$t_0 = -11,32 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\tau_0 = 20 - \frac{(20 + 11,32)(0,115 + 3,92)}{4,08} = -11,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$E_0 = 237 \text{ Па.}$$

Согласно [4] в многослойной ограждающей конструкции увлажняемым слоем является утеплитель минераловатный

$\rho_w = \rho_0 = 100 \text{ кг} / \text{м}^3$, при толщине $\delta_w = 0,15 \text{ м}$, предельно допустимое приращение расчетного массового отношения влаги в этом материале согласно [4] $\Delta w_{av} = 3\%$

$$e_0^{ext} = \frac{(160 + 170 + 290 + 330 + 220)}{5} = 234 \text{ Па}$$

$$\eta = \frac{0,0024(E_0 - e_0^{ext}) \cdot z_0}{R_{vp}^e} = \frac{0,0024(237 - 234) \cdot 151}{3,9} = 0,3$$

$$R_{vp2}^{req} = \frac{0,0024 \cdot 151(650 - 237)}{100 \cdot 0,15 \cdot 3 + 0,3} = 3,3 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$$

$R_{vp} > R_{vp2}^{req}$ следовательно, условие по защите ограждающей конструкции от переувлажнения выполняется.

1.7 Расчет температурного поля.

Длина крепления 50 мм + 150 мм = 200мм. Толщина металла, из которого изготавливаются детали 1,0 мм. Суммарная ширина части кронштейна, прорезающей минераловатные плиты 100 мм.

Площадь сечения кронштейна 100 мм². Площадь части кронштейна прилегающей к конструктивному слою стены (опоры) 3000 мм².

Площадь паронитовой прокладки 3000 мм². Толщина паронитовой прокладки 4мм.

Диаметр стального крепления (анкера) 7 мм. Количество анкеров 2 шт. Глубина погружения стального анкера в конструктивный слой 90 мм.

Для оцинкованного стального кронштейна

$$\xi_n = 0,22 \text{ м.}$$

$$S_n = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

$$t_{кк} = 8 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$t_{np} = -14,73 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$\alpha_{np} = 6,72 \text{ Вт/(м}^2\text{}^\circ\text{C).}$$

$$t_{\pi.к} = -14,73 + \frac{8 + 14,73}{1 + (0,2 - 0,05) \sqrt{\frac{6,72 \cdot 0,22}{40 \cdot 1,0 \cdot 10^{-4}}}} = -8,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Q_0 = \frac{1}{\frac{1}{1,72} + \frac{1}{\frac{20 + 14,73}{0,23} + \frac{0,15}{0,045} + \frac{0,51}{0,87} + \frac{1}{87}}} = 7,42 \text{ Вт}$$

$$Q_H = 7,81 \text{ Вт.}$$

$$r = \frac{7,42}{7,81} = 0,95$$

$$R_{0np} = 0,95 \cdot 4,08 = 3,88 \text{ м}^2\text{}^\circ\text{C/ Вт}$$

Приведенное сопротивление конструкции 3,88 м²°C/ Вт больше требуемого значения 2,93 м²°C/ Вт, значит конструкция удовлетворяет СНиП 23-02-2003 по энергоснабжению.

1.8 Расчет влажности воздуха на выходе из вентилируемой воздушной прослойки.

$$t_{np} = -14,73^\circ\text{C.}$$

$$V_{np} = 0,49 \text{ м/с.}$$

$$e_y = 272,7 \text{ Па.}$$

$$e_n = 25 \text{ Па.}$$

$$R_{\text{вет}}^n = \frac{0,51}{0,11} + \frac{0,15}{0,32} + 7,3 = 12,4 \text{ м}^2 \text{ ч Па/мг}$$

$R_{об}^n$ исключается так как сталь паронепроницаема

$$e_{np} = \frac{\frac{272,7}{12,4} + \left[\frac{28573}{1 - \frac{14,73}{273}} \cdot \frac{0,05}{10} \cdot 0,49 \right] \cdot 25}{\frac{1}{12,4} + \frac{28573}{1 - \frac{14,73}{273}} \cdot \frac{0,05}{10} \cdot 0,49} = 25,3 \text{ Па}$$

Парциальное давление водяного пара в вентилируемой прослойке меньше давления насыщенного водяного пара при температуре равной температуре воздуха в вентилируемой прослойке и

составляющего 170,2 Па, значит, конструкция вентилируемой прослойки, с точки зрения обеспечения благоприятного влажностного режима не нуждается в улучшении.

Нормативные документы и литература по разделу

1. СНиП 2.08.01-89 - Жилые здания.
2. СНиП 2.01.07-85 - Нагрузки и воздействия.
3. СНиП II-23-81 - Стальные конструкции.
4. СНиП 23-02-2003 - Тепловая защита зданий.
5. СНиП 23-01-99 - Строительная климатология.
6. СНиП 2.03.11-85 - Защита строительных конструкций от коррозии.
7. СНиП 21-01-97 - Пожарная безопасность зданий и сооружений.
8. ГОСТ 17177-94 - Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний.
9. СНиП 2.01.01-82 - Строительная климатология и геофизика.
10. Фокин К.Ф. - «Строительная теплотехника ограждающих частей зданий». 1973.
11. Богословский В.Н. - «Тепловой режим здания». 1979.
12. Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий. 1984.
13. СП 23-101-2004 - Проектирование тепловой защиты зданий
14. ГОСТ 30494 - Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.