

УДК 692:536.2

**А. Г. Перехоженцев**

*Волгоградский государственный технический университет*

## **ДИФфуЗИЯ ВЛАГИ В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ В ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА**

Приводятся результаты лабораторных исследований диффузии влаги в капиллярно-пористых строительных материалах в зависимости от температуры. Выявлено, что в холодный период года при понижении температуры воздуха ниже  $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$  в результате увеличения примерно на 80 % вязкости воды практически прекращается диффузия жидкой фазы влаги. Это позволяет считать приемлемыми методы расчета влажностного состояния наружных ограждений зданий, основанные на паропроницаемости. Показаны условия образования плоскости возможной конденсации влаги при нормальных условиях эксплуатации помещения.

**Ключевые слова:** ограждающие конструкции зданий, диффузия влаги и вязкость воды от температуры, плоскость возможной конденсации влаги.

### **Введение**

Наступила осень, чаще идут дожди, понизилась среднесуточная температура воздуха. Мы наблюдаем разноцветие осенних деревьев, листья которых постепенно засыхают и опадают. Наступает красивое природное явление «осенний листопад». Рассмотрим причину этого явления с точки зрения диффузии влаги в древесных растениях в зависимости от температуры. Известно, что влага — неотъемлемый фактор жизни растений. Источником влаги является влажный грунт, из которого через корневую систему вода по капиллярам доставляется по всему дереву. Однако с наступлением осеннего похолодания, несмотря на то, что грунт хорошо увлажнен осенними дождями, листья высыхают, желтеют и опадают. Что же является причиной этого явления? Покажем, что основной причиной листопада является уменьшение диффузии влаги по капиллярам при понижении температуры ниже  $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , т. е. задолго до морозов влага перестает поступать к листьям, поэтому они высыхают и опадают. Предполагаем, что аналогичные процессы происходят в ограждающих конструкциях зданий в холодный период года. В отличие от существующих представлений<sup>1</sup> [1], что в холодный период года происходит диффузия капиллярной влаги в конструкциях под действием градиентов температуры и парциальных давлений [2—4], покажем, что в холодный период года диффузия капельно-жидкой влаги практически отсутствует.

### **Влажностное состояние наружных ограждений зданий**

В данной статье под диффузией подразумевается перемещение влаги в капиллярно-пористых материалах под действием градиентов температуры и парциальных давлений водяных паров. Вопрос состоит в степени влияния капиллярной диффузии жидкой фазы влаги в наружных ограждениях зданий

<sup>1</sup> СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. М.: Минрегионразвития России, 2012. 139 с.

СП 345.1325800.2017. Здания жилые и общественные. Правила проектирования тепловой защиты. М.: Минстрой РФ, 2017. 45 с.

в холодный период года. Переувлажнение конструкций в холодный период приводит к увеличению теплопотерь через ограждение, а накопление влаги в зоне резких колебаний температуры приводит к разрушению переувлажненных слоев в результате попеременного замерзания и оттаивания. Таким образом, основным временем, влияющим на теплопотери и долговечность конструкций, является холодный период года. В теплый период эти проблемы не актуальны. Однако следует уточнить, какой период года в данной статье принят холодным, а какой теплым, т. к. в разделе 8 «Защита от переувлажнения наружных ограждающих конструкций зданий» действующих норм по проектированию теплозащиты зданий СП 50<sup>2</sup> влажностный режим конструкции рассматривают в годовом цикле, выделяя температуры осеннего периода от +5 до -5 °С, зимнего периода — ниже -5 °С, весеннего — от -5 до +5 °С и летнего — выше +5 °С. При этом за расчетную температуру зимнего периода принимают среднемесячные температуры ниже 0 °С. Такое деление на климатические периоды не согласуется с действующими СП 131<sup>3</sup>, где выделены два периода: холодный — при понижении средней температуры пятидневки ниже +8 °С, т. е. начало отопительного периода, и теплый — при температуре выше +8 °С, окончание отопительного периода. Эти нормы более точно, с обеспеченностью 0,94 (табл. 3.1 ст. 6) определяют температуру наиболее холодного периода<sup>4</sup>. В нашем случае деление на климатические периоды приняты в соответствии с СП 131.

Рассмотрим результаты лабораторных исследований зависимости коэффициентов диффузии влаги во влажных капиллярно-пористых строительных материалах от температуры в широком диапазоне увлажнения — от полного водонасыщения до равновесного состояния с окружающей средой. На рисунке 1 представлены результаты исследования изменения коэффициентов диффузии влаги цементно-песчаного раствора при температурах +20, +7, -1,2, -5, -10, -20 °С [5].

При постоянной температуре +20 °С в процессе испарения влаги происходит изменение коэффициента диффузии от  $0,03 \cdot 10^{-6}$  до  $0,003 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/ч, т. е. в 10 раз. По мере освобождения пор от жидкой фазы влаги увеличивается диффузия паробразной влаги до  $0,02 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/ч [6, 7].

Таким образом, при температуре +20 °С, как следует из результатов исследований (рис. 1), виден процесс изменения коэффициента диффузии в широком диапазоне изменения влагосодержания материала от максимального до равновесного с окружающей средой. Однако при температуре от +7 °С и ниже абсолютные значения коэффициентов диффузии уменьшились на порядок по сравнению с минимальными значениями при температуре +20 °С, т. е. при понижении температуры ниже +8 °С диффузия капиллярной влаги в капиллярно-пористых телах практически прекращается [8].

По всей видимости, причиной резкого уменьшения диффузии влаги при понижении температуры ниже +8 °С в строительных материалах является увеличение кинематической вязкости жидкой фазы влаги с понижением тем-

<sup>2</sup> СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. М.: Минрегионразвития России, 2012. 139 с.

<sup>3</sup> СП 131.13330.2012. Строительная климатология. М.: Минрегионразвития, 2012. 145 с.

<sup>4</sup> Там же.

пературы, т. е. та же, что и у осеннего листопада. Так, если при температуре  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  вязкость воды равна примерно  $\eta = 1,0 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$ , то при  $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$  вязкость увеличивается до  $\eta = 1,43 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$  (на 79,9 %), при этом диффузия влаги соответственно уменьшается примерно на 80 %. Так как при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  вязкость равна  $\eta = 1,79 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$ , жидкая фаза влаги замерзает, капиллярное движение практически прекращается [9]. Поэтому и листья на деревьях увядают, поскольку к ним не поступает влага уже при температуре ниже  $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

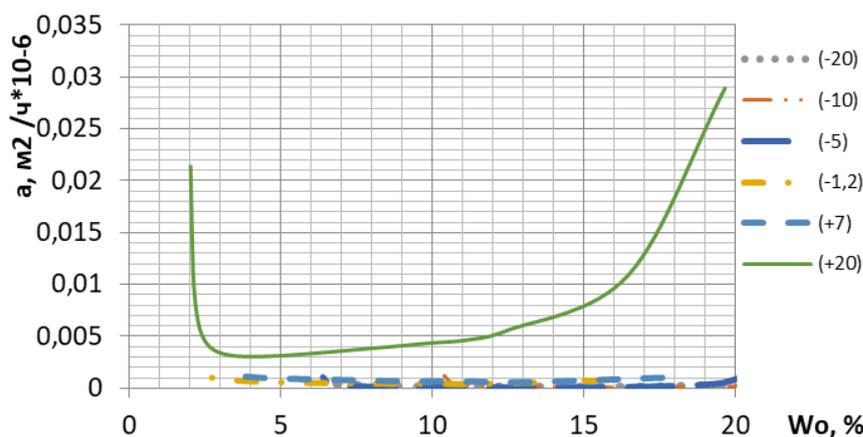


Рис. 1. Изменение коэффициента диффузии влаги цементно-песчаного раствора в широком диапазоне влагосодержаний при разных температурах

Итак, с наступлением холодного периода при понижении температуры ниже  $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$  деревья листья сбросили и отдыхают, а наружные ограждающие конструкции зданий начинают трудиться, т. к. при указанной температуре включают отопление, образуются градиенты температуры и парциальных давлений водяных паров. Внутренняя часть конструкции прогревается, т. е. находится при положительных температурах, остальная — при отрицательных. Следовательно, конструкция работает при довольно сложном температурно-влажностном режиме.

Рассмотрим, при каких условиях эксплуатации наружных ограждений зданий при понижении температуры ниже точки росы в некоторых слоях ограждающих конструкций возможна термическая конденсация влаги, т. е. увлажнение конструкции жидкой фазой влаги [10, 11].

Представим ситуацию, в которой может возникнуть термическая конденсация влаги для ограждающей конструкции в помещении с нормальными условиями эксплуатации — с температурой внутреннего воздуха  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и относительной влажностью 60 %. Парциальное давление насыщенного пара воды (максимальная упругость водяного пара) при данной температуре составляет  $E = 2338\text{ Па}$  и, соответственно действительная упругость водяных паров при влажности 60 % равна  $e_n = 2338 \cdot 0,6 = 1403\text{ Па}$ .

На рисунке 2 представлен график кривой зависимости максимальной упругости водяного пара от температуры ( $E, e$ ), построенный по табличным значениям. Для определения температуры, при которой возможна конденсация водяных паров, т. е. появление жидкой фазы в капиллярах, проведем ка-

сательную ( $k$ ) к этой кривой из точки  $e_n = 1403$  Па, в точке касания которой действительная упругость будет равна максимальному значению,  $e_n = E$ . На рисунке можно отметить, что точка касания находится в промежутке между температурой 0 и  $-5$  °С.

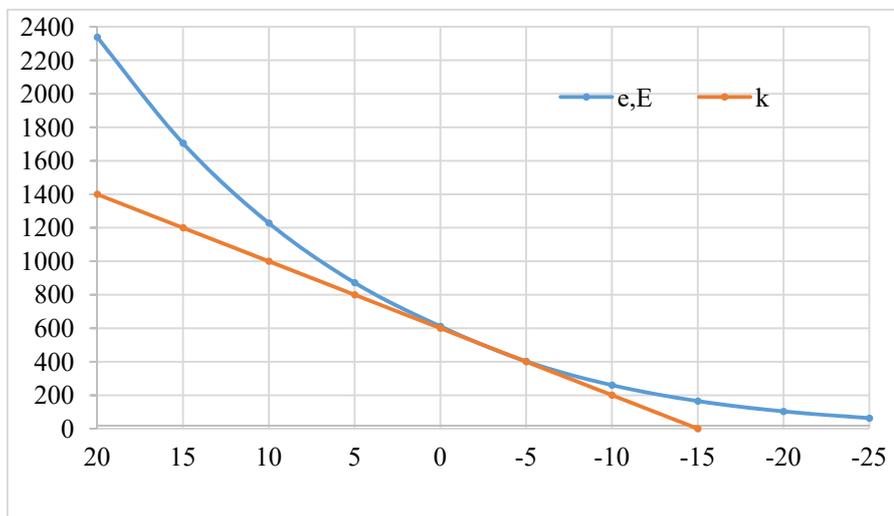


Рис. 2. Зависимость парциального давления насыщенного пара воды от температуры

Для более точного определения точки касания представим кривую максимальной упругости в виде полинома третьей степени, описывающего данную кривую с погрешностью менее 2 % [12, 13]:

$$E = 0,019t^3 + 1,52t^2 + 48t + 611. \quad (1)$$

Первая производная уравнения (1) представляет собой уравнение касательной к данной функции:

$$\Delta E = 0,057t^2 + 3,04t + 48. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) относительно температуры даст значение температуры в точке касания, которое имеет следующий вид

$$t_k = -26,7 + \sqrt{17,5\Delta E_k - 131}, \quad (3)$$

где  $\Delta E_k = (e_b - e_n)/(t_b - t_n)$  — отношение градиента упругостей пара к градиенту температур, характеризующее условия эксплуатации ограждающей конструкции.

На рисунке 2 можно отметить, что данной касательной соответствует температура наружной среды примерно  $-13$  °С, что соответствует температуре холодного периода для г. Москвы (по СП 131). Принимая эти условия, получим значение

$$\Delta E = (1403 - 52)/(20 + 13) = 40,9.$$

Тогда температура в точке касания (см. (3)):

$$t_k = -26,7 + \sqrt{17,5 \cdot 40,9 - 131} = -26,7 + 24,2 = -2,5 \text{ °С.}$$

Таким образом, при нормальных условиях эксплуатации помещения термическая конденсация в каком-либо сечении наружного ограждения независимо от конструктивного решения может возникнуть лишь при понижении температуры до  $-2,5$  °С. Как показывают многие исследования, в капиллярно-пористых строительных материалах жидкая фаза при данной температуре замерзает [14]. Следовательно, никакого капиллярного перемещения влаги не будет, т. е. влага где сконденсировалась, там и замерзла.

Анализируя график, представленный на рис. 2 можно сделать еще несколько важных выводов. Так при нормальных условиях эксплуатации помещения в ограждающей конструкции не будет плоскости возможной конденсации, если температура холодного периода будет выше, указанной на графике (примерно  $-13$  °С). И наоборот, при температуре, ниже указанной, возможно образование не плоскости, а зоны конденсации, следовательно, возможно накопление влаги в конструкции в холодный период года. При изменении параметров внутреннего воздуха в помещении, например, увеличение влажности воздуха в помещении, плоскость возможной конденсации образуется при более высоких температурах холодного периода.

Во всех случаях при проектировании наружных ограждающих конструкций необходимо соблюдать условие ненакопления влаги в конструкции в холодный период года, а именно — количество водяного пара, которое поступает в плоскость возможной конденсации, должно быть равно количеству выходящего из плоскости [15]:

$$\frac{e_b - E_k}{R_{пв}} = \frac{E_k - e_n}{R_{по} - R_{пв}}, \quad (4)$$

где  $e_b$  и  $e_n$  — соответственно парциальные давления водяных паров внутри помещения и снаружи;  $E_k$  — максимальное значение парциального давления водяного пара в плоскости конденсации;  $R_{пв}$  и  $R_{пн} = R_{по} - R_{пв}$  — сопротивление паропроницанию слоев до плоскости конденсации и после нее;  $R_{по}$  — сопротивление паропроницанию всей конструкции.

При соблюдении условия (4) требуемое сопротивление паропроницанию для всей конструкции равно:

$$R_{оп}^{тп} = R_{пв}' \left( 1 + \frac{E_k - e_n}{e_b - E_k} \right). \quad (5)$$

Для многослойных систем, в которых всегда можно выделить 2 слоя, один должен выполнять функцию теплозащиты, а другой — регулировать диффузию пара в ограждении. При известном требуемом сопротивлении теплопередаче параметры этих слоев следует назначать не умозрительно, а определять, решая систему двух уравнений [16, 17] с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} R_o^{тп} / r = R_b + \sum R_{ik} + R^{yt} + R^{пн} + R_n; \\ R_{оп}^{тп} = R_{вн} + \sum R_{пик} + R_n^{yt} + R^{пн} + R_{пн}. \end{cases} \quad (6)$$

Полученные результаты будут отвечать требованиям по теплозащите и паропроницанию, которые предъявлены к данным ограждающим конструкциям.

### Выводы

1. Причиной уменьшения диффузии жидкой фазы влаги в капиллярно-пористых телах в холодный период года, т. е. при понижении температуры наружного воздуха ниже  $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , является увеличение кинематической вязкости воды с понижением температуры.
2. При нормальных условиях эксплуатации помещения термическая конденсация в наружных ограждениях, независимо от конструктивного решения, может возникнуть лишь при понижении температуры в каком-либо сечении до  $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже, следовательно, где сконденсируется, там и замерзнет.
3. Отсутствие в холодный период года диффузии жидкой фазы влаги позволяет сделать вывод, что под действием градиентов температуры и упругостей водяного пара происходит диффузия лишь парообразной влаги, поэтому приемлемы методы расчета влажностного состояния ограждающих конструкций, основанные на паропроницаемости.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гагарин В. Г., Козлов В. В. Анализ расположения зоны наибольшего увлажнения в ограждающих конструкциях с различной толщиной теплоизоляционного слоя // Жилищное строительство. 2016. № 6. С.8—12.
2. Künzel H. M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and two-dimensional calculation using simple parameters. Dissertation, Universität Stuttgart, 1995. 65 p.
3. Богословский В. Н. Потенциал влажности, теоретические основы // Вестник Отделения строительных наук РААСН. 1996. № 1. С.12—22.
4. Kiessl K. Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen. Dissertation Universität-Gesamthochschule Essen, 1983.
5. Перехоженцев А. Г., Груздо И. Ю. Исследование диффузии влаги в пористых строительных материалах // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 35(54). С. 116—120.
6. Шнайдель К. Диффузия и конденсация водяного пара в ограждающих конструкциях. М. : Стройиздат. 1985.
7. Куприянов В. Н., Сафин И. Ш. Количественные параметры конденсации парообразной влаги в наружных стенах // Известия КГАСУ. 2013. № 4(26). С. 121—128.
8. Перехоженцев А. Г., Груздо И. Ю. Температурно-влажностное состояние поверхностных слоев наружных ограждающих конструкций зданий // Бюллетень строительной техники. 2016. № 6(932). С. 70—71.
9. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М. : Наука, 1972. 720 с.
10. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М. : Авок-Пресс, 2006. 256 с.
11. Вытчиков Ю. Определение плоскости возможной конденсации для многослойных строительных ограждающих конструкций // Строй-инфо. 1999. № 24. С. 92—94.
12. Перехоженцев А. Г. Нормирование сопротивления теплопередаче наружных ограждений зданий по условию теплового комфорта в помещении // Вестник МГСУ. 2016. С. 173—185.
13. Перехоженцев А. Г. Метод расчета многослойных ограждающих конструкций зданий на тепло- и пароизоляцию // Бюллетень строительной техники. 2017. № 9(997). С. 46—49.
14. Перехоженцев А. Г. Теоретические основы и методы расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций зданий. Волгоград : Изд-во ВолгГАСУ, 2008. С. 104—112.
15. Перехоженцев А. Г. О защите от переувлажнения ограждающих конструкций зданий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Вып. 2(87). С. 30—38.
16. Комплексный расчет тепло- и пароизоляции многослойных ограждающих конструкций зданий // Материалы 2-й междунар. науч.-техн. конф. «Теоретические основы теплоснабжения и вентиляции». 2007. М. : МГСУ, 2007.

17. *Перевоженцев А. Г.* О потенциале влажности, нормировании и расчете тепловлажностных характеристик наружных ограждений зданий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 3-4(92). С. 39—48.

© *Перевоженцев А. Г.*, 2024

Поступила в редакцию  
в июне 2024 г.

Ссылка для цитирования:

*Перевоженцев А. Г.* Диффузия влаги в ограждающих конструкциях зданий в холодный период года // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Вып. 3(96). С. 309—315. DOI: 10.35211/18154360\_2024\_3\_309.

Об авторе:

**Перевоженцев Анатолий Георгиевич** — д-р техн. наук, проф. каф. архитектуры зданий и сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; pag41@mail.ru

**Anatoly G. Perehozhencev**

**Volgograd State Technical University**

## **DIFFUSION OF MOISTURE IN BUILDING ENVELOPES IN THE COLD PERIOD OF THE YEAR**

The article presents the results of laboratory studies of moisture diffusion in capillary-porous building materials depending on temperature, as a result of which it was revealed that in the cold period of the year, that is, when the air temperature drops below +8 °C as a result of an increase in water viscosity by about 80%, the diffusion of the liquid phase of moisture practically stops, which allows us to consider acceptable methods for calculating the humidity state of external fences of buildings based on vapor permeability. The conditions for the formation of a plane of possible condensation of moisture under normal conditions of operation of the room are shown.

**Key words:** building envelopes, moisture diffusion and water viscosity as a function of temperature, plane of possible moisture condensation.

*For citation:*

Perehozhencev A. G. [Diffusion of moisture in building envelopes in the cold period of the year]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2024, iss. 3, pp. 309—315. DOI: 10.35211/18154360\_2024\_3\_309.

*About author:*

**Anatoly G. Perehozhencev** — Doctor of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; pag41@mail.ru