

Диффузорная конструкция навесного вентилируемого фасада

Инженер Е.Б. Явтушенко,

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»;

к.т.н., старший преподаватель М.В. Петроченко,

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Аннотация. Основной проблемой при проектировании фасадных систем является эмпирический выбор параметров вентилируемого воздушного зазора и рустов между облицовочными панелями, в результате чего появляются невентилируемые прослойки. Недостаточный воздухообмен при этом приводит к обледенению элементов подконструкции, выходящих в воздушный вентилируемый зазор, и облицовочного слоя в зимний период, снижению теплозащитных свойств конструкции в целом.

Целью настоящей работы была разработка методики гидравлического расчета параметров течения воздуха в вентилируемом воздушном зазоре, позволяющая определить рациональные размеры гидравлически оптимального воздушного зазора в навесных фасадах зданий и сооружений. В результате было установлено, что с точки зрения минимизации потерь необходимо проектировать вентилируемый навесной фасад с вентилируемой воздушной прослойкой, расширяющейся снизу вверх.

Ключевые слова: навесной вентилируемый фасад; свободноконвективное течение; воздушный зазор; диффузорный профиль навесного фасада; оптимальная ширина воздушного зазора; показатель политропы; тепловой поток; энергоэффективность; наружные ограждающие конструкции

На сегодняшний день вопрос внедрения новых технологий строительства, позволяющих рационально использовать энергоресурсы, экономить средства и минимизировать затраты на эксплуатацию зданий и сооружений, становится все более актуальным. В настоящее время происходит поиск новых возможностей для повышения энергоэффективности зданий.

В целом объем домостроения на территории Российской Федерации постоянно растет и требует новейших технических решений абсолютно во всех аспектах. Одним из таких решений стало применение ограждающих конструкций с использованием эффективных утеплителей, в том числе навесных вентилируемых фасадов (НВФ) с воздушным зазором. Воздушная вентилируемая прослойка оказывает влияние на все теплофизические характеристики фасада, и ее правильная организация является важной практической задачей.

Основной проблемой при проектировании фасадных систем является эмпирический выбор параметров воздушного зазора и рустов между облицовочными панелями, в результате чего появляются невентилируемые прослойки. Недостаточный воздухообмен при этом приводит к обледенению элементов подконструкции, выходящих в воздушный вентилируемый зазор, и облицовочного слоя в зимний период, а также к снижению теплозащитных свойств конструкции в целом. В период эксплуатации в ограждающих конструкциях здания возможны конденсация и накопление влаги, вследствие чего снижаются долговечность и теплозащитные свойства материалов конструкции. Распространены конструктивные решения по выведению влаги восходящим потоком воздуха, движущимся в плоских каналах ограждающих конструкций. К таким решениям относятся, в том числе, и вентилируемые фасадные системы [1].

Для проектирования ограждающих конструкций необходим тщательный анализ условий и возможности вывода влаги из конструкции через вентилируемую воздушную прослойку, а также уточнение параметров течения воздуха в вентилируемом канале [2].

Течение воздуха в вертикальных плоских каналах ограждающих строительных конструкций можно охарактеризовать как свободноконвективное (термогравитационное). Воздух, поступая снаружи в вентилируемый канал, движется за счет естественной тяги, возникающей вследствие разницы температур наружного воздуха и стенок вентилируемого канала. Наличие свободноконвективных течений в элементах строительных конструкций делает актуальными оценки гидравлических характеристик свободноконвективного потока, в первую очередь, средней скорости течения как функции тепловой нагрузки и размеров воздушного зазора [3].

Свободная конвекция – это экономичный и практичный метод удаления влаги из воздушного зазора, так как он не требует дополнительных материальных затрат [4].

Для обоснования эффективности работы вентилируемого фасада необходима методика расчета параметров воздушного потока в вентилируемом зазоре между стеной и защитным экраном, а именно, требуется решить вопрос о том, каков должен быть размер (ширина) воздушного зазора, обеспечивающий пропуск максимального расхода воздуха. Многими исследователями были приняты попытки описания характера движения воздушного потока в вентилируемом зазоре [5–18], но дальнейшее развитие этого направления требует более точного расчета и формулировки общей универсальной методики расчета гидравлических параметров воздушного потока в зазоре.

Целью данной работы является разработка методики гидравлического расчета параметров течения воздуха в вентилируемом воздушном зазоре. Данный расчет позволит определить рациональные размеры гидравлически оптимального воздушного зазора в навесных фасадах зданий и сооружений.

Рассматривается вертикальный воздушный зазор стандартной фасадной системы (рис. 1) [19–22], образованный двумя плоскостями $y = 0$, $y = L$, высотой L и шириной воздушного зазора h . Правая стенка $y = h$ охлаждена и поддерживается при температуре T_c , меньшей, чем температура T_h левой стенки $y = 0$. Давление на отметке $z = 0$ равно p_0 , давление на отметке $z = L$ равно p_1 , причем $p_0 > p_1$.

Свободная конвекция обусловлена наличием разности плотностей в поле массовых сил.

Решение задачи конвективного теплообмена сводится к совместному определению температурного и скоростного полей движущейся жидкости или газа в пограничном слое стенки [3]. Для этого составляется система дифференциальных уравнений, описывающих конвективный перенос, которая включает уравнение энергии, уравнение количества движения в приближении пограничного слоя, уравнение неразрывности потока.

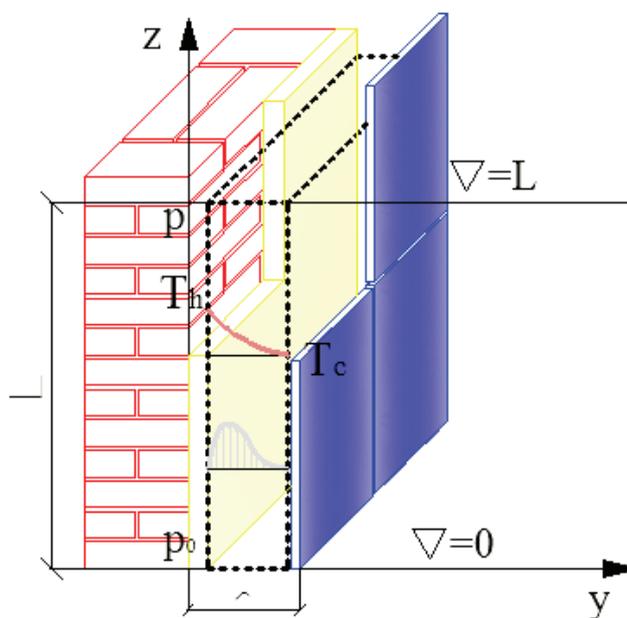


Рисунок 1. Схема фасадной системы с воздушным зазором

Уравнение количества движения в приближении пограничного слоя:

$$U_z \frac{\partial U_z}{\partial z} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 U_z}{\partial y^2} + g\theta \quad (1)$$

Уравнение энергии:

$$U_z \frac{\partial \theta}{\partial z} + U_y \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\nu}{\sigma} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \quad (2)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial U_z}{\partial z} + \frac{\partial U_y}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

где U_z, U_y – продольные и поперечные компоненты скорости;

$\theta := \frac{T - T_c}{T_h - T_c}$ – безразмерный температурный напор, $0 < \theta < 1$;

σ – число Прандтля;

z – вертикальная координата, отсчитываемая снизу вверх от входа в воздушный зазор;

y – горизонтальная координата, отсчитываемая от горячей стенки.

Заменим U_z, U_y на производные функции тока:

$$\psi(y, z): U_z = \frac{\partial \psi}{\partial y}; U_y = -\frac{\partial \psi}{\partial z},$$

где $\Psi(y, z)$ – функция тока плоского движения.

В производных функции тока условие неразрывности принимает вид:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = 0.$$

Уравнения движения и энергии производных функции тока:

$$\frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z \partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \nu \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^3} + g\theta; \quad (1')$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{\nu}{\sigma} \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \quad (2')$$

приводятся к переменным $\zeta, f(\zeta)$:

$$\begin{aligned} f'''' + 3ff'' - 2f'^2 + \theta &= 0; \\ \theta'' + 3\sigma \cdot f \cdot \theta' &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где f – функция тока пристеночного течения, связанная с размерной функцией тока Ψ тождеством

$$\psi := G \cdot f \left(\frac{y}{\delta(z)} \right);$$

δ – толщина слоя подъемной силы, $\delta := 4 \sqrt{\frac{4\nu^2 z}{g}}$;

$G(z) := \frac{g\delta^3}{\nu}$ – масштаб функции тока;

$f=f(\zeta)$ – безразмерная функция тока;

ζ – безразмерная координата, $\zeta = \frac{y}{\delta(z)}$, $\zeta \in (0, \infty)$, где z, y – продольная и поперечная координаты,

$\delta > z > 0, y > 0$.

Причем предельные условия ставятся в зависимости от обстановки на горячей плоскости $\zeta = 0$ [23]. Это может быть:

- 1) изотермическая стенка, $\theta(0) - 1 = 0$;
- 2) стенка, пропускающая постоянный тепловой поток, $\theta'(0) = -Nu_\delta = const$;
- 3) смешанные условия Робэна, случай граничных условий III рода, когда задается коэффициент теплоотдачи; предельные условия на функцию тока f и температурный перепад записываются в виде:

$$f(0) = f''(0) = f'(\infty) = \theta'(0) + \alpha\theta(0) + \gamma = \theta(\infty) = 0.$$

В данном случае используются результаты простейшей предельной задачи в условиях изотермической стенки $\theta(0) - 1 = 0$:

$$f(0) = f'(0) = f'(\infty) = \theta(0) - 1 = \theta(\infty) = 0.$$

Решения этой задачи известны. Для удобства вычислений используется метод расщепляющих разложений [23]. Тогда для профилей безразмерного напора температуры и безразмерной скорости получается:

$$\theta(\zeta) = \exp(-3a\zeta);$$

$$f'(\zeta) = \frac{\zeta \exp(-3a\zeta)}{3a}.$$

Здесь $a = \frac{1}{\sqrt[4]{27}}$ – параметр задачи. Для коэффициента теплообмена получается выражение:

$$Nu_\delta = -\theta'(0) = 3a = \sqrt[4]{3};$$

$$\alpha(z) = \frac{\lambda}{\delta(z)} Nu_\delta = \frac{\sqrt[4]{3g\lambda}}{\sqrt[4]{4v^2z}} = 0,9306\lambda\sqrt[4]{\frac{g}{v^2z}}.$$

Среднее по длине плоскости $\zeta = 0$ значение α :

$$\alpha_m = 1,2408\lambda\sqrt[4]{\frac{g}{v^2L}}.$$

Таким образом, скорость свободноконвективного течения повышается с увеличением теплового потока.

Для инженерных расчетов вентилируемых фасадных систем используются гидравлические переменные: расход, массовый расход, средняя скорость, массовая скорость, коэффициенты потерь и скорости. Основные положения гидравлического расчета обозначены в работе М.В. Петроченко [3].

Для оценки средней скорости свободноконвективного течения вычисляется техническая работа при баротропном движении воздуха с показателем политропы $n < k$. Прежде всего, считается, что СКТ – баротропное движение, т. е. существует биекция $p = p(\rho)$, причем эта зависимость аппроксимируется степенной функцией (политропой) [24], это допущение «исключает из системы уравнений дифференциальное уравнение энергии, заменяя его проинтегрированным соотношением, связывающим плотность и давление (политропным равенством)» [25]. При этом условие $n = k$ равносильно отсутствию внешнего теплообмена, а условие $n < k$ – подводу теплоты к воздушному потоку.

Далее из элементарных соображений получено выражение для средней скорости в СКТ [26]:

$$v = \varphi \frac{gL}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\frac{1}{n} - \frac{1}{k}}, \quad (5)$$

где φ – коэффициент скорости, который находится по формуле:

$$\varphi := \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta + \lambda \frac{L}{h}}}, \quad (6)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения; ζ – коэффициент местных потерь напора, учитывающий потери напора на вход в щелевой канал и внутри канала; T_0 – температура воздуха на входе в канал.

Формула (5) приводит к правдоподобным оценкам средней скорости течения в выходном сечении канала. Например, пусть $k = 1,4$; $0,05 < n < 1,4$; $T_0 = 300$ К; $0 < \varphi < 0,5$; $L = 100$ м (рис. 2).

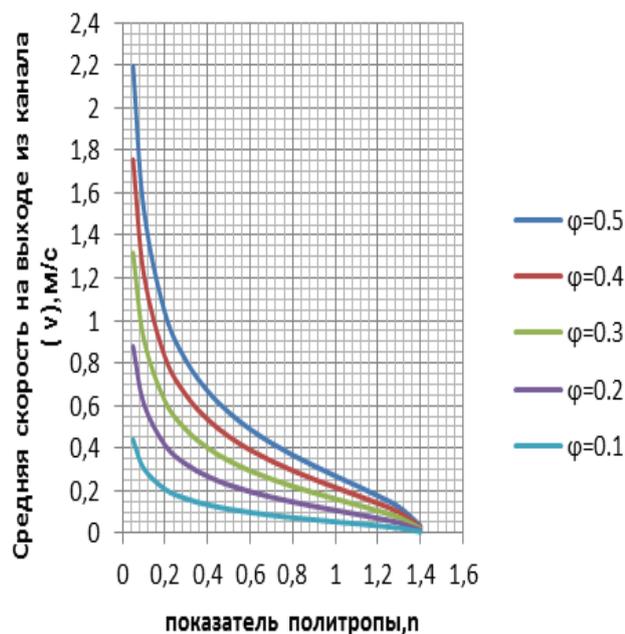


Рисунок 2. График зависимости средней скорости от показателя политропы

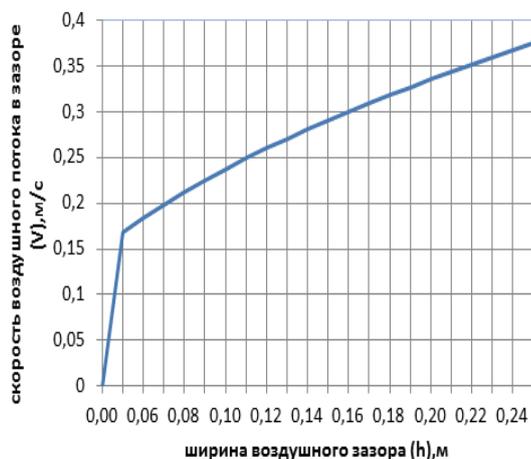


Рисунок 3. График зависимости средней скорости от ширины воздушного зазора в прямоугольном вертикальном канале

Из графика, приведенного на рисунке 3, следует, что темп увеличения средней скорости растет при увеличении ширины воздушного зазора (h), но, как видно, максимум скорости достигается при больших значениях h (порядка метра), что, конечно, конструктивно неприемлемо. В существующих конструкциях величина h составляет порядка 10–30 см. Важно, что при небольших ширинах канала средняя скорость прямо пропорциональна ширине канала.

Из графика, приведенного на рисунке 4, следует, что темп увеличения средней скорости растет до определенной ширины, после чего скорость становится постоянной, что очень важно для минимизации потерь по высоте.

Из графика, приведенного на рисунке 2, видно, что средняя скорость свободноконвективного течения возрастает с увеличением разности $(k-n)$. При малых значениях этой разности средняя скорость мало зависит от коэффициента скорости φ . Эта зависимость средней скорости течения от коэффициента скорости заметна при достаточно больших значениях средней скорости.

Для того чтобы построить продольный профиль канала для вертикального воздушного зазора, обеспечивающего постоянство средней скорости по высоте зазора, требуется доказать, что средняя скорость связана с шириной воздушного зазора.

Из формул (5) и (6) видно, что скорость воздушного потока имеет прямую зависимость

от ширины воздушного зазора $v \approx \sqrt{\frac{h}{\lambda \cdot L}}$.

Для обоснования данного утверждения принимаем высоту воздушного зазора 100 м.

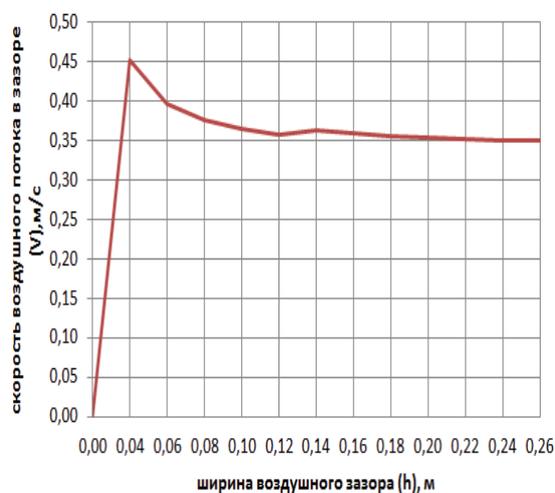


Рисунок 4. График зависимости средней скорости от ширины воздушного зазора в диффузорном вертикальном канале

Таким образом, можно сделать вывод, что при обычной прямоугольной конструкции навесного фасада скорость в зависимости от ширины воздушного зазора растет. В соответствии с этим можно сказать, что применение конструкции диффузорного навесного фасада более приемлемо, так как при определенной ширине скорость становится постоянной, за счет чего уменьшаются потери.

Анализ формулы (5) для средней скорости показывает, что средняя скорость монотонно возрастает при увеличении высоты воздушного зазора (L) (эффект «драфта», или тяги) и при уменьшении n . При уменьшении n возрастает интенсивность подвода теплоты к воздушному потоку. Тем самым устанавливается связь скорости течения и интенсивности передачи теплоты [3]. На входе в канал интенсивность передачи теплоты велика, n мало и градиент средней скорости максимален. При постоянной температуре стенки поток на входе в канал турбулизированный, «возмущения» возникают от условий входа. По высоте канала поток прогревается, вследствие чего плотность воздуха понижается, а средняя скорость растет. При прогреве потока $n \rightarrow k \rightarrow 0$ и вблизи выходного сечения канала градиент средней скорости уменьшается, приближаясь к минимальному значению. К выходу из канала возникает некая диффузорность за счет потерь напора на резкое расширение.

В работе вводится понятие о гидравлически оптимальном канале. Канал является гидравлически оптимальным, если при заданной длине L , коэффициенте φ , температуре T_0 он обеспечивает пропуск максимального массового расхода [27].

Переменное поле температур вызывает переменное поле плотности, и вследствие этого в поле земного тяготения происходит перемещение масс с разной плотностью (легкие слои поднимаются вверх, тяжелые опускаются вниз). По графику, изображенному на рисунке 5, можно сказать, что плотность воздуха падает с набором высоты. Поэтому целесообразно применение диффузорного канала.

Переменное поле температур вызывает переменное поле плотности, вследствие чего в поле земного тяготения происходит перемещение масс с разной плотностью (легкие слои поднимаются вверх, тяжелые опускаются вниз). По данному графику можно сказать, что плотность воздуха падает с набором высоты. Поэтому целесообразно применение диффузорного канала.

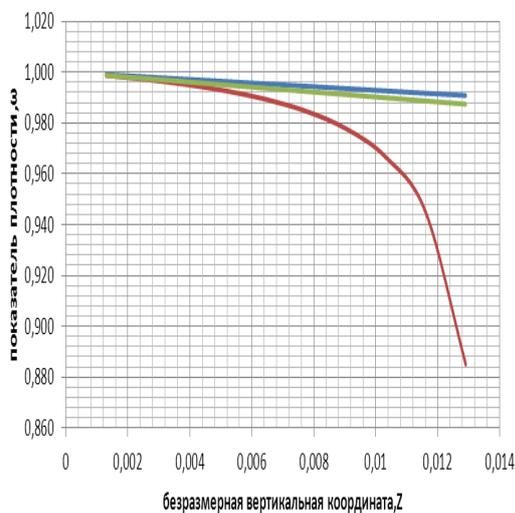


Рисунок 5. График зависимости плотности от безразмерной вертикальной координаты

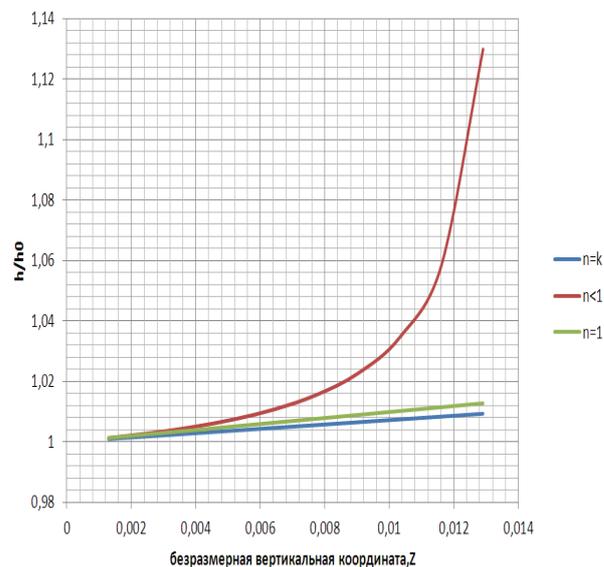


Рисунок 6. Профиль продольного сечения вертикального щелевого канала

Для обоснования применения диффузорного канала воспользуемся уравнением неразрывности $\rho Vh = \text{const}$.

При показателе политропы $n = k$ примем, что адиабатный газ неподвижен: $h = \text{const}$.

Газ нагревается, плотность снижается, скорость растет. Следовательно, для того чтобы скорость была постоянной $V = \text{const}$, требуется увеличение h . Это важно для минимизации потерь.

С точки зрения минимизации потерь (увеличения ϕ) необходимо проектировать вентилируемый навесной фасад НВФ с вентилируемым воздушным зазором, расширяющимся снизу вверх. Профиль продольного сечения воздушного зазора найден и изображен на рисунке 6.

Таким образом, гидравлический расчет вентилируемых каналов является неотъемлемой частью проектирования и расчета ограждающих строительных конструкций с вентилируемыми воздушными зазорами, а именно навесных вентилируемых фасадов.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Понятие гидравлически оптимального канала определяется значениями температуры и коэффициентами теплопередачи и трения (сопротивления) щели, иначе говоря, понятие оптимального воздушного зазора соответствует сезонным условиям эксплуатации НВФ.
2. Определено, что при стандартной прямоугольной конструкции НВФ скорость воздушного потока растет. Постоянство средней скорости в воздушном зазоре, обеспечивающее минимум потерь напора, реализуется при небольшом продольном уширении зазора, так называемом «диффузорном воздушном зазоре».

Литература

1. Лапин В.Г., Лапин С.В. Расчет конвективного движения воздуха в канале вентилируемого фасада при наличии горизонтальных щелей между плитками облицовки // Приволжский научный журнал. 2012. №2(22). С. 85–92.
2. Фасадные теплоизоляционные системы с воздушным зазором. Рекомендации по составу и содержанию документов и материалов, представляемых для технической оценки пригодности продукции. М.: Госстрой России, 2004.
3. Петроченко М.В. Основы гидравлического расчета свободноконвективных течений в ограждающих строительных конструкциях: дис. канд. техн. Санкт-Петербург, 2012. 122 с.
4. Петриченко М.Р., Петроченко М.В. Гидравлика свободноконвективных течений в ограждающих конструкциях с воздушным зазором // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8(26). С. 51–56.
5. Ayinde T.F., Said S.A.M., Habib M.A. Experimental investigation of turbulent natural convection flow in a channel // Heat and Mass Transfer. 2006. Vol. 42. Issue 3. Pp. 169–177.
6. Ayinde T.F., Said S.A.M., Habib M.A. Turbulent natural convection flow in a vertical channel with anti-symmetric heating // Heat and Mass Transfer. 2008. Vol. 44. Issue 10. Pp. 1207–1216.
7. Bodia J.R., Osterle J.F. The development of free convection between heated vertical plates // Journal Heat Transfer. 1962. Vol. 84. Issue 1. Pp. 40–43.
8. Elenbaas W. Heat dissipation of Parallel plates by free Convection // Physica. 1942. Vol. 9. Issue 1. Pp. 1–28.
9. Fedorov A.G., Viskanta R., Mohamad A.A. Turbulent heat and mass transfer in an asymmetrically heated, vertical parallel plate channel // International Journal of Heat and Fluid Flow. 1997. Vol. 18. Issue 3. Pp. 307–315.
10. Fedorov A.G., Viskanta R. Turbulent natural convection heat transfer in an asymmetrically heated, vertical parallel-plate channel // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1997. Vol. 40. Issue 16. Pp. 3849–3860.
11. Naylor D., Floryan J.M., Tarasuk J.D. A Numerical study of Developing Free convection Between Isothermal vertical plates // Journal of Heat Transfer. 1991. Vol. 113. Issue 3. Pp. 620–626.
12. Naylor D., Tarasuk J.D. Natural Convective Heat Transfer in a Divided vertical channel Part-I – Numerical Study // Journal of Heat Transfer. 1993. Vol. 115. Issue 2. Pp. 377–387.
13. Sparrow E.M., Azevedo L.F.A. Vertical channel natural convection spanning between fully-developed limit and the single-plate boundary-layer limit // International Journal Heat Mass Transfer. 1985. Vol. 28. Issue 10. Pp. 1847–1857.

14. Tanda G. Natural Convection Heat Transfer in vertical channels with and without transverse square ribs // International Journal of Heat Mass Transfer. 1997. Vol. 40. Issue 9. Pp. 2173–2185.
15. Miyamoto M. [et al]. Turbulent Free Convection Heat Transfer From Vertical Parallel Plates // Proceeding of the International Heat Transfer Conference. 1986. Vol. 4. Pp. 1593–1598.
16. Badr H.M. [et al]. Turbulent natural convection in vertical parallel-plate channels // International Journal Heat Mass Transfer. 2006. Vol. 43. Pp. 73–84.
17. Habib M.A. [et. al]. Velocity characteristics of turbulent natural convection in symmetrically and asymmetrically heated vertical channels // Experimental Thermal and Fluid Science. 2002. Vol. 26. Issue 1. Pp. 77–87.
18. Yilmaz T., Gilchrist A. Temperature and velocity field characteristics of turbulent natural convection in a vertical parallel-plate channel with asymmetric heating // Heat Mass Transfer. 2007. Vol. 43. Issue 7. Pp. 707–719.
19. Рекомендации по проектированию навесных фасадных систем с вентилируемым воздушным зазором для нового строительства и реконструкции зданий. М.: Москомархитектура, 2001.
20. СП 23-101-2000 «Проектирование тепловой защиты зданий». М.: Госстрой России, 2004.
21. СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий». М., 2004.
22. ТР по проектированию, монтажу и эксплуатации навесных фасадных систем ТР 161-05. М., 2005.
23. Петриченко М.Р. Расщепляющие разложения в предельных задачах для обыкновенных квазилинейных дифференциальных уравнений // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2012. №2(146). С. 143–150.
24. Страхович К.И. К вопросу об одноразмерном установившемся движении газа в трубах // Гидрогазодинамика, избранные труды. М.: Наука, 1980. С. 102–105.
25. Фабрикант Н.Я. Аэродинамика. М.: Наука, 1964. 275 с.
26. Петриченко М.Р., Петроченко М.В. Достаточные условия существования СКТ в вертикальном щелевом канале // НТВ СПбГПУ. 2012. №2–2(147). С. 276–282.
27. Петриченко М.Р., Петроченко М.В., Явтушенко Е.Б. Гидравлически оптимальная вентилируемая щель // Инженерно-строительный журнал. 2013. №2(37). С. 35–39.

*Евгения Борисовна Явтушенко, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(965)761-58-24; эл. почта: yavtushenko_89@mail.ru*

*Марина Вячеславовна Петроченко, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812)552-94-60; эл. почта: mpetroch@mail.ru*

© Явтушенко Е.Б., Петроченко М.В., 2013

doi: 10.5862/MCE.43.6

The diffuser design of ventilated facades

Y.B. Yavtushenko*Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia
+79657615824; e-mail: yavtushenko_89@mail.ru***M.V. Petrochenko***Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia
552-94-60; e-mail: mpetroch@mail.ru*

Key words

ventilated facades; free convective flow; air gap; cone profile in hinged facade; optimum width of the air gap; polytropic index; heat flux; energy efficiency; exterior building envelope

Abstract

The main problem in the design of front systems is an empirical choice of parameters and the air gap between the cladding panels, causing appear of unventilated layer. Inadequate ventilation leads to icing of substructure elements that go into the air ventilated gap, and the top layer in winter, reduction of heat-protective properties as a whole.

The aim of this work was to develop a methodology for calculating the parameters of the hydraulic flow of air in the ventilated gap, which allows determining the optimal rational dimensions of hydraulically mounted air gap in the facades of buildings and structures. As a result, it was found that, in terms of minimizing the loss there must be designed a ventilated curtain facade with ventilated air gap, expanding upwards.

References

1. Lapin V.G., Lapin S.V. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2012. No.2(22). Pp. 85–92. (rus)
2. *Fasadnyye teploizolyatsionnyye sistemy s vozdushnym zazorom. Rekomendatsii po sostavu i soderzhaniyu dokumentov i materialov, predstavlyayemykh dlya tekhnicheskoy otsenki prigodnosti produktsii* [Façade heat-insulating systems with air gap. Recommendations on the structure and contents of the documents and materials, submitted for technical evaluation of production suitability]. Moscow: Gosstroy Rossii, 2004. (rus)
3. Petrochenko M.V. *Osnovy gidravlicheskogo rascheta svobodnokonvektivnykh techeniy v ograzhdayushchikh stroitelnykh konstruktsiyakh* [Fundamentals of hydraulic calculation free convection flow in building structures]. PhD dissertation. Saint-Petersburg, 2012. 122 p. (rus)
4. Petrichenko M.R., Petrochenko M.V. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No.8(26). Pp. 51–56. (rus)
5. Ayinde T.F., Said S.A.M., Habib M.A. Experimental investigation of turbulent natural convection flow in a channel. *Heat and Mass Transfer*. 2006. Vol. 42. Issue 3. Pp. 169–177.
6. Ayinde T.F., Said S.A.M., Habib M.A. Turbulent natural convection flow in a vertical channel with anti-symmetric heating. *Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 44. Issue 10. Pp. 1207–1216.
7. Bodia J.R., Osterle J.F. The development of free convection between heated vertical plates. *Journal Heat Transfer*. 1962. Vol. 84. Issue 1. Pp. 40–44.
8. Elenbaas W. Heat dissipation of Parallel plates by free Convection. *Physica*. 1942. Vol. 9. Issue 1. Pp. 1–28.
9. Fedorov A.G., Viskanta R., Mohamad A. A. Turbulent heat and mass transfer in an asymmetrically heated, vertical parallel plate channel. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1997. Vol. 18. Issue 3. Pp. 307–315.
10. Fedorov A.G., Viskanta R. Turbulent natural convection heat transfer in an asymmetrically heated, vertical parallel-plate channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1997. Vol. 40. No. 16. Pp. 3849–3860.
11. Naylor D., Floryan J.M., Tarasuk J.D. A Numerical study of Developing Free convection Between Isothermal vertical plates. *Journal of Heat Transfer*. 1991. Vol. 113. Issue 3. Pp. 620–626.
12. Naylor D., Tarasuk J.D. Natural Convective Heat Transfer in a Divided vertical channel Part-I – Numerical Study. *Journal of Heat Transfer*. 1993. Vol. 115. Issue 2. Pp. 377–387.

13. Sparrow E.M., Azevedo L.F.A. Vertical channel natural convection spanning between fully-developed limit and the single-plate boundary-layer limit. *International Journal of Heat Mass Transfer*. 1985. Vol. 28. Issue 10. Pp. 1847–1857.
14. Tanda G. Natural Convection Heat Transfer in vertical channels with and without transverse square ribs. *International Journal of Heat Mass Transfer*. 1997. Vol. 40. Issue 9. Pp. 2173–2185.
15. Miyamoto M. [et al]. Turbulent Free Convection Heat Transfer From Vertical Parallel Plates. *Proceeding of the International Heat Transfer Conference*. 1986. Vol. 4. Pp. 1593–1598.
16. Badr H.M. [et al]. Turbulent natural convection in vertical parallel-plate channels. *Heat Mass Transfer*. 2006. Vol. 43. Pp. 73–84.
17. Habib M.A. [et al]. Velocity characteristics of turbulent natural convection in symmetrically and asymmetrically heated vertical channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2002. Vol. 26. Issue 1. Pp. 77–87.
18. Yilmaz T., Gilchrist A. Temperature and velocity field characteristics of turbulent natural convection in a vertical parallel-plate channel with asymmetric heating. *Heat Mass Transfer*. 2007. Vol. 43. Issue 7. Pp. 707–719.
19. *Rekomendatsii po proyektirovaniyu navesnykh fasadnykh sistem s ventiliruyemym vozdushnym zazorom dlya novogo stroitelstva i rekonstruktsii zdaniy* [Recommendations for designing hinged facade systems with ventilated air gap for new construction and renovation projects]. Moscow, Moskomarkhitektura, 2001. (rus)
20. *SP 23-101-2000. Proyektirovaniye teplovoy zashchity zdaniy* [Set of rules 23-101-2000. Design of thermal protection in buildings]. Moscow: Gosstroy Rossii, 2004. (rus)
21. *SNiP 23-02-2003. Teplovaya zashchita zdaniy* [Building code 23-02-2003. Thermal protection of buildings]. Moscow, 2004. (rus)
22. *TR po proyektirovaniyu, montazhu i ekspluatatsii navesnykh fasadnykh sistem TR 161-05* [Technical regulations for the design, installation and operation of hinged facade systems TR 161-05]. Moscow, 2005. (rus)
23. Petrichenko M.R. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2012. No.2(146). Pp. 143–150. (rus)
24. Strakhovich K.I. *Gidro-gazodinamika, izbrannyye trudy* [Hydro-gas dynamics: Selected works]. Moscow, Nauka, 1980. Pp. 102–105. (rus)
25. Fabrikant N.Ya. *Aerodinamika* [Aerodynamics]. Moscow: Nauka, 1964. 275 p. (rus)
26. Petrichenko M.R., Petrochenko M.V. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2012. No.2-2(147). Pp. 276–282. (rus)
27. Petrichenko M.R., Petrochenko M.V., Yavtushenko Ye.B. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No.2(37). Pp. 35–39. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 38–45