

УДК 699.86

В.Г. ГАГАРИН, д-р техн. наук, В.В. КОЗЛОВ, канд. техн. наук, НИИСФ РААСН (Москва),
К.И. ЛУШИН, инженер, Московский государственный строительный университет

Скорость движения воздуха в прослойке навесной фасадной системы при естественной вентиляции

Рассмотрено формирование воздушно-теплого режима при естественной вентиляции воздушной прослойки в навесной фасадной системе. Получено дифференциальное уравнение, описывающее распределение температуры по высоте прослойки, а так же приближенное уравнение для определения скорости воздуха в прослойке. Проведена оценка максимально достижимой скорости воздуха в прослойке. Полученные результаты могут быть использованы при оценке эмиссии волокон из минераловатного утеплителя НФС.

Ключевые слова: навесная фасадная система, воздушная прослойка, скорость движения воздуха, естественная вентиляция прослойки, интенсивность солнечной радиации.

Навесные фасадные системы занимают прочное положение среди ограждающих конструкций современных зданий вследствие их архитектурной привлекательности и ряда преимуществ при утеплении зданий [1, 2]. В СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» (актуализированный СНиП 23-02-2003) [3] в качестве рекомендуемого приложения Л включена методика теплофизического расчета навесных фасадных систем (НФС) с вентилируемой воздушной прослойкой. Расчет скорости движения воздуха в данной методике осуществляется исходя из математической модели и алгоритма, представленного в [4, 5]. Расчет по этой методике обычно проводится при некоторых значениях параметров обеспечивающих среднюю скорость движения воздуха в прослойке или даже наименьшую скорость. Это необходимо для обеспечения дальнейшего расчета влажностного режима НФС с вентилируемой прослойкой. Однако, в ряде случаев необходимо обладать информацией о максимальных скоростях движения воздуха в прослойке, действующих продолжительное время. Такая задача возникает, например, при количественной оценке эмиссии волокон из минераловатного утеплителя НФС [6] или при изменении свойств утеплителя НФС [7]. Задача определения скорости движения воздуха в вентилируемых прослойках неоднократно решалась методами механики несжимаемой жидкости и газа [8–10]. В настоящей статье приводятся инженерные методики расчета и оценки скорости движения воздуха в прослойке НФС, в том числе и максимальной скорости.

Вывод уравнения распределения температуры воздуха по высоте воздушной прослойки НФС

Расчет температуры воздуха производится в предположении, что известна скорость движения воздуха в прослойке. Температура воздуха в воздушной прослойке $t_{пр}$, °С, зависит от геометрических параметров прослойки и теплофизических характеристик стены и облицовки фасада. Зависит она также и от температуры наружного и внутреннего воздуха. Направление и скорость ветра также оказывают

влияние на скорость движения воздуха в прослойке, но влиянием этой скорости пренебрегают ввиду случайного характера. Большое влияние на скорость движения воздуха оказывает солнечная радиация, которая учитывается при помощи условной температуры наружного воздуха, определяемой по формуле:

$$t_{н}^{усл} = t_{н} + \frac{I \cdot \rho}{\alpha_{н}}, \quad (1)$$

где ρ – коэффициент поглощения солнечной радиации, доли ед.; $\alpha_{н}$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности, Вт/(м²·°С); I – интенсивность солнечной радиации (прямой и рассеянной) на вертикальную поверхность данной ориентации, Вт/м².

Значение $t_{пр}$ зависит от высоты и изменяется от значения $t_{н}$ у входа в прослойку до предельного значения температуры воздуха в прослойке, которое соответствует температуре при неподвижном воздухе, т. е. чем выше (дальше от входа в прослойку) расположен участок стены здания, тем выше значение $t_{пр}$.

Пусть скорость движения воздуха в прослойке известна и составляет v , м/с. Уравнение баланса теплоты для элементарного слоя воздуха в прослойке, толщиной Δx имеет вид:

$$-t_{x+\Delta x} \cdot c_B \cdot v \cdot d \cdot \gamma_B + t_x \cdot c_B \cdot v \cdot d \cdot \gamma_B + \frac{t_B - t_{пр}}{R_{о,констр}} \cdot \Delta x - \frac{t_{пр} - t_{н}^{усл}}{R_{о,обл}} \cdot \Delta x = 0. \quad (2)$$

Первое слагаемое в данном уравнении выражает количество теплоты, уносимой потоком воздуха из элементарного слоя прослойки вверх; второе слагаемое выражает количество теплоты, поступающей в элементарный слой снизу; третье слагаемое выражает количество теплоты, поступающей в элементарный слой через стену с утеплителем; четвертое слагаемое выражает количество теплоты, уходящей из элементарного слоя через облицовочные элементы фасада.

Преобразование (2), приводит к дифференциальному уравнению:

$$\frac{dt_{\text{пр}}}{dx} \cdot \frac{c_{\text{в}} \cdot v \cdot d \cdot \gamma_{\text{в}}}{\frac{1}{R_{\text{о.констр}}} + \frac{1}{R_{\text{о.обл}}}} + t_{\text{пр}} = \frac{\frac{t_{\text{в}}}{R_{\text{о.констр}}} + \frac{t_{\text{н}}^{\text{усл}}}{R_{\text{о.обл}}}}{\frac{1}{R_{\text{о.констр}}} + \frac{1}{R_{\text{о.обл}}}}. \quad (3)$$

Выражение в правой части уравнения представляет собой температуру воздуха в прослойке при отсутствии изменения температуры воздуха по высоте и обозначается t_0 . Такая температура имеет место при отсутствии движения воздуха в прослойке. Коэффициент при производной обозначается символом x_0 , его физический смысл будет прояснен ниже.

$$t_0 = \frac{\frac{t_{\text{в}}}{R_{\text{о.констр}}} + \frac{t_{\text{н}}^{\text{усл}}}{R_{\text{о.обл}}}}{\frac{1}{R_{\text{о.констр}}} + \frac{1}{R_{\text{о.обл}}}} = \frac{t_{\text{в}} K_{\text{констр}} + t_{\text{н}}^{\text{усл}} K_{\text{обл}}}{K_{\text{констр}} + K_{\text{обл}}}; \quad (4)$$

$$x_0 = \frac{c_{\text{в}} \cdot v \cdot d \cdot \gamma_{\text{в}}}{\frac{1}{R_{\text{о.констр}}} + \frac{1}{R_{\text{о.обл}}}} = k \cdot v, \quad (5)$$

где $t_{\text{в}}$, $t_{\text{н}}$ – температуры внутреннего и наружного воздуха соответственно, °С; $t_{\text{н}}^{\text{усл}} = t_{\text{н}} + \frac{I \cdot \rho}{\alpha_{\text{н}}}$ – условная температура наружного воздуха, с учетом солнечной радиации, падающей на стену, °С; $R_{\text{о.констр}}$, $R_{\text{о.обл}}$ – сопротивления теплопередаче частей конструкции от внутреннего воздуха помещения до воздушной прослойки и от воздушной прослойки до наружного воздуха соответственно, м²·°С/Вт; $K_{\text{констр}}$, $K_{\text{обл}}$ – коэффициенты теплопередачи частей конструкции от внутреннего воздуха помещения до воздушной прослойки и от воздушной прослойки до наружного воздуха соответственно, Вт/(м²·°С); x – расстояние от входа в воздушную прослойку до рассматриваемой точки, м; v – скорость движения воздуха в прослойке, м/с; $c_{\text{в}}=1005$ – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С); $\gamma_{\text{в}}=353/(273+t_{\text{н}})$ – плотность воздуха при температуре $t_{\text{н}}$, кг/м³; d – ширина воздушной прослойки, м.

С учетом этих обозначений уравнение (3) принимает простой вид:

$$x_0 \frac{dt_{\text{пр}}}{dx} + t_{\text{пр}} = t_0. \quad (6)$$

Естественным начальным условием для данной задачи является: $t_{\text{пр}}=t_{\text{н}}$ при $x=0$. При этом, решением уравнения (6) является:

$$t_{\text{пр}} = t_0 - (t_0 - t_{\text{н}}) \cdot e^{-\frac{x}{x_0}}. \quad (7)$$

Это уравнение описывает распределение температуры по высоте воздушной прослойки фасада. Если $t_{\text{н}}$ – начальная температура воздуха на входе в прослойку, то величина $(t_0 - t_{\text{н}})$ является по своему физическому смыслу предельным отклонением температуры воздуха в вентилируемой прослойке от своего начального значения. Из уравнения (7) следует, что по мере увеличения x , значение $t_{\text{пр}}$ стремится к значению t_0 . Как следует из формулы (7) величина x_0 – это высота, на которой разность температур $(t_0 - t_{\text{пр}})$ становится меньше своего предельного значения $(t_{\text{н}} - t_0)$ в e раз.

Полученное уравнение (7) позволяет рассчитать распределение температуры по высоте воздушной прослойки.

Средняя температура воздуха в вентилируемой прослойке НФС

Уравнение (7) позволяет получить уравнение для средней температуры воздуха в прослойке. При высоте фасада L средняя температура определяется интегрированием полученной зависимости (7):

$$t_{\text{ср}} = \frac{1}{L} \int_0^L t_{\text{пр}} dx = \frac{1}{L} \int_0^L \left(t_0 - (t_0 - t_{\text{н}}) \cdot e^{-\frac{x}{x_0}} \right) dx = \frac{1}{L} \left(t_0 \cdot L - x_0 - (t_0 - t_{\text{н}}) \left[1 - e^{-\frac{L}{x_0}} \right] \right) = t_0 - (t_0 - t_{\text{н}}) \cdot \frac{x_0}{L} \cdot \left[1 - e^{-\frac{L}{x_0}} \right]. \quad (8)$$

Практическое применение это выражение может получить при оценке скорости движения воздуха в прослойке. Согласно [4] скорость движения воздуха в прослойке при отсутствии ветра выражается формулой:

$$v = \sqrt{\frac{0,08 \cdot L \cdot (t_{\text{ср}} - t_{\text{н}})}{\sum_i \xi_i}}, \quad (9)$$

где L – разность высот от входа воздуха в прослойку до выхода из нее (высота фасада), м; $\sum_i \xi_i$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений, определяемых из Справочника по гидравлическим сопротивлениям И.Е. Идельчика.

Приближенная формула для расчета скорости движения воздуха в прослойке

Выражения (8) и (9) позволяют получить приближенную формулу для расчета скорости движения воздуха в вентилируемой прослойке. Для этого значение $t_{\text{ср}}$ из (8) подставляется в (9). Полученное уравнение решается относительно скорости движения воздуха. При этом в (8) пренебрегают величиной $e^{-\frac{L}{x_0}}$, которая в практических задачах составляет малую величину (менее 0,1), не оказывающую существенного влияния на конечный результат (рис. 1). Приближенная формула имеет вид:

$$v \approx \sqrt{\frac{0,0016 \cdot (t_0 - t_{\text{н}})^2 \cdot k^2 + 0,08 \cdot L \cdot (t_0 - t_{\text{н}})}{\left(\sum_i \xi_i \right)^2} - \frac{0,04 \cdot (t_0 - t_{\text{н}}) \cdot k}{\sum_i \xi_i}}. \quad (10)$$

Можно, рассчитав скорость движения воздуха по формуле (9), проводить расчет распределения температуры воздуха по высоте прослойки по формуле (7) вместо итерационного расчета по методике [4].

Оценка максимальной скорости движения воздуха в прослойке

Выражения (8) и (9) позволяют также получить оценку максимально достижимой скорости движения воздуха в воздушной прослойке, обусловленной конвекцией. Это значение можно использовать при оценке эмиссии волокон и долговечности минераловатного утеплителя [6]. Из (9) следует, что скорость движения воздуха пропорциональна $\sqrt{(t_{\text{ср}} - t_{\text{н}})}$, следовательно, она монотонно возрастает с ростом $(t_{\text{ср}} - t_{\text{н}})$. Остальные параметры остаются неизменными при эксплуатации фасада. Из (8) следует:

$$t_{\text{ср}} - t_{\text{н}} = t_0 - (t_0 - t_{\text{н}}) \cdot \frac{x_0}{L} \cdot \left[1 - e^{-\frac{L}{x_0}} \right] - t_{\text{н}}. \quad (11)$$

Преобразование (11) дает:

$$t_{\text{ср}} - t_{\text{н}} = t_0 \left(1 - \frac{x_0}{L} \cdot \left[1 - e^{-\frac{L}{x_0}} \right] \right) + t_{\text{н}} \left(\frac{x_0}{L} \cdot \left[1 - e^{-\frac{L}{x_0}} \right] - 1 \right) = \left(1 - \frac{x_0}{L} \cdot \left[1 - e^{-\frac{L}{x_0}} \right] \right) \cdot (t_0 - t_{\text{н}}). \quad (12)$$

Максимальное значение $(t_{cp} - t_n)_{max}$ достигается при $\frac{x_0}{L} \rightarrow 0$. Это следует из того, что функция $f(\frac{x_0}{L}) = \left(1 - \frac{x_0}{L} \cdot \left[1 - e^{-\frac{x_0}{L}}\right]\right)$ имеет максимум при $\frac{x_0}{L} \rightarrow 0$, что в свою очередь следует из того, что эта функция монотонно убывающая, так как ее производная $\frac{df}{d(\frac{x_0}{L})}$ является отрицательной на полуинтервале значений аргумента $\frac{x_0}{L} \in [0; 1]$.

Следовательно, максимальное значение $t_{cp} - t_n$ достигается при $\frac{x_0}{L} = 0$:

$$(t_{cp} - t_n)_{max} = \lim_{\frac{x_0}{L} \rightarrow 0} \left(1 - \frac{x_0}{L} \cdot \left[1 - e^{-\frac{x_0}{L}}\right]\right) \cdot (t_0 - t_n) = (t_0 - t_n). \quad (13)$$

После подстановки (13) в (9) получается:

$$v_{max} = \sqrt{\frac{0,08 \cdot L \cdot (t_0 - t_n)}{\sum \xi_i}}. \quad (14)$$

Подстановка в (14) выражения для t_0 из (4) дает:

$$v_{max} = \sqrt{\frac{0,08 \cdot L}{\sum \xi_i} \cdot \left(\frac{t_b K_{констр} + t_n^{усл} K_{обл}}{K_{констр} + K_{обл}} - t_n\right)} = \sqrt{\frac{0,08 \cdot L}{\sum \xi_i} \cdot \frac{(t_b - t_n) K_{констр} + (t_n^{усл} - t_n) K_{обл}}{K_{констр} + K_{обл}}}. \quad (15)$$

С учетом того, что коэффициент теплопередачи облицовки $K_{обл}$ намного больше, чем коэффициент теплопередачи конструкции $K_{констр}$ из (15) следует:

$$v_{max} \approx \sqrt{\frac{0,08 \cdot L}{\sum \xi_i} \cdot \frac{K_{констр}}{K_{обл}} (t_b - t_n) + (t_n^{усл} - t_n)} = \sqrt{\frac{0,08 \cdot L}{\sum \xi_i} \cdot \frac{K_{констр}}{K_{обл}} (t_b - t_n) + \frac{\rho I}{\alpha_n}}. \quad (16)$$

Формулы (15) и (16) позволяют легко оценить максимальную скорость движения воздуха в прослойке. При отсутствии солнечной радиации скорость движения воздуха определяется в основном разностью температуры внутреннего и наружного воздуха. В летних условиях, когда эта разность мала, скорость движения воздуха определяется интенсивностью солнечной радиации. Максимальное значение скорости движения воздуха будет наблюдаться при одновременном максимуме значений $(t_b - t_n)$ и I . Это значение и будет представлять оценку максимальной скорости движения воздуха в воздушной прослойке НФС на выбранном наборе климатических данных.

Примеры расчета скорости движения воздуха в прослойке

Расчеты скорости движения воздуха в прослойке НФС позволяют иллюстрировать полученные формулы. Расчеты выполнялись для кирпичной стены здания с НФС в Москве. Высота НФС составляла 10 м, толщина слоя минеральной ваты 120 мм, термическое сопротивление: облицовки НФС – 0,06 м²·°C/Вт; стены с утеплителем – 3,3 м²·°C/Вт. Климатические условия приняты для Москвы. Расчеты выполнялись по среднемесячным значениям температуры воздуха и интенсивности солнечной радиации (солнечная радиация принимается для южного фасада здания).

На рис. 1 приведена скорость движения воздуха в прослойке НФС в различные месяцы года, рассчитанная без

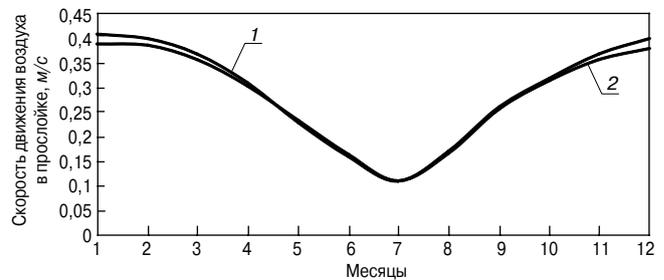


Рис. 1. Скорость движения воздуха в прослойке НФС, рассчитанная по среднемесячным значениям климатических параметров итерационным методом [4] и по приближенной формуле (10): 1 – итерационный расчет; 2 – расчет по приближенной формуле

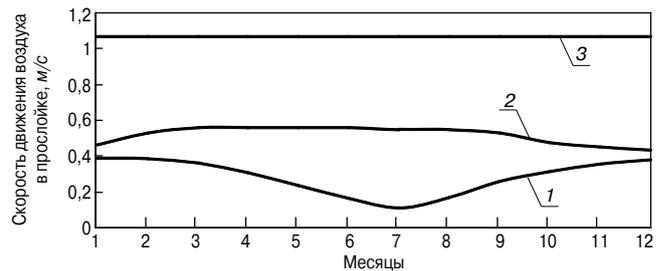


Рис. 2. Рассчитанная средне-месячная скорость движения воздуха в прослойке НФС без учета влияния солнечной радиации и с учетом этого влияния. 1 – без учета солнечной радиации; 2 – с учетом солнечной радиации; 3 – максимально возможная средне-месячная скорость движения воздуха в прослойке НФС

учета солнечной радиации итерационной методикой [4] и по приближенной формуле (10). Получены близкие значения величин.

На рис. 2 приведена скорость движения воздуха в прослойке НФС по среднемесячным значениям климатических параметров, рассчитанная по формуле (10) без учета и с учетом интенсивности солнечной радиации, а также оценка максимального значения этой скорости по формуле (16) при максимальной в течение года разности $(t_b - t_n)$ и при максимальном в течение года значении I . Из графиков видно, что учет интенсивности солнечной радиации существенно повысил рассчитанную скорость движения воздуха в прослойке. Пренебрегать влиянием солнечной радиации при расчетах скорости движения воздуха в вентилируемой прослойке нельзя.

Заключение

Выполненное моделирование температурно-воздушного режима в вентилируемой прослойке НФС позволяет проводить расчеты по сравнительно простым, инженерным формулам. Это делает возможным внедрить расчеты в проектную практику и повысить точность расчетов теплофизических свойств ограждающих конструкций с НФС, что, в свою очередь может отразиться на экономическом обосновании при выборе ограждающих конструкций зданий [11].

Список литературы

1. Есаулов Г.В. История России в градостроительстве: традиции и новации // Academia. Архитектура и строительство. 2012. № 4. С. 130–133.
2. Гагарин В.Г. Теплофизические проблемы современных стеновых ограждающих конструкций многоэтажных зданий // Academia. Архитектура и строительство. 2009. № 5. С. 297–305.

3. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Требования к теплозащите и энергетической эффективности в проекте актуализированного СНиП «Тепловая защита зданий» // Жилищное строительство. 2011. № 8. С. 2–6.
4. Гагарин В.Г., Козлов В.В., Цыкановский Е.Ю. Расчет теплозащиты фасадов с вентилируемым воздушным зазором // АВОК. 2004. № 2. С. 20–26; № 3. С. 20–26.
5. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Расчет сопротивления теплопередаче фасадов с вентилируемым воздушным зазором // Строительные материалы. 2004. № 7. С. 8–9.
6. Гагарин В.Г., Гувернюк С.В., Лушин К.И. Моделирование эмиссии волокон из минераловатного утеплителя навесной фасадной системы с вентилируемой прослойкой // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 9. С. 27–29.
7. Умнякова Н.П. Теплозащитные свойства эксплуатируемых навесных вентилируемых фасадных конструкций // Жилищное строительство. 2011. № 2. С. 2–6.
8. Машенков А.Н., Чебурканова Е.В. Определение коэффициента теплотехнической однородности навесных фасадных систем с воздушным зазором // Строительные материалы. 2007. № 6. С. 10–12.
9. Hensen J., Bartak M., Drkal F. Modeling and Simulation of a Double-Skin Facade System // ASHRAE Transactions, 2002. Vol. 108. Part 2. Pp. 1251–1259.
10. Mingottia N., Chenvidyakarna T., Woodsb A.W. The fluid mechanics of the natural ventilation of a narrow-cavity double-skin facade // Building and Environment. 2011. Vol. 46. Pp. 807–823.
11. Гагарин В.Г. Экономический анализ повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий // Строительные материалы. 2008. № 8. С. 41–47.

21–24 января 2014
Красноярск



XXII СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА
**СТРОИТЕЛЬСТВО
АРХИТЕКТУРА**

**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ВОЗВЕДЕНИЯ, ОТДЕЛКИ
И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ**

Организатор –
ВК «Красноярская ярмарка»

Официальная
поддержка:



г. Красноярск, ул. Авиаторов,
19, МВДЦ «Сибирь»
тел.: (391) 22-88-405,
22-88-611 (круглосуточно)
build@krasfair.ru
www.krasfair.ru

0+



ИНЖ
ПРОЕКТ
СТРОЙ

СОВРЕМЕННЫЕ ГЕОТЕХНОЛОГИИ

- УКРЕПЛЕНИЕ ГРУНТОВ
- ОГРАЖДЕНИЕ КОТЛОВАНОВ
- ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ
- ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ЗАВЕСЫ
- УСИЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТОВ
- ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

(499) 951-03-21
www.jet-grouting.ru

Реклама