

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ



УДК 697.137.5

DOI: 10.17673/Vestnik.2020.04.5

Ю. С. ВЫТЧИКОВ
М. Е. САПАРЁВ
Д. Д. КОНЯКИНА

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА МНОГОСЛОЙНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

OPTIMIZATION OF THE HEAT AND HUMIDITY MODE OF MULTI-LAYER BUILDING ENCLOSING STRUCTURES

Представлена методика определения требуемого сопротивления паропрооницанию наружного слоя многослойной строительной ограждающей конструкции исходя из условия отсутствия в ней конденсации водяного пара. При выводе формулы использовалась аналитическая зависимость для определения упругости насыщенного водяного пара, полученная авторами данной статьи. С помощью предложенной методики произведена оценка тепловлажностного режима наружной стены, утепленной фасадной системой с применением тонкостенной штукатурки, а также слоистой кладки с использованием в качестве утеплителей пенополистирольных и базальтовых плит. Представлены результаты расчета указанных наружных стен, которые показывают, что конденсация водяного пара возможна в слоистых кладках. Предложенную аналитическую зависимость для определения максимально допустимого сопротивления паропрооницанию наружного слоя многослойной ограждающей конструкции рекомендуется использовать в инженерных расчетах влажностного режима наружных ограждений зданий и сооружений.

Ключевые слова: конденсация, водяной пар, влажностный режим, сопротивление паропрооницанию, плоскость конденсации

Согласно нормативным требованиям, представленным в СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», строительные ограждающие конструкции должны обладать сопротивлением теплопередаче, обеспечивающим выполнение санитарно-гигиенических требо-

The article presents a methodology for determining the required resistance to vapor permeation of the outer layer of a multilayer building envelope, based on the condition that there is no condensation of water vapor in it. When deriving the formula, an analytical dependence was used to determine the elasticity of saturated water vapor, obtained by the authors of this article. With the help of the proposed technique, the assessment of the thermal and humidity regime of the outer wall, insulated facade system using thin-walled plaster, as well as layered masonry using expanded polystyrene and basalt plates as insulation was made. The results of the calculation of the indicated external walls are presented, which show that condensation of water vapor is possible in layered masonry. The proposed analytical dependence for determining the maximum allowable resistance to vapor permeation of the outer layer of a multilayer enclosing structure is recommended to be used in engineering calculations of the humidity mode of external enclosures of buildings and structures.

Keywords: condensation, water vapor, humidity mode, vapor permeability resistance, condensation plane

ваний и условия энергосбережения. В практике современного строительства широкое применение нашли многослойные ограждающие конструкции с использованием в качестве утеплителей высокоэффективных полимерных материалов.

Исследованию влажностного режима многослойных ограждающих конструкций посвящены работы [1–5], базирующиеся в основном на использовании потенциала влажности. В работах [6, 7] представлены результаты экспериментальных исследований влагопереноса в материалах ограждающих конструкций зданий.

При выборе конструктивных решений ограждающих конструкций необходимо обращать особое внимание на паропроницаемость наружного слоя. С точки зрения обеспечения благоприятного влажностного режима ограждений менее плотные паропроницаемые слои следует располагать согласно [8] с наружной стороны. При этом наружный слой должен обеспечивать надежную защиту конструкций от увлажнения при выпадении осадков в виде дождя или мокрого снега.

Получим аналитическое решение для определения требуемого сопротивления паропроницанию наружного слоя многослойной ограждающей конструкции исходя из условия отсутствия в ней конденсации водяного пара. Схематизация процесса теплопередачи в утепленной наружной стене представлена на рисунке.

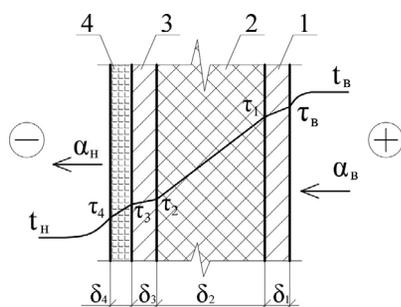


Рис. 1. Схематизация процесса теплопередачи в утепленной наружной стене:
1 – внутренняя штукатурка;
2 – несущий слой наружной стены;
3 – утеплитель; 4 – наружный слой стены

$$R_{n_4}^{\max} = \frac{611R_{n_0} \left\{ 1 + 0,01 \left[t_6 - \frac{t_6 - t_{n_{\text{отп}}}}{R_0^{\text{усл}}} \left(R_0^{\text{усл}} - \frac{1}{\alpha_n} - R_4 \right) \right] \right\}^{7,6} - e_{n_{\text{отп}}} R_{n_0}}{e_6 - e_{n_{\text{отп}}}}, \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}, \quad (6)$$

где $t_{n_{\text{отп}}}$, $e_{n_{\text{отп}}}$ – средняя температура и парциальное давление наружного воздуха за период месяцев с отрицательными температурами.

Для исключения процесса конденсации водяного пара в рассматриваемой наружной стене должно выполняться неравенство

Условие отсутствия конденсации водяного пара в наружной стене запишем в виде неравенства

$$e_3 < E_3, \text{ Па}, \quad (1)$$

где e_3 значение упругости водяного пара на наружной поверхности утеплителя, Па; E_3 – значение упругости насыщенного водяного пара, определяемое согласно [9] по формуле

$$E_3 = 611 \left(1 + \frac{\tau_3}{100} \right)^{7,6}. \quad (2)$$

Для нахождения величины e_3 используем согласно [10] выражение

$$e_3 = e_6 - \frac{e_6 - e_n}{R_{n_0}} \sum_{i=1}^3 R_{n_i}, \quad (3)$$

где e_6 – значение упругости водяного пара для внутреннего воздуха в помещении, Па; e_n – значение упругости водяного пара для наружного воздуха, Па; $R_i = \delta_i / \mu_i$ – сопротивление паропроницанию i -го слоя; μ_i – коэффициент паропроницаемости i -го слоя, мг/(м·ч·Па); δ_i – толщина i -го слоя, м.

Подставим выражение (2) и (3) в неравенство (1). Тогда получим

$$e_6 - \frac{e_6 - e_n}{R_{n_0}} \sum_{i=1}^3 R_{n_i} < 611 \left(1 + \frac{\tau_3}{100} \right)^{7,6}, \quad (4)$$

где $\sum_{i=1}^3 R_{n_i} = R_{n_0} - R_{n_4}$.

Температуру на наружной поверхности утеплителя определим по формуле

$$\tau_3 = \tau_6 - \frac{t_6 - t_n}{R_0^{\text{усл}}} \left(R_0^{\text{усл}} - \frac{1}{\alpha_n} - R_4 \right), \quad (5)$$

где $R_0^{\text{усл}}$ – сопротивление теплопередаче гладкой наружной стены, (м²·°С)/Вт; α_n – значение коэффициента теплоотдачи со стороны наружной поверхности стены, Вт/(м²·°С).

После преобразований получим выражение для определения максимально допустимого сопротивления паропроницанию наружного слоя

$$R_{n_4}^{\max} < R_{n_n}^{\max}, \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}. \quad (7)$$

Если условие не выполняется, следует определить координату плоскости возможной конденсации в утеплителе согласно [9] по формуле

$$x_3 = \lambda_3 \left\{ \frac{\left[t_B - 55,9 \left(\frac{e_B - e_{H_{отп}}}{t_B - t_{H_{отп}}} \frac{R_0^{учл}}{R_{n_0}} \frac{\lambda_3}{\mu_3} \right)^{0,1515} + 100 \right] R_0^{учл}}{t_B - t_{H_{отп}}} - \frac{1}{\alpha_6} - \sum_{i=1}^3 R_i \right\}. \quad (8)$$

Для проверки возможности накопления влаги в наружной стене как за годовой период эксплуатации здания, так и за период месяцев с отрицательными температурами, следует использовать методику, подробно изложенную в СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий».

По изложенной выше методике выполним расчет влажностного режима для двух вариантов исполнения утепленных наружных стен.

Вариант исполнения 1 представляет собой утепленную наружную стену с применением тонкостенной штукатурки. Состав конструкции приведен в табл. 1.

При выполнении расчета влажностного режима наружной стены, представленной на рисунке (исполнение 1), были приняты следующие исходные данные:

- 1) Район строительства – г. Самара
- 2) Температура наиболее холодной пятидневки $t_{н5} = -30 \text{ }^\circ\text{C}$
- 3) Средняя температура за отопительный период $t_{о.п.} = -4,7 \text{ }^\circ\text{C}$
- 4) Продолжительность отопительного периода $Z_{о.п.} = 197 \text{ сут}$
- 5) Температура воздуха внутри здания $t_B = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- 6) Относительная влажность воздуха внутри здания $\varphi_B = 55 \text{ \%}$

Проверка на возможность выпадения конденсата в утеплителе производилась в следующей последовательности:

1. Сопротивление теплопередаче глади наружной стены определялось по формуле

$$R_0^{учл} = \frac{1}{\alpha_6} + \sum_{i=1}^4 R_i + \frac{1}{\alpha_n} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,76} + \frac{0,51}{0,76} + \frac{0,10}{0,042} + \frac{0,005}{0,70} + \frac{1}{23} = 3,24 \text{ (м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}/\text{Вт}.$$

2. Сопротивление паропроницанию глади наружной стены рассчитывалось по формуле

$$R_{n_0} = \sum_{i=1}^4 R_i = \sum_{i=1}^4 \frac{\delta_i}{\mu_i} = \frac{0,02}{0,09} + \frac{0,51}{0,11} + \frac{0,10}{0,32} + \frac{0,005}{0,05} = 5,27 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}.$$

3. Парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха в помещении вычислялось с использованием зависимости

$$e_6 = E \frac{\varphi_6}{100} = 2338 \cdot \frac{55}{100} = 1285,6 \text{ Па}.$$

4. Среднее парциальное давление водяного пара в наружном воздухе за период месяцев с отрицательными температурами для г. Самары согласно СП 131.13330.2012 «Строительная климатология» составило $e_{H_{отп}} = 310 \text{ Па}$.

Таблица 1

Теплофизические характеристики материалов наружной стены (исполнение 1). Район строительства – г. Самара

№ п/п	Материал	Толщина слоя δ_r , м	Теплофизические характеристики материала слоя		
			Плотность ρ_r , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ_r , Вт/(м·°C)	Коэффициент паропроницаемости μ_r , мг/(м·ч·Па)
1	Цементно-песчаный раствор	0,02	1800	0,76	0,09
2	Силикатный кирпич	0,51	1800	0,76	0,11
3	Базальтовая минвата	0,10	120	0,042	0,32
4	Фактурный слой фасадной системы	0,005	1800	0,70	0,05

5. По формуле (6) находим значение максимально допустимого сопротивления паропроницанию наружного слоя:

$$R_{n_4}^{\max} = \frac{611 \cdot 5,27 \left\{ 1 + 0,01 \left[20 - \frac{20 - (-7,18)}{3,24} \left(3,24 - \frac{1}{23} - \frac{0,005}{0,70} \right) \right] \right\}^{7,6} - 310 \cdot 5,27}{1285,6 - 310} = 0,264 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}.$$

6. Сравнение величин R_{n_4} и $R_{n_4}^{\max}$ показало, что сопротивление паропроницанию фактурного слоя фасадной системы оказалось меньше максимально допустимого значения ($0,1 < 0,264 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$). Следовательно, выпадение конденсата в рассматриваемой наружной стене маловероятно.

Избыточное влагонакопление в слоистых кладках часто приводит к образованию темных сырых пятен и плесневых грибов на внутренних поверхностях наружных стен, а также к разрушению облицовочного слоя. Поэтому актуальной задачей является рациональный выбор материала утеплителя, обеспечивающего не только высокое значение термического сопротивления, но и значительное сопротивление паропроницанию.

По изложенной выше методике был выполнен расчет тепловлажностного режима наружной стены, выполненный в виде слоистой кладки (исполнение 2 и 3). Состав конструкции приведен в табл. 2.

Результаты теплофизического расчета наружных стен, выполненных с применением слоистых кладок приведены в табл. 3.

Анализируя данные, представленные в табл. 3, можно сделать вывод о том, что конденсация водяного пара возможна в слоистых кладках исполнения 2 и 3. Для проверки возможности накопления влаги в наружных стенах как за годовой период эксплуатации здания, так и за период месяцев с отрицательными температурами определим координату плоскости возможной конденсации по формуле (8).

Наружная стена (исполнение 2):

$$x_3 = 0,038 \left\{ \frac{\left[20 - 55,9 \left(\frac{1285,6 - 310}{20 - (-7,18)} \cdot \frac{3,49}{6,76} \cdot \frac{0,038}{0,05} \right)^{0,1515} + 100 \right] 3,49}{20 - (-7,18)} - \frac{1}{8,7} - \frac{0,02}{0,76} - \frac{0,38}{0,76} \right\} = 0,137 \text{ м}.$$

Таблица 2

Теплофизические характеристики материалов наружной стены (исполнение 2, 3)

№ п/п	Материал	Толщина слоя δ_r , м	Теплофизические характеристики материала слоя		
			Плотность ρ_r , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ_r , Вт/(м·°С)	Коэффициент паропроницаемости μ_r , мг/(м·ч·Па)
1	Цементно-песчаный раствор	0,02	1800	0,76	0,09
2	Кладка из силикатного кирпича	0,38	1800	0,76	0,11
3	Базальтовая минвата (исполнение 2)	0,10	120	0,042	0,32
	Пенополистирол (исполнение 3)	0,10	25	0,038	0,05
4	Кладка из керамического кирпича	0,12	1800	0,70	0,11

Таблица 3

Результаты теплофизического расчета слоистых кладок

№ исполнения стены	R_0^{ysl} , (м ² ·°С)/Вт	R_{n_0} , м ² ·ч·Па/мг	R_{n_4} , м ² ·ч·Па/мг	$R_{n_4}^{\max}$, м ² ·ч·Па/мг
2	3,24	5,08	1,09	0,417
3	3,49	6,76	1,09	1,08

Плоскость возможной конденсации совпадает с наружной поверхностью базальтовой минваты, т. е. $x_3 = \delta_3 = 0,1$ м.

Наружная стена (исполнение 3):

$$x_3 = 0,042 \left\{ \frac{\left[20 - 55,9 \left(\frac{1285,6 - 310}{20 - (-7,18)} \cdot \frac{3,24}{5,08} \cdot \frac{0,042}{0,32} \right)^{0,1515} + 100 \right] 3,24}{20 - (-7,18)} - \frac{1}{8,7} - \frac{0,02}{0,76} - \frac{0,38}{0,76} \right\} = 0,124 \text{ м.}$$

Плоскость возможной конденсации совпадает с наружной поверхностью пенополистирольных плит.

Проверка на накопление влаги в стене при эксплуатации здания, выполненная по известной методике, приведенной в СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий», показала на отсутствие накопления влаги за годовой период эксплуатации здания, а накопление влаги в холодный период не выходит за пределы сорбционного увлажнения.

Выводы. 1. Получена аналитическая зависимость для определения максимально допустимого сопротивления паропроницанию наружного слоя многослойной ограждающей конструкции. Применение данной аналитической зависимости может быть рекомендовано в инженерных расчетах влажностного режима наружных ограждений.

2. Представлены результаты расчета по предложенной методике тепловлажностного режима утепленной наружной стены с применением в качестве фактурного слоя многослойной штукатурки и слоистой кладки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). М.: Высшая школа, 1982. 415 с.

2. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 536 с.

3. Корниенко С.В. Метод инженерной оценки влажностного режима ограждающих конструкций на основе потенциала влажности // Промышленное и гражданское строительство. 2008. №2. С. 46–48.

4. Гагарин В.Г., Зубарев К.П. Применение теории потенциала влажности к моделированию нестационарного влажностного режима ограждений // Вестник МГСУ. 2019. №4. С. 485–495.

5. Корниенко С.В. Натурные исследования температурно-влажностного режима жилого здания при верификации метода расчета влаготеплопереноса в ограждающих конструкциях // Вестник Волгогр. гос. арх.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2012. Вып. 28 (47). С. 19–26.

6. Корниенко С.В. Экспериментальное исследование переноса влаги в материалах ограждающих конструкций зданий // Строительные материалы. 2007. №1. С. 42–44.

7. Корниенко С.В. Экспериментальная проверка состояния системы «внутренняя среда-ограждение-наружная среда» на основе потенциала влажности // Жилищное строительство. 2007. №2. С. 5–7.

8. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.

9. Вытчиков Ю.С., Сапарёв М.Е., Дядин А.А. Приближенный аналитический метод расчета влажност-

ного режима многослойных строительных ограждающих конструкций // Инженерный вестник Дона. 2020. № 3. URL: www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2020/6350

10. Ильинский В.М. Строительная теплофизика. М.: Высшая школа, 1974. 319 с.

REFERENCES

1. Bogoslovskij V.N. *Stroitel'naja teplofizika (teplofizicheskie osnovy otoplenija, ventiljacii i kondicionirovanija vozduha)* [Building Thermophysics (thermo-physical fundamentals of heating, ventilation and air-conditioning)]. M., Vysshaja shkola, 1982. 415 p.

2. Lykov A.V., Mihajlov Ju.A. *Teorija teplo- i massopere-nosa* [Theory of heat and mass transfer]. M.-L., Gosjenergoizdat, 1963. 536 p.

3. Kornienko S.V. Method for engineering assessment of the humidity regime of enclosing structures based on the humidity potential. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil construction], 2008, no. 2, pp. 46-48. (in Russian)

4. Gagarin V. G., Zubarev K. P. Application of moisture potential theory to modeling of non-stationary humidity regime of fences. *Vestnik MGSU* [Bulletin of MGSU], 2019, no. 4, pp. 485-495. (in Russian)

5. Kornienko C.B. Field studies of the temperature and humidity regime of a residential building when verifying the method for calculating moisture and heat transfer in enclosing structures. *Vestnik Volgogr. gos. arhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arhit* [Bulletin of the VSUACE. Ser.: Construction and architecture], 2012, vol. 28 (47), pp. 19-26. (in Russian)

6. Kornienko S.V. Experimental study of moisture transfer in building envelope materials. *Stroitel'nye materialy* [Building material], 2007, no. 1, pp. 42-44. (in Russian)

7. Kornienko S.V. Experimental verification of the state of the "internal environment-enclosure-external environment" system based on the humidity potential. *Zhilishhnoe stroitel'stvo* [Housing construction], 2007, no. 2, pp. 5-7. (in Russian)

8. Fokin K. F. *Stroitel'naja teplotehnika ograzhdajushhih chastej zdanij* [Construction heat engineering of enclosing parts of buildings]. Moscow, AVOK-PRESS Publ., 2006. 256 p.

9. Vytchikov Ju.S., Saparjov M.E., Djamin A.A. Approximate analytical method for calculating the humidity regime of multi-layer building enclosing structures. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the don], 2020, no. 3. Available at: www.ivdon.ru/magazine/archive/N3y2020/6350 (Accessed 11 January 2021) (in Russian)

10. П'инский V.M. *Stroitel'naja teplofizika* [Construction Thermophysics]. M., Vysshaja shkola Publ., 1974. 319 p.

Об авторах:

ВЫТЧИКОВ Юрий Серафимович

кандидат технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: git.2008@mail.ru

САПАРЁВ Михаил Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: msx072007@yandex.ru

КОНЯКИНА Дарья Денисовна

магистрант Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: d.konyakina@yandex.ru

VYTCHIKOV Yuri S.

PhD in Engineering Science, Professor of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: git.2008@mail.ru

SAPAREV Mikhail E.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: msx072007@yandex.ru

KONYAKINA Dar'ya D.

Master's Degree Student Samara State Technical University Academy of Civil Engineering and Architecture 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: d.konyakina@yandex.ru

Для цитирования: Вытчиков Ю.С., Сапарёв М.Е., Конякина Д.Д. Оптимизация тепловлажностного режима многослойных строительных ограждающих конструкций // Градостроительство и архитектура. 2020. Т.10, № 4. С. 36–41. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.04.5.

For citation: Vytchikov Yu.S., Saparev M.Ye., Konyakina D.D. Optimization of the Heat and Humidity Mode of Multi-Layer Building Enclosing Structures. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2020, vol. 10, no. 4, Pp. 36–41. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2020.04.5.