

УДК 691.33

Куприянов В.Н. – доктор технических наук, профессор

E-mail: kuprivan@kgasu.ru

Петров А.С. – аспирант

E-mail: ortemk@me.com

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

## Паропроницаемость материалов в условиях, приближенных к эксплуатационным

### Аннотация

В работе исследуются закономерности процесса паропереноса через ограждающую конструкцию, моделируя ее реальные эксплуатационные условия, что позволяет получить наиболее адекватные результаты. В отличие от общепринятых методов измерения паропроницаемости строительных материалов, в данной работе описывается методика, учитывающая движение воздуха над образцом. Первые результаты эксперимента наглядно показывают, что существующие стандартные методы измерения паропроницаемости сильно упрощены и требуют научного развития.

**Ключевые слова:** паропроницаемость, ограждающие конструкции, теплоизоляционные материалы, ветровой поток.

Известно, что разность парциальных давлений водяного пара во внутреннем и наружном воздухе вызывает диффузию водяного пара через ограждающую конструкцию. В зимние месяцы процесс диффузии протекает наиболее интенсивно, в летний период ослабевает и может прекратиться совсем. Исследованию процессов паропроницания в материалах и ограждающих конструкциях посвящено большое число работ как отечественных, так и зарубежных авторов. Первые научные исследования были сделаны В.Д. Мачинским для выявления роли диффузии и конденсации водяного пара в ограждении. Метод прогнозирования влажностного состояния ограждающих конструкций в стационарных температурно-влажностных условиях был разработан К.Ф. Фокиным. Впоследствии исследованием разнообразных аспектов состояния и переноса влаги в строительных материалах занимались О.Е. Власов, Р.Е. Брилинг, А.У. Франчук, Э.Х. Одельской, Ф.В. Упсков, В.Н. Богословский, А.В. Лыков, С.В. Александровский, В.М. Ильинский, Б.Ф. Васильев, А.И. Фоломин, В.И. Лукьянов, А.Г. Перехоженцев, В.Г. Гагарин, А.П. Васьковский, Е.И. Тертичников, В.В. Козлов и др. Однако многие аспекты закономерностей паропроницания в ограждающих конструкциях требуют дальнейших исследований.

При расчетах паропроницаемости и увлажнения ограждающих конструкций конденсированной влагой в [1, 2, 7-10] используют коэффициенты паропроницаемости материалов ( $\mu$ ), приведенные в справочных таблицах. Эти значения  $\mu$  получены испытанием материалов по методикам государственных стандартов [3-6]. Во всех методах испытаний образец находится в постоянных температурно-влажностных условиях. Различие состоит в схеме движения водяного пара. В первом случае при так называемом сухом методе водяной пар проходит через образец из влажного воздуха в чашку с влагопоглотителем, где влажность воздуха приближается к нулю. Во втором случае (мокрый метод) водяной пар из чашки с водой, где влажность воздуха близка к 100 %, проходит через образец в воздух, имеющий меньшую влажность. Эти схемы испытаний представлены на рис. 1.

В обеих схемах испытания образцы находятся в спокойном воздухе, в то время как в ограждениях зданий наружная поверхность (то есть поверхность испарения) подвергается воздействию ветра. Особенно это проявляется в вентилируемых фасадах, когда в воздушной прослойке по наружной поверхности утеплителя движется гравитационный поток воздуха. В дополнение к этому следует отметить, что разность температур по наружной и внутренней сторонах утеплителя может достигать десятка градусов. То есть помимо молекулярной диффузии в реальных эксплуатационных условиях существуют явления турбулентной диффузии и термодиффузии.

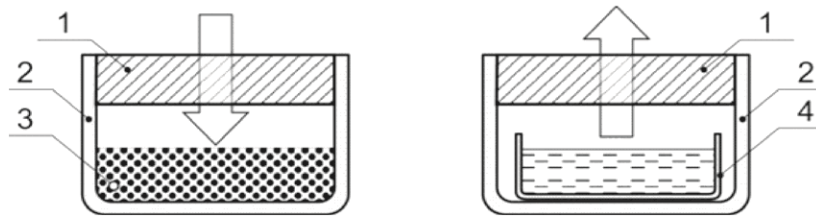


Рис. 1. Стандартные схемы определения паропроницаемости материалов  
1 – образец материала, 2 – чашка, 3 – влагопоглотитель, 4 – кювета с водой.  
Стрелкой показано направление движения водяного пара

Из этого следует, что стандартные методы определения паропроницаемости материалов не моделируют условий их эксплуатации в ограждающих конструкциях и можно высказать предположение о некорректности использования коэффициента паропроницаемости  $\mu$  из справочных таблиц при расчетах влажности материалов в ограждениях.

В таких отраслях техники, как производство одежды, тканей, искусственной кожи и т.п., есть опыт моделирования эксплуатационных условий при оценке паропроницаемости материалов [ГОСТ 22900-78]. Для измерения паропроницаемости материалов разработано большое количество нестандартных устройств, позволяющих моделировать специальные эксплуатационные условия.

Изучение этого опыта позволило создать лабораторную установку [11] по определению паропроницаемости материалов, в которой моделируется ветровой поток над поверхностью испарения и разность температур на разных поверхностях образца (рис. 2). Установка позволяет изменять условия паропроницаемости образцов: устанавливать перепад температур по разным поверхностям образца, а над поверхностью испарения образца создавать воздушный поток и регулировать его скорость. Количество испаряющейся через образец парообразной влаги фиксируется электронными весами в непрерывном режиме.

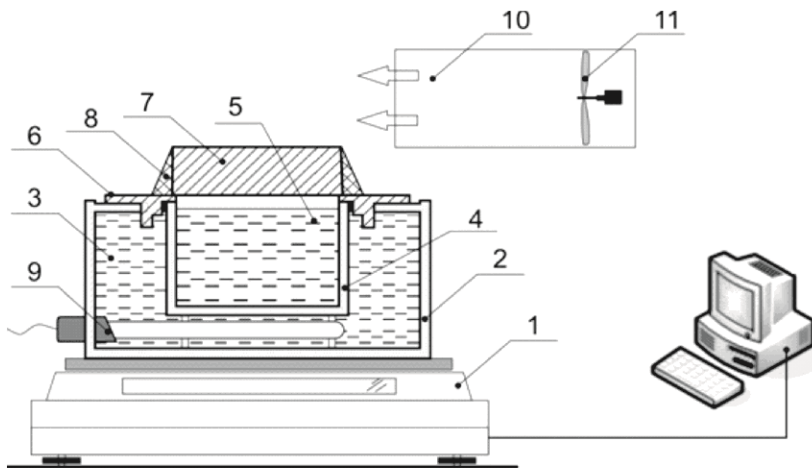


Рис. 2. Схема установки по определению характеристик паропроницаемости материалов с моделированием эксплуатационных воздействий: 1 – электронные весы, 2 – жидкостной термостат, 3 – специальная жидкость, 4 – чашка, 5 – вода, 6 – обойма, 7 – образец, 8 – герметизирующий состав, 9 – регулятор температуры, 10 – аэродинамическая труба, 11 – вентилятор

Результаты измерений передаются на компьютер и обрабатываются в автоматическом режиме. Результат измерений представляется в виде таблиц, графиков или в виде характеристик паропроницаемости: потери массы, коэффициента паропроницаемости  $\mu$  или сопротивления паропроницаению  $R$ .

В настоящей статье представлены результаты исследования волокнистого теплоизоляционного материала Rockwool с плотностью  $90 \text{ кг/м}^3$ , газобетона плотностью  $400 \text{ кг/м}^3$  и пенополистирола плотностью  $8 \text{ кг/м}^3$ .

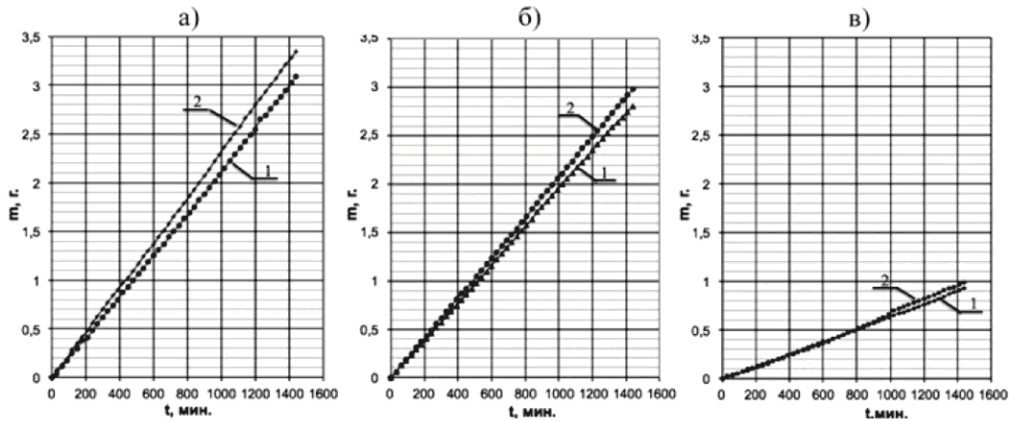


Рис. 3. Скорость испарения по времени:  
 а) минеральная вата; б) газобетон; в) пенополистирол;  
 1 – без движения воздуха над образцом; 2 – с движением воздуха над образцом

Испытания образца материала утеплителя Rockwool диаметром 12 см, толщиной 5 см проведены при температуре 20-20,6 °С, влажность воздуха над образцом изменялась в пределах 50-52 %. При этих температурно-влажностных условиях упругость водяного пара внутри чашки с водой (при 100 % влажности) будет равна  $E=2338$  Па (предел насыщения при температуре 20°С). В помещении лаборатории  $e=2338(51/100)=1192$  Па. То есть образец находится под разностью давлений  $\Delta e=(E-e)=2338-1192=1146$  Па.

Испытания газобетона толщиной 3,4 см проведены при температуре 21,6-21,7 °С, влажность воздуха над образцом 36,7 %. При этих температурно-влажностных условиях упругость водяного пара внутри чашки с водой (при 100 % влажности) будет равна  $E=2586,94$  Па (предел насыщения при температуре 21,65°С). В помещении лаборатории  $e=2586,94(36,7/100)=935,44$  Па. То есть образец находится под разностью давлений  $\Delta e=(E-e)=2586,94-935,44=1651,5$  Па.

Испытания пенополистирола толщиной 4 см проведены при температуре 24,4-24,7 °С, влажность воздуха над образцом колебалась в пределах 16,2-16,9 %. При этих температурно-влажностных условиях упругость водяного пара внутри чашки с водой (при 100 % влажности) будет равна  $E=3072,56$  Па (предел насыщения при температуре 24,55 °С). В помещении лаборатории  $e=3072,56(16,55/100)=508,51$  Па. То есть образец находится под разностью давлений  $\Delta e=(E-e)=3072,56-508,51=2564,05$  Па.

Испытания проведены без движения воздуха над образцом и со скоростью воздушного потока над образцом – 0,2 м/с. Характерная скорость движения воздуха в вентилируемой прослойке навесных фасадов 0,2~1 м/с.

На рис. 3 представлены сравнительные данные по скорости испарения парообразной влаги испытанных материалов. Можно видеть, что за сутки (1440 мин.) через образец минеральной ваты без движения воздуха над ним прошло 3,09 г. влаги, а с движением воздуха – 3,35 г., через образец газобетона 2,71 и 2,99 и через образец пенопласта 0,9725 и 0,99 г. соответственно. Можно видеть, что скорость испарения с потоком воздуха над поверхностью испарения возросла.

Данные эксперимента позволяют рассчитать различные характеристики паропроницаемости испытанных материалов.

Минеральная вата:

1. Плотность потока водяного пара через образец ( $q$ ):

$$q = \frac{\Delta m}{\Delta \tau \cdot F}, \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{час}), \quad (1)$$

где  $\Delta m$  – количество парообразной влаги, прошедшей через образец за время  $\Delta \tau$ , мг (уменьшение массы чашки),  $F$  – площадь образца,  $\text{м}^2$ .

– без потока воздуха над образцом:

$$q_1 = \frac{3090}{24 \cdot 0,0113} = 11393,8, \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{час});$$

– с потоком воздуха над образцом:

$$q_2 = \frac{3350}{24 \cdot 0,0113} = 12352,5, \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{час}).$$

2. Сопротивление паропрооницанию ( $R$ ):

$$R = \frac{\Delta e}{q} - \frac{\delta_B}{\mu_B}, \text{ (м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{Па)/мг}, \quad (2)$$

где  $\delta_B$  – расстояние от уровня воды до нижней плоскости образца (толщина слоя воздуха), равное 0,01 м,  $\mu_B$  – паропрооницаемость воздуха равная 1,01 мг/(м·час·Па);

– без потока воздуха над образцом:

$$R_1 = \frac{\Delta e}{q_1} - \frac{\delta_B}{\mu_B} = \frac{1146}{11393,8} - \frac{0,01}{1,01} = 0,0906, \text{ (м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{Па)/мг};$$

– с потоком воздуха над образцом:

$$R_2 = \frac{\Delta e}{q_2} - \frac{\delta_B}{\mu_B} = \frac{1146}{12352,5} - \frac{0,01}{1,01} = 0,0828, \text{ (м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{Па)/мг}.$$

3. Коэффициент паропрооницаемости ( $\mu$ ):

$$\mu = \frac{\delta}{R}, \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{Па}), \quad (3)$$

где  $\delta$  – толщина образца, м.

– без потока воздуха над образцом:

$$\mu_1 = \frac{\delta}{R_1} = \frac{0,05}{0,0906} = 0,552, \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{Па});$$

– с потоком воздуха над образцом:

$$\mu_2 = \frac{\delta}{R_2} = \frac{0,05}{0,0828} = 0,604, \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{Па});$$

Газобетон:

– без потока воздуха:

$$\begin{aligned} q_1 &= 9202,662 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{час}); \\ R_1 &= 0,1696 \text{ (м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{Па)/мг}; \\ \mu_1 &= 0,200 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{Па}). \end{aligned}$$

– с потоком воздуха:

$$\begin{aligned} q_2 &= 10153,491 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{час}); \\ R_2 &= 0,153 \text{ (м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{Па)/мг}; \\ \mu_2 &= 0,222 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{Па}). \end{aligned}$$

Пенополистирол:

– без потока воздуха:

$$\begin{aligned} q_1 &= 3294,38 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{час}); \\ R_1 &= 0,764 \text{ (м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{Па)/мг}; \\ \mu_1 &= 0,0523 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{Па}). \end{aligned}$$

– с потоком воздуха:

$$\begin{aligned} q_2 &= 3361,86 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{час}); \\ R_2 &= 0,759 \text{ (м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{Па)/мг}; \\ \mu_2 &= 0,053 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{Па}). \end{aligned}$$

Таким образом, сопоставление двух коэффициентов паропрооницаемости показывает, что поток воздуха над образцом со скоростью 0,2 м/с увеличивает коэффициент паропрооницаемости минераловатного утеплителя на 9,4 %, газобетона на 9,1 %, материала из пенополистирола на 1,32 %.

По-видимому, вблизи поверхности испарения концентрация водяного пара выше, чем в помещении, что затрудняет процесс паропрооницания в стационарных условиях. При действии ветрового потока концентрация водяного пара вблизи поверхности испарения снижается и становится равной концентрации водяного пара в помещении, что и влияет на увеличение коэффициента паропрооницаемости.

Программное обеспечение позволяет автоматически рассчитывать коэффициент паропроницаемости испытываемого материала и строить график изменения его величины во времени. На рис. 4 представлены графики изменения коэффициента паропроницаемости минераловатного утеплителя после установления стационарного режима (на четвертые сутки испытаний). Из рис. 4 видно, что в течение суток при сохранении средних величин ( $\mu$ ) фактические значения коэффициента паропроницаемости испытывают колебания как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Причем более частые колебания наблюдаются в случае воздушного потока над образцом. Аналогичные данные получены при испытании газобетона и пенополистирола.

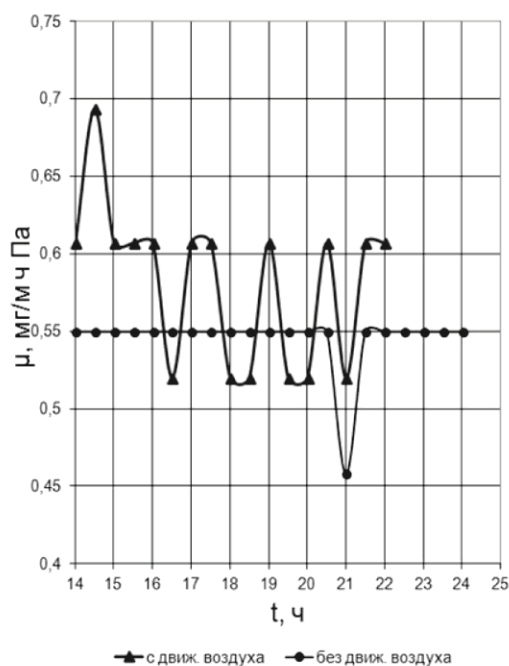


Рис. 4. Изменение коэффициента паропроницаемости во времени

Из этого следует, что процесс паропроницания материалов не является простым и однозначным. По-видимому, объяснить колебания коэффициента паропроницаемости на имеющемся экспериментальном материале не представляется возможным, необходимо продолжить исследования других материалов и при других режимах испытаний.

### Список литературы

1. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий.
2. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий.
3. ГОСТ 25898-83. Материалы и изделия строительные. Методы определения сопротивления паропроницанию.
4. ГОСТ 28575-90. Конструкции бетонные и железобетонные. Испытание паропроницаемости защитных покрытий.
5. ГОСТ Р ЕН 12086. Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения характеристик паропроницаемости.
6. ASTM E-96. Standard test methods for water vapor transmission of materials.
7. Рекомендации по проектированию и применению для строительства и реконструкции зданий в г. Москве фасадной системы с вентилируемым воздушным зазором «U-кон».
8. Фасадная система «Полиалпан». Рекомендации по проектированию и применению для строительства и реконструкции зданий. ОАО ЦНИИЭП Жилища, 2003.
9. Рекомендации по проектированию навесных фасадных систем с вентилируемым воздушным зазором для нового строительства и реконструкции зданий. Правительство Москвы, Москомархитектура, 2002.

10. Рекомендации по составу и содержанию документов и материалов, предоставляемых для технической оценки пригодности продукции. Фасадные теплоизоляционные системы с воздушным зазором.
11. Решение о выдаче патента на полезную модель по заявке № 2012155972/28(088561). Дата подачи заявки 21.12.2012. Авторы: Куприянов В.Н., Петров А.С.

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

E-mail: kupriyan@kgasu.ru

**Petrov A.S.** – post-graduate student

E-mail: ortemk@me.com

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

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

### Water vapor permeability of materials under actual operating conditions

#### Resume

This article discusses methods for determining the water vapor permeability of building materials, and indicates the need for testing of materials under actual operating conditions. The article is devoted to the experimental study of water vapor permeability considering wind effects on the surface of the test specimens. Understanding the process of water vapor permeability interconnected with real operating conditions of enclosing structure, will enable proper evaluation and prediction of water vapor permeability of the assembly, which guarantees the preservation of its thermal characteristics and durability. The authors developed an experimental setup that simulates actual operating conditions of a wall structure. A distinctive feature of the method described in the article is that it allows to analyze the kinetics of water vapor permeability considering the movement of air at the surface of the sample. The obtained results of a study of some insulating materials presented in the article talking about the need of scientific development on this issue.

**Key words:** water vapor permeability, building envelope, mineral wool, aerated concrete, Styrofoam, wind flow.

#### References

1. SNIP 23-02-2003. Thermal protection of buildings.
2. Set of rules 23-101-2004. Design of thermal protection of buildings.
3. GOST 25898-83. Materials and products. Methods for determination of the resistance to water vapor transmission.
4. GOST 28575-90. Concrete and reinforced concrete design. Vapor permeability test of protective coatings.
5. GOST R EH 12086. Thermal insulation products for building applications. Method for determining the water vapor permeability.
6. ASTM E-96. Standard test methods for water vapor transmission of materials.
7. Recommendations for the design and application for the construction and reconstruction of buildings in Moscow facade system with ventilated air gap «U-kon».
8. The facade system «Polialpan». Recommendations for the design and application for the construction and renovation of buildings. Open Joint Stock Company CNIIEP Dwellings, 2003.
9. Recommendations for the design of systems with hinged front ventilated air gap for new construction and renovation projects. The Government of Moscow, Moskomarkhitektura, 2002.
10. Recommendations on the composition and content of the documents and materials submitted for technical evaluation of the suitability of products. Facade insulation systems with an air gap.
11. The decision to grant a patent for utility model application number 2012155972/28 (088561). Filing Date 21/12/2012. Authors: V.N. Kupriyanov, A.S. Petrov.