

6. Ильшева, Н. Н. Совершенствование методического инструментария количественной оценки выбросов парниковых газов с учетом международного опыта / Н. Н. Ильшева, Е. В. Балдеску // Вестник УрФУ. Серия: Экономика и управление. – 2017. – Т. 16, № 1. – С. 108–126. – DOI 10.15826/vestnik.2017.16.1.006.

УДК 697.1:536

**Определение температурно-влажностного состояния наружной стены, подвергнутой тепловой реабилитации, при изменениях температуры наружного воздуха**

Зафатаев В. А., Батенкова А. В., Коршун А. А., Милочкина А. Д.  
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой  
Новополоцк, Республика Беларусь

*Представлены результаты влажностного расчета несветопрозрачной многослойной конструкции наружной стены на основе двух наиболее распространенных в инженерной практике методов и проведен их сравнительный анализ. Установлены неопределенности двух использованных методов расчета. Показано, что в действующих нормативных документах, устанавливающих теплотехнические требования к ограждающим конструкциям, не определены правила учета ключевых факторов влагопереноса в ограждающих конструкциях.*

Эксплуатационные качества здания зависят не только от теплового и воздушного режимов, но и от влажностного состояния, которое, в основном, определяется влажностным состоянием ограждающих конструкций [1]. Защита ограждающих конструкций зданий от влаги необходима для сохранения их теплозащитных и эксплуатационных качеств, экономии энергии для создания и поддержания в устойчивом состоянии микроклиматических и санитарно-гигиенических условий в помещениях.

Многообразие факторов, влияющих на распределение и перемещение влаги в толще ограждающих конструкций, привело к развитию большого количества подходов к изучению теории влагопереноса. Впервые метод расчета влагопереноса в конструкциях был разработан К. Ф. Фокиным. Метод основан на модели молекулярной диффузии водяного пара за счет разности парциальных давлений пара по обе стороны ограждений. Ввиду простоты физико-математической модели и малой трудоемкости различные модификации этого метода широко применяются в настоящее время как в отечественной, так и в зарубежной практике [2].

Особый интерес представляет метод расчета влагопереноса в ограждающих конструкциях на основе теории потенциала влажности. Теория потенциала влажности была разработана В. Н. Богословским. Достоинством теории потенциала влажности является возможность учесть не только сконденсировавшуюся влагу, но и содержание влаги в материале при любом ее фазовом состоянии [3]. Метод позволяет определить не только положение зоны возможной конденсации, но и количественно определить влагосодержание по толщине ограждения в широком диапазоне влажности, включая область сверхсорбционного увлажнения материалов. Однако широкое практическое применение теории потенциала влажности в инженерных расчетах сдерживается отсутствием единой методики расчета потенциалов влажности [3]. Другим недостатком является неопределенность значений коэффициентов влагопроводности  $\chi$  для многих существующих строительных материалов [3].

Существуют четыре основных параметра, которые определяют характер температурно-влажностного режима ограждений [4]:

- 1) расчетная температура наружного воздуха;
- 2) продолжительность периода увлажнения (конденсации) и высыхания;
- 3) количество парообразной влаги, проходящей через ограждение;
- 4) взаимное расположение слоев в многослойном ограждении.

Отечественные нормативные документы не рассматривают перечисленные параметры в виде ключевых и не содержат рекомендаций по их определению и использованию при проектировании теплозащиты ограждающих конструкций. Так, например, согласно СП 2.04.01-2020 требуется выполнять влажностный расчет ограждающих конструкций только при средней температуре отопительного периода (для г. Полоцка, она равна  $-1,1$  °С согласно таблице 3.1 изменения № 1 к СНБ 2.04.02-2000). Однако при понижении температуры наружного воздуха уменьшается упругость водяного пара, а следовательно, изменяется распределение влаги в конструкции [1].

На самом деле изменение температуры наружного воздуха изменяет весь процесс паропроницаия [4] – изменяются температуры по сечению ограждения и, как следствие, изменяются значения максимальной и фактической упругостей водяного пара на наружной поверхности стены  $E_n, e_n$  и по ее сечению  $E_x, e_x$ . Произойдет изменение потоков влаги до зоны конденсации  $G_1$  и после зоны конденсации  $G_2$  и, как следствие, изменится количество конденсированной влаги  $G_{\text{конд}}$ . Таким образом, температура наружного воздуха во влажностных расчетах ограждающих конструкций, как расчетный параметр, требует специального исследования и обоснования [4].

Принятая по нормам для влажностного расчета расчетная температура наружного воздуха как средняя за отопительный период  $t_{н,от}$  является более высокой по сравнению с расчетной температурой для теплотехнического расчета.

Считается [1], что процессы диффузии водяного пара протекают значительно медленнее процессов теплопроводности и для установления стационарного состояния влаги в конструкции необходим более длительный промежуток времени, чем для установления температурного поля. Однако конструкции, не подверженные периодическому нагреву за счет солнечной радиации, способны к более интенсивному накоплению влаги [4], а установление стационарного режима тепло- и влагообмена в них происходит в более короткие сроки, чем в конструкциях, периодически нагреваемых и охлаждаемых.

Для исследования температурно-влажностного режима выбрана наружная стена помещения лаборатории строительной теплофизики, находящейся на первом этаже главного корпуса университета, и имеющая ориентацию на Север. Состав конструкции представлен в табл.

Данные для таблицы приняты из проекта термореновации 18.17 «Реконструкция учебно-лабораторных корпусов № 1, 2 Полоцкого государственного университета», разработанного в 2017 г. Полоцким государственным университетом.

Параметры воздуха внутри помещения приняты по табл. 5.1 СП 2.04.01-2020 как для общественных зданий: режим помещений – сухой, режим эксплуатации конструкций по таблице 5.2 СП 2.04.01-2020 – А.

Для выполнения влажностного расчета также необходимо задать относительную влажность наружного воздуха, которая согласно таблице 3.9 СНБ 2.04.02-2000 практически постоянна в холодный период года – в декабре 88 %, в январе 85 %, в феврале 84 % (для г. Полоцка), и не находится в прямой взаимозависимости с температурой наружного воздуха. Таким образом, относительная влажность наружного воздуха принята в расчетах постоянной и соответствующей средней за отопительный период для г. Полоцка (принята равной 83 % по табл. 3.1 изменения № 1 к СНБ 2.04.02-2000) [1].

При изучении материалов проекта термореновации установлено [1], что в проектной документации отсутствуют какие-либо расчетные показатели, характеризующие влажностный режим ограждающих конструкций. Кроме того, при определении величины приведенного сопротивления теплопередаче наружной стены в проекте не учтены сопротивления теплопроводности наружного армированного и защитно-отделочного полиминерального слоев.

Существует утверждение [4], что ограждение не будет накапливать влагу, если паропроницаемость наружного слоя  $G_n$  будет как минимум в 5 раз выше паропроницаемости внутреннего слоя  $G_v$ . Однако это противоречит характеристикам паропроницаемости облицовочного слоя, который должен быть достаточно плотным и водостойким. Следствием этого будет накопление влаги перед облицовочным слоем.

Характеристики материалов слоев исследуемой наружной стены

Наименование материала слоя*	Толщина слоя $\delta$ , м	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ по условиям эксплуатации, Вт/(м·°С)	Коэффициент паропроницаемости $\mu$ , мг/(м·ч·Па)	Сопротивление теплопроводности $R_t$ , м <sup>2</sup> ·°С/Вт	Сопротивление паропроницанию $R_{\mu}$ , м <sup>2</sup> ·ч·Па/мг
1. Штукатурка из цементно-песчаного раствора $\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$	0,02	0,76	0,09	0,026	0,222
2. Кладка из полнотелого керамического кирпича на цементном растворе $\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$	0,38	0,7	0,11	0,543	3,455
3. Кладка из полнотелого силикатного кирпича на цементном растворе $\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$	0,13	0,99	0,11	0,131	1,182
4. Плиты минераловатные ПТМ СТБ 1995-T5-DS(TH)1-CS(10)40-TR15-WS1 $\rho = 135 \text{ кг/м}^3$	0,12	0,0428	0,482	2,804	0,249
5. Армированный полиминеральный слой по СТБ 1621 $\rho = 1730 \text{ кг/м}^3$	0,006	0,87	0,015	0,007	0,4
6. Защитно-отделочный полиминеральный слой по СТБ 1621 $\rho = 1740 \text{ кг/м}^3$	0,006	0,87	0,02	0,007	0,3

\* – нумерация и последовательность расположения слоев конструкции соответствует направлению от внутреннего воздуха помещения к наружному воздуху.

В подавляющем большинстве известных конструкций наружный облицовочный слой имеет меньшую паропроницаемость, чем теплоизоляционный, в связи с чем такая конструкция заведомо предполагает конденсацию водяного пара в ограждении. Это обстоятельство характерно и для исследованной конструкции стены. Установлено [1], что неучет наружного армированного и защитно-отделочного полиминерального слоев в исследуемой

ограждающей конструкции при ее влажностном расчете приводит к ошибочному выводу об отсутствии зоны конденсации в конструкции даже при понижении температуры наружного воздуха относительно средней за отопительный период. При этом величина приведенного сопротивления теплопередаче при добавлении к ней сопротивлений теплопроводности двух вышеуказанных слоев увеличивается не более чем на 0,3 %, что для теплового расчета можно считать несущественной ошибкой [1].

Расчетами установлено [1], что образование зоны конденсации в исследованной конструкции наружной стены будет происходить при температурах наружного воздуха от  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже. Зона конденсации будет располагаться между поверхностью слоя утеплителя (минераловатных плит), ближайшей к наружному воздуху, и внутренней поверхностью защитно-отделочного полиминерального слоя.

Количество конденсата в ограждении зависит от продолжительности конденсации, т. е. от продолжительности климатических условий, приводящих к конденсации водяного пара в ограждении. Отечественные нормы не определяют ни продолжительности увлажнения, ни продолжительности высухания. Расчетами установлено [1], что при понижении температуры наружного воздуха и сохранении постоянными параметров внутреннего воздуха количество поступающего в исследованную конструкцию водяного пара увеличивается со  $119\text{ мг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$  при температуре наружного воздуха  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $128\text{ мг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$  при  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  и до  $137\text{ мг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$  при  $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Т. е. при понижении температуры наружного воздуха на каждые  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  количество поступающего в конструкцию водяного пара увеличивается примерно на 15 %. При этом количество конденсирующегося пара  $G_{\text{конд}}$  при понижении температуры наружного воздуха от  $-5$  до  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  сначала возрастает до  $32\text{ мг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$ , при дальнейшем понижении температуры от  $-7$  до  $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$  возрастает почти в 2 раза, а затем на каждые  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  понижения температуры увеличивается примерно на 20–30 %. Отечественные нормы не устанавливают предельное количество конденсирующейся влаги  $G_{\text{конд}}$ . Отсутствие нормируемой величины конденсирующейся влаги в ограждающих конструкциях не позволяет установить нормативную величину сопротивления влагопередаче  $R_{\text{вл.норм}}$  и сопоставить с ней величину фактического сопротивления влагопередаче конструкции  $R_{\text{вл}}$ ,  $\text{м}^2\cdot\text{ч}\cdot^{\circ}\text{Вл}/\text{кг}$ , определенную на основе теории потенциалов влажности [3; 5].

Величина фактического сопротивления влагопередаче  $R_{\text{вл}}$  зависит от множества факторов, взаимно влияющих друг на друга – от распределения температуры по сечению ограждающей конструкции, распределения потенциалов влажности  $\theta$ ,  $^{\circ}\text{Вл}$ , величин коэффициентов влагопроводности строительных материалов  $\chi$ ,  $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot^{\circ}\text{Вл})$ , количества влаги, проходящей через ограждающую конструкцию. Согласно проведенным расчетам фактическое

сопротивление влагопередаче рассматриваемой конструкции, несмотря на зависимость от вышеперечисленных факторов, при увеличении температуры наружного воздуха от  $-9$  до  $-1,1$  °C возрастает не более чем на 5 %, т. е. в пределах допустимой инженерной погрешности метода. Таким образом, фактическое сопротивление влагопередаче допустимо считать величиной постоянной при выбранных для расчета температурных и влажностных условиях окружающей среды, однако установить допустимость ее фактической величины при отсутствии данных о нормативном значении  $R_{\text{вл.норм}}$  не представляется возможным.

Поглощение влаги материалом определяется зависимостью равновесного влагосодержания  $w$ , кг/кг от абсолютного потенциала влажности  $\theta$  при разных температурах при помощи относительного потенциала влажности  $\theta_{\phi}$  [6]. Существующие зависимости равновесного влагосодержания материала  $w$  от относительного потенциала влажности  $\theta_{\phi}$  охватывают небольшой перечень строительных материалов, поэтому определение на их основе количества и состояния влаги в материалах рассматриваемой ограждающей конструкции можно выполнить лишь приближенно.

Установлено [7], что для рассматриваемой ограждающей конструкции превышение абсолютного потенциала влажности  $\theta$  над максимальным потенциалом  $\theta_{\text{max}}$  отсутствует при температурах наружного воздуха выше  $-9$  °C (согласно результатам, полученным по теории молекулярной диффузии [1] – при температурах наружного воздуха выше  $-5$  °C). На стыке теплоизоляционного слоя с наружными армированным и защитно-отделочными слоями относительный потенциал влажности  $\theta_{\phi}$  выше 1,0, но не превышает 1,5. Установлено [7], что наибольшей степени увлажнения подвергается теплоизоляционный слой рассматриваемой конструкции – в этом слое образуется зона сверхсорбционной влажности при температурах наружного воздуха от  $-9$  °C и ниже. При этом в данном слое наблюдается переход от сорбционно-связанной влаги к капиллярной ( $\theta_{\phi} < 1,5$ ), однако перехода к свободной влаге (при  $\theta_{\phi} \geq 1,5$ ) не наблюдается, что можно расценивать как удовлетворение условия невыпадения влаги в толще ограждения, – вопреки результатам, полученным согласно теории молекулярной диффузии.

На рассмотренном примере показана важность учета факторов влажностного состояния наружных ограждающих конструкций. Порядок выбора расчетной величины температуры наружного воздуха, данные о продолжительности периода увлажнения и высыхания конструкции, порядок расчета количества парообразной и сконденсированной влаги в ограждении, а также требования к взаимному расположению слоев конструкций должны быть обоснованы, поскольку они непосредственно определяют характер влагопе-

переноса в ограждающих конструкциях, и соответственно должны быть прописаны в действующих нормативных документах, устанавливающих теплотехнические требования к ограждающим конструкциям. Учет и обоснование величин перечисленных факторов важен для длительного сохранения теплозащитных и эксплуатационных качеств наружных ограждающих конструкций, экономии энергии для создания и поддержания в устойчивом состоянии микроклиматических и санитарно-гигиенических условий в помещениях.

### Литература

1. Батенкова, А. В. Температурно-влажностный режим наружных ограждающих нестенопрозрачных конструкций главного корпуса ПГУ при изменении температуры наружного воздуха / А. В. Батенкова, А. А. Коршун, А. Д. Милочкина, В. А. Зафатаев // Электронный сборник статей IV междунар. научн. конференции, Новополоцк, 20–21 апр. 2022 г. / Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой; редкол.: Д. Н. Лазовский [и др.]. – Новополоцк, 2022. – С. 119–126.
2. Корниенко, С. В. Влагозащита ограждающих конструкций и ее повышение: монография / С. В. Корниенко; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград: ВолгГТУ, 2021. – 96 с.
3. Рафальская, Т. А. Определение влагонакоплений в многослойных ограждающих конструкциях на основе потенциала влажности / Т. А. Рафальская // Современное промышленное и гражданское строительство, 2019. – Том 15. – № 2. – С. 91–98.
4. Куприянов, В. Н. Проектирование теплозащиты ограждающих конструкций: учеб. пособие / В. Н. Куприянов. – Казань: КГАСУ, 2011. – 161 с.
5. Кучеренко, М. Н. Применение теории потенциала влажности для расчета переноса влаги через наружные ограждения / М. Н. Кучеренко, Е. В. Чиркова // Известия вузов. Строительство, 2013. – № 5. – С. 63–67.
6. Корниенко, С. В. Характеристики состояния влаги в материалах ограждающих конструкций зданий / С. В. Корниенко // Строительные материалы, 2007. – № 4. – С. 74–76.
7. Батенкова, А. В. Определение температурно-влажностного режима наружной стены на основе теории потенциала влажности / А. В. Батенкова, А. А. Коршун, А. Д. Милочкина // Электронный сборник трудов молодых специалистов Полоцкого государственного университета имени Евфросинии Полоцкой. – 2022. – № 44 (114). – Прикладные науки. Строительство. – С. 126–129.