

Продольная фильтрация воздуха в современных ограждающих конструкциях

Метод оценки теплозащиты стены здания с вентилируемым фасадом с учетом продольной фильтрации воздуха

В. Г. Гагарин, доктор техн. наук, профессор;

В. В. Козлов, канд. техн. наук; **А. В. Садчиков**, инженер, НИИСФ РААСН;

И. А. Мехнецов, инженер, ООО «УРСА Евразия»

С точки зрения строительной теплофизики, расположение слоя теплоизоляции у наружной поверхности ограждающей конструкции обладает рядом преимуществ. Вместе с тем, такое расположение пористой теплоизоляции предполагает решение ряда проблем, которые отсутствовали при применении традиционных конструкций, но являются актуальными для современных ограждающих конструкций. К таким проблемам относится фильтрация наружного воздуха в теплоизоляционном слое и ее влияние на теплозащитные свойства конструкций.

Введение

Влияние **фильтрации воздуха** через ограждающие конструкции на их теплозащитные свойства исследовалось в нашей стране с конца XIX века. Первые исследования были проведены гигиенистами в лаборатории Эрисмана. Многосторонние исследования различных аспектов воздухопроницаемости и фильтрации были выполнены Р. Е. Брилингом [1]. В частности, он экспериментально определил воздухопроницаемость большинства строительных материалов и конструкций стен, применяемых в то время. Математическая модель одномерного теплопереноса в конструкции при поперечной фильтрации воздуха была предложена Ф. В. Ушковым [2]. Им был разработан метод расчета распределения температуры по толщине конструкции при поперечной фильтрации воздуха. В дальнейшем были работы Ю. А. Калядина, В. С. Беляева, Е. В. Веселовацкой и др., посвященные исследованию конвективного движения воздуха и связанного с ним теплопереноса в конструкциях. Р. Е. Брилинг ввел понятие и определил «продольную инфильтрацию» как «явление проникновения наружного воздуха в толщу ограждения при направлении ветра, параллельном поверхности наружных ограждений» [1]. В дальнейшем это явление стали называть «продольной фильтрацией». Р. Е. Брилинг экспериментально подтвердил существование продольной фильтрации [1] и показал ее значительное влияние на снижение термического сопротивления слоев пористой теплоизоляции. К. Ф. Фокин отмечал, что методы расчета влияния продольной фильтрации воздуха на теплозащитные свойства стеновых ограждающих конструкций не разработаны, и учитывать продольную фильтрацию следует строительными мероприятиями [3].

Учет **продольной фильтрации воздуха** принципиально не сводится к одномерной задаче и поэтому представляет вычислительные трудности.

Сравнительно небольшая проработка данной темы, по-видимому, была вызвана незначительной актуальностью проблемы в недалеком прошлом и большими вычислительными затратами для ее разрешения.

В последнее десятилетие произошли изменения, заставляющие вернуться к исследованию этой проблемы на новом уровне.

Во-первых, резкое повышение нормативных требований к сопротивлению теплопередаче стен в корне изменило их конструктивные решения. Практически невозможно спроектировать наружную ограждающую конструкцию без использования эффективных теплоизоляционных материалов.

Наиболее выгодное, с точки зрения теплофизики, расположение теплоизоляции в конструкции – у наружной поверхности. Поэтому получили распространение навесные теплоизоляционные фасады – конструкции именно с таким расположением теплоизоляционного слоя.

Во-вторых, весьма распространенные материалы, применяемые в качестве наружной теплоизоляции, – волокнистые, а они обладают высокой воздухопроницаемостью.

Современные технологии позволяют получать и промышленно производить волокнистые минераловатные материалы с весьма малой плотностью, применение которых экономически выгодно. Чем меньше плотность минеральной ваты, тем выше ее воздухопроницаемость, хотя точной зависимости одного параметра от другого в настоящее время не установлено.

Изменения в практике строительства поставили новые вопросы при проектировании ограждающих конструкций, в том числе и связанные с фильтрацией воздуха.

Среди этих вопросов можно выделить следующие, относящиеся к конструкциям вентилируемых фасадов:

1. Какое влияние оказывает продольная фильтрация воздуха в теплоизоляционном слое на характеристики теплозащиты стены?
2. Каковы характеристики воздухопроницаемости современной минеральной ваты, как они влияют на продольную фильтрацию?
3. В каких случаях необходимо устройство ветрогидрозащитной мембраны?
4. Каким критериям по воздухопроницаемости и паропроницаемости должны отвечать ветрогидрозащитные мембраны для фасадных систем с вентилируемым воздушным зазором?
5. В какой степени оказывает влияние на продольную фильтрацию в теплоизоляционном слое облицовка вентилируемого фасада?
6. В какой степени продольная фильтрация в теплоизоляционном слое стены зависит от архитектурного решения здания, в частности от его высоты?

Настоящая работа посвящена ответу на первый из сформулированных вопросов.

Метод расчета температурного поля с учетом фильтрации воздуха в ограждающей конструкции

Как уже отмечалось, перенос теплоты через конструкцию при учете продольной фильтрации воздуха принципиально не сводится к одномерной задаче, поэтому он может рассчитываться практически только численными методами.

Характеристики теплозащиты конструкции в этом случае могут быть получены путем расчета температурного поля, причем решаемое уравнение должно учитывать перенос теплоты фильтрацией воздуха.

Уравнение теплопроводности, учитывающее перенос теплоты фильтрацией воздуха, в общем случае имеет вид:

$$c_m \gamma_0 \frac{\partial t}{\partial z} = \operatorname{div} \left(\lambda \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad}} T - c_b \overrightarrow{G}_c T \right), \quad (1)$$

где T – температура, К;

λ – расчетный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);

c_b – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С) ($c_b = 1006$ Дж/(кг·°С));

c_m – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·°С);

G_c – плотность потока воздуха через конструкцию, кг/(м²·с);

γ_0 – плотность материала в сухом состоянии, кг/м³;

z – время, с.

Уравнение (1) является уравнением теплопроводности с добавкой, стоящей в скобках в правой части, представляющей собой плотность потока теплоты, переносимой перемещающимся воздухом. Выражение для этого потока легко может быть получено из общих соображений. Переносимая воздухом плотность потока теплоты равна теплоемкости воздуха, умноженной на его температуру и на плотность потока воздуха.

В рассматриваемой постановке плотность потока воздуха через конструкцию принимается величиной, постоянной по координатам и по времени (стационарной). В этом случае через одну из границ участка конструкции поток воздуха входит в теплоизоляционный слой, а через другую – выходит. Воздух перемещается вдоль фасада, внутри воздушного зазора и в утеплителе под действием градиентов давления, которые возникают при воздействии ветрового напора. Количественное определение этих градиентов давления воздуха является задачей аэродинамики здания. По своей величине скорости движения воздуха, вызванные ветровым напором вдоль фасада здания, в воздушном зазоре и в утеплителе отличаются на порядки.

Так, если для движения воздуха вдоль фасада характерны скорости в несколько метров в секунду, то для соответствующего движения воздуха в воздушном

зазоре – в несколько сантиметров в секунду, а для движения воздуха в утеплителе – в несколько сантиметров в минуту. Поэтому при рассмотрении проблем внешней аэродинамики здания чаще всего не учитывается движение воздуха в воздушном зазоре, а при рассмотрении проблем движения воздуха в воздушном зазоре не учитывается движение воздуха в утеплителе.

Но даже сравнительно небольшое движение воздуха в утеплителе способно переносить количество теплоты, сопоставимое с тепловыми потерями конструкции без фильтрации.

Влияние фильтрации воздуха на теплоперенос рассматривается далее на примере межоконных простенков. Межоконные простенки, даже при отсутствии фильтрации, характеризуются пониженным значением приведенного сопротивления теплопередаче из-за наличия оконных откосов.

В то же время в некоторых зданиях площадь по фасаду простенков между окнами составляет значительную долю от площади стен (рис. 1).



Рисунок 1.

Пример здания с вентилируемым фасадом и с многочисленными оконными простенками

Следует отметить, что межоконные простенки подвержены наибольшему влиянию продольной фильтрации воздуха в утеплителе не потому, что при равных условиях воздух в утеплителе для этого узла движется интенсивнее (очевидно, что интенсивность движения воздуха зависит только от градиента давления и будет везде примерно одинакова), а потому, что чем короче путь воздуха в утеплителе, тем меньше он успевает прогреваться и интенсивнее отводит теплоту из конструкции.

Для определенности рассматривается фильтрация воздуха вдоль стены в направлении, перпендикулярном боковому оконному откосу (в положительном направлении оси y).

Это наиболее простой и характерный случай, позволяющий проиллюстрировать особенности исследуемого процесса. Задача сводится к двумерной, а уравнение теплопроводности в стационарном случае принимает вид:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} - c_v \cdot G_c \cdot \frac{\partial t}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

где x, y – координаты, м;

t – температура, °С;

λ_x, λ_y – расчетные коэффициенты теплопроводности по соответствующим направлениям, Вт/(м·°С);

G_c – плотность потока воздуха через конструкцию, кг/(м²·с); $G_c > 0$, если воздух движется в положительном направлении оси y , $G_c < 0$ – если в отрицательном.

Введенная величина G_c отличается от общепринятой воздухопроницаемости G размерностью (представляет количество воздуха в секунду, а не в час). Эти величины связаны соотношением:

$$G = 3600 \cdot G_c.$$

Плотность потока воздуха через конструкцию G_c , входящая в уравнение (2), определяется формулой:

$$G_c = \frac{\Delta P}{3600 \cdot \left(2R_{и.вм.} + \frac{L}{i} \right)} = \frac{\Delta P}{L} \cdot \frac{1}{3600 \cdot \left(\frac{2R_{и.вм.}}{L} + \frac{1}{i} \right)}, \quad (3)$$

где L – длина участка конструкции, по которому движется воздух, м;

ΔP – разность давлений на участке конструкции, вызывающая фильтрацию воздуха, Па;

$\Delta P/L$ – градиент давления воздуха в теплоизоляционном слое конструкции, Па/м;

i – коэффициент воздухопроницаемости теплоизоляционного материала, кг/(м·ч·Па);

$R_{и.вм.}$ – сопротивление воздухопроницанию ветрогидрозащитной мембраны, м²·ч·Па/кг;

$1/3600$ – размерный коэффициент, связанный с переходом от часов в коэффициенте воздухопроницаемости к секундам в плотности потока воздуха.

Величины $\Delta P, i, L$ являются параметрами, необходимыми для расчета значения G_c . Градиент давления воздуха вдоль фасада здания, $\Delta P/L$, зависит как от геометрии здания, так и от параметров ветрового режима. Эта величина существенно изменяется во времени, а для проведения расчетов требуется только ее среднее значение.

Корректное определение этой величины для проведения инженерных расчетов требует специальных исследований.

Коэффициент воздухопроницаемости теплоизоляционных материалов и сопротивление воздухопроницанию ветрогидрозащитной мембраны определяются экспериментально. Для назначения их расчетных значений также требуются специальные исследования. Для полного задания математической модели процесса теплопереноса на участке ограждающей конструкции требуется записать граничные условия. В общем случае на границах участка конструкции принимаются граничные условия третьего рода с добавлением плотности потока теплоты переносимого фильтрацией воздуха:

– на границах ограждения, параллельных направлению потока воздуха:

$$\begin{cases} \lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha_H \cdot (t - t_H) & * \\ \lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha_B \cdot (t_B - t) & ** \end{cases} ; \quad (4)$$

– на границах ограждения, перпендикулярных направлению потока воздуха:

$$\begin{cases} \lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} = (t - t_H) \cdot (\alpha_H + c_B \cdot G_c) & * \\ \lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha_B \cdot (t_B - t) & ** \end{cases} \quad (5)$$

На стыке материалов должно выполняться два условия.

Первое – в месте стыка температуры обоих материалов должны быть равны, второе – по обе стороны от стыка плотности потоков теплоты должны совпадать по направлению и равняться по модулю. Уравнение (2) с граничными условиями (4), (5) решается в конечных разностях.

* На наружной границе ограждения.

** На внутренней границе ограждения.

Результаты расчетов влияния фильтрации воздуха на теплозащитные свойства конструкции

Возможности рассмотренного метода расчета температурного поля с учетом фильтрации воздуха иллюстрируются на примере конкретной конструкции. Рассматривается вертикальный межоконный простенок шириной 1 м. Конструкция стены следующая: керамзитобетонная панель толщиной 250 мм, коэффициент теплопроводности материала: $\lambda_{кб} = 0,50$ Вт/(м·°С), теплоизоляционный слой из минераловатных плит толщиной 150 мм, коэффициент теплопроводности материала $\lambda_{мвп} = 0,045$ Вт/(м·°С). Температура наружного воздуха принята равной – 28 °С и 20 °С – внутреннего. Оконный блок установлен в плоскость панели стены. Минераловатные плиты установлены с нахлестом на оконный блок в 30 мм. Влияние теплотехнической неоднородности, обусловленной элементами

подконструкции фасада, в данных расчетах не рассматривается ради упрощения анализа результатов (учет этого фактора может быть легко осуществлен дополнительно). Условное сопротивление теплопередаче конструкции равно:

$$\begin{aligned}
 R_0^{усл} &= \frac{1}{\alpha_{в}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_{н}} = \\
 &= \frac{1}{8,7} + \frac{0,25}{0,50} + \frac{0,15}{0,045} + \frac{1}{23} = \\
 &= 3,99 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}} \quad . (6)
 \end{aligned}$$

Поток теплоты через рассматриваемый участок конструкции, Q , рассчитывается по внутренней поверхности от места примыкания оконного блока к оконному откосу до такого же места на другом оконном откосе простенка. Таким образом, потери теплоты через оконный блок не учитываются. Приведенное сопротивление теплопередаче рассматриваемой конструкции рассчитывается по формуле:

$$R_0^{пр} = \frac{t_{в} - t_{н}}{Q} L_1, \quad (7)$$

где $R_0^{пр}$ – приведенное сопротивление теплопередаче рассматриваемой конструкции, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$;

Q – поток теплоты через участок межоконного простенка высотой 1 м, $\text{Вт}/\text{м}$;

L_1 – ширина межоконного простенка по внутреннему обмеру, м.

Рассчитанное температурное поле рассматриваемой конструкции без учета фильтрации воздуха представлено на рис. 2. Температурное поле представлено изотермами (линиями равной температуры), которые соответствуют температурам с шагом 4 °C . По результатам расчета поток теплоты через рассматриваемый участок конструкции при отсутствии фильтрации воздуха составляет: $Q_0 = 17,4 \text{ Вт}/\text{м}$. Приведенное сопротивление теплопередаче, рассчитанное по формуле (9), составляет: $R_0^{пр} = 2,76 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

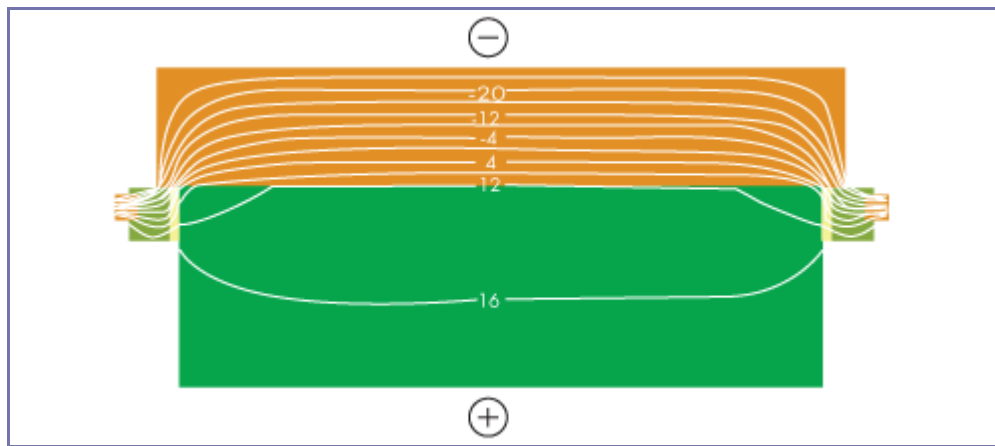


Рисунок 2.

Температурное поле в горизонтальном сечении межоконного простенка без учета влияния продольной фильтрации

Следовательно, коэффициент теплотехнической однородности рассматриваемой конструкции составляет:

$$r = \frac{R_0^{np}}{R_0^{ycl}} = \frac{2,76}{3,99} = 0,692, \quad (8)$$

Таким образом, из представленных результатов следует, что рассматриваемая конструкция обладает низким значением коэффициента теплотехнической однородности. Низкие значения этого коэффициента характерны для межоконных простенков. Вопрос о теплозащитных свойствах этих конструкций нуждается в специальном рассмотрении. В данной работе это значение r используется для анализа теплозащитных характеристик конструкции.

При наличии продольной фильтрации воздуха в конструкции поток теплоты через нее будет составлять величину Q_ϕ . Для характеристики влияния фильтрации воздуха на теплозащитные свойства конструкций предлагается ввести «коэффициент теплотехнического влияния фильтрации» r_ϕ в соответствии со следующим соотношением:

$$r_\phi = \frac{Q_0}{Q_\phi} = \frac{R_0^{np\phi}}{R_0^{np}}, \quad (9)$$

Из (8) и (9) следует:

$$R_0^{np\phi} = r_\phi \cdot R_0^{np} = r_\phi \cdot r \cdot R_0^{ycl}. \quad (10)$$

На рис. 3 представлено температурное поле рассматриваемой конструкции с учетом продольной фильтрации воздуха при значении величины плотности потока воздуха, равной $G = 11,5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Такое значение G примерно соответствует скорости ветра 10 м/с и значению коэффициента воздухопроницаемости теплоизоляционного материала $0,4 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$ (коэффициент воздухопроницаемости, характерный для минеральной ваты плотностью 30–50 $\text{кг}/\text{м}^3$).

Представленные на рис. 3 изолинии температурного поля деформировались вследствие влияния воздушного потока в утеплителе. Минимальная температура на оконном откосе понизилась с 14,8 до 12,9 °С. Поток теплоты через рассматриваемый участок конструкции увеличился по сравнению с предыдущим вариантом и составил: $Q_\phi = 20,1 \text{ Вт}/\text{м}$. Рассчитанное по формуле (9) значение коэффициента составило $r_\phi = 0,87$. Приведенное сопротивление теплопередаче конструкции с учетом фильтрации, рассчитанное по формуле (10), составило $R_0^{np\phi} = 2,39 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ и составляет от условного сопротивления теплопередаче долю, равную $r_\phi \cdot r = 0,602$. Теплотери через конструкцию вследствие продольной фильтрации увеличились на 13 %.

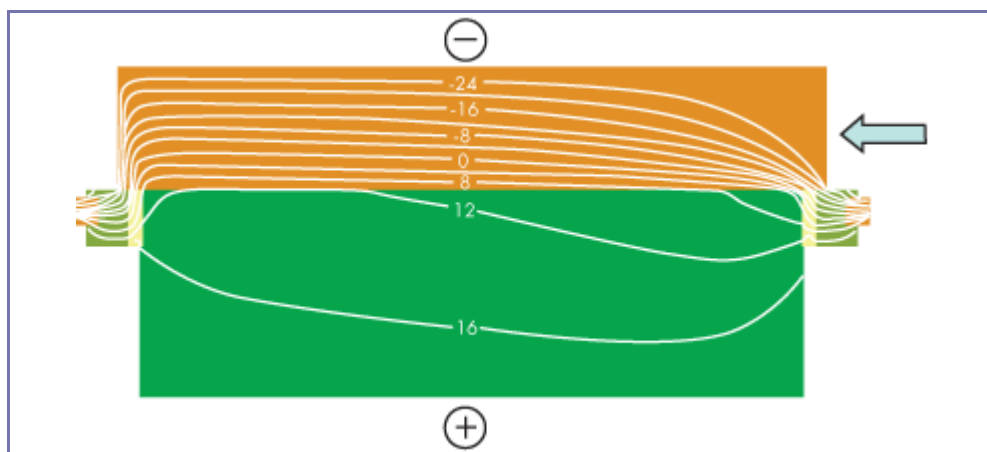


Рисунок 3.

Температурное поле в горизонтальном сечении межоконного простенка с учетом влияния продольной фильтрации при значении плотности потока воздуха $G = 11,5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Проведенные расчеты позволили получить характеристики теплозащиты конструкции при варьировании величины плотности потока воздуха. На рис. 4 представлен коэффициент теплотехнического влияния фильтрации, $\gamma_{\text{ф}}$, а на рис. 5 – минимальная температура на оконном откосе в зависимости от плотности потока воздуха для рассматриваемой конструкции. Конечно, эти данные сложно анализировать без их соотнесения с возможным ветровым воздействием на конструкцию и с воздухопроницаемостью утеплителя.

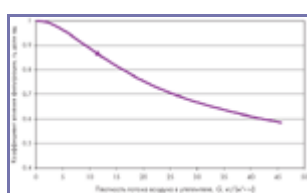


Рисунок 4 ([подробнее](#))

Зависимость коэффициента теплотехнического влияния фильтрации от плотности потока воздуха для рассматриваемой конструкции межоконного простенка

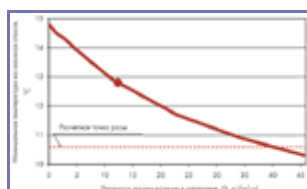


Рисунок 5 ([подробнее](#))

Зависимость минимальной температуры на оконном откосе от плотности потока воздуха для рассматриваемой конструкции межоконного простенка

Однако они показывают границы влияния продольной фильтрации воздуха на теплозащитные свойства конструкции. Разработанный метод позволяет проводить сравнительные расчеты при различных вариантах теплоизоляции конструкций.

Известна практика двухслойного утепления фасада, в котором теплоизоляционный материал внешнего слоя плотнее внутреннего. Предполагается, что такое расположение теплоизоляционных слоев должно уменьшать фильтрацию воздуха.

На рис. 6 приведено температурное поле конструкции, отличающейся от исследованной выше тем, что у нее два теплоизоляционных слоя с различной воздухопроницаемостью. Внутренний слой имеет воздухопроницаемость такую же, как и в предыдущем примере, а наружный теплоизоляционный слой – в восемь раз меньшую.

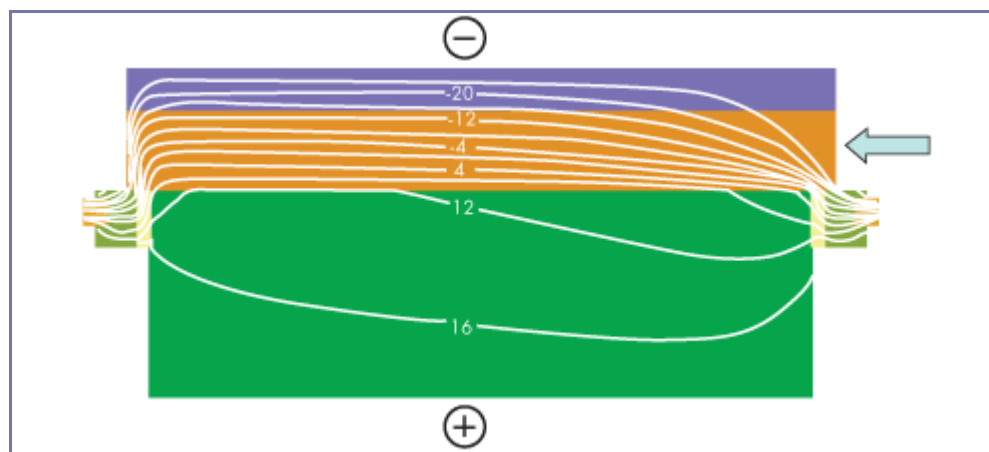


Рисунок 6.

Температурное поле горизонтального сечения конструкции межоконного простенка с двухслойным утеплением с учетом влияния продольной фильтрации при значении плотности потока воздуха $G = 11,5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Сравнение рис. 3 и рис. 6 показывает, что температурные поля идентичны. Количественные показатели теплозащиты конструкций также практически совпадают. Минимальная температура на оконном откосе составила для конструкции как с однослойным, так и с двухслойным утеплением $12,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Поток теплоты через конструкцию с однослойным утеплением составил $20,09 \text{ Вт}/\text{м}$, с двухслойным – $19,94 \text{ Вт}/\text{м}$. Коэффициент теплотехнического влияния фильтрации для конструкции с однослойным утеплением составил $r_\phi = 0,866$, с двухслойным также $r_\phi = 0,866$. Различия лежат в пределах погрешности вычислений.

То есть при двухслойном утеплении фильтрационные потери теплоты определяются внутренним слоем теплоизоляционного материала с наибольшей воздухопроницаемостью. Предельным случаем такого устройства теплоизоляции является отсутствие внутреннего теплоизоляционного слоя, т. е. наличие щели (воздушной прослойки) между теплоизоляционным слоем и стеной (рис. 7). Такой монтаж теплоизоляции, конечно, является дефектным. Говорить о фильтрации воздуха в этом случае неправомерно. Воздух может двигаться в такой щели даже при очень небольших значениях градиента давления. Скорость движения будет зависеть от градиента давления и аэродинамического сопротивления щели.



Рисунок 7.
Неплотное прилегание минераловатных плит к стене в межоконном простенке

Разработанный метод позволяет провести расчет температурного поля такой конструкции, если задана скорость движения воздуха в щели. На рис. 8 представлено температурное поле такой конструкции при движении воздуха в щели со скоростью 0,05 м/с (т. е. 5 см/с). При этом плотность потока воздуха в слое теплоизоляции принята равной $G = 0,43 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, т. е. намного меньше, чем в предыдущих расчетах. Искривленные изолинии указывают на большое влияние движения воздуха в щели на температурный режим конструкции. Поток теплоты через конструкцию составил 43,4 Вт/м. Приведенное сопротивление теплопередаче с учетом фильтрации составило $R_0^{\text{пр ф}} = 1,11 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, коэффициент теплотехнического влияния фильтрации $\gamma_{\text{ф}} = 0,40$, минимальная температура на оконном откосе 7,0 °С.

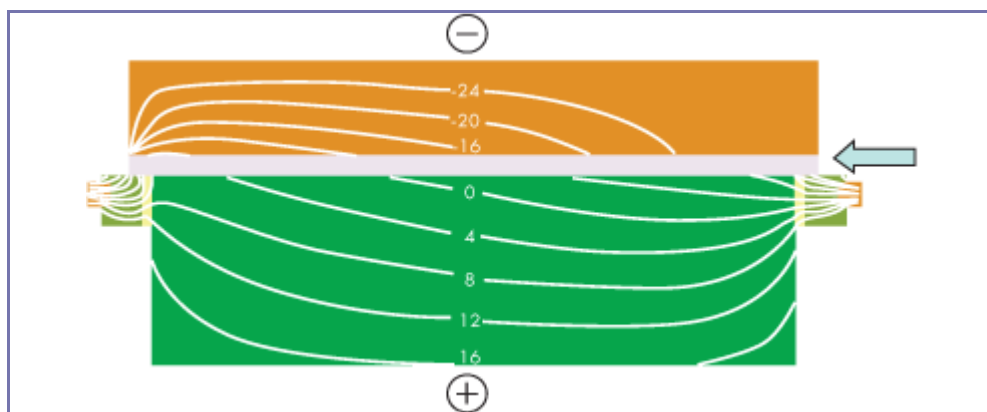


Рисунок 8.

Температурное поле конструкции межоконного простенка со щелью между теплоизоляционным слоем и стеной. Ширина щели 2,5 см, скорость движения воздуха в щели 5 см/с

Следует отметить, что принятая скорость движения воздуха в щели очень мала, она на порядок меньше скорости движения воздуха в воздушном зазоре фасада. Даже при такой скорости сопротивление теплопередаче конструкции настолько резко снизилось, что составило всего 28 % от значения этой величины по глади конструкции (т. е. от $R_{0, \text{усл}}$). Если же при этом учитывать влияние и теплопроводных включений (кронштейнов), то сопротивление теплопередаче конструкции может стать ниже, чем требуемое сопротивление теплопередаче по санитарно-гигиеническим требованиям СНиП II-3-79 «Строительная теплотехника» до Изменений № 3, т. е. до 1995 года.

Поэтому такой дефект при монтаже теплоизоляции недопустим. Рассматриваемая конструкция может иметь другие дефекты, обусловленные ошибками при монтаже.

Часто допускаемая ошибка монтажа заключается в том, что минераловатные плиты не закрывают оконную коробку.

Пример такого исполнения показан на рис. 9. В связи с этим рассмотрена конструкция, в которой минераловатные плиты отстоят от оконной коробки на расстоянии 20 мм. Температурное поле в сечении такой конструкции при отсутствии продольной фильтрации воздуха приведено на рис. 10. Поток теплоты через конструкцию составил $Q_0 = 28,5$ Вт/м. Приведенное сопротивление теплопередаче, рассчитанное по формуле (7), составило: $R_{0, \text{пр}} = 1,68$ м² · °С/Вт, коэффициент теплотехнической однородности конструкции – $\tau = 0,42$, минимальная температура на внутренней поверхности оконного откоса 9,2 °С.



Рисунок 9.

Пример неправильного монтажа утеплителя. Минераловатные плиты не закрывают оконную коробку

Эти данные показывают значительное снижение теплозащитных свойств стены из-за допущенной ошибки монтажа. В частности, приведенное сопротивление теплопередаче $R_{0}^{пр}$ снизилось на 39 %. Температурное поле в сечении этой же конструкции, но при учете фильтрации воздуха в слое теплоизоляции представлено на рис. 11. Поток теплоты через конструкцию составил $Q_{\phi} = 30,7$ Вт/м. Коэффициент теплотехнического влияния фильтрации $r_{\phi} = 0,93$, приведенное сопротивление теплопередаче с учетом фильтрации составило $R_{0}^{пр\phi} = 1,56 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$, минимальная температура на внутренней поверхности оконного откоса $8,2 \text{ °C}$. В данном случае, хотя минимальная температура на оконном откосе существенно снизилась, потери теплоты через конструкцию увеличились незначительно, на что указывает высокое значение r_{ϕ} .

Следовательно, отрицательное действие продольной фильтрации будет более заметным для правильно смонтированной конструкции, чем для конструкции с указанным дефектом. То есть влияние рассматриваемого дефекта, допущенного при монтаже конструкции, значительно серьезнее, чем влияние продольной фильтрации.

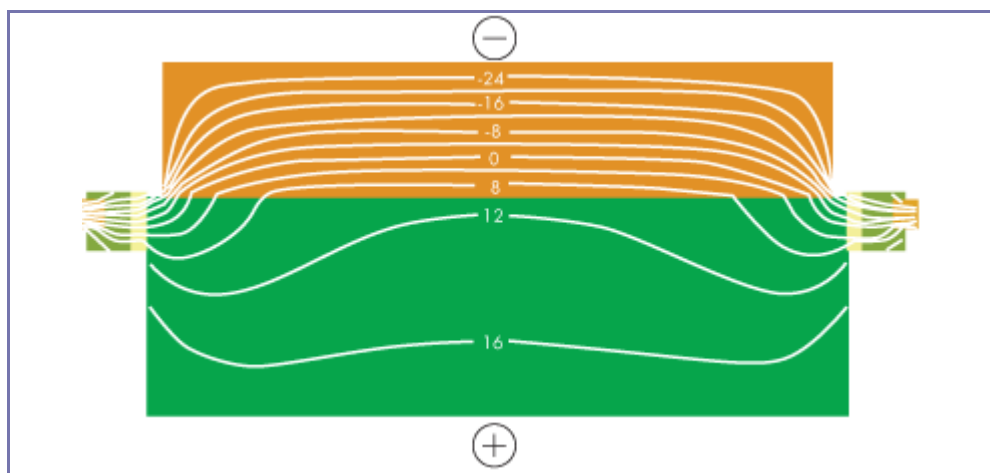


Рисунок 10.

Температурное поле в сечении конструкции, когда минераловатные плиты не закрывают оконную коробку при отсутствии фильтрации воздуха

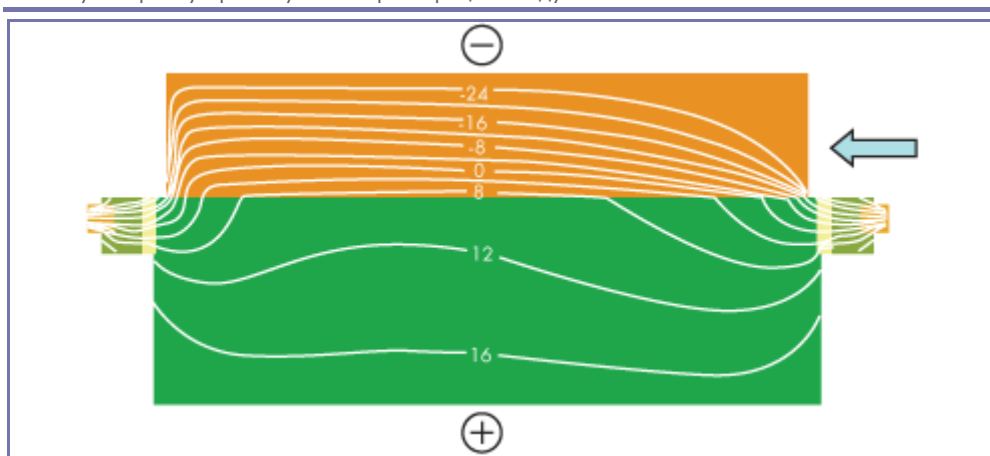


Рисунок 11.

Температурное поле в сечении конструкции, когда минераловатные плиты не закрывают оконную коробку, при плотности потока воздуха в утеплителе $G = 11,5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Заключение

Разработанный метод расчета позволяет проводить оценку теплозащитных свойств конструкций с учетом фильтрации наружного воздуха. Вариант метода, изложенный в статье, предусматривает расчет наихудшей, с точки зрения теплотерь, конструкции здания. Для систематического использования представленного метода расчета необходимо составить банк данных по коэффициентам воздухопроницаемости волокнистых теплоизоляционных материалов, используемых в вентилируемых фасадах, и разработать метод расчета перепадов давления на фасаде здания при ветре.

При проектировании вентилируемых фасадов представляется целесообразным ввести ограничения на расчетное сопротивление теплопередаче конструкции с учетом фильтрации воздуха в слое теплоизоляции межоконного простенка по следующим трем случаям:

1. Значение приведенного сопротивления теплопередаче межоконных простенков с учетом продольной фильтрации воздуха через утеплитель, рассчитанное при температуре и скорости движения наружного воздуха, средних за отопительный период, должно быть не менее, чем 0,63 от величины, определяемой требованиями энергосбережения СНиП II-3-79*.

2. Значение приведенного сопротивления теплопередаче межоконных простенков с учетом продольной фильтрации воздуха через утеплитель, рассчитанное при температуре наружного воздуха, равной температуре наиболее холодных суток, и при скорости ветра, равной наибольшей среднесуточной в январе, должно быть не менее требуемого по санитарно-гигиеническим условиям.

3. Минимальная температура воздуха на оконном откосе в последнем случае не должна быть ниже точки росы.

Литература

1. Брилинг Р. Е. Воздухопроницаемость ограждающих конструкций и материалов. М.: Госстройиздат, 1949.

2. Ушков Ф. В. Влияние воздухопроницаемости на теплозащиту стен // Строительная промышленность. 1951. № 8.

3. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: Стройиздат, 1973.