

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 χ 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 δ , м	Коэффициент теплопроводности λ по условиям эксплуатации, Вт/(м·°С)	Коэффициент паропроницаемости μ , мг/(м·ч·Па)	Сопротивление теплопроводности R_t , м ² ·°С/Вт	Сопротивление паропроницанию R_{μ} , м ² ·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 θ , $^{\circ}\text{Вл}$, величин коэффициентов влагопроводности строительных материалов χ , $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot^{\circ}\text{Вл})$, 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 θ при разных температурах при помощи относительного потенциала влажности θ_{ϕ} [6]. Существующие зависимости равновесного влагосодержания материала w от относительного потенциала влажности θ_{ϕ} 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 θ над максимальным потенциалом θ_{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 θ_{ϕ} 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.