

Теплозащита фасадов с вентилируемым воздушным зазором

Часть 2

В. Г. Гагарин, доктор техн. наук;

В. В. Козлов, НИИСФ;

Е. Ю. Цыкановский, канд. техн. наук, ООО «ДИАТ-2000»

Для характеристики какой-либо системы фасада с воздушным зазором теплотехническую однородность стены целесообразно рассматривать для рядового участка стены без оконных и дверных проемов. Коэффициент теплотехнической однородности определяется для участка стены, содержащего один кронштейн на основании расчета температурного поля. Эта часть конструкции вентилируемого фасада не может быть сведена к двумерной модели, будь то плоская или осесимметричная модель, хотя само теплопроводное включение (кронштейн) обладает практически осевой симметрией.

Методика расчета коэффициента теплотехнической однородности фасада с учетом влияния подконструкции

Даже если рассчитывать трехмерное температурное поле рассматриваемой части конструкции, то все равно учесть все факторы не представляется возможным: сложная форма кронштейна, разнообразные вставки, клепки, болты, направляющие, кляммеры настолько усложняют расчетную схему, что для систематического решения практических задач она становится непригодной. В связи с этим приходится делать ряд упрощений при замене реальной конструкции ее моделью. Главное требование к упрощениям — адекватное описание исследуемых физических свойств объекта при значительном сокращении вычислений. Наиболее значительным упрощением при решении данной задачи является отказ от внесения в расчетную схему множества сложных элементов (кляммеров, направляющих, плит облицовки) и учет их влияния граничными условиями. Вторым упрощением является переход к осесимметричным координатам. Сделать его можно только для части конструкции — от внутреннего воздуха до воздушной прослойки. Задача сводится к решению трехмерного уравнения теплопроводности записанного в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_r r \frac{\partial t}{\partial r} \right) = 0. \quad (10)$$

Уравнение (10) является уравнением с двумя переменными, которое можно сравнительно легко решить численно. При этом расчетный участок моделируется цилиндром, одно основание которого является внутренней поверхностью ограждения, а другое — поверхностью в воздушном зазоре. Части кронштейна моделируются цилиндрами, с периметром и площадью поперечного сечения, равными периметру и площади поперечного сечения соответствующей части кронштейна. Радиус расчетного участка конструкции стены выбирается в каждом

случае исходя из данных о среднем количестве кронштейнов n_k , приходящихся на квадратный метр стены (или средней площади приходящейся на один кронштейн) по формуле:

$$P_{уч} = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot n_k}}. \quad (11)$$

На границах ограждения принимаются условия теплообмена третьего рода. Наружная граница расчетной зоны проходит по внутренней границе воздушного зазора. В месте сечения кронштейна границей расчетной зоны происходит нарушение граничных условий, обусловленное прохождением через кронштейн больших тепловых потоков и неучтенным влиянием подконструкции и наружного облицовочного слоя, находящихся в непосредственном контакте с кронштейном. Предлагается принимать в этом месте граничные условия первого рода с заранее найденной температурой, $t_{ч.к}$. Методика расчета величины $t_{ч.к}$ основана на рассмотрении баланса теплоты, проходящей через кронштейн. Из-за огромной разницы коэффициентов теплопроводности материала кронштейна и утеплителя (около 1 000 раз для стали и около 5 000 раз для алюминия) кронштейн можно рассматривать как линейный проводник теплоты. Учет потерь теплоты кронштейном в воздушной прослойке за счет теплообмена с воздухом приводит к схеме баланса с одним местом входа теплоты (место крепления кронштейна к стене) и двумя местами выхода теплоты (воздушная прослойка и направляющая с облицовкой). Процесс описывается одномерным стационарным уравнением теплопроводности, которое легко разрешается. При этом температура воздуха в воздушном зазоре и температура кронштейна в точке касания конструкционного слоя стены предполагаются известными. На обоих концах кронштейна записываются граничные условия первого рода. В воздушном зазоре записывается уравнение конвективного теплообмена поверхности кронштейна с воздухом в зазоре, учитывающее стекание теплоты в зазор:

$$\lambda_{м.кр} \cdot S \cdot \frac{d^2 t}{(dx)^2} - \alpha_{кр} \cdot \zeta \cdot (t - t_{заз}) = 0. \quad (12)$$

Решение уравнения теплопроводности и уравнения (12) с соответствующими граничными условиями дает формулу расчета температуры на поверхности кронштейна $t_{ч.к}$ в виде функции от параметров кронштейна и других элементов фасада.

$$t_{ч.к} = t_{об} + \frac{t_{кк} - t_{об}}{1 + (\delta_{кр} - d) \sqrt{\frac{\alpha_{кр} \zeta}{\lambda_{м.кр} S}}}. \quad (13)$$

Так как в формуле (12) используется температура части кронштейна, соприкасающейся со стеной, значение которой заранее неизвестно, то расчет температурного поля производится совместно с вычислениями по формуле (13) методом итераций.

После расчета температурного поля коэффициент теплотехнической однородности конструкции определяется по формуле:

$$r = \frac{Q_0}{Q_H}, \quad (14)$$

где Q_H — поток теплоты через неоднородную конструкцию, рассчитанный по температурному полю, Вт;

Q_0 — поток теплоты через однородную конструкцию той же площади, Вт, определяемый по формуле:

$$Q_0 = \frac{q_0}{n_k} = \frac{1}{n_k} \cdot \frac{t_B - t_H}{\frac{1}{\alpha_{\text{взз}}} + \frac{\delta_y}{\lambda_y} + \frac{\delta_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_B}}, \quad (15)$$

Влияние конструктивных особенностей фасадов на значения коэффициента теплотехнической однородности

Существует много систем фасадов и, соответственно, много форм кронштейнов. Коррозионностойкая сталь имеет коэффициент теплопроводности примерно в 5 раз меньший, чем алюминий. Размеры кронштейнов могут также отличаться в несколько раз. В связи с этим и потери теплоты через кронштейны для различных систем могут существенно различаться. На рис. 1, 4, 5, 6 рассмотрено влияние различных факторов на коэффициент теплотехнической однородности рассматриваемых конструкций.

Для расчетов влияния различных факторов на коэффициент теплотехнической однородности выбрана следующая конструкция: стена (конструкционный слой) из материала с коэффициентом теплопроводности $0,81 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$ и толщиной $0,25 \text{ м}$ (соответствует кладке из полнотелого керамического кирпича), слой теплоизоляции толщиной $0,15 \text{ м}$ из материала с коэффициентом теплопроводности $0,05 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$ (примерно соответствует минераловатным плитам). Другие параметры варьировались при проведении расчетов. Сопротивление теплопередаче по глади рассматриваемой конструкции составляет $3,53 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{С}/\text{Вт}$. Критическое значение коэффициента теплотехнической однородности, ниже которого приведенное сопротивление теплопередаче конструкции менее $2,68 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{С}/\text{Вт}$ (требуемое значение для административных зданий в Москве), составляет $0,76$.

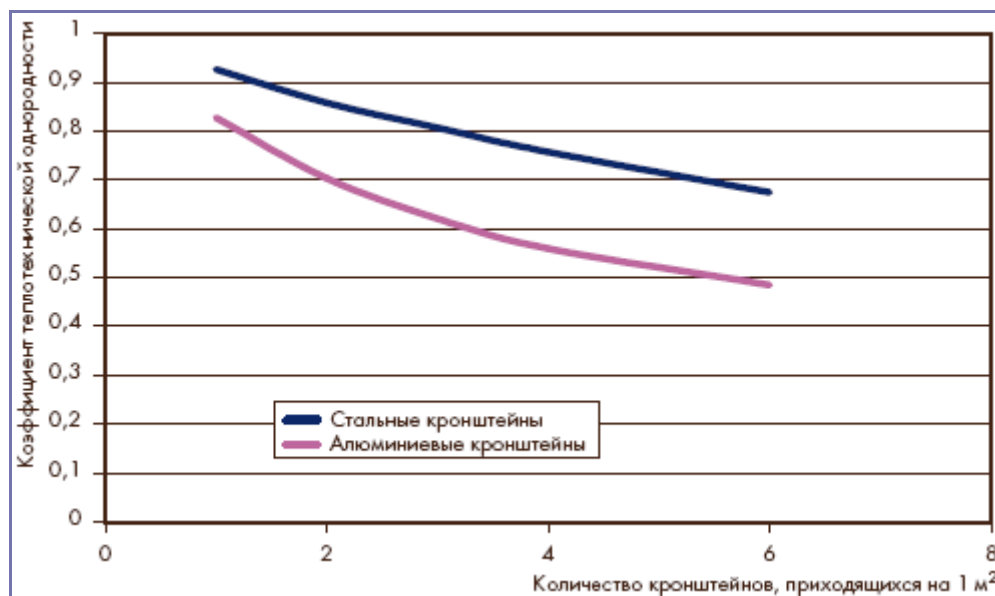


Рисунок 1.

Зависимость коэффициента теплотехнической однородности от количества кронштейнов, приходящихся на 1 м² фасада. При площади поперечного сечения кронштейна 2 см²

На рис. 1 представлены результаты расчетов коэффициента теплотехнической однородности при изменении количества кронштейнов, приходящихся на 1 м² фасада. Площадь поперечного сечения кронштейна принята равной 2 см².

Количество кронштейнов существенно влияет на значение коэффициента теплотехнической однородности: при увеличении количества кронштейнов от 1 до 4 этот коэффициент снижается с 0,93 до 0,76 в случае выполнения кронштейнов из стали и с 0,83 до 0,56, если кронштейны выполнены из алюминия. В действительности количество кронштейнов вряд ли будет ниже 2, в большинстве случаев их будет более 3. В таких случаях значение коэффициента теплотехнической однородности будет менее 0,8, если кронштейны выполнены из стали, и менее 0,6, если кронштейны выполнены из алюминия.



Рисунок 2.

Число кронштейнов составляет примерно 6 шт. на 1 м². Кроме того, конструкция содержит теплопроводные включения. Значение коэффициента теплотехнической однородности не более 0,5

На практике часто наблюдается применение большого числа кронштейнов (рис. 2 и 3). Поэтому коэффициенты теплотехнической однородности могут иметь довольно низкие значения, что означает плохое использование теплозащитных свойств утеплителя.

Другим параметром, влияющим на значение коэффициента теплотехнической однородности, является площадь поперечного сечения кронштейнов. На рис. 4 представлены результаты расчетов при изменении площади поперечного сечения кронштейнов. На 1 м² фасада приходится два кронштейна.



Рисунок 3.

Число кронштейнов составляет примерно 10 шт. на 1 м².
Значение коэффициента теплотехнической однородности не более 0,5

Теплопроводность конструкционного слоя также влияет на значение коэффициента теплотехнической однородности. В случае использования стальных кронштейнов это влияние невелико. Зато для алюминиевых кронштейнов оно значительно. На рис. 5 приведена зависимость коэффициента теплотехнической однородности от коэффициента теплопроводности конструкционного слоя. Значения коэффициента теплотехнической однородности при теплопроводности конструкционного слоя меньше 0,35 Вт/(м·°С) на графике не приведены, т. к. им соответствуют ячеистые или особо легкие бетоны. Их прочность чаще всего недостаточна и требует смены конструктивного решения крепления облицовки, поэтому расчеты не могут корректно сравниваться с остальными результатами.

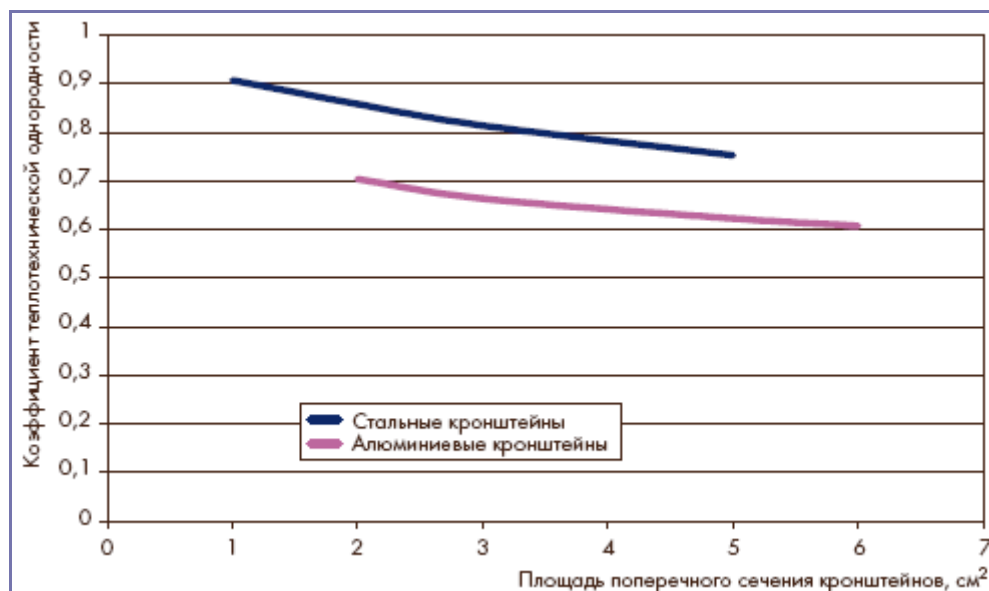


Рисунок 4.

Зависимость коэффициента теплотехнической однородности от площади поперечного сечения кронштейнов. При количестве — 2 кронштейна на 1 м² фасада

Увеличение теплопроводности материала теплоизоляционного слоя ведет к увеличению коэффициента теплотехнической однородности конструкции (рис. 6). Этот эффект хорошо известен, он проявляется тем отчетливее, чем больше различаются коэффициенты теплопроводности теплоизоляционного материала и материала кронштейна. Поэтому значение коэффициента теплотехнической однородности наиболее чувствительно к увеличению теплопроводности утеплителя в случае применения алюминиевых кронштейнов в области малых значений коэффициента теплопроводности утеплителя. Следует отметить, что хотя с возрастанием коэффициента теплопроводности утеплителя значение коэффициента теплотехнической однородности также растет, приведенное сопротивление теплопередаче снижается.

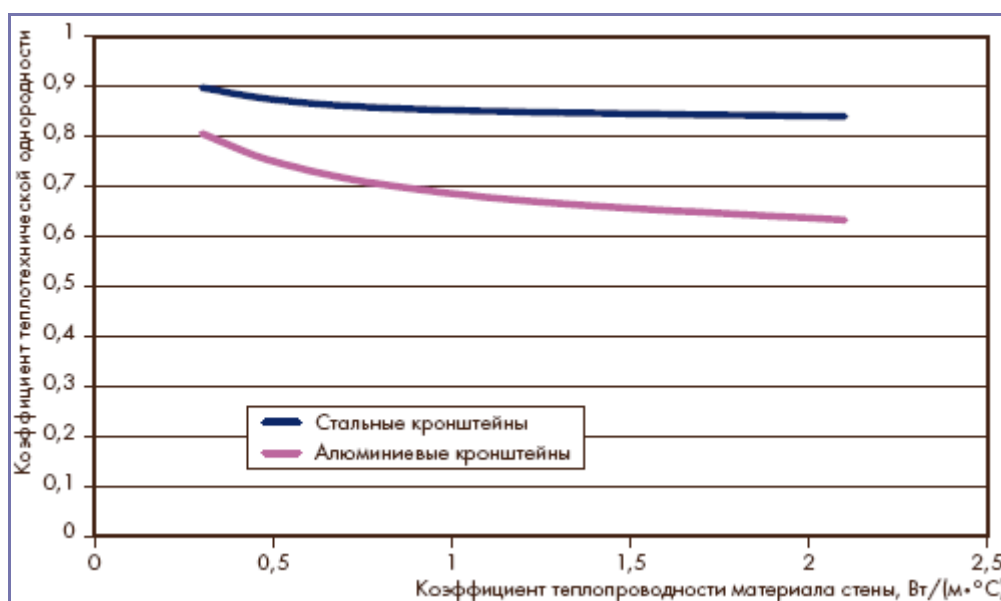


Рисунок 5.

Зависимость коэффициента теплотехнической однородности от коэффициента теплопроводности конструкционного слоя. При количестве — 2 кронштейна на 1 м² фасада. При площади поперечного сечения кронштейна 2 см²

В месте крепления кронштейна к стене часто устанавливается прокладка из поливинилхлорида, паронита или иного материала (рис. 7). Считается, что эта прокладка является теплоизоляционной, разрывает «мостик холода» и, следовательно, повышает коэффициент теплотехнической однородности системы, что очень существенно при применении алюминиевых кронштейнов.

В связи с актуальностью данного вопроса была рассчитана и на рис. 8 приведена зависимость коэффициента теплотехнической однородности от коэффициента теплопроводности теплоизоляционной прокладки. Толщина теплоизоляционной прокладки принята равной 6 мм. При проведении этих расчетов было принято, что на 1 м² фасада приходится 2 кронштейна площадью поперечного сечения 6 см², что заметно больше, чем у большинства распространенных кронштейнов. Чем больше эта площадь, тем больший поток теплоты уходит через кронштейн и тем заметней должно быть влияние теплоизоляционной прокладки. Однако расчеты показали, что при изменении термического сопротивления теплоизоляционной прокладки в 5 раз, коэффициент теплотехнической однородности изменяется на 1,5–2 %. Такое влияние нельзя признать существенным. Незначительное влияние теплоизоляционной прокладки объясняется малой, по сравнению с металлом, теплопроводностью материала конструкционного слоя, а также значительной площадью основания кронштейна.

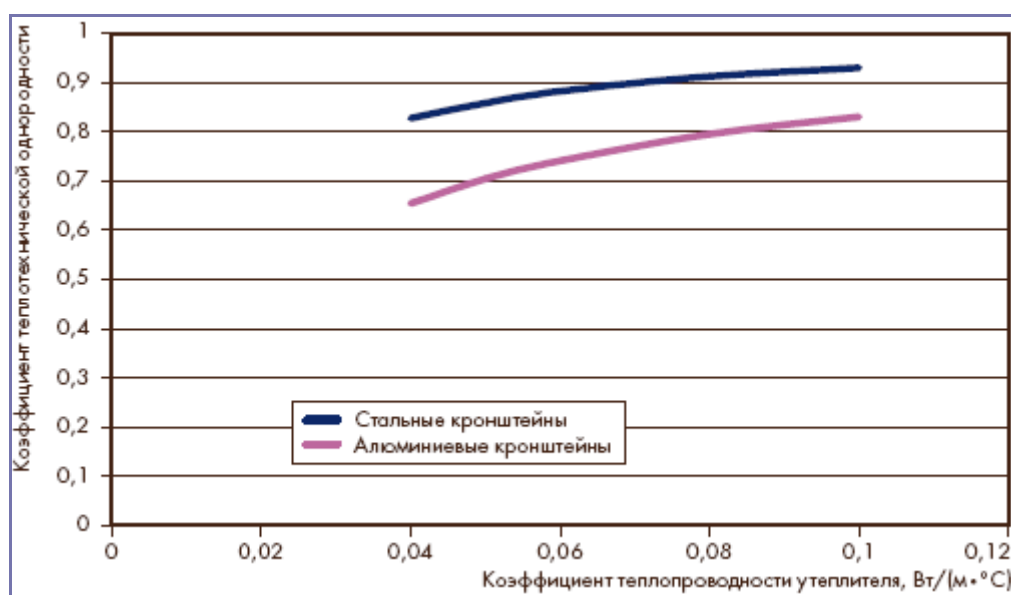


Рисунок 6.

Зависимость коэффициента теплотехнической однородности от коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала. При количестве — 2 кронштейна на 1 м² фасада. При площади поперечного сечения кронштейна 2 см²

Пример расчета теплозащитных характеристик фасада с вентилируемым воздушным зазором

В качестве примера рассматривается следующая конструкция. Стена из монолитного железобетона толщиной 20 см утепляется снаружи минераловатными плитами толщиной 15 см, с коэффициентом теплопроводности 0,045 Вт/(м·°С). Подконструкция выполнена из алюминия. Кронштейны из алюминия расположены в среднем по 2,5 шт на м². Площадь поперечного сечения кронштейнов 2,4 см². Воздушный зазор имеет непрерывные вертикальные участки высотой 10 м и толщину 10 см. Сопротивление теплопередаче по глади такой

конструкции составляет $3,59 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. Согласно расчету по представленной методике, коэффициент теплотехнической однородности рассматриваемой конструкции составляет $0,59$, приведенное сопротивление теплопередаче с учетом влияния кронштейнов $R_{\text{кр}}^{\text{пр}} = R_{\text{усл}} \cdot r = 2,12 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. Термическое сопротивление воздушного зазора для средней температуры отопительного периода в Москве составляет $0,13 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. Приведенное сопротивление теплопередаче всей конструкции $R_{\text{кр}}^{\text{пр}} = R_{\text{усл}} \cdot r + R_{\text{зазора}}^{\text{эф}} = 2,25 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. Для климатических условий Москвы плотность потока теплоты через стену с фасадом при температуре наиболее холодной пятидневки составит $21,3 \text{ Вт}/\text{м}^2$, при средней температуре отопительного периода — $10,3 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Потери теплоты за отопительный период составят $52,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$.



Рисунок 7.
Металлический кронштейн с теплоизоляционной прокладкой

Представляет интерес рассмотрение возможностей повышения теплотехнической однородности и приведенного сопротивления теплопередаче стены.

Замена алюминиевых кронштейнов на кронштейны из коррозионностойкой стали с той же частотой и несколько меньшей площадью поперечного сечения — $1,8 \text{ см}^2$. Рассчитанный коэффициент теплотехнической однородности такой конструкции составит уже $0,83$, приведенное сопротивление с учетом влияния кронштейнов — $2,98 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. Термическое сопротивления воздушного зазора для средней температуры отопительного периода для Москвы составит $0,135 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. Приведенное сопротивление теплопередаче всей конструкции равно $3,12 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$. Для климатических условий Москвы плотность потока теплоты через стену с фасадом при температуре наиболее холодной пятидневки составит $15,4 \text{ Вт}/\text{м}^2$, при средней температуре отопительного периода — $7,4 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Потери теплоты за отопительный период составят $37,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$.

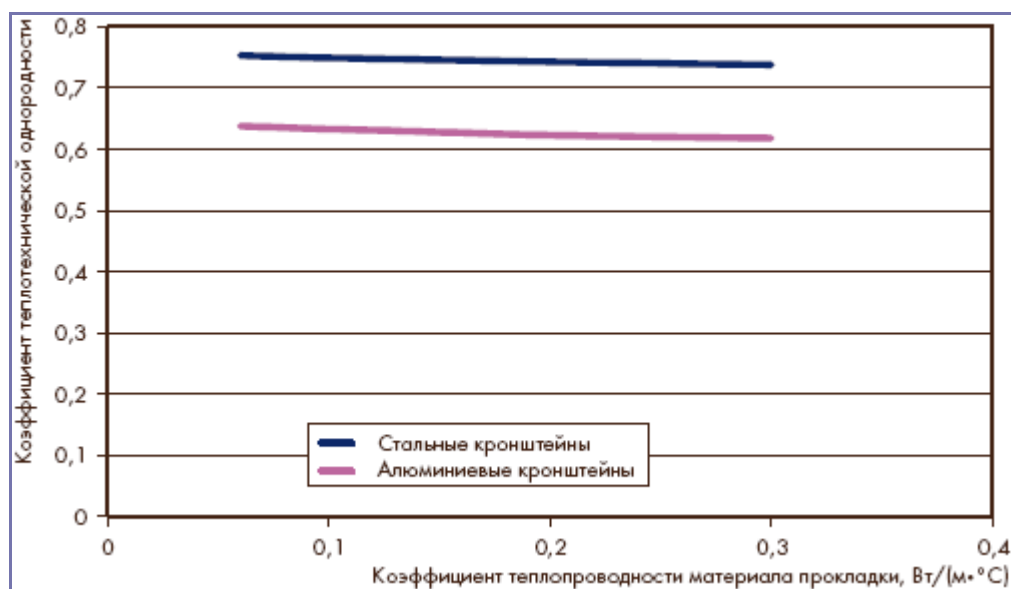


Рисунок 8.

Зависимость коэффициента теплотехнической однородности от коэффициента теплопроводности материала прокладки. При количестве — 2 кронштейна на 1 м² фасада. При площади поперечного сечения кронштейна 6 см²

Выигрыш от замены кронштейнов очевиден — потери теплоты снизились на 28 %, но и цена подконструкции вероятно увеличилась, окупаемость такого решения должна оцениваться соответствующим расчетом. Существуют и другие возможные изменения конструкции, которые приводят к увеличению значения $R_{ср.пр}$. Например, изменение ширины воздушного зазора с 10 до 3 см. Эффективное термическое сопротивление воздушного зазора для средней температуры отопительного периода составит 0,194 м²·°С/Вт (для фасада со стальными кронштейнами — 0,202 м²·°С/Вт). Приведенное сопротивление для фасада с алюминиевыми кронштейнами будет равно 2,31 м²·°С/Вт. Для климатических условий Москвы плотность потока теплоты через стену с фасадом при температуре наиболее холодной пятидневки составит 20,8 Вт/м², при средней температуре отопительного периода 10 Вт/м². Потери теплоты за отопительный период составят 51,3 кВт·ч/м²·год, эта величина на 1,4 кВт·ч/м²·год, или 2,7 % меньше, чем при ширине воздушного зазора, равной 10 см. Конечно, такое снижение потерь теплоты не может считаться существенным, но и цена этого мероприятия может считаться нулевой.

Рассмотренный пример иллюстрирует возможности использования представленной методики расчета для повышения теплозащитных свойств проектируемых фасадов с вентилируемым воздушным зазором.

Список обозначений

$c_b = 1\ 005$ Дж/(кг·°С) — удельная теплоемкость воздуха

d — ширина воздушного зазора, м

L — высота фасада с вентилируемым зазором, м

n_k — среднее количество кронштейнов, приходящихся на м² стены, м⁻²

$R_{o. \text{контр.}}, R_{o. \text{обл.}}^{np}$ — приведенные сопротивления теплопередаче частей конструкции от внутренней поверхности до воздушного зазора и от воздушного зазора до наружной поверхности конструкции соответственно, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$

R_o^{np} — приведенное сопротивление теплопередаче всей конструкции, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$

$R_{o. \text{контр.}}^{ysl}$ — сопротивление теплопередаче по глади конструкции (без учета теплопроводных включений), $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$

$R_{o. \text{контр.}}^{ysl}$ — сопротивление теплопередаче по глади конструкции, определяется как сумма термических сопротивлений слоев конструкции и сопротивлений теплоотдачи внутренней (равное $1/\alpha_{в}$) и наружной (равное $1/\alpha_{н}$) поверхностей

$R_{СНиП}^{np}$ — приведенное сопротивление теплопередаче конструкции стены с утеплителем, определяемое в соответствии со СНиП II-3-79*, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$

$R_{\text{терм. контр.}}^{np}$ — термическое сопротивление стены с утеплителем (от внутреннего воздуха до поверхности утеплителя в воздушном зазоре), $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$

$R_{\text{зазора}}^{\text{эф}}$ — эффективное термическое сопротивление воздушного зазора, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$

Q_n — рассчитанный поток теплоты через неоднородную конструкцию, Вт

Q_0 — поток теплоты через однородную конструкцию той же площади, Вт

q — плотность потока теплоты через конструкцию, $\text{Вт} / \text{м}^2$

q_0 — плотность потока теплоты через однородную конструкцию, $\text{Вт} / \text{м}^2$

r — коэффициент теплотехнической однородности

S — площадь сечения кронштейна, м^2

t — температура, °C

$t_{в}, t_{н}$ — температура внутреннего и наружного воздуха соответственно, °C

$t_{\text{заз}}$ — температура воздуха в воздушном зазоре, °C

$t_{\text{кк}}$ — температура части кронштейна соприкасающейся с конструкционным слоем, °C

x — координата по оси перпендикулярной плоскости стены, м

z — время, с

$\alpha_{\text{кр}}$ — коэффициент теплообмена между поверхностью кронштейна и воздухом в зазоре, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C})$

$\alpha_{\text{заз}}$ — коэффициент теплообмена в воздушном зазоре, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C})$

$\alpha_{в}$ — коэффициент теплообмена внутренней поверхности стены, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C})$

$\alpha_{н}$ — коэффициент теплообмена наружной поверхности ограждения, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C})$

$\gamma_{в} = 353 / (273 + t_{н})$, $\text{кг} / \text{м}^3$ — плотность воздуха при температуре $t_{н}$

$\delta_{\text{кр}}$ — длина кронштейна, м

ζ — периметр сечения кронштейна, м

$\lambda_{x,r}$, λ_r — расчетные коэффициенты теплопроводности материала по соответствующим направлениям, Вт/(м•°С)

$\lambda_{м.кр}$ — коэффициент теплопроводности материала кронштейна, Вт/(м•°С)

λ_y — коэффициент теплопроводности утеплителя, Вт/(м•°С)

v — скорость движения воздуха в зазоре, м/с

ρ — радиальная координата, м

Заключение

Установлено, что существенное влияние на теплозащитные свойства фасадов с вентилируемым воздушным зазором оказывает количество и расположение кронштейнов и теплопроводность материала, из которого они выполнены.

Для воздушного зазора основными параметрами являются его ширина и приведенное термическое сопротивление части конструкции от внутреннего воздуха до поверхности теплоизоляции в воздушном зазоре. Максимальные теплозащитные свойства конструкции фасада достигаются при наименьшем количестве кронштейнов, выполнении их из стали, при наименьшей площади их поперечного сечения и при минимально возможной (по условиям удаления влаги или по другим соображениям) величине воздушного зазора.

Результаты расчетов показывают, что обеспечение требуемых значений сопротивления теплопередаче фасадов с вентилируемым воздушным зазором является не такой простой задачей. Влияние металлических кронштейнов весьма существенно, и им нельзя пренебрегать. Например, реальное значение коэффициента теплотехнической однородности рассматриваемых конструкций при использовании трех стальных кронштейнов в количестве на 1 м² составляет 0,85 и ниже, а при использовании алюминиевых кронштейнов — не более 0,7. Попытки повышения теплотехнической однородности путем использования теплоизоляционных прокладок нельзя признать эффективными.

Влияние вентилируемого зазора на повышение теплозащитных свойств рассматриваемых конструкций в большинстве случаев незначительно, однако его необходимо учитывать при расчете энергоэффективности зданий.

Представляется необходимым совершенствование методов, изложенных в статье. Предстоит учесть влияние ветра на тепловой режим зазора, а также зазоры между элементами облицовки. Однако учет этих факторов не приведет к существенному увеличению расчетных значений теплозащитных характеристик фасадов с вентилируемым воздушным зазором, он позволит только повысить точность расчетов. Для повышения возможностей математического моделирования теплозащиты фасадов необходимо проведение планомерных натурных обследований существующих зданий, которые позволят корректировать расчетные методы.

При проектировании фасадов необходимо проводить достаточно полные расчеты теплозащитных характеристик конструкций для объективной оценки используемых

систем. Это будет способствовать техническому совершенствованию систем фасадов с вентилируемым воздушным зазором и удовлетворению требуемых норм теплозащиты.

Авторы признательны профессору Ю. А. Табунщикову за квалифицированное обсуждение рукописи, которое привело к существенному улучшению статьи.

Литература

1. Батинич Р. Вентилируемые фасады зданий: Проблемы строительной теплофизики, систем обеспечения микроклимата и энергосбережения в зданиях / Сб. докл. IV науч.-практ. конф. М.: НИИСФ, 1999.
2. Езерский В. А., Монастырев П. В. Крепежный каркас вентилируемого фасада и температурное поле наружной стены // Жилищное строительство. 2003. № 10.
3. Рекомендации по проектированию навесных фасадных систем с вентилируемым воздушным зазором для нового строительства и реконструкции зданий. М.: Москомархитектура, 2002.
4. СНиП II-3-79*. Строительная теплотехника. М.: ГУП ЦПП, 1998.
5. Богословский В. Н. Тепловой режим здания. М., 1979.
6. Sedlbauer K., Kunzel H. M. Luftkonvektions einflüsse auf den Wärmedurchgang von belüfteten Fassaden mit Mineralwolleabdämmung // WKSB. 1999. Jg. 44. H.43.