

5. C. Shu, Differential quadrature and its application in engineering, Springer-Verlag 2000.

6. R.E. Belman, B.G. Kashef, J. Casti, Differential quadrature: a technique for the rapid solution of nonlinear partial differential equations, Journal of Computational Physics, 1972, 10, 40–52.

7. R.E. Bellman, Methods of non-linear analysis, Newyork Academic Press, 1973, chap. 26.

8. de Vahl Davis, G., Natural convection in a square cavity. International Journal of Numerical Methods Fluids, 1983, 3, 249–264.

9. R. Anderson and A. Bejan, Heat transfer through single and double vertical walls in natural convection: theory and experiment, International Journal of Heat and Mass Transfer, 1981, 24, 1611–1620.

Получено 03.10.2005 г.

УДК 536.24

ПОШКАС П., ЗУЮС Р., ЯНКАУСКАС Ю.

Литовский энергетический институт

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЛАМИНАРНАЯ СМЕШАННАЯ КОНВЕКЦИЯ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ПЛОСКОМ КАНАЛЕ ПРИ ПОПУТНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ ПОТОКОВ

Подано результати числового дослідження нестационарної ламінарної змішаної конвекції у плоскому вертикальному каналі для супутних напрямів потоків. Результати числового моделювання тепловіддачі порівняно з даними, отриманими у Литовському енергетичному інституті, і дають задовільну збіжність на початку каналу, тобто у зоні стійкої ламінарної течії.

Представлены результаты численного исследования нестационарной ламинарной смешанной конвекции в плоском вертикальном канале для попутных направлений потоков. Результаты численного моделирования теплоотдачи сравнены с экспериментальными данными, полученными в Литовском энергетическом институте, и показывают хорошее совпадение в начале канала, т.е. в зоне устойчивого ламинарного течения.

The results on the numerical modeling of the unsteady laminar mixed convection in the vertical flat channel for aiding flows are presented in this paper. The results of heat transfer modeling are compared to the experimental data obtained at the Lithuanian energy institute and show good agreement in the region of the stable laminar flow.

b – ширина канала;

Bo – параметр термогравитации, $Bo = Gr_q/Re$;

d_e – гидравлический диаметр, $d_e = h_b/(h + b)$;

Gr_q – число Грасгофа по тепловому потоку;

$Gr_q = g \cdot \beta \cdot d_e^4 \cdot q_w/v^2 \cdot \lambda$;

g – ускорение свободного падения;

h – высота плоского канала;

Nu – число Нуссельта, $Nu = \alpha d_e/\lambda$;

p – давление;

q – плотность теплового потока;

Re – число Рейнольдса, $Re = u_b d_e/\nu$;

t – время;

T_b – среднemasсовая температура;

u – среднemasсовая скорость;

x – расстояние от начала обогрева;

x, y – декартовы координаты;

α – коэффициент теплоотдачи, $\alpha = q_w/(T_w - T_b)$;

β – коэффициент объемного расширения;

λ – коэффициент теплопроводности;

ν – кинематический коэффициент вязкости;

μ – динамический коэффициент вязкости.

Индексы

b – среднemasсовые;

cr – критический;

in – на входе;

w – на стенке;

x, y – по координатам.

Исследований теплоотдачи при смешанной конвекции в области ламинарно-переходного течения очень мало [1–3]. В [1] с целью визуализации потока в попутных потоках в центральную часть трубы впрыскивалась краска. Установлено, что при потере устойчивости потока нитка краски приобретает форму синусоиды, и появляются пульсации температуры стенки. В [2, 3] указывается, что наличие в профилях скорости точек перегиба и особенно возможность возникновения возвратного течения стимулируют нарушение устойчивости ламинарного течения и переход к турбулентному течению при значении $Re = Re_{cr} < 2300$.

В настоящей работе приведены результаты исследования нестационарной ламинарной смешанной конвекции в плоском вертикальном канале для попутных направлений потоков воздуха при симметричном нагреве ($q_{w1} = q_{w2} = \text{const}$), числе Грасгофа около $3,9 \cdot 10^8$. При моделировании принято, что входная скорость возрастает по времени экспоненциально в соответствии с зависимостью (1) и при условии $t \geq 4\text{с}$ уже достигает 99% от максимального значения скорости 0,32 м/с в центре канала:

$$u_{in} = 0,32 \left(1 - \left(\frac{y}{0,0204} \right)^2 \right) \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{0,8} \right) \right). \quad (1)$$

При $t > 4\text{с}$ входная скорость меняется очень незначительно и соответствует числу Рейнольдса примерно $Re_{in} = 2016$.

Численные двумерные исследования проведены с использованием компьютерной программы FLUENT 6.1. Расчеты проводились в потоке воздуха при давлении 0,2 МПа. При численном моделировании использованы нестационарные уравнения Навье-Стокса и энергии.

При анализе структуры потока в момент времени $t = 2,066\text{с}$ (рис. 1 а) видно, что в канале формируются замкнутые изолинии функции потока, которые локализируются в середине канала (по координате y), а по длине канала занимают область $6,5 < x/d_e < 15$. Профили скорости (рис. 2 в) показывают, что в момент времени $t = 2,066\text{с}$, скорость в середине канала близка к нулю (при $x/d_e = 6,5$), но уже при ($x/d_e = 8,8$) (рис. 2 б) в центре канала направление скорости меняется на отрицательное, т.е. на противоположное по отно-

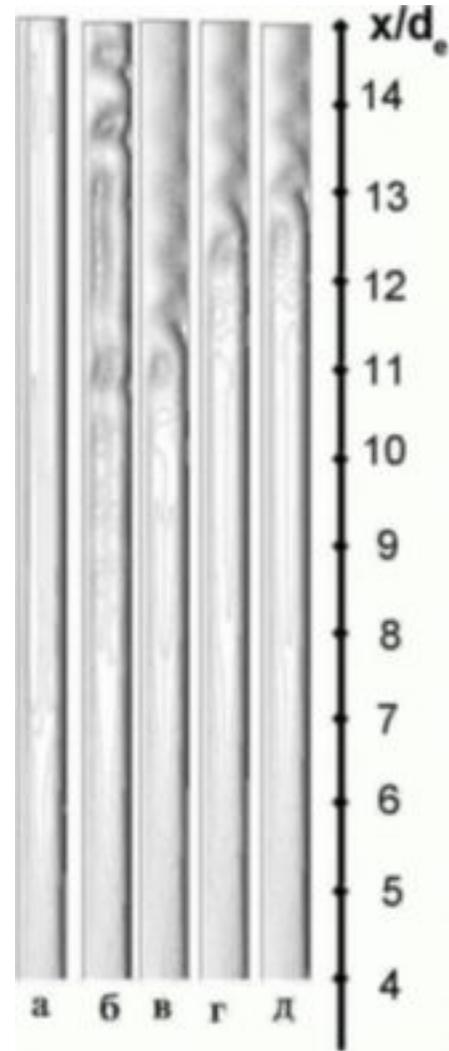


Рис. 1. Структура изолинии функции потока в канале в разные моменты времени:

**$a-t = 2,066\text{ с}, Bo_{in} = 2,09 \cdot 10^{-5}$; $б-2,6563\text{ с},$
 $Bo_{in} = 2,01 \cdot 10^{-5}$; $в-5,5113\text{ с}, Bo_{in} = 1,98 \cdot 10^{-5}$;
 $г-11,168\text{ с}, Bo_{in} = 1,94 \cdot 10^{-5}$; $д-18,301\text{ с},$
 $Bo_{in} = 1,94 \cdot 10^{-5}$.**

шению к направлению вынужденного потока. В этот момент времени отрицательная скорость в середине канала также зафиксирована и при $x/d_e = 13$ (рис. 2 а). Таким образом, можно утверждать, что в области канала $6,5 < x/d_e < 15$ формируется рециркуляционная зона (рис. 1 а).

В момент времени $t = 2,6563\text{с}$ (рис. 1 б) изолинии функции тока в этой зоне канала ($6,5 < x/d_e < 15$) разбиваются на более мелкие структуры замкнутых изолиний. Рециркуляционная зона наблюдается при $x/d_e > 7$, а в области $8,8 < x/d_e < 15$ преобладают структуры неустойчивого вихревого

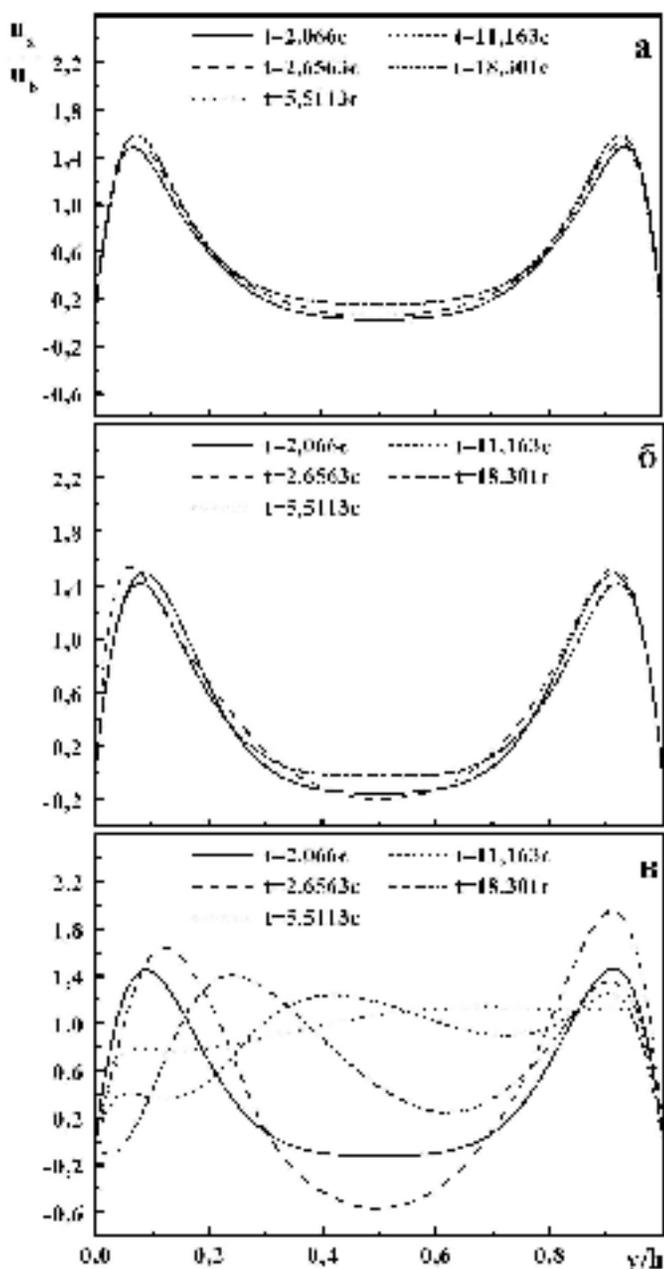


Рис. 2. Профили скорости в разных сечениях канала: а- $x/d_e = 6,5$; б- $8,8$; в- 13 .
 $t = 2,066 \text{ с}, Bo_{in} = 2,09 \cdot 10^{-5}$; $t = 2,6563 \text{ с}, Bo_{in} = 2,01 \cdot 10^{-5}$; $t = 5,5113 \text{ с}, Bo_{in} = 1,98 \cdot 10^{-5}$;
 $t = 11,163 \text{ с}, Bo_{in} = 1,94 \cdot 10^{-5}$; $t = 18,301 \text{ с}, Bo_{in} = 1,94 \cdot 10^{-5}$.

течения. С увеличением времени ($t = 5,5113 \text{ с}$) вихревое течение смещается к большим x/d_e ($10,5 < x/d_e < 15$) (рис. 1 в), а при $t = 11,163 \text{ с}$ (рис. 1 г) и $t = 18,301 \text{ с}$ (рис. 1 д) положение зоны вихревого течения уже практически не меняется

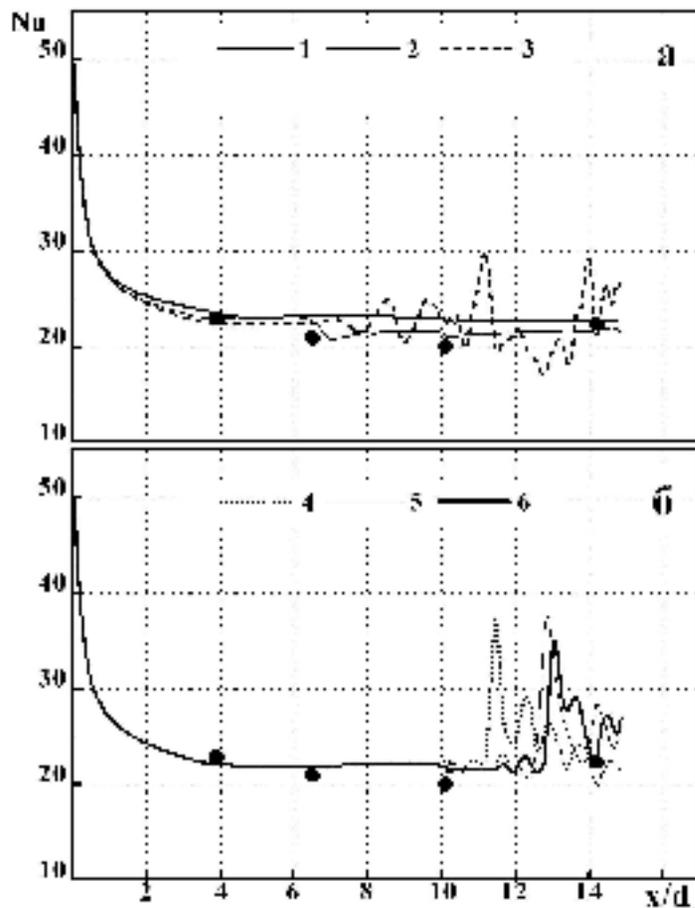


Рис. 3. Изменение теплоотдачи по длине канала в разные моменты времени:
 1- $t=1,6725 \text{ с}, Bo_{in} = 2,21 \cdot 10^{-5}$; 2- $2,066 \text{ с}, Bo_{in} = 2,09 \cdot 10^{-5}$; 3- $2,6563 \text{ с}, Bo_{in} = 2,01 \cdot 10^{-5}$;
 4- $5,5113 \text{ с}, Bo_{in} = 1,98 \cdot 10^{-5}$; 5- $11,163 \text{ с}, Bo_{in} = 1,94 \cdot 10^{-5}$; 6- $18,301 \text{ с}, Bo_{in} = 1,94 \cdot 10^{-5}$.
 Точки – экспериментальные данные Литовского энергетического института для стационарных условий.

($11,5 < x/d_e < 15$). При анализе структуры потока в моменты времени $t = 11,163 \text{ с}$ (рис. 1 г) и $t = 18,301 \text{ с}$ (рис. 1 д) видно, что в этом промежутке времени структура течения меняется очень незначительно и течение уже можно назвать квазистационарным.

Следовательно, в результате выполненного анализа структуры течения, можно утверждать, что вдоль канала (рис. 1 в, г, д), образуются три характерные зоны течения. В первой зоне под воздействием термогравитационных сил параболический профиль скорости деформируется в М-образный профиль скорости. Это зона стабиль-

ного течения. При $t \geq 5,5113\text{с}$ (рис. 1 в, г, д) она продолжается до $x/d_c = 8$.

При больших x/d_c (рис. 1 в) $x/d_c = 8 \dots 10,5$, а в случае (рис. 1 г, д) $x/d_c = 8 \dots 11,5$ в середине канала формируется зона с противоположным течением по отношению к вынужденному течению. Затем следует зона нестабильного вихревого течения. При анализе профилей скорости в зоне нестабильного вихревого течения (рис. 2 в, $x/d_c = 13$) можно заметить присущие этой зоне черты: изменение направления скорости в разных местах сечения канала и асимметрию профиля скорости (при $t = 2,6563 \dots 18,301\text{с}$).

Изменение теплоотдачи по длине канала (рис. 3 а, б) имеет тесную связь с изученными ранее особенностями структуры потока (рис. 1).

Изменение характера теплоотдачи в момент времени $t = 2,066\text{с}$ (рис. 3 а, кривая 2) при $x/d_c \geq 6,5$ связано с изменением направления скорости потока в середине канала (рис. 1 а). В следующий момент времени $t = 2,6563\text{с}$ при $x/d_c > 8,8$ изменение Nu приобретает пульсирующий характер (рис. 3 а, кривая 3) и это обуславливается вихревым течением в этой области (рис. 1 б). С увеличением времени пульсирующий характер теплоотдачи проявляется при больших значениях x/d_c (рис. 3 б, кривые 4,5,6), что обусловлено смещением вихревого течения к большим x/d_c (рис. 1 в, г, д).

На рис. 3 также приведены данные экспериментального исследования теплоотдачи при тех же условиях, полученные в Литовском энергетическом институте.

Видно хорошее совпадение результатов экспериментальных и численных исследований в начале канала, т.е. в зоне устойчивого ламинарного течения.

Вывод

При течении воздуха в плоском вертикальном канале с теплообменом при $Re = 2016$, близким к критическому, и числе $Gr = 3,9 \cdot 10^8$ образуются три зоны течения. Зона устойчивого течения в начале канала, зона с противоположным течением потока в центре канала и зона с неустойчивым вихревым течением. В этой зоне температура стенки и число Nu имеют пульсационный характер.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Scheele G. F., Rosen E. M., Hanratty T. J.* Effects of natural convection on transition to turbulence in vertical pipes // *Can. J. Chem. Eng.* 1960. Vol. 38. P. 67–73.
2. *Петухов Б. С., Поляков А. Ф., Стригин Б. К.* Исследование теплообмена в трубах при вязкостно-гравитационном течении. М.: Энергия, 1968. Т. 1. 607 с.
3. *Петухов Б. С., Генин Л. Г., Ковалев С. А.* Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Энергоатомиздат, 1986.

Получено 03.10.2005 г.