

Гидравлически оптимальная вентилируемая щель

*Д.т.н., профессор М.Р. Петриченко;
к.т.н., старший преподаватель М.В. Петроченко;
инженер Е.Б. Явтушенко*,*

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Ключевые слова: навесной вентилируемый фасад; конвекция; свободно-конвективное течение; вентилируемая щель; оптимальный размер щелевого канала

Вопрос повышения энергоэффективности зданий и снижения затрат на их эксплуатацию сегодня приобретает все большую актуальность. Особое внимание этой теме уделено в Федеральном законе №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Исследования, посвященные этой теме, показывают, что применение систем вентилируемых фасадов повышает энергоэффективность зданий в среднем на 30%. Такой фасад существенно повышает устойчивость любого строения к негативному воздействию окружающей среды, надолго продлевая срок его службы [1].

В настоящее время в современном строительстве повысился интерес к конструкциям навесных вентилируемых фасадов (НВФ), которые используются как декоративный элемент и как дополнительная тепловая и ветровая защита. Навесные фасадные системы с вентилируемым воздушным зазором являются частным случаем ограждающих конструкций с вентилируемыми воздушными прослойками, которые защищают утеплитель, примыкающий к стене здания, от воздействия окружающей среды. При этом наличие конвективных движений способствует выносу влаги в атмосферу и поддержанию утеплителя в состоянии с малой влажностью [2]. Система вентилируемого фасада состоит из несущего каркаса, утеплителя и облицовочных панелей. Такая конструкция лишена многих недостатков, характерных для фасадов, выполненных с использованием «мокрых» технологий, и широко применяется как при ремонте, так и при возведении новых зданий.

Течение воздуха в вертикальном вентилируемом канале – свободноконвективное. Свободная конвекция – один из наиболее экономичных и практичных методов удаления влаги из воздушного зазора. Если температура поверхности выше температуры окружающей среды, то поток воздуха, омывающий поверхность, нагревается и, становясь легче, начинает всплывать. В этом случае плотные соседние слои воздуха заменяют поднявшийся слой. Этот принцип замещения слоев используется при проектировании воздушных прослоек [3].

Такой принцип действия способствует постоянному поддержанию оптимального температурного режима и микроклимата внутри сооружения при самых различных погодных условиях, а также помогает использовать энергосберегающие ресурсы утеплителя стен с максимальной эффективностью [4].

Для прогнозирования влажностного режима таких конструкций необходимо иметь четкую картину течения воздуха в вентилируемом канале и учитывать гидравлические параметры свободноконвективного течения воздуха в зазоре [5]. Важнейшими характеристиками воздухообмена для расчета влагоудаления являются скорость и размер навесного фасада [6].

Большой вклад в изучение характеристик свободноконвективных течений внесли как российские, так и зарубежные исследователи. В работах [7–12] представлены результаты экспериментальных и численных исследований свободноконвективных течений воздуха в вертикальных каналах, образованных двумя параллельными стенками с симметричным и асимметричным нагревом.

Результаты исследований представляют большой интерес, но для их практического применения требуется сформулировать единый подход к определению оптимального расстояния от экрана до стены в вертикальных щелевых каналах.

Целью настоящей работы является оценка гидравлически оптимальной вентилируемой щели в навесных фасадах зданий и сооружений.

Рассмотрим вертикальную щель, образованную плоскостями $y=0, y=h$, высотой L , имеющими температуру T_c и T_h соответственно (рис. 1). Эта щель стилизует эйлеровскую клетку вентилируемого пространства навесного фасада – вертикальный щелевой канал. В этом пространстве за счет сил плавучести индуцируется вязкая термогравитационная конвекция воздуха, обеспечивающая создание теплоизолирующей воздушной завесы и подсушивание плоскостей $y=0, y=h$ [13-17].

Свободноконвективное течение воздуха создает восходящий воздушный поток, в котором роль «насоса» играет распределенный по высоте тепловой поток, передаваемый от плоскости $y=h$ воздуху. Интенсивность передачи теплоты описывается дифференциальным уравнением теплопередачи [18]:

$$\frac{dT}{dz} = S_h(T_h - T) + S_c(T_c - T), \quad (1)$$

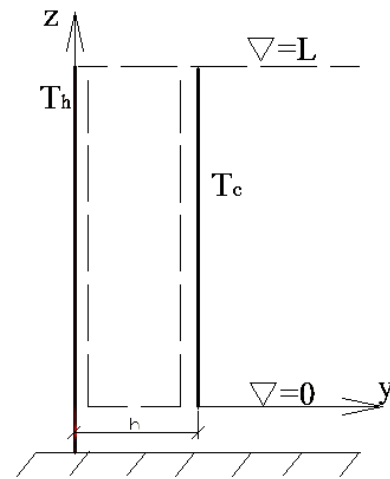


Рисунок 1. Схема вертикального канала

где S_h, S_c – безразмерные коэффициенты теплопередачи (числа подобия Стентона); $S = \frac{\alpha}{\rho C_p v}$;

v – средняя скорость воздушного потока. Средняя скорость воздушного потока вычисляется следующим образом:

$$v = \varphi \frac{gL}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\frac{1}{n} - \frac{1}{k}}, \quad (2)$$

где $\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda \frac{L}{h} + \sum_{(j)} \zeta_j}}$ – коэффициент скорости для канала [6]; T_0 – температура газа на

отметке $z = 0$. Далее считается: $T_0 = T_c$. В работе [6] подробно разбирается случай гидравлически гладкого канала без промежуточных местных потерь напора.

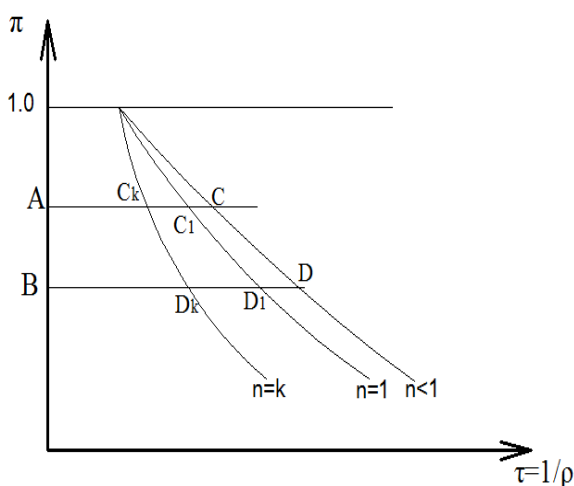


Рисунок 2. Политропное расширение воздуха в свободноконвективном течении

Показатель политропы n позволяет заменить непроинтегрированное (неголомное) условие теплопередачи (1) голомным условием баротропности $p = p(\rho)$ [19]. Получается, что при значении $n = k$ воздух находится в состоянии равновесия (рис. 2). При $n < k$ возникает некоторый профицит технической работы, превращаемый в кинетическую энергию потока, и в канале индуцируется свободная конвекция. Если $1 < n < k$, то расширение газа в канале сопровождается его охлаждением. При $n < 1$ подвод теплоты столь интенсивен, что расширение воздуха при всплытии не приводит к падению температуры потока по длине канала. Интенсивность теплообмена и показатель политропы n связаны тождеством [4]:

$$n = \frac{1}{1 + \frac{R}{gh} \frac{dT}{dz}}, \quad \bar{z} := \frac{z}{h} \in \left(0, \frac{L}{h}\right). \quad (3)$$

С учетом (1) равенство (3) можно записать таким образом:

$$n = \frac{1}{1 + \frac{R}{gh} (S_h (T_h - T) + S_c (T_c - T))} \quad (4)$$

В силу (2), (3), (4):

$$v = \varphi \frac{gL}{\sqrt{RT_c}} \sqrt{\frac{R}{gh} \frac{dT}{dz} + \frac{k-1}{k}}, \quad (5)$$

$$v = \varphi \frac{gL}{\sqrt{RT_c}} \sqrt{\frac{R}{gh} (S_h (T_h - T) + S_c (T_c - T)) + \frac{k-1}{k}}. \quad (6)$$

Из формул (5), (6) выясняется влияние термических факторов (интенсивности теплопередачи, температурных напоров) на среднюю скорость течения в вертикальном щелевом канале НВФ. Например, если $\frac{dT}{dz} \geq 0$, то всегда $n \leq 1$.

Далее, пусть $n=k$. Тогда $\frac{R}{gh} \frac{dT}{dz} + 1 = \frac{1}{k}$. Значит, в условиях адиабатного равновесия

средняя по сечению щели НВФ температура изменяется по высоте щели:

$$T = T_c - \frac{k-1}{k} \frac{gz}{R}. \quad (7)$$

Действительно, в условиях адиабатного равновесия столба воздуха выполняются уравнения Эйлера:

$$\frac{dp}{\rho} + g dz = 0,$$

причем $p(0)=p_c$. Тогда:

$$gz = RT_c \frac{k}{k-1} \left(1 - \left(\frac{p}{p_c} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) = RT_c \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{T}{T_c} \right).$$

Это выражение равносильно равенству (7).

Наконец, формула (4) определяет точную нижнюю грань вертикального градиента температуры, срывающую свободноконвективное течение в щели: $\frac{dT}{dz} \geq -\frac{g}{R} \frac{k-1}{k}$. Для воздуха ($k = 1,4$; $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 287 \text{ м}^2/(\text{с}^2 \cdot \text{К})$), $dT/dz \geq -0,01 \text{ К}/\text{м}$.

Вертикальный щелевой канал называется гидравлически оптимальным в том и только в том случае, если при заданных значениях L , S_h , S_c , T_c , T_h , T_0 он обеспечивает максимальный массовый расход воздуха в условиях свободноконвективного течения и баротропного течения воздуха.

Тогда, как доказано в работах [4, 20], показатель политропы n удовлетворяет тождеству:

$$\frac{1}{n_{op}} = \frac{1}{\Lambda} - \frac{k-1}{k}, \quad (8)$$

$$\frac{1}{n_{op}} - \frac{1}{k} = \frac{RT_c}{gL} - 1, \quad (9)$$

где $\Lambda := \frac{gL}{RT_c}$. В этом случае, в силу выражений (2) и (8), в вертикальном щелевом канале устанавливается средняя скорость течения:

$$v = \varphi \frac{gL}{\sqrt{RT_c}} \sqrt{\frac{RT_c}{gL} - 1} = \varphi \sqrt{gL - \frac{(gL)^2}{RT_c}}. \quad (10)$$

Очевидно, для реальных строительных конструкций $\Lambda \ll 1$. Значит, с погрешностью $O(\Lambda^2)$, $n_{op} = \Lambda$.

Понятие об оптимальном канале позволяет получить оценку для калибра гидравлически длинного щелевого канала, т. е. канала с $\lambda \frac{L}{h} \gg 1 + \sum_{(j)} \zeta_j$. Эта оценка выглядит так:

$$\frac{h}{L} = \sqrt[3]{\frac{\lambda}{gL} \left(\frac{T_h - T_c}{T_c} \frac{\alpha_h}{\rho C_p} \right)^2}. \quad (11)$$

В эту оценку входят коэффициенты теплопередачи α_h и гидравлического трения λ , которые, в свою очередь, зависят от параметров потока в НВФ. В первом приближении их можно задавать, а в последующих итерациях уточнять.

Очевидно, для размеров оптимальных щелей выполняется, в силу формулы (11), следующее условие:

$$\frac{h_1}{\sqrt[3]{L_1^2}} = \frac{h_2}{\sqrt[3]{L_2^2}},$$

позволяющее пересчитывать, например, размеры с модели на натуру.

Естественно, полученные оценки занижены, т.к. при расчете сопротивления вертикального щелевого канала НВФ не учитываются местные потери напора (на вход, на выход, потери на крепежных кронштейнах и пр.). Поэтому при расчете гидравлически короткого вертикального щелевого канала можно поступить и другим способом. Из (4) и (8) следует:

$$\frac{R}{gh} (S_h(T_h - T) + S_c(T_c - T)) = \frac{RT_c}{gL} - \frac{2k-1}{k}. \quad (12)$$

Пусть температура потока оценивается полусуммой предельных температур, $T = \frac{1}{2}(T_h + T_c)$. Тогда, в соответствии с (9):

$$\begin{aligned} T_c \frac{h}{L} - \frac{2k-1}{k} \frac{gh}{R} &= \frac{1}{2}(T_h - T_c)(S_h - S_c) \leq \frac{T_h S_h}{2}, \\ \frac{h}{L} &\leq \frac{T_h S_h}{2T_c} + \frac{2k-1}{k} \frac{gL}{RT_c}. \end{aligned}$$

В силу сказанного, можно рассматривать последнее неравенство как точное равенство.

Пусть $\alpha_h = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $T_c = 250 \text{ К}$, $T_h = 280 \text{ К}$, $R = 287 \text{ м}^2/(\text{с}^2 \cdot \text{К}) = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $L = 50 \text{ м}$, $C_p = 1000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $\rho = 1,19 \text{ кг}/\text{м}^3$. Учитываются только потери напора на расширение потока в выходном сечении канала, $\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \lambda \frac{L}{h}}}$, $\lambda = 0,04$.

Эта оценка, конечно, преувеличивает значения φ , v и оптимальной ширины h . Тогда, в первом приближении, $\frac{h}{L} = \frac{2k-1}{k} \frac{gL}{RT_c}$, что в условиях примера дает: $\frac{h}{L} = \frac{1,8}{1,4} \frac{10 \cdot 50}{287 \cdot 250} = 0,0089$, откуда $h = 45$ см. Если $\varphi = 0,4$, то, в соответствии с (10):

$$v = \varphi \sqrt{gL - \frac{(gL)^2}{RT_c}} = 0,4 \sqrt{500 - \frac{500^2}{287 \cdot 250}} = 8,91 \text{ м/с.}$$

Далее:

$$S_h = \frac{\alpha_h}{\rho C_p v} = \frac{10}{1,19 \cdot 1000 \cdot 8,94} = 0,00094,$$

и потому, во втором приближении, $\frac{h}{L} = 0,0089 + 0,00094 \frac{280}{2 \cdot 250} = 0,0094$, т.е. $h = 47$ см. Это позволяет несколько увеличить φ (на 0.03), что приведет к незначительному уменьшению S_h и к уменьшению h/L до 0,0093. Окончательно, $h = 46,5$ см. Итак, расчет оптимального размера щелевого канала сходится на третьей итерации.

Очевидно, что для короткого канала в условиях $\alpha_h = \text{idem}$, $T_{h,c} = \text{idem}$ и т.д. выполняется закон подобия $hL^{-2} = \text{idem}$, позволяющий пересчитывать размеры щелевого канала. Например, для пятиметрового канала $h = 0,47$ см, для стометрового канала $h = 1,5$ м и т.д.

Уточнение значений чисел Стэнтона и коэффициентов передачи теплоты производится с помощью эмпирических формул теории неизотермических течений и здесь не приводится, см. [18], [20, 21].

Таким образом получаем:

1. Для всякого НВФ существует оптимальное расстояние от экрана до стены, $h = h_{op}$, определяемое высотой щели, условиями передачи теплоты и сопротивлением свободноконвективному течению в вентилируемом пространстве. В первом приближении можно считать:

$$h_{op} = \frac{2k-1}{k} \frac{gL^2}{RT_c} + \frac{S_h T_h L}{2T_c},$$

т.е. оптимальный режим течения, обеспечивающий максимальный расход воздуха сквозь щель, реализуется только для множества значений T_c, T_h, S_h, φ . При любой вариации этого множества значений параметров канал перестает быть оптимальным.

2. Предыдущее условие можно ослабить. Поскольку в реальных конструкциях $\frac{gL}{RT_c} \gg \frac{S_h T_h}{T_c}$, то оптимальная ширина канала $h = h_{op}$ определяется только величиной минимальной температуры на входе в канал. Иначе говоря, если оптимальность канала достигается при $T_c = 250$ К, то при $T_c = 300$ К размер щели необходимо уменьшить в $300/250 = 1,2$ раза.

Литература

1. Вентилируемый фасад Одинцовского завода легких конструкций // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2011. №4(147). С. 24-25.
2. 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.
3. Петриченко М.Р., Петроченко М.В. Гидравлика свободноконвективных течений в ограждающих конструкциях с воздушным зазором // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8(26). С. 51-56.
4. Петриченко М.Р., Петроченко М.В. Достаточные условия существования СКТ в вертикальном щелевом канале // Научно-технические ведомости СПбГПУ. №2-2(147). С. 276-282.
5. Солощенко С.С. Влияние вентилируемого зазора на теплофизические характеристики систем наружного утепления фасадов зданий с применением тонкослойной штукатурки // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2(20). С. 39-41.
6. Петроченко М.В. Основы гидравлического расчета СКТ в ограждающих строительных конструкциях: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. СПб., 2012, 20 с.
7. Elenbaas W. Heat dissipation of Parallel plates by free Convection // Physica. 1942. Vol. 9. Pp. 1-28.
8. Naylor D., Tarasuk J.D. Natural Convective Heat Transfer in a Divided vertical channel Part-I // Journal of Heat Transfer. 1993. Vol. 115. Pp. 377-387.
9. 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. Pp. 620-626.
10. 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 and Mass Transfer. 1985. Vol. 28. No. 9. Pp. 1847-1857.
11. Tanda G. Natural Convection Heat Transfer in vertical channels with and without transverse square ribs // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1997. Vol. 40. No.9. Pp. 2173-2185.
12. Kettleborough C.F. Transient Laminar Free Convection Between Heated Vertical Plates Including Entrance Effects // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1972. Vol. 15. No.5. Pp. 883-896.
13. СП 23-101-2000. Проектирование тепловой защиты зданий. М.: Госстрой России, 2004.
14. ТР 161-05. Технические рекомендации по проектированию, монтажу и эксплуатации навесных фасадных систем М., 2005.
15. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. М., 2004.
16. Фасадные теплоизоляционные системы с воздушным зазором. Рекомендации по составу и содержанию документов и материалов, представляемых для технической оценки пригодности продукции. М.: Госстрой России, 2004.
17. Рекомендации по проектированию навесных фасадных систем с вентилируемым воздушным зазором для нового строительства и реконструкции зданий. М.: Москомархитектура, 2001.
18. Страхович К.И. Термогазодинамика и теория теплообмена: конспект лекций. Ч.3. Теплопередача. Л.: ЛПИ, 1966. 107 с.
19. Страхович К.И. К вопросу об одномерном установившемся движении газа в трубах // Гидро- и газодинамика. Избранные труды. М.: Наука, 1980. С. 102-105.
20. Соковишин Ю.А., Березовский А.А., Мартыненко О.Г. Теория струй вязкой жидкости. Минск: Наука и техника, 1984, 256 с.
21. Мартыненко О.Г., Соковишин Ю.А. Свободно-конвективный теплообмен: справочник. Минск: Наука и техника, 1982. 400 с.

**Евгения Борисовна Явтушенко, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812)552-94-60; эл. почта: yavtushenko_89@mail.ru*

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

doi: 10.5862/MCE.37.5

A hydraulically optimum ventilated gap

**M.R. Petrichenko;
M.V. Petrochenko;
Ye.B. Yavtushenko,**

*Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia
+7(812)552-94-60; yavtushenko_89@mail.ru*

Key words

ventilated facades; convection; free-convective flow; ventilated gap; optimal size slotted channel

Abstract

The issues of increasing the energy efficiency of buildings and reducing their operating costs are very important today. Researches on this subject show that application of ventilated facades improves energy efficiency of buildings an average by 30%.

Now we have a high demand for ventilated facades, which are used as a decorative element or as the additional heat and wind protection in construction technology.

Ventilated facades with ventilated air gap are special case of building construction. This construction consist of ventilated air layers which protect heat insulation from different environmental effects and availability of convection motions removes water from the atmosphere, which includes keeping heater in position with low humidity.

The aim of this work was to assess the hydraulically optimum ventilation holes in the hinged facades of the buildings and structures.

Thus, it was found that for any ventilated facade there is an optimum distance from the screen to the wall which is defined by the height of a crack, conditions of transfer of heat and resistance to the free-convective flow in the ventilated space.

References

1. *Magazine of Building Materials, equipment, technologies of XXI century*. 2011. No.4(147). Pp. 24–25. (rus)
2. Lapin V.G., Lapin S.V. *Volga Scientific Magazine*. 2012. No.2(22). Pp. 85–92. (rus)
3. Petrichenko M.R., Petrochenko M.V. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No.8(26). Pp. 51–56. (rus)
4. Petrichenko M.R., Petrochenko M.V. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti*. 2012. No.2–2(147). Pp. 276–282. (rus)
5. Soloshchenko S.S. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No.2(20). Pp. 39–41. (rus)
6. Petrochenko M.V. *Osnovy gidravlicheskogo rascheta SKT v ograzhdayushchikh stroityelnykh konstruktsiyakh* [Fundamentals of hydraulic calculation free convection flow in building structures] Abstract of PhD thesis. Saint-Petersburg, 2012. 20 p. (rus)
7. Elenbaas W. Heat dissipation of Parallel plates by free Convection. *Physica*. 1942. Vol. 9. Pp. 1–28.
8. Naylor D. Natural Convective Heat Transfer in a Divided vertical channel Part-I. *Journal of Heat Transfer*. 1993. Vol. 115. Pp. 377–387.
9. 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. Pp. 620–626.
10. 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. No.9. Pp. 1847–1857.
11. Tanda G. Natural Convection Heat Transfer in vertical channels with and without transverse square ribs. *International Journal of Heat Mass Transfer*. 1997. Vol. 40. No.9. Pp. 2173–2185.
12. Kettleborough C.F. Transient Laminar Free Convection Between Heated Vertical Plates Including Entrance Effects. *International Journal of Heat Mass Transfer*. 1972. Vol. 15. No.5. Pp. 883–896.
13. SP 23-101-2000 *Proyektirovaniye teplovoi zashchity zdaniy* [Design of thermal protection in buildings]. Moscow: Gosstroy Rossii, 2004. (rus)

14. TR 161-05. *Tekhnicheskiye rekomendatsii po proektirovaniyu, montazhu i ekspluatatsiyi navesnykh fasadnykh sistem* [Technical regulations for the design, installation and operation of hinged facade systems]. Moscow, 2005. (rus)
15. SNIP 23-02-2003 *Teplovaya zashchita zdaniy* [Thermal protection of buildings]. Moscow, 2004. (rus)
16. *Fasadnyye teploizolyatsionnyye sistemy s vozdushnym zazorom. Rekomendatsyi po sostavu i soderzhaniyu dokumentov i materialov, predstavlyayemykh dlya tekhnicheskoy otsenki prigodnosti produktsyi* [Facade insulation systems with air gap. Recommendations on the composition and content of the documents and materials submitted for the technical evaluation suitability of products]. Moscow: Gosstroy Rossii, 2004. (rus)
17. *Rekomendatsyi po proektirovaniyu navesnykh fasadnykh sistem s ventiliruemym vozdushnym zazorom dlya novogo stroitelstva i rekonstruktsiyi zdaniy* [Recommendations for designing hinged facade systems with ventilated air gap for new construction and renovation projects]. Moscow: Moscomarkhitektura, 2001. (rus)
18. Strakhovich K.I. *Termogazodinamika i teoriya teploobmena: konspekt lektsiy. Ch.3. Teploperedacha* [Thermogasdynamics and the Theory of Heat Transfer: lecture notes. Part 3. Heat transmission]. Leningrad: LPI, 1966. (rus)
19. Strakhovich K.I. *Gidro-gazodinamika: izbrannyye trudy* [Hydro-gas dynamics: Selected works]. Moscow: Nauka, 1980. Pp.102–105. (rus)
20. Sokovishin Yu.A., Berezovskiy A.A., Martynenko O.G. *Teoriya struy vyazkoy zhydkosti* [The theory of viscous liquid jets]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1984. 256 p. (rus)
21. Martynenko O.G., Sokovishin Yu.A. *Svobodno-konvektivnyy teploobmen: spravochnik* [Natural convection heat exchange: Manual]. Moscow: Nauka i tekhnika, 1982. 400 p. (rus)

Full text of this article in English: pp. 35–40