

УДК 697.137.2

Куприянов В.Н. – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН

E-mail: kuprivan@kgasu.ru

Сафин И.Ш. – инженер, заведующий лабораторией

E-mail: zavlab17@rambler.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ДИФФУЗИИ И КОНДЕНСАЦИИ ПАРООБРАЗНОЙ ВЛАГИ

АННОТАЦИЯ

Вскрыты недостатки нормативных документов по учету диффузии парообразной влаги при проектировании теплозащиты ограждающих конструкций. Предложен новый взгляд на проблему, основанный на физических процессах диффузии парообразной влаги через многослойное ограждение. Показано, что, изменяя теплопередачу и паропроницаемость отдельных слоев и их взаиморасположение в ограждении, можно обеспечить не накопление в них парообразной и конденсированной влаги.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ограждающие конструкции, проектирование, диффузия, водяные пары, конденсация.

Kupriyanov V.N. – doctor of technical sciences, professor, corresponding member of RAASN;

Safin I.S. – engineer, head of the laboratory

Kazan State University of Architecture and Engineering

DESIGNING OF ENCLOSING STRUCTURES WITH REGARD TO DIFFUSION AND CONDENSATION OF THE VAPOR MOISTURE

ABSTRACT

The weaknesses of normative documents on accounting diffusion of vaporized moisture in the design of building envelope thermal performance are revealed. We propose a new approach to the problem based on the physical processes of diffusion of moisture vapor through a multi-barrier. It is shown that by changing the heat transfer and water vapor permeability of individual layers and their relative positions in the fence, we can ensure non-accumulation in them of vaporized and condensed moisture.

KEY WORDS: walling, design, diffusion, water vapor, condensation.

1. Состояние вопроса и недостатки нормативных документов

Известно, что эксплуатационные свойства ограждающих конструкций во многом определяются процессами диффузии парообразной влаги и ее конденсации внутри ограждений.

В связи с этим в нормативной литературе по строительной теплотехнике всех лет изданий введены представления о допустимом влажностном режиме ограждающих конструкций в эксплуатации. Эти представления имеют различные наименования: «нормы влажностного режима наружных ограждений» (СНиП II – А. 7-62) [1]; «сопротивление паропроницанию» (СНиП II – А. 7-71, СНиП II – 3-79, СНиП II – 3-79*) [2,3]; «защита от переувлажнения ограждающих конструкций» (СНиП 23-02-2003) [4], однако принципы учета воздействия парообразной влаги на ограждения сохранены во всех переизданиях СНиП.

Нормы предписывают проектировать ограждающие конструкции, прежде всего, с позиции энергосбережения. Учет воздействия парообразной влаги проводится на ограждении, сформированном с позиции энергосбережения, по принципу «соответствует» или «не соответствует» требованиям СНиП. Если ограждение не соответствует требованиям СНиП по переувлажнению парообразной влагой, то нормы не дают внятных рекомендаций.

Принцип оценки соответствия нормам по рассматриваемому показателю сводится к сопоставлению сопротивления паропроницанию ограждающей конструкции (в пределах от

внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации) $R_{ПО}^B$, с нормируемым $R_{ПО}^{TP}$. При этом $R_{ПО}^B$ должно быть не меньше нормируемого $R_{ПО}^{TP}$, то есть должно выполняться неравенство

$$R_{ПО}^B > R_{ПО}^{TP} \quad (1)$$

Нормируемое (требуемое) сопротивление паропрооницанию определяется из двух условий:

1. Из условий недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации, то есть влага, накопившаяся в ограждении в зимний период, должна полностью высохнуть в летний период – $R_{ПО1}^{TP}$.

$$R_{ПО1}^{TP} = (e_B - E) R_{ПО}^H / (E - e_H) \quad (2)$$

2. Из условий ограничения накопления влаги в ограждающей конструкции за период с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха, то есть количество накопленной влаги не должно превышать количества, предусмотренного СНиПом к концу периода влагонакопления – $R_{ПО2}^{TP}$.

$$R_{ПО2}^{TP} = \frac{0,0024 \cdot 20 \cdot (e_B - E_0)}{r_w \cdot d_w \cdot \Delta W_{av} + h} \quad (3)$$

В этих формулах $R_{ПО}^H$ – сопротивление паропрооницанию части ограждения от плоскости возможной конденсации до наружной поверхности. Остальные индексы в формулах (2) и (3) подробно описаны в СНиП 23-02-2003, поэтому в целях экономии места в данной статье определение индексов опущено.

Приведенные принципы определения $R_{ПО1}^{TP}$ и $R_{ПО2}^{TP}$ сформулированы достаточно ясно, однако при их реализации возникает много неопределенностей.

Первый принцип, в некотором смысле, противоречит второму, то есть вне зависимости от количества накопившейся в ограждении влаги к концу периода влагонакопления, если эта влага высыхает за летний период, то ограждение удовлетворяет первому требованию.

При втором принципе непонятны обоснования граничных условий по допустимому количеству влаги: снижением теплозащитных качеств, коррозией материалов, снижением их долговечности или чем-либо еще. Представляется, что при различных граничных условиях допустимая величина влаги в ограждении должна быть различной.

Описанный метод учета парообразной влаги, разработанный М.А. Гуревичем [5, с. 60], впервые был представлен в СНиП II – А. 7-62 и практически не изменялся во всех последующих редакциях норм. Для однородных однослойных конструкций метод дает вполне удовлетворительные результаты.

С переходом на повышенный уровень теплозащиты ограждающих конструкций и появлением многослойных конструкций в нормативной методике выявился ряд неопределенностей и методика становится зачастую не эффективной и требует уточнения.

Первая неопределенность связана с расположением зоны возможной конденсации в ограждении. От расположения этой зоны зависят два важных параметра расчета $R_{ПО}^B$ и $R_{ПО}^H$. Неопределенной является также толщина увлажняемого слоя – d_w .

На рис. 1 приведена схема расположения плоскости возможной конденсации по СНиП II-А. 7-62 и можно видеть, что она детерминирована только для однородной стены – 1/3 толщины ограждения от наружной поверхности.

В ограждениях с утеплителем расположение плоскости конденсации неопределенно. В СНиП 23-02-2003 введено некоторое уточнение: плоскость возможной конденсации у ограждений с утеплителем определена как наружная поверхность утеплителя (примечание к п. 9.1).

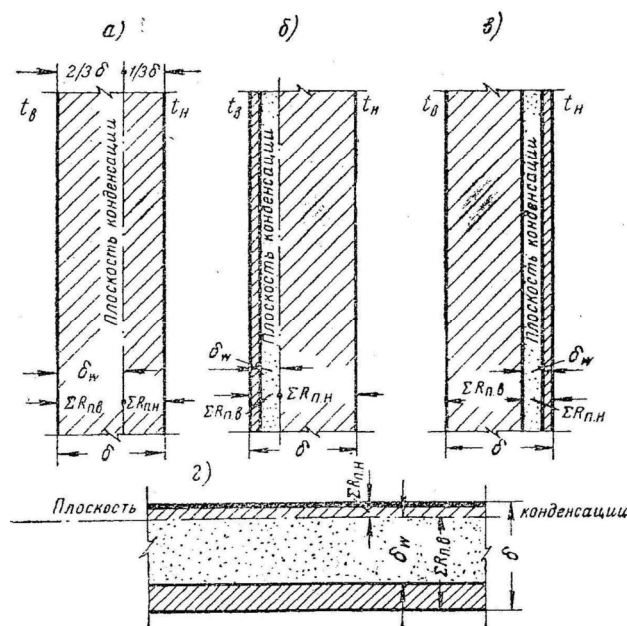


Рис. 1. Схемы положения плоскости вероятной конденсации в наружных ограждающих конструкциях отапливаемых зданий:
 а – однородная стена; б – стена, утепленная с внутренней стороны;
 в – стена, утепленная с наружной стороны; г – покрытие.

«Плавающее» расположение плоскости конденсации вызывает неопределенность в определении $R_{ПО}^B$ и $R_{ПО}^{TP}$. В связи с этим недоумение вызывает п. 13.8 СП 23-101-2004 [6], в котором записано: «Независимо от результатов расчета нормируемые сопротивления паропроонианию $R_{ПО1}^{TP}$ и $R_{ПО2}^{TP}$ (в пределах от внутренней поверхности до плоскости возможной конденсации) во всех случаях должны приниматься не более $5 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}/\text{мг}$ ». Если следовать этим указаниям нормативного документа, то расчет $R_{ПО1}^{TP}$ и $R_{ПО2}^{TP}$ можно исключить совсем, достаточно сформулировать конструкцию ограждения с величиной сопротивления паропроонианию $R_{ПО}^B$ – больше $5 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}/\text{мг}$. Например, слой из монолитного железобетона толщиной 15 см имеет величину $R_{П} = 0,15/0,03 = 5 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)}/\text{мг}$, а такие слои очень часто используются в конструкциях многослойных ограждений. При этом неопределенность с расположением плоскости конденсации сохраняется.

Большие неопределенности заложены в нормативных документах при использовании расчетных параметров климата: температуры наружного воздуха t_n и его влажности e_n или ϵ_n . От величины t_n зависят: E_n и ϵ_n для наружного воздуха; температуры ϕ_x и максимальные упругости водяного пара E_x по сечению ограждения, что при сравнении E_x с e_x и предопределяет конденсацию водяного пара в ограждении.

При определении E и E_0 (формулы 2 и 3) в плоскости возможной конденсации, температуру в плоскости возможной конденсации нормы рекомендуют определять через среднюю температуру наружного воздуха соответственно холодного, переходного и теплого периодов или через среднюю температуру периода месяцев с отрицательными средними месячными температурами. Величина e_n определяется как средняя за годовой период. То есть основные параметры формул (2) и (3) представляют собой средние величины и не моделируют физические процессы диффузии парообразной влаги в ограждениях. В расчетной практике используют и другие значения температур наружного воздуха [7]. Например, в приложении Э СП 23-101-2004 в качестве расчетной принята средняя температура наружного воздуха самого холодного месяца.

Существующие нормативные документы не содержат информации (или методов) по оценке продолжительности увлажнения ограждений в зимний период, что не позволяет оценить количество конденсированной влаги и, соответственно, ее влияние на эксплуатационные свойства ограждений. В то же время в зарубежных нормах эти параметры определены. Так, в немецких нормах DIN 4108 [8,9] определено, что период водонакопления продолжается с середины ноября до середины января – 60 суток или 1440 часов, период высыхания (испарения) – с середины июня до середины сентября – 90 суток или 2160 часов.

2. Определение температуры начала конденсации и продолжительности конденсации влаги в ограждении

Оптимальная конструкция ограждения должна исключать конденсацию парообразной влаги. Если конструктивными мерами не удастся полностью исключить конденсацию влаги, то задача проектирования сводится к максимальному снижению объемов конденсированной влаги в зимний период и обеспечению ее высыхания в летний период.

Конденсация парообразной влаги в ограждении начинается в том сечении, в котором максимальная упругость водяного пара E_x будет равна (или меньше) действительной упругости водяного пара e_x , т.е. $(E_x - e_x) \leq 0$. Это наглядно видно на рис. 2, где построены линии E_x и e_x по сечению ограждающей конструкции по методике Власова-Фокина и видно, что в сечении $\frac{3}{4}$ разность $(E_{3/4} - e_{3/4}) = 286 - 456 = -170$ отрицательная, следовательно, в этом сечении выпадает конденсат (зона выделена вертикальной штриховкой).

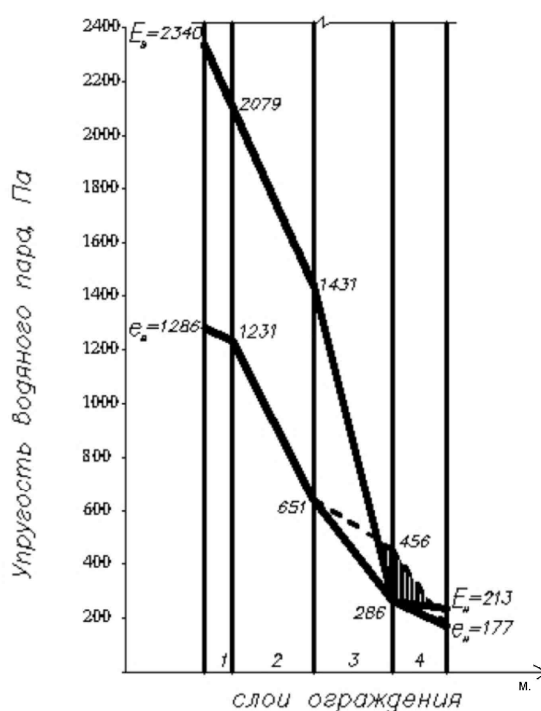


Рис. 2. Распределение действительных (e) и максимальных (E) упругостей водяного пара по сечению ограждения. Область с вертикальной штриховкой – зона конденсации.

Параметры рассмотренного ограждения приведены в табл. 1. Климатические условия эксплуатации: $t_H = -12,2^\circ\text{C}$, $\varphi_H = 83\%$, $t_B = 20^\circ\text{C}$, $\varphi_B = 55\%$, отсюда $E_H = 213$ Па, $e_H = 177$ Па, $E_B = 2338$ Па, $e_B = 1286$ Па.

Исследования в этом направлении [7] позволили установить два важных аспекта в определении расчетной температуры наружного воздуха при оценке паропроницаемости ограждений:

1. Для каждой конструкции ограждения существует свое значение расчетной температуры наружного воздуха $t_{нк}$, при которой в ограждении начинается конденсация парообразной влаги в определенном сечении – плоскости конденсации.

2. Для каждой конструкции ограждения существует интервал температур от $t_{нк}$ до минимальной температуры в данном регионе, определенной обеспеченности t_m , в котором идет процесс конденсации и накопления влаги в ограждении. В интервале $(t_{нк} - t_m)$ в ограждении образуется не только плоскость, но и зона конденсации, которая занимает некоторое расстояние по толщине ограждения.

В плоскости конденсации разность $(E - e)$ равна нулю, в зоне конденсации разность $(E - e)$ меньше нуля. Сформулированные представления о конденсации парообразной влаги в ограждающих конструкциях приведены на рис. 3.

Таблица 1

Характеристика слоев ограждения и теплотехнические параметры

№ слоя	Вид материала слоя	Толщина слоя d , м	Кэф. теплопроводности λ Вт/(м·°C)	Кэф. паропроницаемости μ мг/(м ² ·ч·Па)	$R_{Ti} = \frac{d}{m}$ (м ⁰ C)/Вт	$R_{Pi} = \frac{d}{m}$ мг/(м ² ·ч·Па)	$G_i = \frac{d}{m}$ мг/(м ² ·ч·Па)
1	Известково-песчаный раствор	0,02	0,7	0,12	0,0286	0,167	6
2	Керамический эффективный кирпич	0,25	0,58	0,14	0,431	1,786	0,56
3	Монолитный пенобетон	0,15	0,095	0,25	1,579	0,6	1,67
4	Керамический эффективный кирпич	0,12	0,58	0,14	0,207	0,857	1,17

Из рис. 3 следует, что при высоких значениях t_H , разность давлений $(E-e)$ будет больше нуля и конденсации влаги не происходит. По мере снижения наружных температур воздуха будет уменьшаться разность $(E-e)$. Значение t_H , при котором разность давлений $(E-e)$ в каком-либо сечении ограждения будет равна нулю, указывает на начало конденсации водяного пара и образование плоскости конденсации.

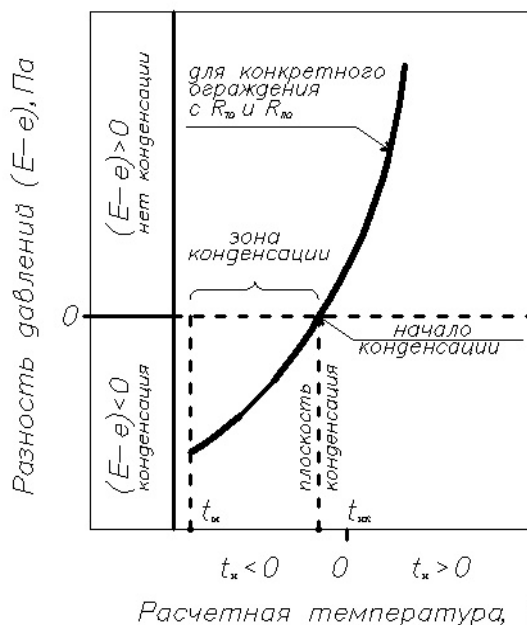


Рис. 3. Зависимость разности давлений водяного пара $(E-e)$ в ограждении с конкретными R_{To} и R_{Po} от расчетных температур наружного воздуха t_H . (Зависимость процесса конденсации водяного пара от температуры наружного воздуха t_H).

Это значение температуры наружного воздуха t_H обозначим $t_{нк}$ – температура начала конденсации. При дальнейшем понижении t_H возрастает отрицательная разность $(E-e)$ и конденсация идет по толщине ограждения, образуя зону конденсации.

Высказанные предположения подтверждаются результатами расчета двух ограждающих конструкций (рис. 4). Кривая 1 относится к многослойному ограждению с утеплителем из экструдированного пенополистирола с облицовкой из сплошного глиняного кирпича и поризованной штукатурки. Ограждение описано в приложении Э СП 23-101-2004 ($R_{Po} = 21,15$ (м²·ч·Па)/мг и $R_{To} = 3,64$ (м²·°C)/Вт). Кривые 2 и 3 относятся к однослойному ограждению из глиняного кирпича со

штукатуркой с двух сторон, толщиной $2+64+2=68$ см ($R_{\text{по}}=6,42$ ($\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$)/мг и $R_{\text{то}}=1,0$ ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$)/Вт). В первом ограждении (кривая 1) в качестве расчетного сечения принята наружная поверхность утеплителя. Во втором ограждении приняты два расчетных сечения: на расстоянии 15 см от наружной поверхности (кривая 2) и 31 см от наружной поверхности (кривая 3).

Анализ данных рис. 4 подтверждает предположение о том, что каждое ограждение и даже отдельное сечение в зависимости от параметров $R_{\text{по}}$ и $R_{\text{то}}$ имеют собственную температуру начала конденсации $t_{\text{нк}}$ (-9, -11 и -15,5 $^{\circ}\text{C}$). При снижении $t_{\text{н}}$ плоскость конденсации продвигается внутрь однослойного ограждения, образуя зону конденсации (кривые 2 и 3, $t_{\text{нк}}=-9$ и -11 $^{\circ}\text{C}$).

Процесс образования зоны конденсации в однослойном ограждении нагляднее представлен в табл. 2, где приведены значения разности $(E - e)$ по различным условным сечениям ограждения при понижении температуры наружного воздуха. Ограждение представляет собой однослойную конструкцию из кирпичной кладки в три кирпича $d = 0,77$ м на цементно-песчаном растворе. Ограждение условно разделено на пять слоев по 0,154 м каждый. Нумерация слоев – от внутренней поверхности (1/2, 2/3 и т.д. – сечения условных слоев). $R_{\text{то}} = 1,25$ ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$)/Вт, $R_{\text{по}}=7,0$ ($\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$)/мг.

Таблица 2

Образование зоны конденсации по сечениям ограждения при понижении температуры наружного воздуха

Температура наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$	$(E - e)$ по сечениям ограждения, Па			
	1/2	2/3	3/4	4/5
-10,2	376	123	26	13
-11	316	110	18	3
-12	290	85	0	-13
-13	277	66	-17	-24
-15	230	21	-51	-50
-20	116	-79	-151	-103

Из табл. 2 видно, что сечение 4/5 (ближайшее к наружному воздуху) при температуре -11 $^{\circ}\text{C}$ близко к конденсации ($E-e=3$). При понижении $t_{\text{н}}$ на 1 $^{\circ}\text{C}$ (до -12 $^{\circ}\text{C}$) в этом сечении выпадает конденсат ($E-e=-13$). При понижении $t_{\text{н}}$ до -20 $^{\circ}\text{C}$ уже в трех сечениях рассматриваемого ограждения (2/3, 3/4 и 4/5) выпадает конденсат. В этих сечениях разность $(E-e)$ имеет отрицательные значения, что в табл. 2 выделено жирным курсивом.

Таким образом, расчетной температурой начала конденсации парообразной влаги в конкретном ограждении $t_{\text{нк}}$ является такая температура наружного воздуха $t_{\text{н}}$, при которой в сечении ограждения, ближайшем к наружной поверхности, разница максимального (E) и действительного (e) давлений водяного пара ($E-e$) равна нулю.

В настоящее время не разработана математическая модель определения $t_{\text{нк}}$ в зависимости от параметров ограждения $R_{\text{п}}$ и $R_{\text{т}}$, поэтому предлагается последовательное определение E_x и e_x в различных сечениях ограждения, начиная с ближайших к наружной поверхности, на основе известного графо-аналитического метода Власова-Фокина.

Предлагается следующая последовательность расчетов:

1. Определяются $R_{\text{т}}$ и $R_{\text{п}}$ по характерным сечениям ограждения.
2. Определяются e_i и ϕ_i в этих сечениях при различных температурах наружного воздуха $t_{\text{н}}$.
3. По температуре в сечениях ограждения ϕ_i на основании справочных таблиц определяется максимальная упругость водяного пара в этих сечениях E_i .
4. Определяется разность $(E_i - e_i)$ по характерным сечениям.
5. Строится зависимость $(E-e)$ от $t_{\text{н}}$ аналогично рис. 3 и по графику определяется температура начала конденсации в данном ограждении - $t_{\text{нк}}$.

Для определения температурных границ зоны конденсации ($t_{\text{нк}}-t_{\text{м}}$) требуется определение максимальной температуры наружного воздуха в данном регионе соответствующей обеспеченности – $t_{\text{м}}$. В связи с недостаточными исследованиями паропроницаемости, оценки объемов конденсированной влаги в ограждениях и влиянием этой влаги на эксплуатационные свойства затруднительно дать обоснованные рекомендации как по величине $t_{\text{м}}$, так и по обеспеченности – величине коэффициента $k_{\text{об}}$.

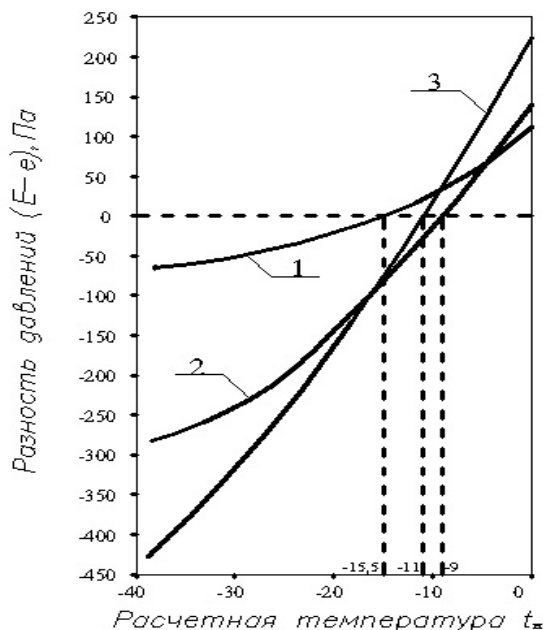


Рис. 4. Зависимость разности давлений водяного пара ($E - e$) в различных сечениях ограждений от расчетных температур наружного воздуха t_n :

1 – наружная поверхность утеплителя в многослойном ограждении;
2 и 3 – на расстоянии 15 и 31 см от наружной поверхности в однослойном ограждении

В первом приближении можно рекомендовать данные СНиП II – А. 6-72 [10] табл. 3 «Повторяемость температур наружного воздуха в часах». Фрагмент этой таблицы СНиП для некоторых городов в области температур ниже нуля градусов приведен в табл. 3.

Таблица 3

Повторяемость температур наружного воздуха в часах

№ интервала	Интервал температур	Москва		Мурманск	
		Всего часов за год	Нарастающий итог часов	Всего часов за год	Нарастающий итог часов
1	-38 ÷ -35,1	3	3	-	-
2	-35 ÷ -30,1	12	15	6	6
3	-30 ÷ -25,1	32	47	32	38
4	-25 ÷ -20,1	125	172	97	135
5	-20 ÷ -15,1	246	418	317	452
6	-15 ÷ -10,1	487	905	665	1117
7	-10 ÷ -5,1	829	1734	1159	2276
8	-5 ÷ -0,1	1299	3033	1726	4002

После определения температуры начала конденсации для данного ограждения $t_{нк}$ по табл. 3 можно найти продолжительность периода конденсации в часах в интервале температур ($t_{нк} - t_m$). В работе [7] приведен пример расчета объемов конденсированной влаги с использованием данных табл. 3.

3. Количество парообразной влаги, поступающее в ограждение и конденсирующееся в нем

С увеличением количества парообразной влаги, проходящей через ограждение, растет объем конденсированной влаги, что снижает эксплуатационные свойства ограждений: повышается теплопроводность увлажненных слоев, вследствие чего снижается теплозащита ограждений; усиливаются процессы замораживания и оттаивания облицовочных слоев и снижается их долговечность. В связи с этим напрашивается вывод о необходимости ограничения количества парообразной влаги, поступающей из помещения в ограждающую конструкцию. Идею о полной изоляции внутренней поверхности ограждения от проникновения через нее парообразной влаги из

помещения следует считать неприемлемой, так как высыхание ограждения в летнее время идет в обе стороны, как через наружную поверхность, так и через внутреннюю поверхность в помещение [9].

Ограничить поступление парообразной влаги в ограждение можно оптимальным подбором материалов и параметров отдельных слоев в многослойном ограждении.

Поток парообразной влаги через ограждение G определяется по аналогии с потоком теплоты по формуле:

$$G = \frac{e_B - e_H}{R_{по}}, \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}), \quad (4)$$

где: e_B и e_H – действительная упругость водяного пара внутри и снаружи помещения соответственно, Па;

$R_{по}$ – сопротивление паропроницаемости ограждающей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$.

Из формулы (4) следует, что количество парообразной влаги в ограждении G растет с увеличением разности действительной упругости водяного пара по обеим сторонам ограждения ($e_B - e_H$) и с уменьшением общего сопротивления паропроницаемости ограждения $R_{по}$.

Разность ($e_B - e_H$) определяется требованиями к микроклимату помещений (e_B), климатом места строительства (e_H) и мало зависит от проектировщика, в то время как сопротивление паропроницаемости ограждения $R_{по}$ и отдельных его слоев $R_{пi}$ зависит только от проектировщика и его квалификации.

Величина $R_{пi}$ определяется по формуле

$$R_{пi} = d_i / m_i \quad (5)$$

и может регулироваться изменением толщины слоя d_i или выбором материала с другим коэффициентом паропроницаемости m_i .

Анализ различных типов современных ограждающих конструкций показал, что их величина сопротивления паропроницаемости $R_{по}$ находится в пределах от 3 до 20 $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$. Для зимнего периода средней климатической зоны России разность ($e_B - e_H$) может превышать 1000 Па.

Из этих данных следует, что поток парообразной влаги через ограждение в зимний период может изменяться от 50 до 333 $\text{мг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$.

$$G_3 = \frac{e_B - e_H}{R_{по}} = \frac{1000}{3} = 333 \text{ мг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$$

$$G_{20} = \frac{1000}{20} = 50 \text{ мг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$$

Таким образом, количество парообразной влаги, проходящей через ограждение, может изменяться более чем в 6 раз в зависимости от конструкции ограждения. Очевидно, что отрицательное влияние влаги на ограждение изменится также в разы.

В связи с изложенным важнейшей задачей проектирования ограждений является ограничение парообразной влаги, поступающей в ограждение. Это обеспечивается относительно высоким сопротивлением паропроницаемости слоя ограждения, примыкающего к внутреннему воздуху помещения. Отечественные нормативные документы не содержат рекомендаций о величине сопротивления паропроницаемости внутреннего слоя ограждения, что затрудняет процесс проектирования. Этот вопрос требует специального исследования.

В настоящее время, в качестве первого приближения, можно рекомендовать предложение Роджерса [11], который со ссылкой на стандарт США для жилых зданий определил величину паропроницаемости первого слоя, которая должна быть меньше $0,03 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{мм рт. ст.})$. В пересчете на принятую в наших нормах размерность это составит $0,225 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$. Величина паропроницаемости слоя является обратной величиной сопротивления паропроницаемости слоя, отсюда $R_{п}$ внутреннего слоя равно $1/0,225 = 4,44 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$. Таким образом, сопротивление паропроницаемости слоя, примыкающего к внутренней поверхности, должно быть не меньше $4,44 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$.

Например, для конструкционного слоя из железобетона сопротивление паропроницаемости будет не меньше 4,44 при толщине слоя $d = R_{п} \cdot m = 4,44 \cdot 0,03 = 0,133 \text{ м}$ и более.

Количество парообразной влаги, конденсирующейся в ограждении, может быть определено графоаналитическим методом Власова-Фокина. Рассмотрим пример двухслойного ограждения (для упрощения расчета и наглядности штукатурные слои отсутствуют). Климатические условия: $t_H = -30^\circ\text{C}$, $\varphi_H = 84\%$, $t_B = +20^\circ\text{C}$, $\varphi_B = 50\%$. Материальные слои: 1 – минераловатные плиты УРСА $\rho_0 = 45 \text{ кг}/\text{м}^3$, $d_1 = 200 \text{ мм}$, $m_1 = 0,5 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$, $\lambda_1 = 0,047 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; 2 – монолитный железобетон $\rho_0 = 2500 \text{ кг}/\text{м}^3$, $d_2 = 100 \text{ мм}$, $m_2 = 0,03 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$, $\lambda_2 = 2,04 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

Рассмотрены два варианта ограждений: а – теплоизоляционный слой размещен со стороны помещения и б – теплоизоляционный слой размещен с наружной стороны (рис. 5). Результаты расчета t ,

ϕ , E и e нанесены на поперечное сечение ограждения, которое выполнено в масштабе сопротивления паропрооницанию R_n (для получения графика e_B-e_H в виде прямой линии).

Сопротивление паропрооницанию слоев:

$$R_{n1} = d_1/m_1 = 0,2/0,5 = 0,4 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)/мг};$$

$$R_{n2} = d_2/m_2 = 0,1/0,03 = 3,33 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)/мг};$$

$$R_{no} = R_{n1} + R_{n2} = 0,4 + 3,33 = 3,73 \text{ (м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па)/мг}.$$

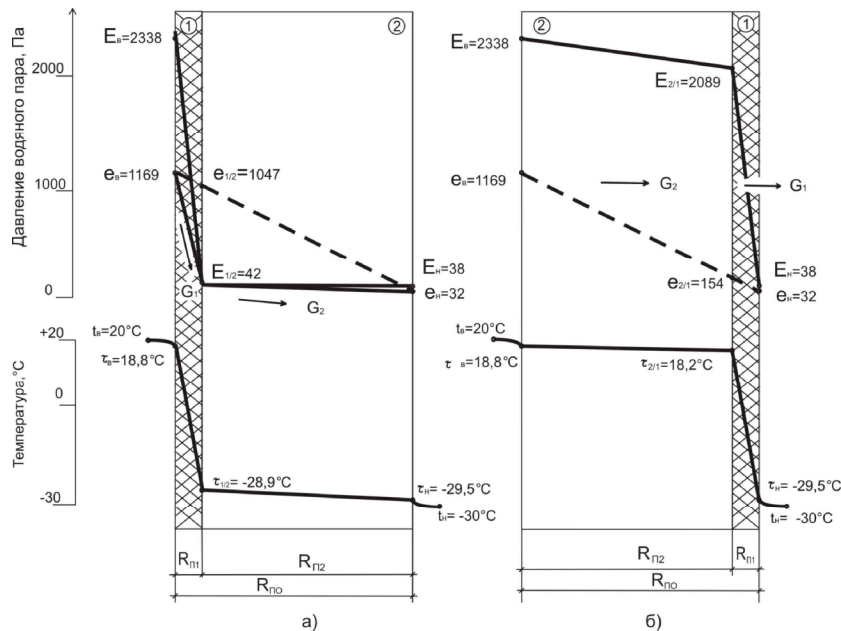


Рис. 5. Распределение t , ϕ , E и e по сечению ограждения.
 а) теплоизоляционный слой расположен со стороны помещения;
 б) то же с наружной стороны.

На рис. 5б видно, что в такой конструкции ограждения конденсация водяных паров отсутствует. Количество парообразной влаги, проходящей через ограждение и отдельные слои, будет равно: $G = G_2 = G_1$;

$$\frac{e_B - e_H}{R_{no}} = \frac{e_B - e_{2/1}}{R_{n2}} = \frac{e_{1/2} - e_H}{R_{n1}} = \frac{1169 - 32}{3,73} = \frac{1169 - 154}{3,33} = \frac{154 - 32}{0,4} = 305 = 305 = 305 \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч)}. \quad (6)$$

Для конструкции ограждения, представленного на рис. 5а, количество конденсата ($G_{конд}$) определяется как разность между количеством водяных паров, приходящих к плоскости конденсации, (G_1) и количеством водяных паров, выходящих из ограждения (G_2):

$$G_{конд} = G_1 - G_2 = \frac{e_B - E_{1/2}}{R_{n1}} - \frac{E_{1/2} - e_H}{R_{n2}} = \frac{1169 - 42}{0,4} - \frac{42 - 38}{3,33} = 2817,5 - 1,2 = 2816,3 \text{ мг/(м}^2 \cdot \text{ч)}. \quad (7)$$

За сутки это количество составит $67,6 \text{ г/м}^2$, а за месяц превысит два литра воды на 1 м^2 ограждения.

В работе немецких исследователей [9, с. 53] показано, что за зимний период в стенах зданий количество конденсированной влаги не должно превышать 500 г/м^2 , а в кровлях между слоем теплоизоляционного материала и нижней стороной кровельного ковра это количество в течение зимы не должно превышать 10 г/м^2 .

В отечественной нормативной литературе подобные рекомендации отсутствуют. Если взять за основу приведенные немецкие нормы, то конструкция ограждения по схеме рис. 5а является неудовлетворительной.

4. Влияние взаимного расположения слоев в многослойных ограждениях

Если одной из задач проектирования ограждений является ограничение доступа парообразной влаги в ограждение, то другой задачей будет обеспечение беспрепятственной диффузии парообразной влаги через ограждение и выход ее наружу. То есть свойства материалов, характеристика слоев

ограждения и их взаимное расположение должны обеспечить возрастающую легкость диффузии парообразной влаги через отдельные слои и удаление ее из ограждения.

Процесс паропроницаемости в многослойных конструкциях выявляется более наглядно, если анализировать не сопротивления паропроницаемости отдельных слоев R_{Pi} , а их обратные величины – величины паропроницаемости слоя $G_i=1/R_{Pi}$, мг/(м²·ч·Па). В этом случае наглядно выявляется «правильность» или «неправильность» взаимного расположения слоев.

Для двухслойного ограждения, пример которого рассмотрен в п. 3 данной статьи, сопротивление паропроницаемости теплоизоляционного слоя $R_{Pi1} = 0,4$, а слоя железобетона $R_{Pi2} = 3,33$ (м²·ч·Па)/мг. Паропроницаемость этих слоев составит соответственно $G_1=1/R_{Pi1}=1/0,4=2,5$ мг/(м²·ч·Па) и $G_2=1/R_{Pi2}=1/3,33=0,3$ мг/(м²·ч·Па).

Эти расчеты показывают, что через 1 м² слоя теплоизоляционного материала проходит 2,5 мг влаги в час, а через слой железобетона 0,3 мг влаги в час при $\Delta e = 1$ Па.

Для ограждения по схеме рис. 5а будем иметь следующую последовательность передачи парообразной влаги:

$$2,5 > 0,3,$$

т.е. через слой теплоизоляции к поверхности слоя железобетона будет подходить в час 2,5 мг влаги, а удаляться через слой железобетона только 0,3 мг. Таким образом, перед слоем железобетона будет накапливаться $2,5 - 0,3 = 2,2$ мг влаги в час и увеличивать влажность ограждения.

Для ограждения по схеме рис. 5б будем иметь:

$$0,3 < 2,5,$$

т.е. через слой железобетона к поверхности слоя теплоизоляционного материала будет подходить 0,3 мг влаги в час, а удаляться через слой теплоизоляции может 2,5 мг влаги в час. Таким образом, вся влага будет свободно выходить из ограждения, не увеличивая его влажность.

Таким образом, анализ паропроницаемости двухслойного ограждения через величины паропроницаемости слоев G_1 и G_2 позволил выявить проблемное сечение, где будет накапливаться влага при «неправильном» взаимном расположении слоев без сложных графоаналитических расчетов и построений.

Рассмотренный пример еще раз подтвердил высокую значимость взаимного расположения слоев в многослойном ограждении, которое должно определяться процессами диффузии водяного пара.

Этот подход не является абсолютно новым. Фокин К.Ф. [12], анализируя «рациональное расположение в ограждении слоев различных материалов», писал, что «материалы ограждения должны располагаться в следующем порядке: к внутренней поверхности – материалы плотные, теплопроводные и малопроницаемые, а к наружной поверхности наоборот, пористые, малотеплопроводные и более паропроницаемые».

В те годы, когда были сформулированы эти рекомендации, конструкции ограждений были простейшими и эти рекомендации были достаточными. В современных ограждающих конструкциях количество материальных слоев может достигать пяти и более, в связи с чем средние слои ограждений остаются «неохваченными» рекомендациями.

Наиболее полные рекомендации к современным ограждениям изложены в работах Роджерса [11] – отдельные слои в многослойных ограждениях следует располагать в такой последовательности, чтобы паропроницаемость каждого слоя нарастала от внутренней поверхности к наружной. То есть должно выполняться неравенство:

$$G_B < G_1 < G_2 < \dots < G_H, \quad (8)$$

где: G_B и G_H – паропроницаемость внутреннего и наружного слоев ограждения соответственно;

$G_1; G_2, \dots$ – паропроницаемость отдельных слоев.

По мнению [11], ограждение не будет накапливать влагу, если паропроницаемость наружного слоя G_H будет, как минимум, в пять раз выше паропроницаемости внутреннего слоя G_B :

$$G_H = 5 G_B. \quad (9)$$

При конструировании ограждения могут возникнуть технические сложности с облицовочным слоем, который должен быть достаточно плотным и водостойким. Величина G_H такого слоя может оказаться достаточно малой, и неравенство (8) не будет выполняться. Следствием этого будет накопление влаги перед облицовочным слоем со всеми негативными последствиями. В этом случае конструкция ограждения должна предусматривать вентилируемую воздушную прослойку перед облицовочным слоем, для удаления излишек парообразной влаги.

5. Заключение

Изложенные выше логичные и понятные рекомендации по проектированию ограждающих конструкций с позиции не накопления в них парообразной влаги не учитываются в подавляющем числе случаев. В настоящее время при проектировании ограждающих конструкций основное внимание направлено на энергосбережение, на получение расчетной энергоэффективности в проектной

документации. Изменение влажностных и теплотехнических характеристик, а также долговечности материалов ограждений при эксплуатационных воздействиях остается на втором плане. «Защита от переувлажнения ограждающих конструкций» в СНиПе 23-02-2003 ограничивается лишь контролем накопления или не накопления влаги в ограждении, которое запроектировано только с позиции энергосбережения. Рекомендаций о том, как проектировать ограждение, чтобы исключить накопление в нем парообразной влаги, не содержится ни в СНиП 23-02-2003, ни в СП 23-101-2004.

В связи с изложенным при проектировании ограждающих конструкций должны одновременно учитываться как требования по достижению необходимого уровня теплозащиты, так и требования по не накоплению в ограждении парообразной и конденсированной влаги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП II-A.7-62. Строительная теплотехника. Нормы проектирования.
2. СНиП II-A.7-71. Строительная теплотехника.
3. СНиП II-3-79*. Строительная теплотехника, 1995 г.
4. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий.
5. Матросов Ю.А. Энергосбережение в зданиях. Проблема и пути ее решения. – М.: НИИСФ, 2008. – 496 с.
6. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий.
7. Куприянов В.Н., Сафин И.Ш., Хабибуллина А.Г. К вопросу о паропроницаемости ограждающих конструкций // Журнал РААСН АCADEMIA Строительство и архитектура, 2009, № 5. – С. 504-507.
8. Блази В. Справочник проектировщика. Строительная физика. / Пер. с нем. – М.: Техносфера, 2004. – 480 с.
9. Строительная физика /Е. Шильд, Х.-Ф. Кассельман, Г. Дамен, Р. Поленц. / Пер. с нем. – М.: СИ, 1982. – 296 с.
10. СНиП II-A.6-72. Строительная климатология и геофизика.
11. Роджерс Т.С. Проектирование тепловой защиты зданий. / Пер. с англ. – М.: СИ, 1966. – 228 с.
12. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. Изд. 4-е, перераб. и дополн. М.: СИ, 1973. – 287 с.

REFERENCES

1. SNIP II-A. 7-62. Building Heat Engineering. Design standards.
2. SNIP II-A. 7-71. Building Heat Engineering.
3. SNIP II-3-79 *. Building Heat Engineering, 1995.
4. SNIP 23-02-2003. Thermal protection of buildings.
5. Matrosov Y.A. Energy conservation in buildings. The problem and its solutions. – M.: NIISF, 2008. – 496 p.
6. SP 23-101-2004. Design of thermal protection of buildings.
7. Kupriyanov V.N., Safin I.S., Khabibullina A.G. On the water vapor permeability walling // Journal RAASN ACADEMIA Construction and Architecture, 2009, № 5. – P. 504-507.
8. Blazy B. Handbook of the designer. Building Physics. Trans. with him. – M.: Technosphere, 2004. – 480 p.
9. Building Physics / E. Schild, H.-F. Casselman, G. Dahmen, R. Polenz. Trans. with him. – M.: MI, 1982. – 296 p.
10. SNIP II-A. 6-72. Building climatology and geophysics.
11. Rogers T.S. Design of thermal protection of buildings. Trans. from English. – M.: MI, 1966. – 228 p.
12. Fokin K.F. Building heat engineering envelope of the building. Ed. 4th revised. and supplemented. MG: SI, 1973. – 287 p.