

Секция V
ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ И ПРИРОДООХРАННЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ
РЕШЕНИЯ В ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМАХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

УДК 697.1:536

ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ НЕСВЕТОПРОЗРАЧНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ ГЛАВНОГО КОРПУСА ПГУ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ
НАРУЖНОГО ВОЗДУХА

А.В. Батенкова, А.А. Коршун, А.Д. Милочкина, В.А. Зафатаев

Полоцкий Государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, Республика Беларусь
e-mail: post@psu.by

Представлены результаты теплового и влажностного расчётов несветопрозрачной многослойной конструкции наружной стены. На рассмотренном примере показано, что кроме учёта теплозащитных качеств ограждающих конструкций, не менее важным является учёт факторов влажностного состояния наружных ограждающих конструкций. Установлено, что действующие нормативные документы, устанавливающие требования в области теплотехнического состояния конструкций, не содержат указаний о порядке и правилах учёта ключевых факторов, влияющих на процессы влагопереноса в ограждающих конструкциях.

Ключевые слова: *Влажностный режим, расчетная температура наружного воздуха, продолжительность периода увлажнения (конденсации) и высыхания, количество парообразной влаги, проходящей через ограждение.*

TEMPERATURE AND HUMIDITY REGIME OF EXTERNAL ENCLOSING TRANSLUCENT STRUCTURES
OF THE MAIN BUILDING OF THE PSU WHEN THE OUTSIDE AIR TEMPERATURE CHANGES

A. Batenkova, A. Korshun, A. Milochkina, V. Zafataev

Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Republic of Belarus
e-mail: post@psu.by

The results of thermal and humidity calculations of a non-translucent multilayer exterior wall structure are presented. The considered example shows that in addition to taking into account the heat-protective qualities of enclosing structures, it is equally important to take into account the factors of the humidity state of the external enclosing structures. It is established that the current regulatory documents establishing requirements in the field of thermal engineering condition of structures do not contain instructions on the procedure and rules for taking into account key factors affecting the processes of moisture transfer in enclosing structures.

Keywords: *Humidity regime, calculated outdoor air temperature, duration of the humidification (condensation) and drying period, amount of vapor-shaped moisture passing through the fence.*

Введение. 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]. Влажностное состояние ограждающих

конструкций изменяется в зависимости от свойств материалов, температурно-влажностных условий в помещениях, климатических условий района строительства.

Влажностный режим ограждения является одним из основных при расчете теплопередачи, поскольку переувлажнение приводит к заметному снижению теплозащитных свойств и долговечности конструкции. С повышением влажности строительных материалов повышается и их теплопроводность, т. е. при прочих равных условиях сырые ограждения будут иметь пониженные теплозащитные качества, поскольку теплопроводность воды в 20–25 раз выше теплопроводности воздуха, заполняющего поры материала ($\lambda_{\text{воды}} \approx 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, $\lambda_{\text{возд}} \approx 0,024 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$). Еще более резко возрастает теплопроводность материала ограждения, если он промерзает, так как лёд имеет теплопроводность $2,3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$, что в 80–90 раз больше, чем у воздуха. Также при увеличении теплопроводности материала уменьшается температура внутренней поверхности ограждения, что может привести к образованию на ней конденсата и плесени [2]. Влажный строительный материал является благоприятной средой для развития в нем грибков, плесени и прочих биологических процессов [3]. Развитие этих процессов в частях ограждения, расположенных в непосредственной близости от его внутренней поверхности, делает состояние в сопряженных с ними помещениях антисанитарным: плесневые грибки, образующиеся на сырых поверхностях наружных ограждений, быстро распространяются на предметы обстановки и пищевые продукты, что может привести к их порче.

Кроме теплотехнического и санитарно-гигиенического значения влажностный режим ограждения имеет также и техническое значение, поскольку он обуславливает долговечность ограждения [3]. Известно, что морозостойкость материалов связана со степенью их влажности: чем больше влажность материала, тем менее он будет морозостойким. Накопление влаги в толщине ограждающей конструкции с учетом многократных циклов попеременного ее замерзания и оттаивания снижает прочность строительных материалов. Это может привести к образованию трещин, отслоению облицовочных слоёв и дальнейшему разрушению ограждающей конструкции.

Постановка задачи и результаты исследований. Существуют четыре основных параметра, которые определяют характер 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 "Строительная теплотехника" требуется делать влажностный расчёт ограждающих конструкций только при средней температуре отопительного периода (для г. Полоцка, она равна $-1,1^\circ\text{C}$ согласно табл. 3.1 изм.1 к СНБ 2.04.02-2000 "Строительная климатология"). Однако при понижении температуры наружного воздуха уменьшается упругость водяного пара, и таким образом изменяется распределение влаги в конструкции.

Изменение температуры наружного воздуха изменяет весь процесс паропроницаемости [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 её 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_k . Таким образом, температура наружного воздуха во влажностных расчетах ограждающих конструкций, как расчётный параметр, требует специального исследования и обоснования.

Принятая по нормам для влажностного расчёта 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 счёт 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.

Таким образом, для исследования влажностного режима выбрана наружная стена помещения лаборатории строительной теплофизики, находящейся на первом этаже главного корпуса Полоцкого государственного университета, и имеющая ориентацию на Север. Эта конструкция в меньшей степени подвержена прямому солнечному облучению, и условия её естественного высыхания значительно хуже, чем у стены главного фасада учебного корпуса, ориентированной на Юг, то есть вероятность образования в этой конструкции зоны конденсации значительно выше, чем у стены главного фасада. Состав конструкции представлен в таблице 1.

Таблица 1. – Характеристики материалов слоёв 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_p , м ² ·ч·Па/мг
1. Штукатурка из цементно-песчаного раствора $\rho=1800$ кг/м ³	0,02	0,76	0,09	0,026	0,222
2. Кладка из полнотелого керамического кирпича на цементном растворе $\rho=1800$ кг/м ³	0,38	0,7	0,11	0,543	3,455
3. Кладка из полнотелого силикатного кирпича на цементном растворе $\rho=1800$ кг/м ³	0,13	0,99	0,11	0,131	1,182
4. Плиты минераловатные ПТМ СТБ 1995-Т5-DS(ТН)1-CS(10)40-TR15-WS1 $\rho=135$ кг/м ³	0,12	0,0428	0,482	2,804	0,249
5. Армированный полиминеральный слой по СТБ 1621 $\rho=1730$ кг/м ³	0,006	0,87	0,015	0,007	0,4
6. Защитно-отделочный полиминеральный слой по СТБ 1621 $\rho=1740$ кг/м ³	0,006	0,87	0,02	0,007	0,3

(*) - нумерация и последовательность расположения слоёв конструкции соответствует направлению от внутреннего воздуха помещения к наружному воздуху

Данные для таблицы 1 взяты из проекта термореновации 18.17 "Реконструкция учебно-лабораторных корпусов №-1,2 Полоцкого государственного университета", разработанного в 2017 г. Полоцким государственным университетом. При изучении материалов проекта нами установлено, что в нём отсутствуют какие-либо расчётные показатели влажностного режима ограждающих конструкций. Кроме того, при определении величины приведённого сопротивления теплопередаче наружной стены не учтено сопротивление теплопроводности наружного армированного и защитно-отделочного полиминерального слоёв. Нами установлено, что неучёт наличия этих слоёв при влажностном расчёте приводит к ошибочному выводу об отсутствии зоны конденсации в исследуемой конструкции даже в условиях понижения температуры наружного воздуха относительно средней за отопительный период (рисунки 1 и 2). При этом величина приведённого сопротивления теплопередаче при добавлении к ней сопротивлений теплопроводности двух указанных слоёв увеличивается не более, чем на 0,3%.

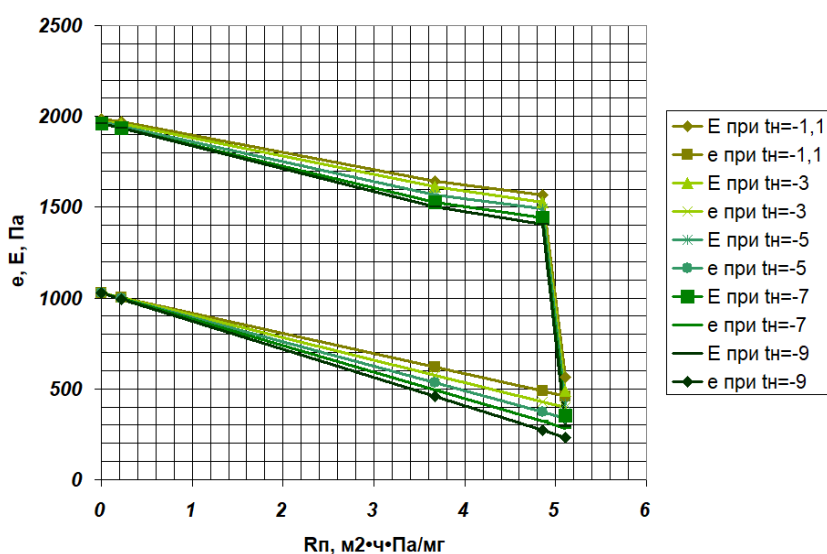


Рисунок 1. – Изменение парциального давления (упругости) e и давления насыщения (максимальной упругости) E водяного пара в наружной стене при различных температурах наружного воздуха t_n при отсутствии внешних армированного и защитно-отделочного слоёв

R_p – сопротивление паропроницаемости, $m^2 \cdot ч \cdot Па / мг$, отсчитываемое от внутренней поверхности стены

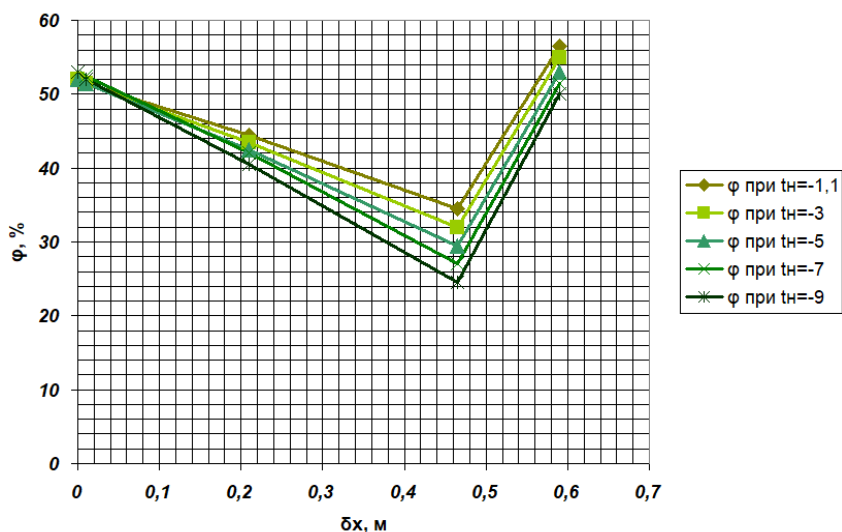


Рисунок 2. – Изменение средней относительной влажности материалов слоёв в наружной стене при различных температурах наружного воздуха t_n при отсутствии внешних армированного и защитно-отделочного слоёв

δ_x – толщина слоёв конструкции, м, отсчитываемая от внутренней поверхности стены

Количество водяного пара, проходящего через ограждение, будет тем выше, чем больше разность парциальных давлений водяного пара во внутреннем и наружном воздухе. Водяной пар, свободно движущийся через пористый материал или воздушное пространство, не конденсируется, проходя зону температур, соответствующую его точке росы. Конденсация пара начинается, когда он достигает зоны, препятствующей его свободному движению или тормозящей его перемещение при соответствующих температурных условиях [1]. Расчётом нами установлено, что образование зоны конденсации в исследованной конструкции наружной стены будет происходить в климатических условиях г. Новополоцка при температурах наружного воздуха от -5°C и ниже. Зона конденсации будет располагаться между поверхностью слоя утеплителя (минераловатных плит), ближайшей к наружному воздуху, и внутренней поверхностью защитно-отделочного полиминерального слоя (рисунки 3 и 4).

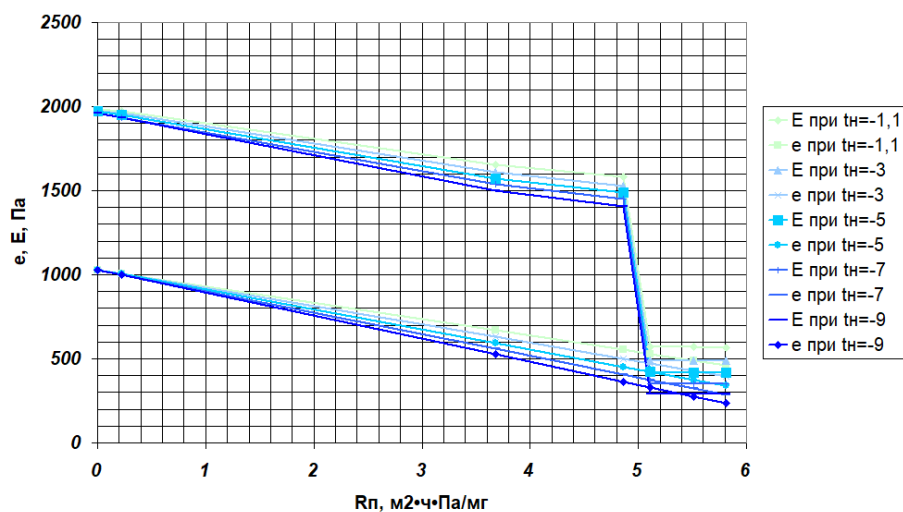


Рисунок 3. — Изменение парциального давления (упругости) e и давления насыщения (максимальной упругости) E водяного пара в наружной стене при различных температурах наружного воздуха t_n с учётом наличия внешних армированного и защитно-отделочного слоёв

R_n — сопротивление паропроницаемости, м²·ч·Па/мг, отсчитываемое от внутренней поверхности стены

Графики распределения относительной влажности материалов в слоях конструкции стены и парциальных давлений водяного пара по сечению стены (рис. 1, 2, 3, 4) получены по итогам проведения влажностного расчёта при различных температурах наружного воздуха и при одних и тех же параметрах воздуха внутри помещения. Параметры воздуха внутри помещения взяты по табл. 5.1 СП 2.04.01-2020 как для общественных зданий: режим помещений — сухой, режим эксплуатации конструкций по табл. 5.2 СП 2.04.01-2020 — А.

Для выполнения влажностного расчёта также нужна относительная влажность наружного воздуха, которая согласно табл. 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 зависимости с температурой наружного воздуха. Таким образом, относительная влажность наружного воздуха принята в расчётах постоянной и соответствующей средней за отопительный период для г. Полоцка (принята равной 83% по табл. 3.1 изм.1 к СНБ 2.04.02-2000).

Чтобы автоматизировать процесс расчётов данные из таблиц, к которым нужно часто обращаться, можно аппроксимировать в виде функциональных зависимостей. Например, данные приложения П СП 2.04.01-2020, по давлению насыщения E , Па, водяного пара в зависимости от температуры воздуха t нами аппроксимированы следующей зависимостью:

$$E = 0,0332 \cdot t^3 + 1,3634 \cdot t^2 + 45,5057 \cdot t + 604,8616$$

Если первой задачей проектирования ограждений является ограничение доступа пароводяной влаги в ограждение, то второй задачей будет обеспечение прохода пароводяной влаги через ограждение и выход ее наружу. Отдельные слои в многослойных ограждениях следует располагать в такой последовательности, чтобы паропроницаемость каждого слоя нарастала от внутренней поверхности к наружной. 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. 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 (рисунок 4, таблица 1).

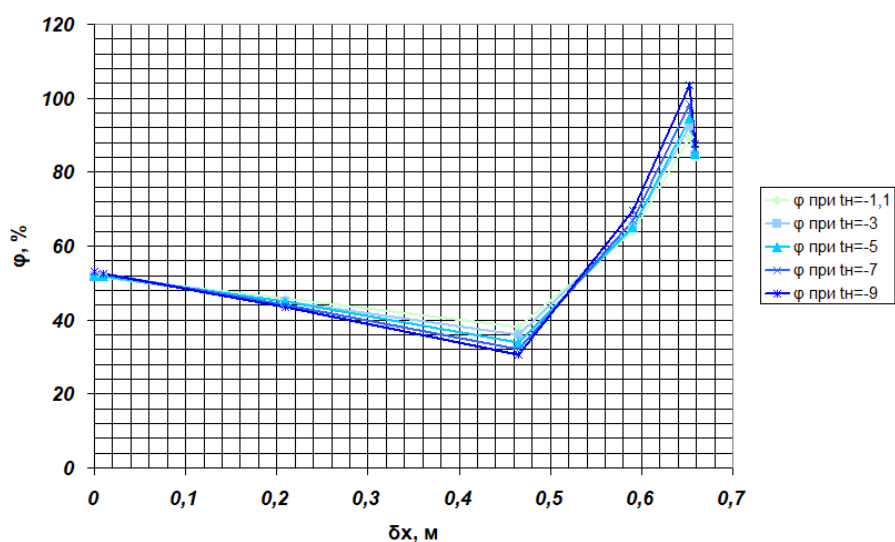


Рисунок 4. – Изменение средней относительной влажности материалов слоёв в наружной стене при различных температурах наружного воздуха t_n с учётом наличия внешних армированного и защитно-отделочного слоёв δ_x – толщина слоёв конструкции, м, отсчитываемая от внутренней поверхности стены

Если не учитывать внутренний штукатурный слой, то сопротивление паропроницанию полнотелого керамического кирпича в исследованной конструкции стены получается в 13,9 раз выше сопротивления паропроницанию слоя плит минераловатных и в 8,6 раз выше сопротивления паропроницанию защитно-отделочного полиминерального слоя. При этом сопротивление паропроницанию защитно-отделочного полиминерального слоя получается в 1,6 раз выше сопротивления паропроницанию слоя плит минераловатных.

Согласно требованиям СП 2.04.01-2020 "Строительная теплотехника" сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции в пределах от внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации $R_{п}$, $m^2 \cdot ч \cdot Па / мг$, должно быть не менее нормативного сопротивления паропроницанию $R_{п.норм}$. Расчётом нами установлено, что при температурах наружного воздуха от $-5^\circ C$ и ниже для исследованной конструкции это условие не выполняется.

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 высыхания. Расчётом нами установлено, что при понижении температуры

наружного воздуха и сохранении постоянными параметров внутреннего воздуха количество поступающего в исследованную конструкцию водяного пара увеличивается со 119 мг/(м²·ч) при температуре наружного воздуха –5°С до 128 мг/(м²·ч) при –7°С и до 137 мг/(м²·ч) при –9°С, т.е. при понижении температуры наружного воздуха на каждые 2°С количество поступающего в конструкцию водяного пара увеличивается примерно на 15% (рис. 5). При этом количество конденсирующегося пара при понижении температуры наружного воздуха от –5 до –7°С сначала возрастает до 32 мг/(м²·ч), при дальнейшем понижении температуры от –7 до –9°С возрастает почти в 2 раза, а затем на каждые 2°С понижения температуры увеличивается примерно на 20–30%. При этом указывается [4], что за зимний период в стенах зданий количество сконденсированной влаги не должно превышать 500 г/м² вне зависимости от того как будут меняться наружные климатические условия в этот период.

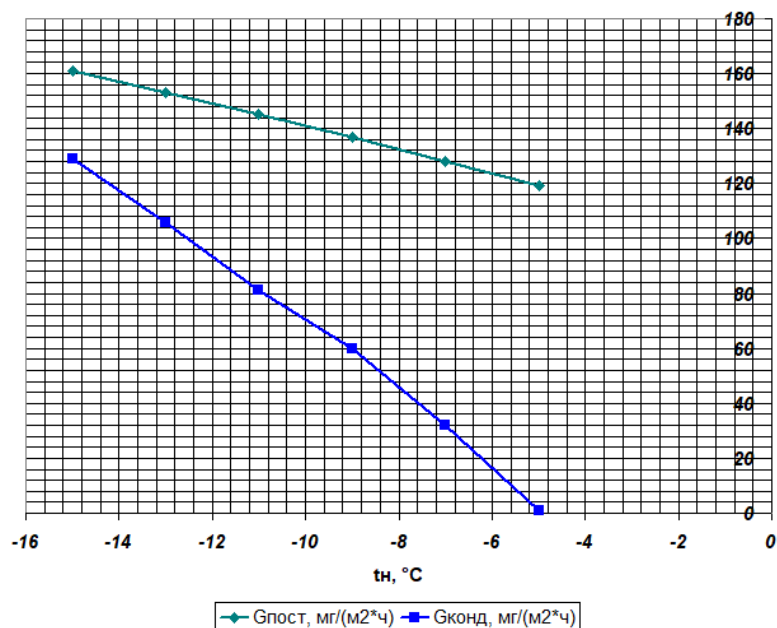


Рисунок 5. – Изменение количества поступающего $G_{\text{пост}}$ и конденсирующегося $G_{\text{конд}}$ водяного пара в наружной стене при различных температурах наружного воздуха t_n с учётом наличия внешних армированного и защитно-отделочного слоёв

Ограничение поступления в ограждение парообразной влаги должно обеспечиваться высоким сопротивлением паропрооницанию слоя ограждения, примыкающего к внутреннему воздуху помещения. Отечественные нормативные документы не содержат рекомендаций о величине сопротивления паропрооницанию внутреннего слоя ограждения. В качестве первого приближения можно рекомендовать для жилых зданий величину паропрооницаемости первого слоя меньше 0,03 г/(м²·ч·мм. рт. ст.) (стандарт США) [4]. В пересчете на принятую в наших нормах размерность это составит 0,225 мг/(м²·ч·Па). Величина паропрооницаемости слоя является обратной сопротивлению паропрооницанию слоя. Отсюда R_n внутреннего слоя должно быть не меньше, чем $1/0,225 = 4,44$ м²·ч·Па/мг. Например, для полнотелого керамического кирпича, если не учитывать внутренний слой штукатурки, сопротивление паропрооницанию не меньше 4,44 м²·ч·Па/мг будет при толщине его слоя $\delta = R_n \cdot \mu = 4,44 \cdot 0,11 = 0,488$ м и более. В нашем случае общая толщина слоёв внутренней штукатурки, полнотелого керамического и силикатного кирпича с примерно одинаковыми коэффициентами паропрооницаемости составляет $0,02+0,38+0,13=0,53$ м, что удовлетворяет указанному требованию.

Заключение. Таким образом на рассмотренном примере показано, что кроме учёта теплозащитных качеств ограждающих конструкций, не менее важным является учёт факторов влажностного состояния наружных ограждающих конструкций. Соответственно действующие нормативные документы, устанавливающие требования в области теплотехнического состояния конструкции, должны быть дополнены информацией об учёте таких факторов как: расчётная температура наружного воздуха, продолжительность периода увлажнения и высыхания конструкции, определение количества парообразной и сконденсированной влаги в ограждении, также должны быть установлены требования к взаимному расположению слоёв конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Протасевич, А. М. Строительная теплофизика ограждающих конструкций зданий и сооружений : учеб. пособие / А. М. Протасевич. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 239 с.
2. Фокин, К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / под ред. Ю. А. Табунщикова, В. Г. Гагарина. – 5-е изд., пересмотр. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.
3. Толстова, Ю. И. Основы строительной теплофизики : учеб. пособие / Ю. И. Толстова, Р. Н. Шумилов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 104 с.
4. Куприянов, В. Н. Проектирование теплозащиты ограждающих конструкций : учеб. пособие / В. Н. Куприянов. – Казань: КГАСУ, 2011. – 161 с.