

Опубликовано в кн. «Строительная физика в XXI веке». Научно-техническая конференция посвященная 50-летию НИИСФ РААСН. Москва, НИИСФ, 25-27 сентября 2006 г. с.73-80.

## **Методика проверки выпадения конденсата в воздушном зазоре вентилируемого фасада.**

*Гагарин В.Г., Козлов В.В.*

**Научно-исследовательский институт  
строительной физики**

### **1. Введение.**

Благоприятный влажностный режим стен с вентилируемым фасадом является одной из предпосылок, определяющих целесообразность их применения, следовательно, конструктивные особенности фасада должны определяться с учетом этого обстоятельства. В частности параметры воздушного зазора должны определяться с учетом расчетного влажностного режима конкретной стены. К сожалению, в настоящее время, при проектировании вентилируемых фасадов этот вопрос редко решается правильно. Наиболее распространенными являются следующие случаи:

- фасад проектируется и строится без учета влажностного режима стены; в результате появляются невентилируемые воздушные зазоры, перекрытия воздушного зазора горизонтальными направляющими, установка облицовки на отnose вообще без зазора как такового [1];
- при проектировании фасада влажностный режим формально учитывается в рамках методики СНиП II-3-79\* [2] или СНиП 23-02-2003 [3], вообще неприменимой для таких конструкций (чаще всего такие расчеты не связывают с параметрами воздушного зазора, так как в СНиП 23-02-2003 такая связь не предусмотрена);
- при проектировании фасада используются методики расчета влажностного режима содержащие ошибки [4] и дающие произвольный результат при их практическом применении.

Не стоит думать, что описываемая проблема незначительна, что необходимость мероприятий по устройству вентилируемого воздушного зазора явно преувеличена, а последствия произвольного выбора параметров воздушного зазора незначительны. Конструктивные различия между нали-

чием вентилируемого воздушного зазора и его отсутствием заключается не только в длине кронштейнов, но и в целом ряде качественных изменений, затрагивающих практически все элементы конструкции, попадающие в зазор. Создание вентилируемого воздушного зазора повышает требования к пожарной безопасности конструкции, коррозионной стойкости материалов, плотности утеплителя, наличию гидроветрозащиты и т.д. Даже требования к крепежу минераловатных плит при наличии воздушного зазора жестче. Причем, от того соответствует воздушный зазор возложенным на него требованиям, или нет, цена описанных выше мероприятий не меняется. Таким образом, дорогостоящее и трудоемкое мероприятие по созданию вентилируемого воздушного зазора вызвано одной причиной - нормализацией влажностного режима стены.

## **2. Особенности расчета влажностного режима для навесных фасадных систем с воздушным зазором.**

В нашей стране прогнозированию влажностного режима ограждающих конструкций традиционно уделялось большое внимание. Первые методы расчета были разработаны еще до Великой отечественной войны. Однако, эти методы ориентированы на сплошные ограждающие конструкции. Наличие вентилируемых воздушных зазоров почти не влияло на математическую модель процесса влагопереноса и на алгоритм расчета. При расчете влажностного режима навесных фасадных систем с воздушным зазором необходимо учитывать особенности, которые создаются наличием воздушного зазора. Воздух, движущийся по зазору, переносит вдоль стены теплоту и влагу, что приводит к изменению его температуры и влажности с высотой. Таким образом, разным зонам по высоте стены соответствуют различные граничные условия, а значит и влажностный режим стены будет меняться с высотой. Это является *первой отличительной особенностью*. Усреднение по высоте граничных условий влагообмена стены неприменимо. Критериями оценки влажностного режима являются не средние, а наиболее худшие показатели, поскольку основной целью расчета влажностного режима является не оценка потери влаги через конструкцию (как в задачах теплопередачи), а выявление периодов времени и зоны предельного увлажнения материала, приводящего к необратимым последствиям (снижению долговечности и т.д.). Кроме того, граничное условие влагообмена значительно сложнее связано с переменными параметрами влажностного режима стены, что делает невозможным применение к нему приема усреднения граничного условия, как это обычно имеет место при расчетах теплопередачи через стену.

*Второй особенностью* расчета влажностного режима навесных фасадных систем с воздушным зазором является расположение возможной зоны конденсации вне расчетного участка стены. При грамотном проектировании вентфасадов единственным местом возможной конденсации явля-

ется облицовочная плитка и элементы подконструкции. Традиционно они не входят в расчетную схему, но, в данном случае, все же являются частью конструкции, влажностным режимом которой нельзя пренебречь. Ни плитка, ни подконструкция практически не чувствительны к ограниченному обледенению или конденсации влаги, но чтобы процесс был ограниченным он должен контролироваться расчетом. При значительном накоплении влаги на облицовочных элементах начнется процесс перераспределения влаги иными механизмами, не предусмотренными в математической модели. Например, влага начнет стекать вниз и попадет на утеплитель или на чувствительные к увлажнению элементы конструкции. При еще более значительном накоплении влаги может частично или полностью перекрыться воздушный зазор с дальнейшим вмерзанием влаги в утеплитель. И, наконец, при еще большем количестве конденсированной влаги она может оказать существенное увеличение нагрузки несущие элементы подконструкции. Конечно, два последних случая являются крайними и, пока что, редки, но отсутствие должного контроля над влажностным режимом проектируемых вентилируемых фасадов неминуемо приведет к распространению и усугублению таких ошибок. Этому способствует постоянно происходящий процесс распространения опробованных технологий в новые более жесткие климатические условия.

*Третьей особенностью* расчета влажностного режима навесных фасадных систем с воздушным зазором является их повышенная воздухопроницаемость. Обычно одним из основных барьеров для фильтрации воздуха является наружная облицовка, которая вынужденно плотнее большинства других слоев конструкции, так как должна выдерживать внешние климатические и техногенные воздействия. В конструкции вентилируемого фасада такая плотная облицовка также присутствует, но она не оказывает препятствия движению воздуха, так как отделена от стены вентилируемым зазором. Для влажностного режима характерна существенная зависимость от поперечной (т.е. распространяющейся перпендикулярно плоскости стены) фильтрации воздуха. Так как наружная облицовка не составляет препятствия для движения воздуха, а внутренняя конструкция часто выполняется без учета возможной фильтрации, во многих зданиях фильтрация может оказать решающее значение на влажностный режим конструкции.

Методика расчета влажностного режима навесных фасадных систем с облицовкой на отnose должна учитывать перечисленные выше особенности.

### **3. Влагоперенос в воздушной прослойке.**

Для исследования влагопереноса в воздушной прослойке требуется знание скорости движения и температуры воздуха в прослойке. Так как влагоперенос практически не влияет на эти характеристики воздушной прослойки их можно находить отдельно по методике описанной в [5].

Математическая модель формулируется для отопительного периода, так как в них заложено поступление тепла из стены в воздушную прослойку. Полагается, что наружный воздух заходит в воздушную прослойку через нижние продухи, имея расчетную температуру и относительную влажность. Он поднимается по воздушной прослойке и выходит через верхние продухи. В процессе подъема повышается температура воздуха и изменяется его относительная влажность. При этом влажность будет монотонно изменяться по всей высоте прослойки. При повышении относительной влажности воздуха в прослойке она может достичь критического значения, после которого начнется выпадение конденсата на облицовке и подконструкции. Причем относительная влажность воздуха в прослойке при этом не обязательно будет равняться 100%, так как температура облицовки ниже, чем температура воздуха в прослойке. Принимается, что температура облицовки равна температуре наружного воздуха. Высота, на которой влажность воздуха в прослойке достигает критического значения будет далее называться *высотой выпадения конденсата*.

С учетом выбранных представлений записывается уравнение баланса влаги в элементарном объеме воздушного зазора. Для удобства за характеристику количества влаги принимается парциальное давление водяного пара  $e_{з\text{аз}}$ . В уравнении баланса присутствует три члена: поток влаги приходящий в воздушный зазор из конструкции, поток влаги уходящий из воздушного зазора через экран и поток влаги переносимый движущимся воздухом.

На первом этапе рассматривается предположение, что поток пара из конструкции в воздушный зазор,  $q_e^n$ , известен и не зависит от парциального давления водяного пара в зазоре. (В действительности, поток пара должен зависеть в первую очередь от сопротивления паропрооницанию некоторой части конструкции и перепада давления водяного пара, однако и тот и другой параметр изменяются с высотой незначительно.) на втором этапе сделанное предположение будет уточнено и решение будет скорректировано.

Выражение для потока влаги уходящего из воздушного зазора через экран имеет вид:

$$q_n^n = \frac{e_{з\text{аз}} - e_n}{R_{\text{эк}}^n} \quad (1)$$

Поток влаги переносимой движущимся воздухом находится по формуле (2):

$$q_{\text{ов}}^n = \frac{de_{з\text{аз}}}{dx} \cdot \frac{7,94}{1 + \frac{t_{з\text{аз}}}{273}} \cdot 3600 \cdot v \cdot d = 28573 \cdot \frac{v \cdot d}{1 + \frac{t_{з\text{аз}}}{273}} \cdot \frac{de_{з\text{аз}}}{dx} \quad (2)$$

Последнее выражение показывает, что поток влаги переносимой движущимся воздухом представляет собой произведение объема воздуха,

переносимого через один погонный метр воздушного зазора за одну секунду, на градиент давления водяного пара по высоте воздушного зазора и на размерные коэффициенты.

Уравнение баланса влаги в элементарном объеме воздушного зазора получается суммированием всех потоков влаги (учитывая при этом направление движения).

$$28573 \cdot \frac{v \cdot d}{1 + \frac{t_{\text{заз}}}{273}} \cdot \frac{de_{\text{заз}}}{dx} + \frac{e_{\text{заз}} - e_n}{R_{\text{эк}}^n} = q_6^n \quad (3)$$

Для удобства дальнейшей работы с уравнением (3) целесообразно произвести ряд преобразований. Обе части уравнения (3) умножаются на  $R_{\text{эк}}^n$  и  $e_n$  переносится в правую часть уравнения.

$$28573 \cdot \frac{v \cdot d \cdot R_{\text{эк}}^n}{1 + \frac{t_{\text{заз}}}{273}} \cdot \frac{de_{\text{заз}}}{dx} + e_{\text{заз}} = q_6^n \cdot R_{\text{эк}}^n + e_n \quad (4)$$

Полученное уравнение совпадает по форме с исследованным в [5] уравнением теплового баланса в элементарном объеме воздушного зазора. Отличие между уравнениями заключается только в зависимости от  $x$  температуры воздуха в зазоре в множителе перед производной. Так как изменение множителя перед производной по всей высоте воздушного зазора не превышает 1%, далее это изменение не учитывается. Чтобы подчеркнуть отмеченное совпадение вводятся новые обозначения.

Выражение в правой части уравнения (4) обозначается далее  $e_1$ , Па.

$$e_1 = q_6^n \cdot R_{\text{эк}}^n + e_n \quad (5)$$

Множитель перед производной в левой части уравнения (4) обозначается далее  $x_1$ , м.

$$x_1 = 28573 \cdot \frac{v \cdot d \cdot R_{\text{эк}}^n}{1 + \frac{t_{\text{заз}}}{273}} \quad (6)$$

В новых обозначениях уравнение (4) принимает вид, совпадающий с уравнением (6) [5], отличаются только обозначения:

$$x_1 \cdot \frac{de_{\text{заз}}}{dx} + e_{\text{заз}} = e_1 \quad (7)$$

Начальным условием для рассматриваемой задачи будет требование  $e_{\text{заз}} = e_n$  при  $x = 0$ . Решение уравнения аналогичного (7) найдено в [5] и имеет вид:

$$e_{\text{заз}} = e_1 - (e_1 - e_n) \cdot \exp\left(-\frac{x}{x_1}\right) \quad (8)$$

Задача влагопереноса отличается от задачи теплопереноса дополнительным условием, накладываемым на решение:

$$e_{заз} < E_n \quad (9)$$

Выражение (8) правомерно только при выполнении условия (9). В противном случае решение тривиально:

$$e_{заз} = E_n \quad (10)$$

При анализе решения (8) удобно выделить два случая.

*Первый случай*  $e_1 \leq E_n$ , в этом случае критическая влажность воздуха в зазоре никогда не достигается и конденсат ни при каких условиях выпасть не будет.

*Второй случай*  $e_1 > E_n$ , для этого случая, чтобы определить выпадает конденсат на облицовке или нет, требуется дополнительный анализ, который далее и проводится. Отметим, что второй случай встречается на практике намного чаще и от этого представляет заметно больший интерес для исследования.

В расчетный период парциальное давление водяного пара на входе в воздушный зазор, заведомо меньше давления насыщенного водяного пара. Перемещаясь по воздушной прослойке, воздух дополнительно увлажняется. Предположив, что высота воздушного зазора неограниченна, можно найти высоту выпадения конденсата,  $x_{крит}$ . Далее сравнивая  $x_{крит}$  с реальной высотой зазора можно узнать выпадет конденсат или нет и количественно оценить насколько близка конструкция к выпадению конденсата (или отсутствию выпадения конденсата). В принципе, того же результата можно добиться и, не вводя высоты выпадения конденсата, простым сравнением давления насыщенного водяного пара при температуре наружного воздуха и давления водяного пара на выходе из зазора, получаемого расчетом по формуле (8). Однако, с введением высоты выпадения конденсата, методика приобретает большую общность и позволяет глубже оценивать происходящие процессы, кроме того, появляется возможность дальнейшего упрощения формул, что повышает наглядность материала и простоту его использования.

Высота выпадения конденсата находится из следующего уравнения:

$$E_n = e_1 - (e_1 - e_n) \cdot \exp\left(-\frac{x_{крит}}{x_1}\right) \quad (11)$$

При решении уравнения (11) следует учитывать, что рассматривается случай  $e_1 > E_n$ . Решение имеет вид:

$$x_{крит} = -x_1 \cdot \ln\left(\frac{e_1 - E_n}{e_1 - e_n}\right) \quad (12)$$

Дальнейшие преобразования позволяют значительно упростить формулу (12) и сделать ее удобной для анализа.

Во-первых, в формулу (12) подставляется выражение (5).

$$x_{крит} = -x_1 \cdot \ln\left(\frac{q_в^n \cdot R_{эк}^n + e_n - E_n}{q_в^n \cdot R_{эк}^n}\right) = -x_1 \cdot \ln\left(1 - \frac{E_n \cdot (1 - \varphi_n)}{q_в^n \cdot R_{эк}^n}\right) \quad (13)$$

В первом приближении можно считать, что выражение под логарифмом достаточно близко к единице, чтобы применить формулу  $\ln(1 + \alpha) = \alpha$ . Тогда формула (13) дополнительно упрощается.

$$x_{крит} \approx x_1 \cdot \frac{E_n \cdot (1 - \varphi_n)}{q_в^n \cdot R_{эк}^n} \quad (14)$$

Во-вторых, в формулу (14) подставляется выражение (6):

$$x_{крит} \approx 28573 \cdot v \cdot d \cdot \frac{1 - \varphi_n}{1 + \frac{t_{заз}}{273}} \cdot \frac{E_n}{q_в^n} \quad (6.15)$$

Полученное решение показывает зависимость высоты выпадения конденсата от основных параметров климата и конструкции. Чтобы еще четче продемонстрировать эту зависимость проводится перегруппировка членов в выражении (15).

$$x_{крит} \approx 3600 \cdot \frac{v \cdot d}{q_в^n} \cdot \left[ 7,94 \cdot \frac{(1 - \varphi_n) \cdot E_n}{1 + \frac{t_{заз}}{273}} \right] \quad (6.16)$$

Полученное выражение позволяет анализировать зависимость высоты выпадения конденсата от различных параметров. Физически таких комплексных параметров три. Выражение, стоящее в квадратных скобках, представляет собой удельную влагоемкость наружного воздуха измеряемую в мг/м<sup>3</sup>. Комплекс  $3600 \cdot v \cdot d$  - объем воздуха, переносимого через один погонный метр воздушного зазора за один час.

Итак, высота, на которой в воздушном зазоре начнется выпадение конденсата на плитке, прямо пропорциональна произведению объема воздуха, проходящего через один погонный метр воздушного зазора за один час, на удельную влагоемкость наружного воздуха и деленную на удельный поток водяного пара из стены в зазор.

Таким образом, сформулирована математическая модель влагопереноса в воздушном зазоре; для постоянного потока влаги из конструкции в воздушный зазор решено уравнение влагопереноса в воздушном зазоре; найдено распределение влажности воздуха по высоте воздушного зазора; найдено выражение для высоты выпадения конденсата в воздушном зазоре.

Использованное в математической модели предположение, что поток влаги из конструкции в воздушный зазор постоянен, не является необходимым для решения уравнения влагопереноса. В то же время оно снижает общность полученных результатов. Далее выполняется *второй этап*, на котором поток влаги из стены в воздушный зазор зависит от влажности

воздуха в зазоре. Для этого случая приводится математическая модель влагопереноса в воздушном зазоре и получаемые из нее решения для потока влаги из конструкции в воздушный зазор.

Принципиальным для решения поставленной задачи является вопрос: каким образом зависит удельный поток водяного пара из стены в зазор от давления водяного пара в зазоре? Как известно в стационарном случае эта зависимость линейная. Более глубокий анализ нестационарного уравнения влагопереноса для случая вентилируемого фасада показывает, что и в нестационарном случае эта зависимость линейная, но с другим коэффициентом пропорциональности. Доказательство этого факта достаточно сложно и выходит за рамки статьи.

Таким образом, в общем случае, зависимость удельного потока водяного пара из стены в зазор от давления водяного пара в зазоре можно описать следующей формулой:

$$q_6^n = -k \cdot e_{заз} + q_0^n \quad (17)$$

Величина коэффициента пропорциональности  $k$  пока уточняться не будет. В конкретных расчетах она может быть получена, например, из расчета нестационарного влажностного режима по методу [6].

С учетом формулы (17), уравнение баланса влаги в элементарном объеме воздушного зазора (3) принимает вид:

$$28573 \cdot \frac{v \cdot d}{1 + \frac{t_{заз}}{273}} \cdot \frac{de_{заз}}{dx} + \frac{e_{заз} - e_n}{R_{эк}^n} = -k \cdot e_{заз} + q_0^n \quad (18)$$

Полученное уравнение аналогично уравнению (7) с другими коэффициентами:

$$x_2 \cdot \frac{de_{заз}}{dx} + e_{заз} = e_2 \quad (19)$$

Здесь введены новые обозначения:

$$e_2 = \frac{e_n + R_{эк}^n \cdot q_0^n}{k \cdot R_{эк}^n + 1} \quad (20)$$

$$x_2 = \frac{28573}{k \cdot R_{эк}^n + 1} \cdot \frac{v \cdot d \cdot R_{эк}^n}{1 + \frac{t_{заз}}{273}} \quad (21)$$

Решение уравнения (6.19) аналогично решению уравнения (7)

$$e_{заз} = e_2 - (e_2 - e_n) \cdot \exp\left(-\frac{x}{x_2}\right) \quad (22)$$

Сравнительный анализ решений (8) и (22) показывает, что значения давления водяного пара в зазоре в конкретных точках полученные по этим формулам могут значительно различаться. Поэтому в случаях, когда тре-



буется знать распределение давления водяного пара по высоте воздушного зазора нельзя считать удельный поток водяного пара из стены в зазор постоянным и следует использовать формулу (22). Однако для большинства приложений важно не распределение давления водяного пара по высоте воздушного зазора, а ответ на вопрос выпадет конденсат на облицовке или нет, а если выпадет, то на какой высоте. Для ответа на этот вопрос исследуется высота выпадения конденсата. Формула (22) позволяет найти новое уточненное выражение для высоты выпадения конденсата. В целом ход решения совпадает с уже проведенным в формулах (11) – (16) поэтому здесь приводятся только формулы без излишних комментариев.

$$x_{\text{крит}} = -x_2 \cdot \ln \left( \frac{e_2 - E_n}{e_2 - e_n} \right) \quad (23)$$

$$x_{\text{крит}} = -\frac{28573}{k \cdot R_{\text{эк}}^n + 1} \cdot \frac{v \cdot d \cdot R_{\text{эк}}^n}{1 + \frac{t_{\text{заз}}}{273}} \cdot \ln \left( \frac{e_n + R_{\text{эк}}^n \cdot q_0^n - E_n (k \cdot R_{\text{эк}}^n + 1)}{-k \cdot R_{\text{эк}}^n e_n + R_{\text{эк}}^n \cdot q_0^n} \right) \quad (24)$$

$$x_{\text{крит}} = -\frac{28573}{k \cdot R_{\text{эк}}^n + 1} \cdot \frac{v \cdot d \cdot R_{\text{эк}}^n}{1 + \frac{t_{\text{заз}}}{273}} \cdot \ln \left( 1 - \frac{E_n (1 - \varphi_n) (k \cdot R_{\text{эк}}^n + 1)}{-k \cdot R_{\text{эк}}^n e_n + R_{\text{эк}}^n \cdot q_0^n} \right) \quad (25)$$

$$x_{\text{крит}} \approx 28573 \cdot \frac{v \cdot d}{1 + \frac{t_{\text{заз}}}{273}} \cdot \frac{E_n (1 - \varphi_n)}{-k \cdot e_n + q_0^n} \quad (26)$$

$$x_{\text{крит}} \approx 28573 \cdot v \cdot d \cdot \frac{1 - \varphi_n}{1 + \frac{t_{\text{заз}}}{273}} \cdot \frac{E_n}{q_n^n} \quad (27)$$

Формулы (15) и (27) в точности совпадают. Таким образом, хотя конкретные значения распределения давления водяного пара по высоте воздушного зазора, посчитанные разными способами, и отличаются, основная характеристика влажностного режима воздушного зазора остается практически неизменной. То есть небольшие изменения давления водяного пара в воздушном зазоре не приводят к значительному изменению влажностного режима. Знание этого факта обладает большим практическим значением, так как снимает вопрос, в какой точке стены рассчитывать нестационарный влажностный режим, чтобы определить удельный поток водяного пара из стены в зазор. Раз влияние выбора точки на конечный результат мало мы в праве выбрать наиболее удобную для нас точку, т.е. точку с наиболее важными для исследования значениями граничных условий. Как показали расчеты нестационарного влажностного режима ограждающей конструкции с вентилируемым зазором, с изменением парциального дав-

ления водяного пара в воздушном зазоре поток водяного пара выходящего из стены в прослойку изменяется мало, а максимальная влажность минеральной ваты – значительно. Поэтому за наиболее удобные граничные условия предлагается выбрать  $e_{заз} = E_n$ , так как в этом случае расчетом будет показана максимальная влажность, достигаемая утеплителем.

При практических расчетах рекомендуется пользоваться формулами (20) – (22) и (25), как наиболее точными.

В случаях, когда нет других источников поступления пара в воздушный зазор, кроме принятых в [6] механизмов влагопереноса через стену паропроницаемостью и влагопроводностью, характеристики  $q_e^n$ ,  $q_0^n$  и  $k$  могут быть получены из результатов расчета нестационарного влажностного режима по методике [6]. При этом удельный поток водяного пара приходящий из стены в зазор  $q_e^n$  получается из результатов расчета нестационарного влажностного режима, а остальные характеристики из соотношения:

$$q_e^n = k \cdot (e_e - e_{заз}) \quad (28)$$

Из формул (17) и (28) следует, что

$$q_0^n = k \cdot e_e \quad (29)$$

Основные характеристики влажностного режима воздушного зазора находятся по формулам (22), (25) с учетом следующих соотношений:

$$e_2 = \frac{e_n + R_{эк}^n \cdot k \cdot e_e}{k \cdot R_{эк}^n + 1} \quad (30)$$

$$x_2 = \frac{28573}{k \cdot R_{эк}^n + 1} \cdot \frac{\nu \cdot d \cdot R_{эк}^n}{1 + \frac{t_{заз}}{273}} \quad (31)$$

#### 4. Влияние фильтрации воздуха на влажностный режим стены с навесной фасадной системой с воздушным зазором.

Как уже отмечалось, для навесных фасадных систем с облицовкой на отnose характерна повышенная воздухопроницаемость конструкции. Известно, что даже довольно незначительная поперечная эксфильтрация существенно ухудшает влажностное состояние ограждающей конструкции. Этот случай и будет рассмотрена в данном разделе.

Влажностный режим ограждающей конструкции с учетом поперечной фильтрации воздуха описывается более сложной математической моделью, чем без учета фильтрации. В уравнении влагопереноса появляется слагаемое, учитывающее перенос влаги воздухом:

$$\gamma_0 \frac{\partial w}{\partial \tau} = \text{div} \left[ 10^{-6} \mu \cdot \text{grad}(e) + 10^{-3} \beta \cdot \text{grad}(w) - 6,14 \cdot e \cdot G \cdot 10^{-6} \right] \quad (32)$$

где

$w$  – влажность материала, % по массе или кг/кг;

$\mu$  - коэффициент паропроницаемости материала, мг/(м·ч·Па);

$\beta$  - коэффициент влагопроводности материала, г/(м·ч·кг/кг);

$G$  – воздухопроницаемость конструкции, кг/(м<sup>2</sup>·ч).

Граничные условия также претерпевают изменение. В общем случае задача расчета нестационарного влажностного режима с учетом фильтрации воздуха решается только численно. Таких программ на данный момент практически не существует, поэтому расчеты нестационарного влажностного режима с учетом фильтрации воздуха не проводятся. В ряде случаев для учета фильтрации воздуха приходится рассматривать стационарную задачу, так как ее решения уже найдены в общем случае [7]. Такие решения являются не вполне точными и могут рассматриваться лишь как предельные случаи, показывая некоторые границы работоспособности конструкции.

В случае исследования влажностного режима стены с навесной фасадной системой с воздушным зазором задача упрощается, так как от расчета влажностного режима конструкции, по сути, требуется только знание удельного потока водяного пара из стены в зазор. В первом приближении этот удельный поток будет суммой потока влаги переносимой паропроницаемостью и влагопроводностью, который можно найти численно, как это описано выше, и потока влаги переносимой эксфильтрацией.

Если первое слагаемое можно найти численно, то для второго слагаемого на данном этапе приходится использовать оценки, полученные из расчетов стационарного влагопереноса.

Для стационарного влагопереноса важным является вопрос: достигается сверхсорбционная влажность на наружной границе стены или нет? Для ответа на это вопрос требуется сравнить два потока  $q_1^n$  и  $q_2^n$ .

$$q_1^n = \left( \frac{1}{R_0^n} - 6,14 \cdot G \right) \cdot (e_e - E_n) \quad (33)$$

$$q_2^n = \left( \frac{1}{R_n^n} - 6,14 \cdot G \right) \cdot (E_0 - E_n) \quad (34)$$

где  $R_0^n$  – сопротивление паропроницанию конструкции, м<sup>2</sup>·ч·Па/мг;

$R_n^n$  – сопротивление влагообмену между утеплителем и воздушным зазором, м<sup>2</sup>·ч·Па/мг;

Первый поток соответствует количеству влаги переносимому из помещения в воздушный зазор, второй поток - количеству влаги переносимому в воздушный зазор в случае сверхсорбционной влажности утеплителя. Если второй поток оказывается меньше первого, то конструкция нуждается в доработке с целью улучшения влажностного режима. Если мень-

ше первый поток, то характеристики  $q_e^n$ ,  $q_0^n$  и  $k$  могут быть получены из соотношений:

$$q_e^n = (k_1 - 6,14 \cdot G) \cdot (e_e - e_{заз}) \quad (35)$$

где  $k_1$  определяется из расчета нестационарного влажностного режима без учета фильтрации, как описано в предыдущем разделе.

Таким образом:

$$q_0^n = (k_1 - 6,14 \cdot G) \cdot e_e \quad (36)$$

Основные характеристики влажностного режима воздушного зазора находятся по формулам (22), (25) с учетом следующих соотношений:

$$e_2 = \frac{e_n + R_{эк}^n \cdot (k_1 - 6,14 \cdot G) \cdot e_e}{(k_1 - 6,14 \cdot G) \cdot R_{эк}^n + 1} \quad (37)$$

$$x_2 = \frac{28573}{(k_1 - 6,14 \cdot G) \cdot R_{эк}^n + 1} \cdot \frac{v \cdot d \cdot R_{эк}^n}{1 + \frac{t_{заз}}{273}} \quad (38)$$

Критическая высота с учетом фильтрации воздуха через конструкцию находится по следующей формуле:

$$x_{крит} = - \frac{28573}{(k_1 - 6,14 \cdot G) \cdot R_{эк}^n + 1} \cdot \frac{v \cdot d \cdot R_{эк}^n}{1 + \frac{t_{заз}}{273}} \cdot \ln \left( 1 - \frac{E_n (1 - \varphi_n) ((k_1 - 6,14 \cdot G) \cdot R_{эк}^n + 1)}{R_{эк}^n \cdot (k_1 - 6,14 \cdot G) \cdot (e_e - e_n)} \right) \quad (39)$$

Чаще всего при проектировании стен с навесными фасадными конструкциями с облицовкой на отnose высота воздушного зазора задана, а доработка конструкции возможна за счет характеристик слоев, т.е. параметров  $k_1$  и  $G$ . Поэтому более наглядна и проста в применении формула, показывающая воздухопроницаемость конструкции  $G_{кр}$ , при которой в воздушном зазоре начнется конденсация водяного пара. Чтобы вывести такую формулу необходимо воспользоваться приближенным уравнением (15). При этом для высоты воздушного зазора вводится обозначение  $H$ .

$$x_{крит} \approx 28573 \cdot v \cdot d \cdot \frac{1 - \varphi_n}{1 + \frac{t_{заз}}{273}} \cdot \frac{E_n}{(k_1 - 6,14 \cdot G) \cdot (e_e - e_n)} \quad (40)$$

$$H = 28573 \cdot v \cdot d \cdot \frac{1 - \varphi_n}{1 + \frac{t_{заз}}{273}} \cdot \frac{E_n}{(k_1 - 6,14 \cdot G_{кр}) \cdot (e_e - e_n)} \quad (41)$$

$$G_{кр} = 0,163 \cdot k_1 - 4654 \cdot \frac{v \cdot d}{H} \cdot \frac{1 - \varphi_n}{1 + \frac{t_{заз}}{273}} \cdot \frac{E_n}{e_e - e_n} \quad (42)$$

Таким образом, получено выражение для максимально допустимой воздухопроницаемости ограждающей конструкции, при которой в воздушном зазоре фасада с заданными характеристиками отсутствует конденса-

ция водяного пара. Из (42) следует, что чем выше фасад, тем меньше критическое значение воздухопроницаемости стены. Этот результат особенно важен при применении вентилируемых фасадов на высотных зданиях.

## 5. Заключение.

Широкое применение навесных фасадных систем привело к необходимости дальнейшего развития методов прогнозирования влажностного режима ограждающих конструкций. В данной статье описаны, разработанные в последнее время методики расчетов, учитывающие особенности навесных фасадных систем и позволяющие наиболее объективно оценивать их влажностное состояние. К этим особенностям относятся переменные по высоте фасада граничные условия влагообмена, эксфильтрация влажного воздуха через стену, конденсация водяного пара на облицовке и элементах подконструкции. Трехлетняя практика использования этих методик при анализе проектных решений позволила проектировать стены с вентилируемым фасадом гарантированные от переувлажнения утеплителя и от оледенения подконструкции.

### Литература

1. Гагарин В.Г. О некоторых теплотехнических ошибках, допускаемых при проектировании вентилируемых фасадов. // Журнал АВОК. 2005, №2 стр. 52-58.
2. СНиП II-3-79\* «Строительная теплотехника» изд. 1998 г.
3. СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий».
4. Рекомендации по проектированию навесных фасадных систем с вентилируемым воздушным зазором для нового строительства и реконструкции зданий. М., Москомархитектура, 2002.
5. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Цыкановский Е.Ю. Расчет теплозащиты фасадов с вентилируемым воздушным зазором. // Журнал АВОК. 2004, №2 стр. 20-26, №3 стр. 20-26.
6. Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий. М., Стройиздат, 1984, 168 С.
7. Козлов В.В. Метод инженерной оценки влажностного состояния современных ограждающих конструкций с повышенным уровнем теплозащиты при учете паропроницаемости, влажнопроводности и фильтрации воздуха. Автореферат канд.техн. наук, М., НИИСФ, 2004.