

Гидравлика свободноконвективных течений в ограждающих конструкциях с воздушным зазором

*Д.т.н., профессор М. Р. Петриченко;
старший преподаватель М. В. Петроченко*,
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

Ключевые слова: свободноконвективное течение; течения в плоских каналах; естественная тяга; вентилируемый воздушный зазор

Свободноконвективное течение воздуха в плоских вертикальных щелевых каналах встречается во многих строительных конструкциях и инженерном оборудовании: вентиляционных каналах зданий и сооружений, в оконных конструкциях с двойным остеклением, в системах пассивного солнечного отопления, в конвекторах и батареях систем отопления. Понимание физических процессов, сопровождающих течение воздуха в вертикальных плоских щелевых каналах, может существенным образом улучшить процесс моделирования конструкций и, как следствие, улучшить их эксплуатационные характеристики. Также необходимо отметить, что при проектировании строительных конструкций и инженерного оборудования зданий учет свойств и характеристик свободноконвективного течения позволяет применить наиболее рациональные инженерные решения.

Например, при эксплуатации систем навесных вентилируемых фасадов с воздушным зазором, широко используемых на сегодняшний день в строительстве, возникает ряд проблем, связанных с конденсацией влаги в конструкции. В зимний период циклическое замораживание-оттаивание влаги оказывает негативное воздействие на конструкцию, приводя к растрескиванию штукатурного слоя и образованию микротрещин [1]. Выведение из конструкции влаги осуществляется благодаря наличию вентилируемого зазора и движущегося в нем воздуха. Воздух, поступая в вентилируемый зазор, движется за счет естественной тяги, возникающей вследствие перепада давления и градиента температур на стенках вентилируемого канала. Для прогнозирования влажностного режима конструкции фасада необходимо иметь четкое представление картины течения воздуха в вентилируемом канале и учитывать тепло-гидравлические параметры свободноконвективного течения воздуха в зазоре. Одной из важнейших характеристик воздухообмена для расчета влагоудаления является скорость воздуха в воздушной прослойке. [2]

Свободноконвективные течения возникают в результате действия объемной силы, зависящей от разности плотностей, обусловленной переносом тепловой энергии вследствие неоднородности температуры. Конвективные токи, вызывающие теплообмен между поверхностями и воздухом, возникают около нагретых и охлажденных поверхностей [3]. Плотность как жидкости, так и газа зависит от температуры, поэтому при наличии в жидкости или газе градиента температуры массовые силы в различных точках различны. Это вызывает движение газа или жидкости, определяемое направлением поля массовых сил, распределением температур в жидкости и геометрической формой объема [4]. Свободноконвективное течение в виде восходящего потока воздуха может быть ламинарным или турбулентным. При этом числа Релея, определяющие переход от ламинарного к турбулентному режиму свободноконвективного течения различны для вертикальной пластины и призматического (плоского) канала, образованного двумя параллельными поверхностями.

Большой вклад в изучение характеристик свободноконвективных течений внесли российские и зарубежные исследователи. В работах [5-14] 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 практического применения полученных результатов требуется сформулировать общий подход для определения средней скорости свободноконвективного течения воздуха в вертикальных щелевых каналах.

Целью настоящей работы является оценка средней скорости свободноконвективного течения воздуха в вертикальном щелевом канале с различной температурой стенок.

Пусть свободноконвективное течение осуществляется в вертикальной щели, прямоугольнике $\Pi = (y, z : 0 < y < h; 0 < z < L)$, $h \ll L$, где h – ширина канала; L – высота канала (см. рис. 1).

Правая грань с координатой $y = h$ охлаждена и поддерживается при температуре T_c , меньшей, чем температура T_h левой грани с координатой $y = 0$. Коэффициенты потерь на вход, по длине и на выход известны (или допускают правдоподобную оценку); известна также интегральная интенсивность теплообмена (число Стентона St) между свободноконвективным потоком и стенками щели. Давление на отметке $z = 0$ равно p_0 , давление на отметке $z = L$ равно p_1 , причем $p_0 > p_1$.

Решение основано на следующих предположках.

1. В адиабатной щели свободноконвективное течение отсутствует. Значит, если считать движение баротропным и заменить условие теплообмена (дифференциальное уравнение энергии) голономным условием баротропности, то средняя скорость свободноконвективного течения (v), равна нулю, показатель политропы (n) равен показателю адиабаты (k).
2. Расширение газа в свободноконвективном течении происходит при $n < k$. В случае, если $1 < n < k$, то расширение газа с подводом теплоты сопровождается его охлаждением и свободноконвективное течение неустойчиво. Если же $0 < n < 1$, подвод теплоты столь интенсивен, что температура газа по длине щели растет и свободноконвективное течение устойчиво по всей длине (высоте) щели. Если равновесному состоянию газа в вертикальном канале отвечает показатель политропы $n = n_1 > 0$, то при всяком значении $0 < n < n_1$ существует свободноконвективное течение.

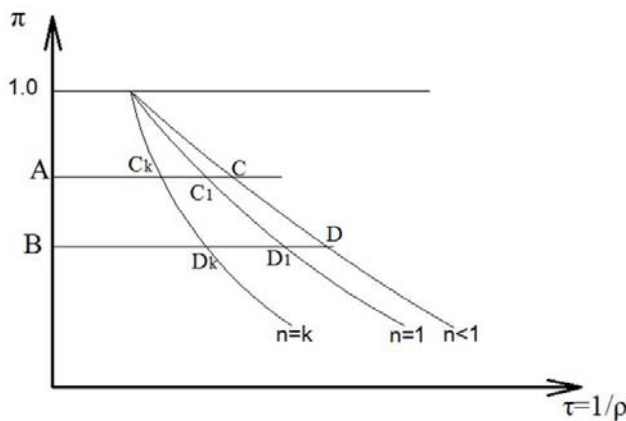


Рисунок 2. Политропное расширение газа в свободноконвективном течении

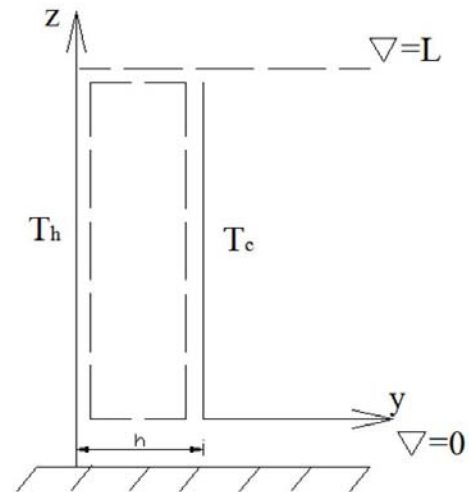


Рисунок 1. Схема вертикального щелевого канала

Действительно, расширение газа в свободноконвективном течении изображается траекторией (политропой) на плоскости переменных $\pi = \frac{p}{p_0}$ и $\tau = 1/\rho$, где τ – удельный объем (см. рис. 2).

Площадь между осью $\tau = 0$ и траекторией изображает «техническую работу» расширения. Если $n = k$, то работа недостаточна для перемещения (подъема) газа в вертикальной щели и превращается в потенциальную энергию покоящегося столба газа. Если $n < k$, возникает профицит работы, реализуемый в кинетическую энергию столба газа. Чем больше разность $k - n$, тем больше профицит и выше скорость свободноконвективного течения.

В условиях свободноконвективного течения возможны оба неравенства. Если $1 < n < k$, то расширение газа при свободноконвективном течении сопровождается его охлаждением. В качестве примера можно привести движение воздуха в печной трубе (подвод теплоты от топочного пространства недостаточен для расширения с увеличением температуры по длине дымохода). Если $0 < n < 1$, подвод теплоты обеспечивает монотонный рост температуры газа по длине канала. Такая ситуация характерна для обогреваемых каналов, например, для вентилируемого канала фасада.

Итак, утверждается, что:

$$\forall \pi := \frac{p_1}{p_0} = \in (0, 1), \forall n < k, \frac{k}{k-1} \left(1 - \pi^{\frac{k-1}{k}} \right) < \frac{n}{n-1} \left(1 - \pi^{\frac{n-1}{n}} \right),$$

причем $n \rightarrow 1, \frac{n}{n-1} \left(1 - \pi^{\frac{n-1}{n}} \right) \rightarrow \ln \frac{1}{\pi}$ и,

если $n < 1$, то $\frac{n}{n-1} \left(1 - \pi^{\frac{n-1}{n}} \right) = \frac{n}{1-n} \left(\left(\frac{1}{\pi} \right)^{\frac{1-n}{n}} - 1 \right)$.

Действительно, если $a > b \geq 0$, где $a = \frac{k-1}{k}, b = \left| \frac{n-1}{n} \right|$, то выполняется неравенство $\frac{1 - \pi^a}{a} < \frac{1 - \pi^b}{b}$.

Неопределенный показатель политропы n связан с интенсивностью теплопередачи в свободноконвективном течении тождеством: $\frac{n-k}{k(n-1)} \frac{d\Gamma}{d\zeta} = St(T_h - T), \zeta := \frac{z}{h}$, причем T – температура потока в щели. Значит $n = \frac{k(S-1)}{S k - 1}, S := St \frac{d\zeta}{d \ln \frac{1}{1-g}}, g := \frac{T}{T_h} \leq 1$, где S – приведенное число Стентона.

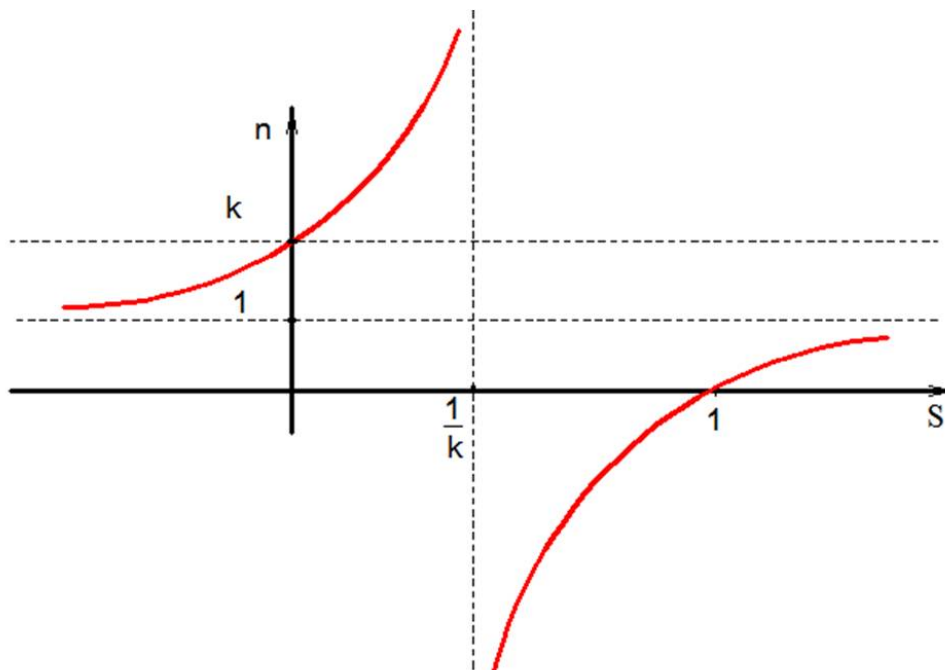


Рисунок 3. График зависимости $n = n(S)$

Очевидно, что $1 < n < k$, если $S < 0$, т.е. в случае убывания температуры по длине щели. Если же $0 < n < 1$, то $S > 1$, т.е. в случае увеличения температуры по длине щели. График зависимости $n = n(S)$ приводится на рис. 3.

3. В условиях адиабатного равновесия столба газа в щели уравнение равновесия (Эйлера) имеет вид:

$$\left(\frac{dp}{\rho}\right)_s + g dz = 0, \quad (1)$$

индекс s подчеркивает адиабатность статического состояния газа. При наличии подвода теплоты уравнение равномерного движения имеет вид:

$$\left(\frac{dp}{\rho}\right)_n + g dz + g dh_f = 0, \quad (2)$$

индекс n отмечает баротропность подвода теплоты при свободноконвективном течении. Можно представить, что подвод теплоты, создающий мощность подъемной (архимедовой) силы, заменяется «распределенным по высоте щели насосом» (источником механической мощности), перемещающим воздух в щели адиабатно. Тогда:

$$\left(\frac{dp}{\rho}\right)_s + g dz + g dh_f = dh_p, \quad (3)$$

где h_p – напор насоса, создающего адиабатный поток, эквивалентный по средней скорости свободноконвективного течения в обогреваемом канале.

Из (1) и (3) получается: $dh_p = dh_f$. Иначе, напор насоса затрачивается на (адиабатное) перемещение столба воздуха в щели. При этом $gh_f = \left(1 + \zeta_j + \lambda \frac{L}{h}\right) \frac{v^2}{2} := \frac{v^2}{2\varphi^2}$, φ – коэффициент скорости.

$$\text{В силу (1) и (2): } \left(\frac{dp}{\rho}\right)_n - \left(\frac{dp}{\rho}\right)_s + g dh_f = 0.$$

$$\text{Тогда } \frac{n}{n-1} \left(1 - \pi^{\frac{n-1}{n}}\right) - \frac{k}{k-1} \left(1 - \pi^{\frac{k-1}{k}}\right) = \frac{v^2}{2\varphi^2 RT_0} \text{ или, что то же:}$$

$$\frac{n}{n-1} \left(1 - \pi^{\frac{n-1}{n}}\right) - \frac{gL}{RT_0} = \frac{v^2}{2\varphi^2 RT_0}, \quad \frac{n}{n-1} \left(1 - \left(1 - \frac{k-1}{k} \Lambda\right)^{\frac{k}{n} \frac{n-1}{k-1}}\right) - \Lambda = \frac{\beta^2}{2\varphi^2},$$

где β – безразмерная скорость (число Барстоу);

Λ – приведенная длина;

$$\beta := \frac{v}{\sqrt{RT_0}};$$

$$\Lambda := \frac{gL}{RT_0}, \text{ причем в реальных технических устройствах } \Lambda \ll 1.$$

4. Поэтому, с погрешностью до членов $O(\Lambda^3)$, скорость на выходе из канала пропорциональна первой степени длины (высоты) канала (щели):

$$\beta = \varphi \Lambda \sqrt{\frac{1}{n} - \frac{1}{k}}, 0 < n \leq k, \quad (4)$$

или:

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

Очевидно, $\beta \xrightarrow{n \rightarrow 1} \varphi \Lambda \sqrt{\frac{k-1}{k}}, \beta \xrightarrow{n \rightarrow 0} \infty$.

Действительно, пусть: $x := \frac{n-1}{n}, b := \frac{k-1}{k} \Lambda > 0, a = \frac{k}{k-1} > 0$.

Тогда $\frac{1-(1-b)^{ax}}{x} - ab = \frac{b^2}{2} a(1-ax) + O(b^3) = \frac{\Lambda^2}{2k} \frac{k-n}{n}$, что и доказывает (4).

Формула (5) решает поставленную задачу и приводит к правдоподобным оценкам средней скорости течения в выходном сечении щели. Например, пусть $k = 1,4; n = 1,3; T_0 = 300\text{K}; \varphi = 0,6; L = 100\text{м}$. Тогда, в силу (5) средняя скорость v равна $0,48$ м/с. Уменьшение показателя политропы n до значения $0,9$ (увеличение интенсивности теплообмена на горячей грани) при прочих неизменных данных увеличивает скорость до $1,29$ м/с.

Массовая скорость свободноконвективного течения w постоянна по высоте щели и равна $w := \rho v$. Значит, в силу (4):

$$\beta_0 = \pi^n \beta = \varphi \Lambda \sqrt{\frac{1}{n} - \frac{1}{k}} \left(1 - \frac{k-1}{k} \Lambda\right)^{\frac{k}{n(k-1)}}, \quad (6)$$

и, как видно, скорость по высоте щели увеличивается незначительно, примерно в $1 + \frac{\Lambda}{n}$ раз.

Во столько же раз уменьшается плотность по высоте щели. Для стометровой щели в условиях примера, $\Lambda = 0,012$ и, соответственно, изменение скорости по высоте щели меньше 1%. На самом деле, вертикальный градиент скорости мал (0,01% на метр высоты щели) и допущение о плавном изменении течения по средней скорости вполне оправдано. Из формулы (5) легко получить, что максимальное значение массовой скорости достигается, если $\Lambda \left(\frac{k-1}{k} + \frac{1}{n}\right) = 1$, т.е.

$\frac{1}{n} = \frac{1}{\Lambda} - \frac{k-1}{k}, n = \frac{\Lambda}{1 - \frac{k-1}{k} \Lambda} = \Lambda + O(\Lambda^2)$. В реальных технических устройствах $\Lambda \ll 1$, поэтому

приводимые оценки допустимы. Получается, что, чем меньше высота канала, тем более интенсивная передача теплоты необходима для достижения наибольшей массовой скорости. При этом, как правило, $0 < n < 1$.

Следовательно, достаточное условие существования свободноконвективного течения в вертикальной щели имеет вид: $n < n_e$, где n_e – значение показателя политропы, отвечающее состоянию равновесия вертикального столба газа. Значение показателя политропы n в равномерном и баротропном свободноконвективном течении практически пропорционально длине канала. Иначе, чем короче канал, тем больше должна быть величина теплового потока, создающего вертикальную тягу, и наоборот.

Усиление достаточного (слабого) условия существования свободноконвективного течения до необходимого и достаточного связано с изучением структуры потока. В частности, развитие пограничных слоев (сдвига, подъемной силы), распределение скорости и температурного напора по сечению и по длине канала зависит от условий подвода теплоты к горячей грани [15]. В этом случае вместо грубого голономного условия баротропности необходимо решать (дифференциальное) уравнение теплопередачи.

При проектировании систем навесных вентилируемых фасадов и расчете влагоудаления из конструкции необходимо учитывать, что максимальная скорость течения воздуха будет в период максимального перепада температур на стенках вентилируемого канала, т.е. в зимнее время. В летний период, когда градиент температур будет весьма низким, скорость свободноконвективного течения воздуха в вентилируемом канале будет минимальна.

Литература

1. Солощенко С. С. Влияние вентилируемого зазора на теплотехнические характеристики систем наружного утепления фасадов зданий с применением тонкослойной штукатурки // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2. С. 39-41.
2. Солощенко С. С. Влажностный режим конструкции вентилируемого штукатурного фасада // Инженерно-строительный журнал. 2010. №8. С. 10-15.
3. Богословский В. Н. Строительная теплофизика. Учебник для вузов. 3-е изд. СПб. : АВОК Северо-Запад, 2006. 399 с.
4. Гебхарт Б., Джалурия И., Махаджан Р., Саммакия Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. В 2-х книгах. кн.1 Пер. с англ. М. : Мир, 1991. 678 с.
5. Чумаков Ю. С. Экспериментальное исследование свободноконвективного течения около вертикальной поверхности // Научно-технические ведомости. Проблемы турбулентности и вычислительная гидродинамика (к 70-летию кафедры «Гидроаэродинамика»). 2004. №2. С. 1-27.
6. Соковишин Ю. А., Мартыненко О. Г. Свободноконвективный теплообмен: Справочник. М. : Наука и техника, 1982. 400 с.
7. Elenbaas W. Heat dissipation of Parallel plates by free Convection // Physica. 1942. №9. Pp. 1-28.
8. Sparrow E. M., Azevedo L. F. Vertical channel natural convection spanning between the fully developed limit and the single plate boundary layer limit // International Journal of Heat Mass transfer. 1985. Vol. 28, No. 10. Pp. 1847-1857.
9. Said S. A. M., Krane R. J. An analytical and experimental investigation of Natural Convection Heat Transfer in vertical channels with single obstruction // International Journal of Heat Mass Transfer. 1990. Vol. 33, No. 6. Pp. 1121-1134.
10. Kihm K. D., Kim J. H., Fletcher L. S. Investigation of Natural Convection Heat Transfer in Converging Channel Flows Using a Specklegram Technique // Journal of Heat Transfer. 1993. Vol. 115. Pp. 140-148.
11. Kihm K. D., Kim J. H., Fletcher L. S. Onset of Flow Reversal and Penetration Length of natural Convective Flow Between Isothermal Vertical Walls // Journal of Heat Transfer. 1995. Vol. 117. Pp. 776-779.
12. Naylor D., Floryan J. M., Tarasuk J. D. A Numerical study of Developing Free convection Between Isothermal vertical plates // Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer. 1991. Vol. 113. Pp. 620-626.
13. 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. Pp. 377-387.
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, No. 9. Pp. 2173-2185.
15. Чумаков Ю. С. Экспериментальное исследование переходного и развитого турбулентного режимов течения в свободноконвективном пограничном слое, развивающемся около вертикальной нагретой поверхности // сб. докл. 4-го Минского международного форума по тепло- и массообмену. Минск, 22-26 мая, 2000. Т.1. С. 325-328.

**Марина Вячеславовна Петроченко, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)552-94-60; эл. почта: mpetrochenko@mail.ru

doi: 10.5862/MCE.26.8

Hydraulics of natural convection flows in building walling with air gap

**M.R. Petrichenko;
M.V. Petrochenko,**

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

Key words

natural convection flow; flat ducts; natural draft; ventilated air gap

Abstract

Natural convection flow in vertical flat ducts with heated face is used to intensify the transfer in technical systems, such as ventilated gaps of facade designs. Understanding of physical processes that accompany the air flow in vertical flat parallel-plate ducts gives ameliorating the structures designing process and increasing its operating characteristics.

The aim of this work is evaluation the average speed of natural convection air flow in vertical parallel-plate duct with different temperature of walls.

If the polytropic index in the barotropic state do not exceed the polytropic index in the equilibrium state, it is enough for barotropic natural convection flow in the vertical parallel-plate ducts. Polytropic index in the uniform and barotropic natural convection flow is almost proportional to the length of the channel. It is established that the shorter the channel, the greater must be the heat flux that creates vertical traction, and vice versa.

References

1. Soloshchenko S. S. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 2. Pp. 39-41. (rus)
2. Soloshchenko S. S. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 8. Pp. 10-15. (rus)
3. Bogoslovskiy V. N. *Stroitel'naya teplofizika. Uchebnik dlya vuzov*. [Building thermophysics: textbook for students]. Saint-Petersburg : AVOK Severo-Zapad, 2006. 399 p. (rus)
4. Gebkhart B., Dzhauriya I., Makhadzhan R., Sammakiya B. *Svobodnokonvektivnyye techeniya, teplo- i massoobmen* [Natural convection flows, heat and mass transfer]. Moscow : Mir, 1991. 678 p. (rus)
5. Chumakov Yu. S. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti*. 2004. No. 2. Pp. 1-27. (rus)
6. Sokovishin Yu. A., Martynenko O. G. *Svobodnokonvektivnyy teploobmen: Spravochnik* [Natural convection heat exchange: Manual]. Moscow : Nauka i tekhnika, 1982. 400 p. (rus)
7. Elenbaas W. Heat dissipation of Parallel plates by free Convection. *Physica*. 1942. No. 9. Pp. 1-28.
8. Sparrow E. M., Azevedo L. F. Vertical channel natural convection spanning between the fully developed limit and the single plate boundary layer limit. *International Journal of Heat Mass transfer*. 1985. Vol. 28, No. 10. Pp. 1847-1857.
9. Said S. A. M., Krane R. J. An analytical and experimental investigation of Natural Convection Heat Transfer in vertical channels with single obstruction. *International Journal of Heat Mass Transfer*. 1990. Vol. 33, No. 6. Pp. 1121-1134.
10. Kihm K. D., Kim J. H., Fletcher L. S. Investigation of Natural Convection Heat Transfer in Converging Channel Flows Using a Specklegram Technique. *Journal of Heat Transfer*. 1993. Vol. 115. Pp. 140-148.
11. Kihm K. D., Kim J. H., Fletcher L. S. Onset of Flow Reversal and Penetration Length of natural Convective Flow Between Isothermal Vertical Walls. *Journal of Heat Transfer*. 1995. Vol. 117. Pp. 776-779.
12. Naylor D., Floryan J. M., Tarasuk J. D. A Numerical study of Developing Free convection Between Isothermal vertical plates. *Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer*. 1991. Vol. 113. Pp. 620-626.
13. 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. Pp. 377-387.
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, No. 9. Pp. 2173-2185.
15. Chumakov Yu. S. *Sb. dokl. 4-go Minskogo mezhdunarodnogo foruma po teplo- i massoobmenu* [Proceedings of 4 Minsk international forum on heat and mass transfer]. Minsk, 22-26 maya, 2000. Vol. 1. Pp. 325-328.

Full text of this article in Russian: pp. 51-56