

# Теплофизические расчеты при проектировании навесных теплоизоляционных фасадных систем с воздушным зазором

Гагарин В.Г., д. т. н., профессор,  
Козлов В.В., к. т. н.,  
НИИ строительной физики

## 1. Введение

Одной из основных предпосылок использования в современном строительстве стеновых ограждающих конструкций с вентилируемым фасадом является уверенность в их высоких теплозащитных свойствах, которые позволяют удовлетворить современные высокие требования по теплозащите зданий. Навесные фасадные системы с воздушным зазором являются частным случаем ограждающих конструкций с вентилируемыми воздушными прослойками, которые давно использовались при строительстве зданий. Применение вентилируемых воздушных прослоек имело одну из следующих целей:

- нормализация влажностного режима ограждающих конструкций, которые в силу особенностей их эксплуатации накапливают избыточное количество влаги (например, стены производственных зданий с мокрым режимом);
- предотвращение перегрева конструкций солнечной радиацией (например, совмещенные покрытия);
- защита конструкций от увлажнения атмосферной влагой (косыми дождями).

Основная цель, с которой в настоящее время применяются фасады с вентилируемым воздушным зазором, – повышение теплозащиты ограждающих конструкций зданий с нормальным температурно-влажностным режимом до уровня нормативных требований. Теплоизоляционная фасадная система с вентилируемым воздушным зазором имеет ряд существенных отличий от известных стен с вентилируемой воздушной прослойкой. В воздушном зазоре фасадной системы располагается мощный теплоизоляционный слой, система имеет металлическую подконструкцию и облицовочный слой, определяющий архитектурный облик здания. Если стены с вентилируемой воздушной прослойкой применялись в малоэтажных зданиях, то фасады с вентилируемым воздушным зазором применяются и в многоэтажных зданиях высотой в десятки метров, что также определяет специфику их теплофизических свойств.

Довольно широкое распространение получило мнение об отсутствии серьезных теплофизических проблем при применении навесных фасадных систем с воздушным зазором. Тем не менее, накопленный опыт показывает, что они имеются и должны учитываться при проектировании. Ниже приводится классификация теплофизических проблем, возникающих при использовании фасадных теплоизоляционных систем с воздушным зазором (табл. 1.).

Таблица 1.

<b>Проблема</b>	<b>Причины</b>	<b>Следствия</b>
Систематическое накопление влаги в конструкции.	Плохая вентиляция или отсутствие вентилируемого зазора. Большое сопротивление паропрооницанию ветрозащитной мембраны. Повышенная воздухо- или паропрооницаемость конструкционного слоя стены.	Снижение долговечности материалов. Ухудшение внешнего вида здания. Снижение сопротивления теплопередаче конструкции.
Теплотехническая неоднородность конструкции.	Металлические кронштейны и дюбели. Оконные откосы. Теплопроводные включения, обусловленные ошибками проектирования и строительства.	Низкое значение коэффициента теплотехнической однородности. Перерасход утеплителя или несоблюдение требований СНиП “Строительная теплотехника”. Снижение долговечности конструкции.
Фильтрация наружного воздуха.	Высокая воздухопроницаемость утеплителя. Отсутствие ветрозащитной мембраны. Изрезанность фасада. Повышенная воздухопроницаемость стены.	Снижение теплозащитных свойств конструкции. Увеличение теплопотерь. Эмиссия минераловатного волокна.
Эксфильтрация внутреннего воздуха.	Повышенная воздухопроницаемость стены при большом тепловом напоре.	Снижение теплозащитных свойств конструкции. Увеличение теплопотерь. Увеличение влажности конструкции.

Теплофизические свойства вентилируемых воздушных прослоек и их влияние на температурно–влажностный режим ограждающих конструкций многократно исследовались в работах советских ученых. Впервые метод теплофизического расчета воздушных прослоек был разработан проф. В.Д. Мачинским в 30-40-х годах. Однако расчеты таких конструкций в СНиП “Строительная теплотехника” [1] практически не отражены.

Вентилируемые фасады являются сложными конструкциями, использующими разнородные по своим свойствам материалы. При проектировании вентилируемых фасадов необходимо комплексное рассмотрение многих аспектов и их взаимного влияния. В НИИСФ разработана методика расчета теплофизических свойств фасадов, позволяющая рассчитывать влажностный режим и теплозащитные свойства с учетом фильтрации воздуха в элементах фасада. В докладе излагаются основные положения и результаты расчетов по предложенной методике.

## 2. Расчет температуры и скорости движения воздуха в воздушном зазоре.

Влияние вентилируемого воздушного зазора на теплофизические свойства конструкции во многом является определяющим, поэтому его необходимо учитывать во всех теплофизических расчетах вентилируемых фасадов. В результате теплофизического расчета должны быть определены подвижность (скорость движения) воздуха, а также изменения его температуры и влажности по высоте зазора. Расчеты должны позволять прогнозировать изменение указанных параметров при изменении характеристик конструкций и температурно-влажностных режимов эксплуатации.

Расчет тепло - массообмена в вентилируемом воздушном зазоре является сложной задачей, поскольку нужно рассматривать несколько типов теплопередачи. Между поверхностями облицовки и теплоизоляции осуществляется лучистый теплообмен, характеризующийся коэффициентом лучистого теплообмена, зависящим от температуры. Конвективный теплообмен осуществляется между воздухом в зазоре и элементами конструкции. Коэффициенты конвективного теплообмена зависят от скорости движения воздуха и температуры воздуха и элементов конструкции. Скорость движения воздуха в зазоре в свою очередь зависит от его средней температуры. А расчет температуры предполагает знание скорости движения воздуха и коэффициентов теплообмена в воздушном зазоре. Нелинейная взаимосвязь параметров, включающая эмпирические уравнения, не позволяет получить простые расчетные формулы для их определения. Поэтому расчет температуры, скорости движения воздуха и других параметров тепло - массообмена в воздушном зазоре проводится численно [2].

Для иллюстрации возможностей данной методики на рис. 1 приведены расчетные зависимости скорости движения воздуха от температуры при различных значениях ширины зазора, а на рис.2 – семейство кривых зависимости температуры воздуха в зазоре от высоты фасада, в котором параметром служит скорость движения воздуха. В расчете не учитывались разрывы в облицовке (зазорам между плитками) фасада, которые приводят отклонению температуры и скорости движения воздуха от рассчитанного среднего значения по высоте вентилируемого зазора. Несмотря на эти недостатки, предлагаемый метод расчета позволяет установить взаимосвязь основных характеристик вентилируемого воздушного зазора.

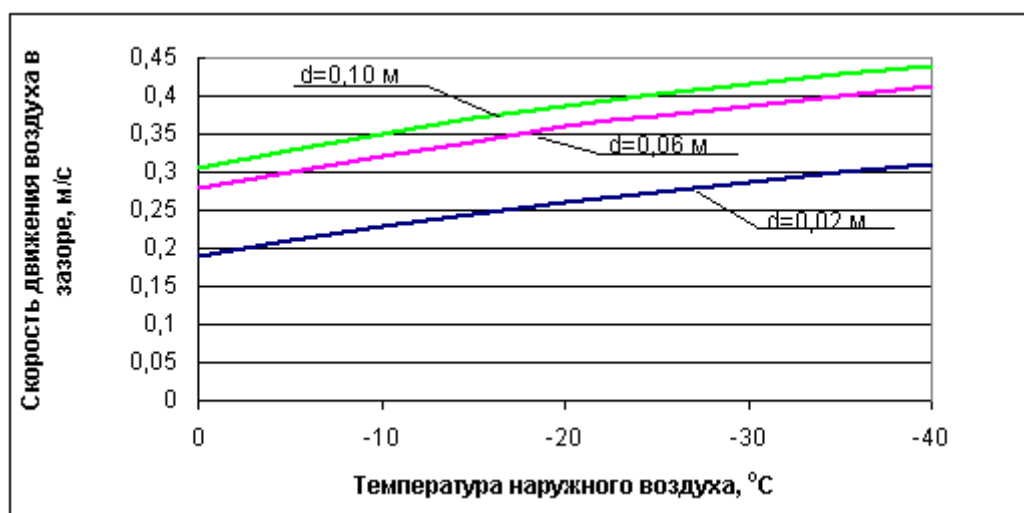


Рис. 1. Зависимость максимальной скорости воздуха в воздушном зазоре от температуры наружного воздуха при различных значениях ширины зазора d.

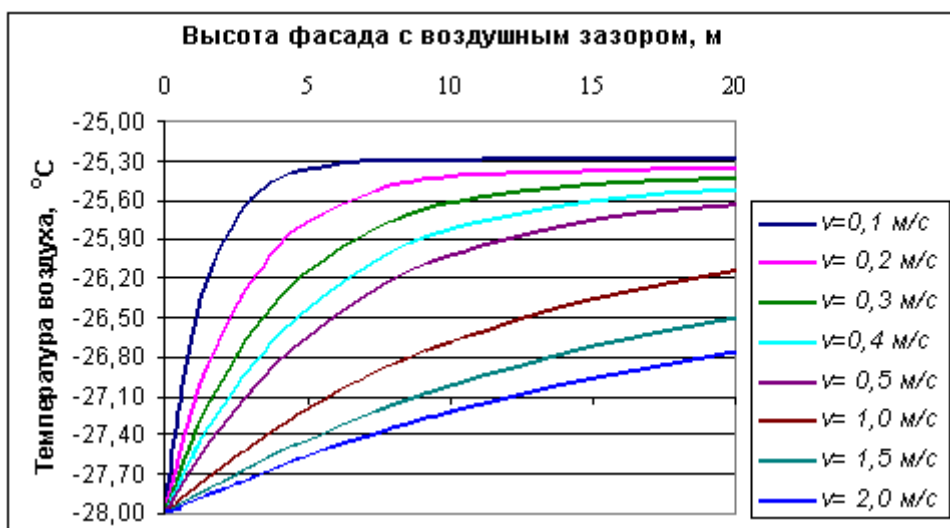


Рис. 2. Изменение температуры по высоте воздушного зазора при различных скоростях движения воздуха.

### 3. Расчеты влажностного режима

Методика, содержащаяся в [1] непригодна для оценки влажностного состояния рассматриваемых конструкций, т.к. в ней пренебрегается наличием вентилируемого зазора. Плоскость возможной конденсации, которую требует метод, для рассматриваемой конструкции невозможно корректно назначить. Кроме того, в методе [1] не учитывается эксфильтрация воздуха, а также перенос жидкой влаги в стене.

Для расчета влажностного режима стены с вентилируемым фасадом можно использовать усовершенствованный метод последовательного увлажнения [3]. Этот метод был разработан в НИИСФ в 70 – 80 годах. Он пригоден для расчета влажностного режима, если имеется малая эксфильтрация воздуха из помещения через стену. Для случая значительной эксфильтрации (т.е. фильтрации воздуха из помещения) через ограждающую конструкцию для расчета стен с вентилируемым фасадом разработан специальный метод, частично вошедший в [4]. При использовании обоих методов расчета в граничных условиях на поверхности утеплителя следует учитывать температурно–влажностные условия в вентилируемом воздушном зазоре, которые определяются расчетом.

Весь опыт исследования тепло - влагопереноса , а также результаты расчетов влажностного режима рассматриваемых ограждающих конструкций свидетельствуют, что зоной наибольшего увлажнения является слой минераловатного утеплителя, примыкающий к зазору. В этой зоне часть влаги может быть в жидкой или даже в твердой (лед) фазе, что снижает долговечность минеральной ваты. Поэтому определяющей следует считать не среднюю влажность по толщине утеплителя, а его влажность в зоне наибольшего увлажнения.

В зоне наибольшего увлажнения в утеплителе влага концентрируется, главным образом, вследствие диффузии водяного пара и фильтрации влажного воздуха из помещения через стену. Эти механизмы влагопереноса в ограждающей конструкции следует по возможности ограничивать. При применении вентилируемых фасадов про первый механизм иногда вспоминают, в то время как про второй упоминаний нам практически

не встречалось. Расчеты показывают, что увлажнение утеплителя за счет эксфильтрации для многоэтажных зданий может оказаться более чем значительным. Так, расчетная влажность минеральной ваты при учете эксфильтрации воздуха для рассматриваемой в качестве примера конструкции может составить 150% по массе (рис. 3). Конечно, такое количество влаги материал не может удержать, однако расчет показывает на недопустимое увлажнение утеплителя.

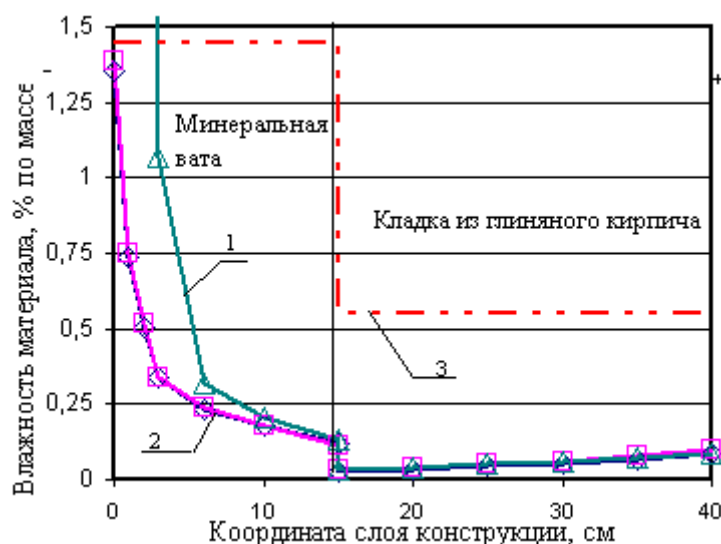


Рис.3. Распределение влажности по толщине стены с навесным фасадом с воздушным зазором. 1 – результаты расчета с учетом фильтрации воздуха; 2 – то же, но без учета фильтрации воздуха; 3 – максимальная сорбционная влажность материалов.

Отвод влаги от зоны наибольшего увлажнения может происходить благодаря диффузии водяного пара через закрывающую поверхность минераловатного утеплителя ветрозащитную мембрану, через воздушный зазор и облицовку фасада. Кроме того, может происходить вынос водяного пара потоком воздуха в воздушном зазоре. Первый из указанных путей мал по сравнению со вторым. Поэтому следует проверять возможность выноса всего водяного пара, поступающего к зоне наибольшего увлажнения, потоком воздуха в воздушном зазоре. Интенсивность этого способа отвода влаги зависит от характеристик воздушного зазора (шириной, высотой и т.д.), которые определяют скорость движения воздуха в нем. Если часть влаги не может быть удалена из зоны наибольшего увлажнения, то в зимние месяцы, когда влажность минеральной ваты достигает своего максимума, на волокнах минеральной ваты, на ветрогидрозащитной мембране и на облицовочных элементах фасада образуются слои льда. Разработан метод расчета, позволяющий оценить способность воздушного зазора осуществлять унос влаги, поступающей через стену по всей высоте фасада. Следует особо подчеркнуть, что указанные методы расчета необходимо применять совместно, поскольку целый ряд параметров влияет друг на друга.

Для обеспечения благоприятного влажностного режима ограждения, как показывает практика, чем больше ширина воздушного зазора, тем лучше. Минимально допустимая толщина воздушного зазора определяется расчетом. Недопустимо отсутствие вентилируемого зазора или его вентиляции.

#### **4. Расчеты характеристик теплозащиты конструкции**

Методика расчетов приведенного сопротивления теплопередаче и коэффициента теплотехнической однородности конструкции изложена в [2 и 5]. Приведенное сопротивление теплопередаче складывается из двух составляющих: приведенного сопротивления теплопередаче, определяемого согласно п. 2.6, 2.8 [1] (т.е. без учета зазора),  $\alpha$ , и эффективного термического сопротивления воздушного зазора  $\alpha_{\text{эф}}$ , осредненного по высоте фасада.

Первое слагаемое определяется из расчета трехмерного температурного поля участка конструкции с кронштейном. Затем, с учетом количества кронштейнов приходящихся на  $1 \text{ м}^2$  фасада, рассчитывается коэффициент теплотехнической однородности и приведенное сопротивление теплопередаче конструкции. При этом следует иметь в виду, что при расчете температурного поля нельзя пренебрегать частью кронштейна, находящейся в воздушном зазоре, т.к. она участвует в конвективном теплообмене с движущимся воздухом в зазоре и скреплена с металлическими направляющими. Если не учитывать этих особенностей, то получаются завышенные значения коэффициента теплотехнической однородности конструкции.

Второе слагаемое,  $\alpha_{\text{эф}}$ , рассчитывается по результатам расчета температуры воздуха и других параметров в воздушном зазоре. Это слагаемое необходимо учитывать при определении сопротивления теплопередаче стен при расчете теплопотерь здания, его энергоэффективности и в др. подобных случаях. Таким образом, характеристики теплозащиты следует рассчитывать в комплексе с параметрами воздуха в зазоре.

#### **5. Расчеты влияния фильтрации воздуха на теплозащитные свойства ограждений**

Характерной особенностью конструкций с вентилируемым фасадом является то, что пористый утеплитель непосредственно или через ветрозащитную мембрану граничит с наружным воздухом. Следовательно, в минераловатном утеплителе будет наблюдаться продольная фильтрация. Расчеты продольной фильтрации воздуха в ограждающих конструкциях и ее влияния на теплозащитные свойства конструкций не проводилось, поскольку не было соответствующих методов. К.Ф. Фокин предлагал снижать влияние от продольной фильтрации строительными мероприятиями [6].

В настоящее время в НИИСФ разработан метод расчета температурных полей для участков ограждающих конструкций с учетом продольной фильтрации воздуха. Метод позволяет определить увеличение теплопотерь и снижение температуры на внутренней поверхности ограждающей конструкции, обусловленные продольной фильтрацией наружного воздуха в теплоизоляционном слое. Систематическое проведение расчетов этим методом сдерживается отсутствием экспериментальных данных по воздухопроницаемости минераловатных плит. Отсутствуют также данные по сопротивлению воздухопроницаемости ветрозащитных мембран. Кроме данных о сопротивлении воздухопроницаемости материалов в данном методе расчета используется величина перепада давления по участку фасада, обусловленная ветровым давлением. Эта величина может быть определена по результатам исследования аэродинамических характеристик фасада здания.

## 6. Заключение

Итак, в НИИСФ разработана комплексная методика теплофизического расчета вентилируемых фасадов, позволяющая повысить качество их проектирования. Представляется целесообразным включить эту методику в нормативные документы по проектированию вентилируемых фасадов.

## Литература

1. СНиП II-3-79\*. Строительная теплотехника. - М., 1998.
2. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Цыкановский Е.Ю. Расчет теплозащиты фасадов с вентилируемым воздушным зазором. // Журнал АВОК. 2004, №2, №3.
3. Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий. Госстрой СССР, НИИСФ. М., “Стройиздат”, 1984.
4. Фасадные теплоизоляционные системы с воздушным зазором. Рекомендации по составу и содержанию документов и материалов, представляемых для технической оценки пригодности продукции. М., Госстрой России, 2004. С.58.
5. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Вопросы теплозащиты фасадов с вентилируемым воздушным зазором. // Сборник докладов конференций, проводившихся в рамках выставок “Международной строительной недели – 2004”. М., КВЦ “Сокольники”, стр. 127 - 132.
6. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий.