Нормирование и расчет паропроницаемости многослойных ограждающих конструкций зданий (Рекомендации по совершенствованию СП 50.13330.2012 «Теплозащита зданий»)

А.Г.Перехоженцев, ВолгГТУ, Волгоград

В данной работе рассмотрена актуальная проблема тепло-влажностного состояния многослойных ограждающих конструкций зданий. Очень важно запроектировать многослойную конструкцию таким образом, чтобы исключить конденсацию и накопление влаги в конструкции в холодный период года. Ниже приводится оригинальная методика расчёта характеристик отдельных слоёв многослойной конструкции, в которой допускается лишь плоскость конденсации, то есть конструкция работает на пределе, но накопление влаги не происходит, так как требуемое (нормируемое) сопротивление паропрооницанию определено из условия, что количество пара, которое входит в плоскость конденсации, равно количеству пара, которое выходит из него. Приводится простая и надёжная методика определения температуры в плоскости возможной конденсации, затем определяется положение этой плоскости в конструкции и требуемое сопротивление паропрооницанию всей конструкции. Решение данной задачи сводится к решению системы двух линейных уравнений, состоящих из суммы термических сопротивлений слоёв и сопротивлений паропрооницанию этих слоёв, приравненных к соответствующим нормативным значениям теплопередаче и паропрооницанию. В многослойной конструкции выделяются два слоя, один из которых определяет теплозащитные свойства ограждения, а другой регулирует диффузию пара через конструкцию. Решая систему двух уравнений с двумя неизвестными определяем соответствующие характеристики этих слоёв, которые обеспечивают требуемые теплозащитные свойства и не допускают накопления конденсационной влаги в конструкции в холодный период года. Преимущество данной методики заключается в том, что слои в многослойной конструкции подбираются не интуитивно, а путем расчёта на соответствие нормативным требованиям.

Ключевые слова: многослойные ограждающие конструкции зданий, определение плоскости возможной конденсации, нормирование сопротивления паропрооницанию ограждающих конструкций, ненакопление влаги в конструкции в холодный период года.

Norming and Calculation of Vapor Permeability of Multi-Layer Building Enclosing Structures (Recommendations for Improving SP 50.13330.2012 "Thermal Protection of Buildings")

A.G.Perehozhentsev, VSTU, Volgograd

The article considers the actual problem of the heat and moisture state of multi-layer enclosing structures of buildings.

Therefore, it is very important to design a multilayer structure in such a way as to prevent condensation and moisture accumulation in the structure during the cold season. The article presents an original method for calculating the characteristics of individual layers of a multilayer structure, in which only the condensation plane is allowed, so the structure works at the limit, but moisture accumulation does not occur, since the required (normalized) resistance to vapor permeation is determined from the condition that the amount of vapor that enters the condensation plane is equal to the amount of vapor that comes out of it. A simple and reliable method for determining the temperature in the plane of possible condensation is given, then the position of this plane in the structure and the required resistance to vapor permeability of the entire structure are determined. The solution of this problem is reduced to solving a system of two linear equations consisting of the sum of the thermal resistances of the layers and the resistances of the vapor permeation of these layers, equal to the corresponding standard values of heat transfer and vapor permeability. Two layers are distinguished in the multilayer structure, one of which determines the heat-shielding properties of the enclosure, and the other regulates the diffusion of vapor through the structure. Solving the system of two equations with two unknowns, we determine the corresponding characteristics of these layers, which provide the required heat-shielding properties and do not allow the accumulation of condensation moisture in the structure during the cold period of the year. The advantage of this method consists in the fact that layers in a multilayer structure are selected not intuitively, but by calculation for compliance with regulatory requirements.

Keywords: multi-layer protecting structures of buildings, determination of possible condensation plane, normalization of resistance to vapor permeability of enclosing structures, rationing of enclosing constructions, non-accumulation of moisture in the structure during the cold period of the year.

Паропроницаемость ограждающих конструкций – это не самоцель. Совершенно не важно, какое количество пара проходит через конструкцию, важно – какое количество пара сконденсируется в виде жидкой фазы влаги в результате термической конденсации. Накопление жидкой фазы влаги в зоне резких колебаний температуры в холодный период года приводит не только к ухудшению теплозащитных свойств

конструкции, но и к её разрушению за счёт попеременного замерзания и оттаивания. Поэтому необходимо проектировать многослойные ограждающие конструкции зданий таким образом, чтобы не допустить накопления жидкой фазы влаги в конструкции в холодный период года. Ниже представлена такая методика нормирования и расчёта характеристик наружных ограждений зданий.

Нормирование паропроницаемости многослойных наружных ограждений зданий

Для инженерного метода расчёта принимаем стационарные условия тепло- и влагопередачи, то есть удельный поток тепла $q = \Delta t/R_o$ и удельный поток пара $q = \Delta e/R_{on}$ приняты постоянными. В этом случае сопротивление теплопередаче $R_o = q \cdot \Delta t$ и сопротивление паропропусканию $R_{on} = p \cdot \Delta e$ линейно зависят от соответствующих градиентов.

Необходимым условием нормирования сопротивления паропропусканию должно быть условие ненакопления влаги в конструкции в холодный период года, так как именно в этот период года происходит накопление влаги в конструкции за счёт термической конденсации. Поэтому необходимым условием ненакопления влаги должно быть условие равенства потоков пара входящего в конструкцию и выходящего из него $-P_{вх} = P_{вых}$:

$$\frac{e_в - E_k}{R_{не}} = \frac{E_k - e_н}{R_{но} - R_{не}}, \quad (1)$$

где $e_в$ и $e_н$ – соответственно парциальные давления водяных паров внутри помещения и снаружи; E_k – максимальное значение парциального давления водяного пара в плоскости конденсации; $R_{не}$ и $R_{но} = R_{но} - R_{не}$ – сопротивление паропропусканию слоёв до плоскости конденсации и после неё; $R_{но}$ – сопротивление паропропусканию всей конструкции.

Для решения уравнения (1) необходимо определить значение максимального парциального давления водяного пара в плоскости возможной конденсации для конкретных условий эксплуатации ограждающей конструкции. Вопросами определения зоны конденсации паров воды в ограждающих конструкциях и решением практических задач на этой основе занимались многие учёные как у нас в стране [1–5] так и за рубежом [6–8]. Недостатком методики СП [1] является то, что обе формулы (8.1 и 8.2) для определения требуемого сопротивления паропропусканию основаны на определении зоны максимального увлажнения по комплексу $f(t)$, который некорректно определяет эту зону, так как в формуле (8.7) СП комплекс $f(t)$ вычисляется для каждого слоя многослойной конструкции по общим потокам тепла и пара и не учитывает влияние характеристик предыдущих слоёв.

Предлагается метод решения задачи для многослойной конструкции, в которой один из слоёв выполняет функцию теплозащиты, другой регулирует диффузию пара в ограждении, то есть выполняет функцию пароизоляции, а остальные слои определены конструктивными или технологическими требованиями.

Для решения задачи используем метод параллельного переноса линии $e_в - e_н$ (рис. 1) до положения касательной к кривой максимальной упругости водяного пара [9]. Координаты точки касания указывают на положение плоскости конденсации в конструкции при данных параметрах ($e_в, e_н, t_в, t_н$) эксплуатации ограждения. Предельный градиент упругости водяных паров определим по соотношению $(e_в - e_н)/(t_в - t_н) = \Delta E_{пр}$. Построив касательную к кривой $E = f(t)$, параллельную линии $e_в - e_н$, значение максимальной упругости $E(t_k)$ в плоскости конденсации и температуру t_k в этой плоскости можно определить графически, как показано на рисунке 1 по соответствующим шкалам температуры и упругости водяного пара либо более точно следующим образом.

Идея нахождения точки касания линии распределения действительных парциальных давлений пара $e_в - e_н$ к кривой распределения давлений насыщенных водяных паров $E = f(t)$ заключается в решении первой производной к данной функции, которая определяет наклон касательной к данной функции. В расчётном диапазоне температур (от +20 до –30 °С) функция $E = f(t)$ не зависит от условий эксплуатации конструкции, а является постоянной функцией температуры, которую с достаточной для инженерных расчётов точностью можно описать следующим полиномом третьей степени:

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

При заданных параметрах эксплуатации ограждающей конструкции ($e_в, e_н, t_в, t_н$) предельный градиент $\Delta E = (e_в - e_н)/(t_в - t_н)$ равен первой производной уравнения (2), который имеет следующий вид

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

Рис. 1. К определению плоскости возможной конденсации

Решая уравнение (3) относительно температуры, получим значение температуры в точке касания, при которой действительная упругость водяного пара равна максимальному значению $e=E$, то есть температуру в плоскости конденсации:

$$t_k = -26,7 + \sqrt{17,5 \cdot \Delta E_k - 131} \quad (4)$$

По температуре t_k из уравнения (2) определяют значение максимального парциального давления $E(t_k) = E_k$ в плоскости конденсации. Положение плоскости конденсации ($e = E_k$) зависит от конструктивного решения наружного ограждения и определяется по соответствующему распределению температуры в конструкции. Зная эти параметры, несложно вычислить сопротивление паропроонианию конструкции от внутренней поверхности до плоскости конденсации $R'_{п.}$.

Требуемое сопротивление паропроонианию, определяемое из условия равенства потоков пара (1), который вошёл в плоскость конденсации и вышел из неё в холодный период года, соответственно будет равно

$$R_{оп}^{mp} = R'_n \left(1 + \frac{E_k - e_n}{e_e - E_k}\right); \quad (5)$$

При расчёте влажностного режима весьма существенную роль играет выбор расчётной температуры, так как при достижении температуры равной точке росы конденсат выпадает практически мгновенно. Поэтому результаты расчёта будут зависеть от выбора расчётной температуры холодного периода. В СП принята расчётная температура равная средней температуре наружного воздуха периода с отрицательными среднемесячными температурами. Эта температура не соответствует реальным условиям эксплуатации конструкций. Так, для Москвы она равна $t_{н.отр} = -4,6^\circ\text{C}$, а в соответствии с п.6 СП 131.13330.2012 «Строительная климатология» температура наиболее холодного периода с вероятностью 0,94 для Москвы равна -13°C . Мы рекомендуем для расчётов влажностного режима выбирать именно эту температуру как наиболее отвечающую реальным условиям эксплуатации.

Ниже представлена методика, в которой слои многослойной конструкции рассчитываются в соответствии с нормативными требованиями в отличие от существующих методик, когда толщины слоёв вначале выбираются интуитивно, а затем проверяются на соответствие норм.

Комплексный расчёт параметров тепло- и пароизоляции многослойных ограждающих конструкций зданий

Для выполнения требований норм по энергосбережению наружные ограждающие конструкции, как правило, должны представлять собой многослойные системы, в которых всегда можно выделить два слоя: один из них выполняет функцию теплозащиты, а другой регулирует диффузию пара в ограждении [9]. При этом для обеспечения надёжных эксплуатационных свойств многослойная конструкция должна отвечать следующим требованиям:

$$\begin{cases} R_o^{тп} = R_b + \sum R_{ik} + \frac{\delta^{ym}}{\lambda^{ym}} + \frac{\delta^{mu}}{\lambda^{mu}} + R_n \\ R_n^{тп} = R_{вп} + \sum R_{ик} + \frac{\delta^{ym}}{\mu^{ym}} + \frac{\delta^{mu}}{\mu^{mu}} + R_{ин}, \end{cases} \quad (6)$$

где $R_b, R_n, R_{вп}, R_{ин}$ – соответственно сопротивления тепло- и влагообмену внутренней и наружной поверхностей ограждения; $\sum R_{ik}, \sum R_{п.ик}$ – суммы термических сопротивлений и сопротивлений паропроонианию конструктивно заданных слоёв ограждения; $R^{ym} = \frac{\delta^{ym}}{\lambda^{ym}}, R^{mu} = \frac{\delta^{mu}}{\lambda^{mu}}, R_n^{ym} = \frac{\delta^{ym}}{\mu^{ym}}, R_n^{mu} = \frac{\delta^{mu}}{\mu^{mu}}$ – термические сопротивления и сопротивления паропроонианию утепляющего и пароизоляционного слоёв; $R_o^{тп}$ – требуемое сопротивление теплопередаче, определяемое по формуле [10].

$$R_o^{mp} = \frac{n \cdot (t_e - t_n)}{(t_e - t_p) \cdot \alpha_e} + k_{эн} \cdot (t_b - t_{оп}) \cdot z_{оп} \cdot 10^{-4}. \quad (7)$$

Зная требуемые сопротивления теплопередаче и паропроонианию, подставляя соответствующие значения в систему (6), можно определить либо толщины слоёв утеплителя и пароизоляции δ^{yt} и δ^{mu} , либо их сопротивления.

Рассмотрим методику комплексного расчёта на примере.

Пример. Требуется определить толщину утеплителя и допустимую толщину наружного слоя в трёхслойной стеновой панели из керамзитобетона, представляющего собой в данном случае пароизоляцию, если толщина внутреннего слоя из керамзитобетона задана конструктивными требованиями и равна 150 мм.

Исходные данные:

Жилый дом в Волгограде. Условия эксплуатации «А»:

$t_b = 20^\circ\text{C}; t_{хп} = -22^\circ\text{C}; t_{нх} = -12^\circ\text{C}; t_{оп} = -2,3^\circ\text{C}; z_{оп} = 176$ сут.

$\varphi_b = 60\%; \varphi_n = 85\%; \varphi_p = 12^\circ\text{C}$ (при $t_b = 20^\circ\text{C}$ и $\varphi_b = 60\%$);

Характеристики материалов:

керамзитобетон, $\gamma_o = 1600$ кг/м³; $\lambda_A = 0,67$ Вт/(м °C); $\mu = 0,09$ мг/(м.ч. Па);

минераловатные плиты, $\gamma_o = 100$ кг/м³; $\lambda_A = 0,042$ Вт/(м °C); $\mu = 0,32$ мг/(м.ч. Па);

коэффициент теплотехнической однородности $r = 0,7$.

$E_b = 2338$ Па; $e_b = E_b \cdot \varphi_b / 100 = 1403$ Па;

$E_n = 217$ Па; $e_n = E_n \cdot \varphi_n / 100 = 184$ Па.

$GCOП = [20 - (-2,3)] 176 = 3925$ °C·сут.

$R^{тп} = (t_b - t_n) / (t_b - t_p) \cdot \alpha_b + k \cdot GCOП \cdot 10^{-4} = (20 + 22) / (20 - 12) \cdot 8,7 + 3,5 \cdot 0,3925 = 1,98$ м² °C/Вт.

С учётом теплотехнической неоднородности $R_{тп} = 1,98 / 0,7 = 2,83$ м² °C/Вт.

$\Delta t = (t_b - t_{нх}) (1 - 0,158 / R_{тп}) = 30,2^\circ\text{C}$

$\Delta e = e_b - e_n = 1403 - 184 = 1219$ Па; $\Delta e / \Delta t = 1219 / 30,2 = 40,4$ Па/°C;

$t_k = -26,7 + \sqrt{17,5 \times 40,4 - 131} = -26,7 + 24,0 = -2,7^\circ\text{C}$.

По таблицам определим соответствующее температуре $-2,7^\circ\text{C}$ максимальное парциальное давление насыщенных водяных паров в плоскости конденсации $E_k = 488$ Па.

Определим сопротивление теплопередаче до плоскости конденсации:

$R_k = (t_b - t_k) \cdot R_{тп} / (t_b - t_{но}) = (20 + 2,7) \cdot 2,83 / (20 + 12) = 2,01$ м² °C/Вт.

По величине сопротивления теплопередаче R_k определим слой, в котором расположена плоскость конденсации.

$$R_b = 0,115 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}; R_1 = 0,15 / 0,67 = 0,22 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт};$$

$$R_k^{yt} = 2,09 - 0,115 - 0,22 = 1,665 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}.$$

Плоскость конденсации расположена в утеплителе на расстоянии от внутренней поверхности слоя равном

$$\delta' = R_{k_{ут}} \cdot \lambda_{ут} = 1,665 \cdot 0,042 = 0,07 \text{ м}.$$

Сопротивление паропрооницанию слоёв конструкции от внутренней поверхности до зоны конденсации будет равно

$$R_n' = (0,15 / 0,09) + (0,07 / 0,32) = 1,67 + 0,22 = 1,89 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па/мг}.$$

Требуемое сопротивление паропрооницанию определим по формуле:

$$R_{on}^{mp} = R_n' \left(1 + \frac{E_n - e_n}{e_o - E_k} \right) = 1,89 \left(1 + \frac{488 - 184}{1403 - 488} \right) = 2,52 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па/мг}$$

Подставляя значения R_{np} и $R_{гпп}$ в систему уравнений (1–2) получим:

$$\begin{cases} 2,83 = 0,115 + 0,22 + \frac{\delta_{ym}}{0,042} + \frac{\delta_{mu}}{0,67} + 0,043 \\ 2,52 = 1,67 + \frac{\delta_{ym}}{0,32} + \frac{\delta_{mu}}{0,09} \end{cases}$$

Решая систему двух уравнений с двумя неизвестными, получим:

$$\delta_{yt} = 0,1 \text{ м и } \delta_{mu} = 0,049 \text{ м};$$

$$\delta_k = 0,15 + 0,10 + 0,05 = 0,30 \text{ м}.$$

Проверяем равенство потоков пара:

$$P_e = \frac{e_o - E_k}{R_{no}} = \frac{1403 - 488}{1,89} = 484; P_n = \frac{E_k - e_n}{R_{no} - R_{ns}} = \frac{488 - 184}{0,63} = 482.$$

Как видим, поток пара, который входит в плоскость конденсации, практически равен потоку пара, который выходит из неё, то есть накопления конденсационной влаги в конструкции в наиболее холодный период не будет.

Таким образом, представленная методика инженерного расчёта позволяет спроектировать многослойную конструкцию наружного ограждения здания, которая будет обладать не только надёжными теплозащитными свойствами, обеспечивающими тепловой комфорт в помещении, но и исключит конденсацию влаги в конструкции в холодный период года.

Литература

1. СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» / Минрегионразвития России. – М., 2012.
2. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин; под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.
3. Куприянов, В.Н. Количественные параметры конденсации парообразной влаги в наружных стенах / В.Н. Куприянов, И.Ш. Сафин // Известия КГАСУ. – 2013. – № 4 (26). – С. 121–128.
4. Гагарин, В.Г. Анализ расположения зоны наибольшего увлажнения в ограждающих конструкциях с различной тол-

щиной теплоизоляционного слоя / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов // Жилищное строительство. – 2016. – № 6. – С. 8–12.

5. Перехоженцев, А.Г. Исследование диффузии влаги в пористых строительных материалах / А.Г. Перехоженцев, И.Ю. Груздо // Вестник ВолГАСУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2014. – Вып. 35 (54). – С. 116–120.

6. Glaser. Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen. Kalttechnik // Heft. – 1959. – 10.

7. Klopfer H. Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen / H. Klopfer. – Bauvertag Wiesbaden, 1974.

8. Шнайдель К. Диффузия и конденсация водяного пара в ограждающих конструкциях / К. Шнайдель; перевод В.Г. Бердичевского. – М.: Стройиздат, 1985.

9. Перехоженцев, А.Г. Теоретические основы и методы расчёта температурно-влажностного режима ограждающих конструкций зданий / А.Г. Перехоженцев. – Волгоград: ВолГАСУ, 2008. – С. 104–112.

10. Перехоженцев, А.Г. Комплексный расчёт тепло- и пароизоляции многослойных ограждающих конструкций зданий / А.Г. Перехоженцев // Материалы 2-ой Международной научно-техн. конф. «Теоретические основы теплоснабжения и вентиляции». – М.: МГСУ, 2007.

Literatura

1. SP 50.13330.2012 «Teplovaya zashhita zdaniy» / Minregionrazvitiya Rossii. – M., 2012.
2. Fokin K.F. Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushhih chastej zdaniy / K.F. Fokin; pod red. Yu.A. Tabunshhikova, V.G. Gagarina. – M.: AVOK-PRESS, 2006. – 256 s.
3. Kupriyanov V.N. Kolichestvennyye parametry kondensatsii paroobraznoj vlagi v naruzhnyh stenah / V.N. Kupriyanov, I.SH. Safin // Izvestiya KGASU. – 2013. – № 4 (26). – S. 121–128.
4. Gagarin V.G. Analiz raspolozheniya zony naibol'shego uvlazhneniya v ograzhdayushhih konstruktsiyah s razlichnoj tolshhinoj teploizolyatsionnogo sloya / V.G. Gagarin, V.V. Kozlov // Zhilishhnoe stroitel'stvo. – 2016. – № 6. – S. 8–12.
5. Perehozhentsev A.G. Issledovanie diffuzii vlagi v poristyh stroitel'nyh materialah / A.G. Perehozhentsev, I.Yu. Gruzdo / Vestnik VolgASU. Seriya «Stroitel'stvo i arhitektura». – 2014. – Vyp. 35 (54). – S. 116–120.
6. Shpajdel' K. Diffuziya i kondensatsiya vodyanogo para v ograzhdayushhih konstruktsiyah / K. Shpajdel'; perevod V.G. Berdichevskogo. – M.: Strojizdat, 1985.
7. Perehozhentsev A.G. Teoreticheskie osnovy i metody rascheta temperaturno-vlazhnostnogo rezhima ograzhdayushhih konstruktsij zdaniy / A.G. Perehozhentsev. – Volgograd: VolgASU, 2008. – S. 104–112.
8. Perehozhentsev A.G. Kompleksnyj raschet teplo- i paroizolyatsii mnogoslojnyh ograzhdayushhih konstruktsij zdaniy / A.G. Perehozhentsev // Materialy 2-oy Mezhdunarodnoj nauchno-tehn. konf. «Teoreticheskie osnovy teplosnabzheniya i ventilyatsii». – M.: MGSU, 2007.

Перехоженцев Анатолий Георгиевич, 1941 г.р. (Волгоград). Доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры «Архитектура зданий и сооружений» Института архитектуры и строительства ФГБУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (400005, Волгоград, пр. им. Ленина, 28. ВолгГТУ). Сфера научных интересов: проектирование и расчёт температурно-влажностного режима наружных ограждающих конструкций зданий. Автор более 100 научных публикаций, в том числе 2 монографий. Тел. +7 (906) 409-03-95. E-mail: pag41@mail.ru.

Perekhozhentsev Anatoly Georgievich, born in 1941. (Volgograd). Doctor of Technical Sciences, Professor. Professor of the Department of Architecture of Buildings and Structures of the Institute of Architecture and Construction of the Volgograd State Technical University (28 Lenin Avenue, Volgograd, 400005. VSTU). Sphere of scientific interests: design and calculation of the temperature-humidity regime of external enclosing structures of buildings. The author of more than 100 scientific publications, including 2 monographs. Tel. +7 (906) 409-03-95. E-mail: pag41@mail.ru.