

УДК 697.137.2

Петров А.С. – ассистент

E-mail: ruarty@mail.ru

Куприянов В.Н. – доктор технических наук, профессор

E-mail: kuprivan@kgasu.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Влияние температурно-влажностных условий эксплуатации строительных материалов на их паропроницаемость

Аннотация

В работе представлены результаты экспериментального исследования характеристик паропроницаемости некоторых теплоизоляционных материалов и двухслойных конструкций при различных температурно-влажностных условиях. Результаты испытаний материалов показывают, что паропроницаемость (μ) не является постоянной величиной и меняется в зависимости от влажности, температуры и расположения материальных слоев конструкции. Подтверждается необходимость научного развития существующих методов измерения паропроницаемости строительных материалов для их стандартизации.

Ключевые слова: паропроницаемость, увлажнение, конденсация, температура, ограждающие конструкции.

Известно, что в сечении ограждающей конструкции существует градиент парциального давления, возникающий из-за разности концентраций паробразной влаги между внутренней и наружной поверхностями. Как следствие паробразная влага диффундирует через ограждение и может увлажнять ее материальные слои за счет сорбции и конденсации. Механизм этого увлажнения исследуется уже многие годы и описан в работах [1-5]. По отношению разности парциальных давлений ($e_v - e_n$) к величине сопротивления паропроницанию ограждения (R_n) находят количество пара (G), прошедшего через ограждение за единицу времени:

$$G = (e_v - e_n) / R_n. \quad (1)$$

По количеству прошедшего пара можно оценить возможное увлажнение ограждающей конструкции. Здесь сопротивление паропроницанию (R_n) играет решающую роль при формировании многослойной ограждающей конструкции на стадии проектирования. Правильный подбор сопротивления паропроницаемости материальных слоев обеспечит их защиту от переувлажнения и своевременного высушивания. Данная характеристика зависит от толщины слоя (δ) и коэффициента паропроницаемости (μ):

$$R_n = \delta / \mu. \quad (2)$$

Формула (2) на сегодняшний день является основой существующих методов расчета по защите от переувлажнения конструкций.

Таким образом оптимальный влажностный режим ограждения на сегодняшний день выполняется подбором толщины материальных слоев (δ) и характеристик паропроницаемости (μ).

Здесь стоит отметить, что существующие методы расчета (в том числе нестационарные методы [1]) принимают коэффициент паропроницаемости постоянной величиной для любых эксплуатационных условий. Лишь в международном стандарте ISO 10456:2007 указано два значения коэффициента паропроницаемости μ для сухого и влажного материала. Однако ясности в том, какой из них необходим для расчета нет, так как для этого необходимо знать характеристики влажности материальных слоев конструкции уже на стадии проектирования.

По многочисленным исследованиям [3, 6, 7] коэффициент паропроницаемости (μ) не является постоянной величиной. Так по исследованию Ильинского В.М. [7] по экспериментальным данным паропроницаемость гигроскопичных материалов значительно возрастает с увеличением относительной влажности воздуха в порах материала. Согласно исследованию Перехоженцева А.Г. [3] паропроницаемость при повышении влажности материала будет снижаться, а процесс переноса влаги в значительной степени будет происходить за счет движения пленочной влаги. По мнению Nens H. [6] образование пленок воды в порах материала при повышенной влажности

воздуха способствует уменьшению длины паровоздушного пространства, которое необходимо «преодолеть» молекулам пара и снижению извилистости пор, что приводит к увеличению паропроницаемости.

Так всеми авторами подчеркивается взаимосвязь между влажностью и паропроницаемостью материала.

Таковыми авторами как В. Плонский [8], А.М. Хелемский [9] были накоплены экспериментальные данные по влиянию градиента температур на паропроницаемость материалов. А.М. Хелемский испытывая гидрофобные материалы из пенопластов установил, что значения паропроницаемости в изотермических и неизотермических условиях отличаются лишь на 4 %. Исследования В. Плонского показывают значительные изменения паропроницаемости в гидрофильных материалах газобетона и рулонных материалов из рубероида (паропроницаемость как правило, уменьшается при наличии градиента температуры) но, к сожалению, не были систематическими и недостаточно объяснены, что не позволяет сделать выводы о зависимости паропроницаемости от градиента температуры.

Таким образом до сих пор не существует четкого представления о зависимости паропроницаемости материалов от различных эксплуатационных условий и требует научного обоснования.

Согласно исследованиям [10] проводимым в течение нескольких лет на натурном стенде, в реальной ограждающей конструкции значительно меняются температуры и относительная влажность. Данные полученные авторами за 2 года позволяют говорить, что в значительной степени этим изменениям подвержены наружные теплоизоляционные слои, выполненные из таких материалов как минеральная вата, пенополистирол, ячеистый бетон и др. Можно предположить, что колебания этих значений влияют на значения паропроницаемости этих слоев в течение года и могут отразиться на их влажностном состоянии. Существующие методы испытания строительных материалов на паропроницаемость (ГОСТ 12852.5-77, ГОСТ РЕ Н 12086 и др.) не учитывают необходимый диапазон условий [11], поэтому нами были проведены исследования паропроницаемости:

- ячеистого бетона и пенопласта по ГОСТ 12852.5-77 и ГОСТ РЕ Н 12086 (изотермические условия),
- ячеистого бетона в неизотермических условиях,
- двухслойных конструкций, выполненных из ячеистого бетона и пенопласта (изотермические условия).

Для проведения испытаний в неизотермических условиях нами была разработана и запатентована полезная модель для испытания строительных материалов на паропроницаемость [12]. По сечению образца ячеистого бетона во время испытания поддерживался перепад температуры равный 20 °С. Установка выполнена из термостата, нагревателя, пластиковой обоймы для фиксации образца ячеистого бетона, рис. 1. Изоляция образца выполнялась согласно ГОСТ 12852.5-77. Установка помещалась в морозильную камеру для формирования пониженной температуры над образцом равную -1,5 °С. Относительная влажность над образцом регулировалась за счет адсорбента CaCl₂, рекомендованного ГОСТ РЕ Н 12086. Температура и влажность под и над образцом фиксировались в непрерывном режиме датчиками ИВА-6. Установка взвешивалась один раз в 7 суток для снятия показаний в течение 35 суток.

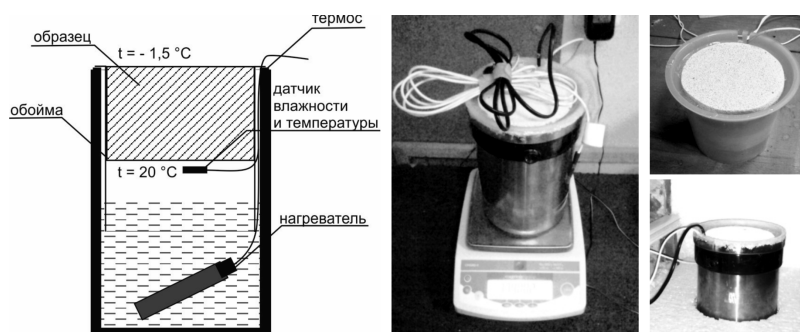


Рис. 1. Схема установки для испытания материалов на паропроницаемость в неизотермических условиях

Двухслойные конструкции «а» и «б» с различным расположением материальных слоев друг относительно друга, рис. 2, были испытаны по температурно-влажностным условиям ГОСТ 12852.5-77, то есть под образцом формировалась стопроцентная относительная влажность воздуха. Однако в связи с тем, что расположение материальных слоев в конструкции различно, образцы материалов в данных конструкциях находятся в различных влажностных условиях. Так, в конструкции «а» ячеистый бетон находится в сухих условиях эксплуатации, где $\varphi = 48,6\%$, а в конструкции «б» во влажных, где $\varphi = 86\%$ (значения получены по средним парциальным давлениям e и температуре t в образцах).

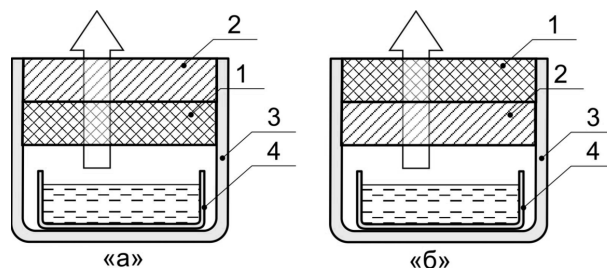


Рис. 2. Схемы установок «а» и «б» для определения паропроницаемости:
1 – пенополистирол, 2 – ячеистый бетон, 3 – обойма, 4 – чашка с водой.
Стрелкой указано направление движения пара

По данным экспериментов были рассчитаны характеристики паропроницаемости материалов.

Ячеистый бетон (400 кг/м^3) по ГОСТ 12852.5-77:

Потеря массы установки в сутки:

$$\Delta m = \Delta m_1 - \Delta m_2 = 1933,5 - 1932,32 = 1,18 \text{ г} = 1180 \text{ мг.} \quad (3)$$

Плотность потока пара:

$$q = \frac{\Delta m}{t \times S} = \frac{1180}{24 \times 0,0156} = 3151,71 \text{ мг/м}^2 \times \text{ч}, \quad (4)$$

где t – время между взвешиваниями в часах, S – площадь поверхности испарения образца, м^2 .

Разность парциальных давлений между внутренней и наружной поверхностями образца:

$$\Delta e = e_2 - e_1 = 2885,5 - 1211,91 = 1673,59 \text{ Па}, \quad (5)$$

где e_1 – действительное парциальное давление над образцом при температуре $t = 23,44 \text{ }^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $\varphi = 42\%$, e_2 – действительное парциальное давление под образцом при температуре $t = 23,44 \text{ }^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $\varphi = 100\%$.

Сопротивление паропроницанию:

$$R = \frac{\Delta e}{q} - \frac{\delta_a}{\mu_a} = \frac{1673,59}{3151,71} - 0,0143 = 0,516 \text{ м}^2 \times \text{ч} \times \text{Па/мг}, \quad (6)$$

где $\frac{\delta_a}{\mu_a}$ – сопротивление паропроницанию слоя воздуха в 1 см.

Коэффициент паропроницаемости:

$$\mu = \frac{\delta}{R} = \frac{0,05815}{0,516} = 0,11 \text{ мг/м} \times \text{ч} \times \text{Па}, \quad (7)$$

где δ – толщина образца в метрах.

Пенопласт ($8,9 \text{ кг/м}^3$) по ГОСТ Р ЕН 12086:

Потеря массы установки в сутки:

$$\Delta m = 808,95 \text{ мг.} \quad (8)$$

Плотность потока пара:

$$q = 2188,71 \text{ мг/м}^2 \times \text{ч}. \quad (9)$$

Разность парциальных давлений между внутренней и наружной поверхностями образца:

$$\Delta e = 1673,59 \text{ Па}. \quad (10)$$

Сопrotивление паропроницанию:

$$R = 0,7503 \text{ м}^2\text{ч}\times\text{Па}/\text{мг}. \quad (11)$$

Коэффициент паропроницаемости:

$$\mu = \frac{\delta}{R} = \frac{0,035}{0,7503} = 0,0466 \text{ мг}/\text{м}\times\text{ч}\times\text{Па}, \quad (12)$$

где δ – толщина образца в метрах.

Ячеистый бетон плотностью 400 кг/м³ в неизотермических условиях:

Потеря массы установки за 7 суток:

$$\Delta m = \Delta m_1 - \Delta m_2 = 3211,44 - 3208,71 = 2,73 \text{ г} = 2730 \text{ мг}. \quad (13)$$

Плотность потока пара:

$$q = \frac{\Delta m}{t \times S} = \frac{2730}{168 \times 0,0127} = 1279,526 \text{ мг}/\text{м}^2 \times \text{ч}, \quad (14)$$

где t – время между взвешиваниями в часах, S – площадь поверхности испарения образца, м².

Разность парциальных давлений между внутренней и наружной поверхностями образца:

$$\Delta e = e_2 - e_1 = 1971,288 - 156,54 = 1814,749 \text{ Па}, \quad (15)$$

где e_1 – действительное парциальное давление над образцом при температуре $t = -1,5$ °C и относительной влажности воздуха $\varphi = 28,5$ %, e_2 – действительное парциальное давление под образцом при температуре $t = 20$ °C и относительной влажности воздуха $\varphi = 85$ %.

Сопrotивление паропроницанию:

$$R = \frac{\Delta e}{q} - \frac{\delta_g}{\mu_g} = \frac{1814,7486}{1279,526} - 0,0143 = 1,404 \text{ м}^2\text{ч}\times\text{Па}/\text{мг}, \quad (16)$$

где $\frac{\delta_g}{\mu_g}$ – сопротивление паропроницанию слоя воздуха в 1 см.

Коэффициент паропроницаемости:

$$\mu = \frac{\delta}{R} = \frac{0,1032}{1,404} = 0,0735 \text{ мг}/\text{м}\times\text{ч}\times\text{Па}, \quad (17)$$

где δ – толщина образца в метрах.

Конструкция «а»:

Потеря массы установки «а» в сутки:

$$\Delta m = 700 \text{ мг}. \quad (18)$$

Плотность потока пара:

$$q = 1944,4 \text{ мг}/\text{м}^2 \times \text{ч}. \quad (19)$$

Разность парциальных давлений между внутренней и наружной поверхностями образца:

$$\Delta e = 2252,272 \text{ Па}. \quad (20)$$

Сопrotивление паропроницанию:

$$R = 1,144 \text{ м}^2\text{ч}\times\text{Па}/\text{мг}. \quad (21)$$

Коэффициент паропроницаемости:

$$\mu = \frac{\delta}{R} = \frac{0,065}{1,144} = 0,057 \text{ мг}/\text{м}\times\text{ч}\times\text{Па}, \quad (22)$$

где δ – толщина образца в метрах.

Конструкция «б»:

Потеря массы установки «б» в сутки:

$$\Delta m = 935 \text{ мг}. \quad (23)$$

Плотность потока пара:

$$q = 2597,22 \text{ мг}/\text{м}^2 \times \text{ч}. \quad (24)$$

Разность парциальных давлений между внутренней и наружной поверхностями образца:

$$\Delta e = 2252,272 \text{ Па}. \quad (25)$$

Сопrotивление паропроницанию:

$$R = 0,853 \text{ м}^2\text{ч}\times\text{Па}/\text{мг}. \quad (26)$$

Коэффициент паропроницаемости:

$$\mu = \frac{\delta}{R} = \frac{0,0641}{0,853} = \mathbf{0,075} \text{ мг/м} \times \text{ч} \times \text{Па}, \quad (27)$$

где δ – толщина образца в метрах.

Результаты расчета занесены в таблицу.

Таблица

Характеристики паропроницаемости испытанных конструкций

	Конструкция «а»	Конструкция «б»	по ГОСТ		ячеистый бетон в неизот-их условиях
			ячеистый бетон	пенопласт	
$R_{по},$ ($\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{Па}$)/мг	1,44	0,853	0,516	0,75	1,404
$\mu,$ мг/($\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{Па}$)	0,057	0,075	0,11	0,047	0,074

Анализ испытаний конструкций «а» и «б» позволяет предположить, что разница в значениях их паропроницаемости следует из различных влажностных условий образцов. Средняя относительная влажность воздуха в порах ячеистого бетона конструкции «б» равна 86 %, в то время как ячеистого бетона конструкции «а» – 48,6 %. Так повышенная сорбционная влажность образца ячеистого бетона конструкции «б» привела к образованию в его порах пленочной влаги, что могло изменить механизм переноса влаги.

Испытание ячеистого бетона в неизотермических условиях показало снижение паропроницаемости ($\mu = 0,074$ мг/($\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{Па}$)) относительно значения (μ) в изотермических условиях ($\mu = 0,11$ мг/($\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{Па}$)), что требует дополнительного исследования и научного обоснования.

Результаты испытаний показывают, что паропроницаемость материала (μ) значительно изменяется в зависимости от условий испытаний, и может отличаться в различных типах ограждающих конструкций. Влажность материала, градиент температуры и расположение слоев в конструкции вносят существенный вклад в механизм влагопереноса, что позволяет говорить о необходимости применять в расчетах коэффициенты паропроницаемости (μ) полученные с учетом конкретных температурно-влажностных режимов эксплуатации.

Список библиографических ссылок

1. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.
2. Перехоженцев А.Г. Вопросы теории и расчета влажностного состояния неоднородных участков ограждающих конструкций зданий. – Волгоград: ВолГАСА, 1997. – 273 с.
3. Перехоженцев А.Г. Теоретические основы и методы расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций зданий // Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т. – Волгоград: ВолГАСУ, 2008. – 212 с.
4. Корниенко С.В. Температурно-влажностный режим наружных стен с вентилируемым фасадом // Пром. и гражд. стро-во, 2009, № 10. – С. 43-45.
5. Hens H. Heat-Air-Moisture Transport, 2nd Volume: Measurements and Implications in Buildings. – J. ASTM Intl., 2 vol., STP1519-EB, 2010. – 248 p.
6. Hens H. Vapor Permeability Measurements: Impact of Cup Sealing, Edge Correction, Flow Direction, and Mean Relative Humidity // Journal of ASTM International, Vol. 6, Issue 9 2009 (October 2009).
7. Ильинский В.М. Коэффициенты переноса водяного пара для расчета влажностного состояния ограждающих конструкций зданий // Инж.-физ. Журнал. – М., 1965, т. 8, № 2. – С. 223-228.
8. Плоский В. Строительная теплофизика. – М.: 1966. – 352 с.

9. Хелемский А.М. Исследование пароизоляционных материалов и покрытий ограждающих конструкций холодильников // Автореф. дис. канд. техн. наук, – Одесса, ОТИХП, 1970. – 38 с.
10. Иванцов А.И., Куприянов В.Н. Режим эксплуатации многослойных стеновых ограждающих конструкций, как основа прогнозирования их срока службы // Известия КГАСУ, 2014, № 3 (29). – С. 32-40.
11. Куприянов В.Н., Петров А.С. Паропроницаемость материалов в условиях, приближенных к эксплуатационным // Известия КГАСУ, 2013, № 2 (24). – С. 126-131.
12. Куприянов В.Н., Петров А.С. Устройство для измерения паропроницаемости строительных материалов // Патент на полезную модель № 128718, Заявка: 2012155972/28, 21.12.2012.

Petrov A.S. – assistant

E-mail: ruarty@mail.ru

Kupriyanov V.N. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: kupriyanov@kgasu.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Influence of temperature and moist operating conditions of construction materials on their vapor permeability

Resume

Moisture vapor diffusion process can lead to moistening of the enclosing structure and reduce its thermal characteristics. These processes have been studied for many years, but there is still a number of unexplored issues. One of them – variability of vapor permeability depending on operating conditions, such as humidity and temperature. The researches made in this area only establish dependence of vapor permeability on temperature and moist conditions, however do not give theoretical justification to these dependences and are not put into practice. So in engineering calculations to ensure the protection of the enclosing structure waterlogged vapor permeability coefficient is assumed constant. In article results of pilot research of vapor permeability of materials taking into account temperature and moist conditions of samples are analyzed. It is proved that vapor permeability of construction materials (μ) changes depending on humidity, temperature and arrangement of material layers of design. Need of measurement of vapor permeability of construction materials for the broad range of temperature and moist conditions are confirmed.

Keywords: vapor permeability, moisture, condensation, temperature, enclosing structures.

Reference list

1. Fokin K.F. Construction heat engineering of the protecting parts of buildings. – M.: AVOK-PRESS, 2006. – 256 p.
2. Perekhozhentsev A.G. Questions of the theory and calculation of moist condition of heterogeneous sites of the protecting designs of buildings. – Volgograd: VOLGASA, 1997. – 273 p.
3. Perekhozhentsev A.G. Theoretical bases and methods of calculation of temperature moisture conditions of the protecting designs of buildings // Volgogr. the state. un-ty of architecture and engineering. – Volgograd: VOLGASU, 2008. – 212 p.
4. Korniyenko S. V. Temperature moisture conditions of external walls with the ventilated facade // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo, 2009, № 10. – P. 43-45.
5. Hens H. Heat-Air-Moisture Transport, 2nd Volume: Measurements and Implications in Buildings. – J. ASTM Intl., 2 vol., STP1519-EB, 2010. – 248 p.
6. Hens H. Vapor Permeability Measurements: Impact of Cup Sealing, Edge Correction, Flow Direction, and Mean Relative Humidity // Journal of ASTM International, Vol. 6, Issue 9, 2009 (October 2009).

7. Ilyinsky V.M. Coefficients of transfer of water vapor for calculation of moist condition of the protecting designs of buildings // Journal of Engineering Physics. – М., 1965, т. 8, № 2. – P. 223-228.
8. Plonsky V. Construction thermophysics. – М., 1966. – 352 p.
9. Helemsky A.M. Vapor barrier materials and coatings walling refrigerators research // Abstract of dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. – Odessa, Odessa Technological Institute of Food and refrigeration industry, 1970. – 38 p.
10. Ivantsov A.I., Kupriyanov V.N. Operative conditions of the sandwich wall protecting constructions as basis of forecasting of their life cycle // News of the KSUAE, 2014, № 3 (29). – P. 32-40.
11. Kupriyanov V.N., Petrov A.S. Water vapor permeability of materials under actual operating conditions // News of the KSUAE, 2013, № 2 (24). – P. 126-131.
12. Kupriyanov V.N., Petrov A.S. Vapor permeability of building materials measuring device // the Patent for useful model № 128718, the Request: 2012155972/28, 21.12.2012.