

УДК 536.24

Сирвидас А., Пошкас Р.

Литовский энергетический институт

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ЛАМИНАРНОЙ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ В ПЛОСКОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ ДЛЯ ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОТОКОВ

Наведено результати числового дво-мірного моделювання ламінарної змішаної конвекції у вертикальному плоскому каналі з використанням комп'ютерної програми FLUENT 6.1.

Проведено аналіз результатів та запропоновано узагальнюючі залежності для розрахунку тепловіддачі та визначення точки відриву потоку (утворення вихрового потоку) при ламінарній змішаній конвекції.

Представлены результаты численно-го двумерного моделирования ламинарной смешанной конвекции в вертикальном плоском канале с использованием компьютерной программы FLUENT 6.1.

Проведен анализ результатов и предложены обобщающие зависимости для расчета теплоотдачи и для определения положения точки отрыва потока (образования вихревого потока) при ламинарной смешанной конвекции.

Numerical two-dimensional simulation of laminar mixed convection heat transfer was performed using FLUENT 6.1 code.

Correlations for calculation of laminar mixed convection heat transfer and for the determination of the position of flow separation from the wall were suggested.

$Bo = Gr_q/Re$ – параметр термогравитации;

c_p – удельная теплоемкость;

b – ширина канала;

$d_e = 2(hb)/(h+b)$ – эквивалентный диаметр;

$Gr_q = g \beta d_e^4 q_w / \nu^2 \lambda$ – число Грасгофа по тепловому потоку;

g – ускорение свободного падения;

h – высота канала;

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

Nu_ζ – число Нуссельта без влияния массовых сил;

$Pr = \mu c_p / \lambda$ – число Прандтля;

p – давление;

q – плотность теплового потока;

$Re = u_f d_e / \nu$ – число Рейнольдса;

T – температура;

u – скорость;

x – расстояние от начала обогрева;

$X = (x/d_e)/(Re \cdot Pr)$ – относительное расстояние;

α – коэффициент теплоотдачи;

β – коэффициент объемного расширения;

λ – коэффициент теплопроводности;

ν – кинематический коэффициент вязкости;

μ – динамический коэффициент вязкости;

ρ – плотность.

Индексы:

$cr, cr1$ – критический;

f – среднемассовый;

in – на входе;

L – ламинарный;

w – на стенке.

Проведенный авторами обзор литературы показал, что исследований теплоотдачи при смешанной конвекции в области ламинарно-переходного течения очень мало. Теплоотдача и характер течения потока в трубах в этой области исследовались в [1 – 5]. В [1] с целью визуализации в попутных потоках в центральную часть трубы впрыскивалась краска. Установлено, что при потере устойчивости потока нитка краски

приобретает форму синусоиды, при этом появляются пульсации температуры стенки. При возрастании параметра термогравитации амплитуда синусоиды нитки увеличивается и, в конце концов, нитка разрушается. Начальная неустойчивость потока зависит не только от величины параметра термогравитации, но и от длины канала (x/d_e). В [2, 3] указывается, что наличие в профилях скорости точек перегиба и особенно возмож-

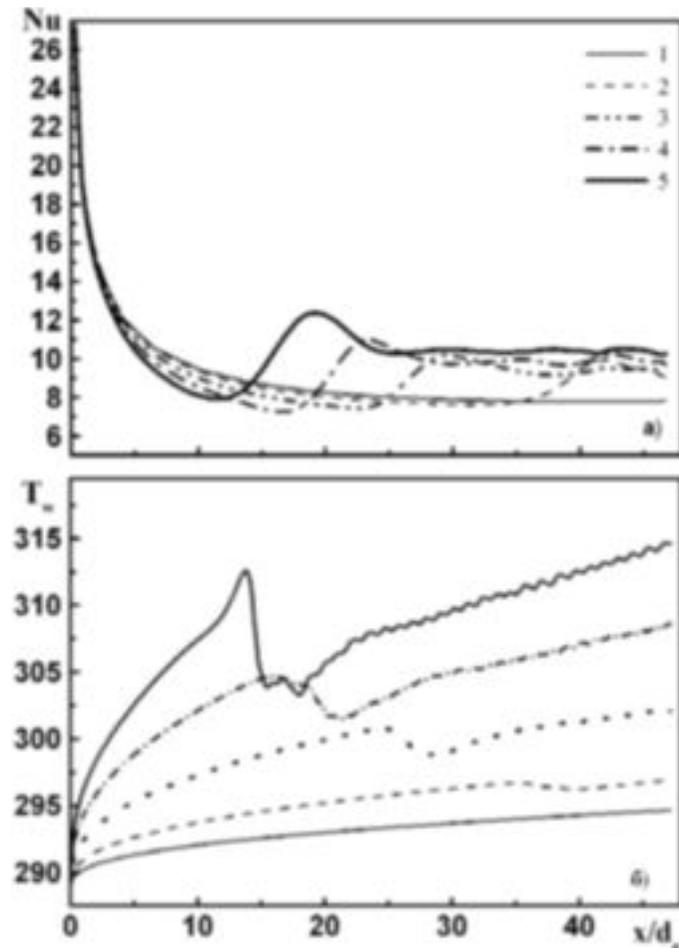


Рис. 1. Изменение теплоотдачи (а) и температуры стенки (б) по длине канала при различном воздействии термогравитационных сил для $Re_{in} = 2136$, $p = 0,1$ МПа : 1 – $Bo_{in} = 757$; 2 – 1135; 3 – 1892; 4 – 2837; 5 – 3784.

ность возникновения возвратного течения стимулируют нарушение устойчивости ламинарного течения и переход к турбулентному течению. Нарушение устойчивости и переход происходит при значении $Re = Re_{cr} < 2300$. В [2] предложена зависимость, которая в вертикальной трубе при попутных потоках позволяет установить безразмерную длину (X_{cr}), при которой ламинарное течение теряет устойчивость. В той же работе предложена зависимость для определения теплоотдачи при ламинарной смешанной конвекции.

В противоположных потоках нестабильность течения, прежде всего, проявляется в появлении асимметрии нитки краски непосредственно перед началом нагрева. При значительном увеличении параметра термогравитации поток начинает

пульсировать [4]. С увеличением Gr_q/Re течение вблизи стенки замедляется, а в ядре потока ускоряется. В [3] указывается, что при $Gr_q/(4Re) \approx 100$ градиент скорости у стенки обращается в нуль, а при несколько большем значении этого параметра вблизи стенки возникает обратное течение. Уже при $Gr_q/(4Re) \approx 170$ происходит нарушение устойчивости, в пристеночной области возникают вихри, а затем при несколько больших Gr_q/Re течение становится турбулентным. Структура потока и теплообмен в зоне вихревого течения анализировались в работе [5]. Проведенные численные исследования показали, что с увеличением воздействия термогравитационных сил у стенок канала образуются циркуляционные течения. Они вызывают асимметричность профилей скорости и пульсации температур стенки. Показано, что в этой зоне интенсивность теплоотдачи заметно больше, чем при турбулентном течении. В литературе нам не удалось найти обобщающие зависимости для определения X_{cr} и теплоотдачи в случае ламинарной смешанной конвекции при противоположных направлениях потоков.

В настоящей работе приводятся результаты двухмерного численного моделирования смешанной конвекции в плоском (высота – 0,0408 м; длина – 6 м; ширина – 0,4 м) вертикальном канале. Исследования проведены для стационарного ламинарного течения воздуха с противоположным направлением потоков при давлении воздуха $p = 0,1; 0,2; 0,4$ МПа в канале. Числа Re_{in} изменялись от $1,5 \cdot 10^3$ до $4,31 \cdot 10^3$, а Gr_q – от $1,65 \cdot 10^5$ до $3,1 \cdot 10^9$. Величина тепловыделения на стенке изменялась в широком диапазоне с целью достижения разного эффекта воздействия термогравитационных сил.

Геометрия канала выбрана такой как и экспериментального участка, используемого в лаборатории для исследования теплоотдачи при смешанной конвекции. Давление воздуха, его температура на входе и Re_{in} были выбраны такими же, как и во время проведения эксперимента.

Для проведения расчётов использована компьютерная программа FLUENT 6.1 [6].

Результаты численного моделирования показывают, что при небольшом нагреве стенки её температура монотонно увеличивается по длине канала (рис. 1б, кр. 1). Воздействие термогравитационных сил практически не оказывает ника-

кого влияния на теплоотдачу, так как в конце канала $Nu = 8,24$ соответствует значению Nu при вынужденной конвекции [7]. С увеличением теплового потока (рис. 1, кр. 2) начинает проявляться воздействие термогравитационных сил. По этой причине скорость потока у стенок канала уменьшается, вследствие чего уменьшается и теплоотдача, но при этом на определенном расстоянии от начала обогрева у стенок канала образуется противоположное течение. От места изменения структуры течения число Nu довольно резко возрастает (рис. 1а, кр. 2), температура стенки резко уменьшается (рис. 1б, кр. 2, $x/d_e \approx 35$). Далее при увеличении нагрева сохраняется та же тенденция – теплоотдача по длине канала постепенно уменьшается (рис. 1а, кр. 3-5), температура стенки канала постепенно увеличивается (рис. 1б, кр. 3-5). Однако от определенной точки наблюдается её возрастание и спад температуры стенки из-за потери стабильности потока. В потоке от точки потери стабильности до конца канала у стенок формируются вихри, которые улучшают отвод теплоты.

При увеличении нагрева расстояние, при котором течение выдерживает стабильность, сокращается, и поэтому возрастание теплоотдачи и спад температуры стенки канала наблюдается раньше (при меньшем x/d_e).

Как уже было сказано, в зависимости от величины нагрева поток теряет стабильность на определенном расстоянии от начала обогрева. С увеличением нагрева точка потери стабильности потока перемещается к началу обогрева канала. Изменение безразмерного расстояния, при котором поток теряет стабильность вследствие воздействия термогравитационных сил, для разных режимов течения показано на рис. 2. В этих координатах результаты моделирования хорошо коррелируют только в зоне стабилизированного течения, т.е. когда $x/d_e \geq 15$. В диапазоне определяющих параметров $1490 \leq Re \leq 4310$, $950 < Gr_q/Re \leq 3000$ и $x/d_e \geq 15$ получена зависимость

$$(x/d_e)_{cr1} = 15,5 \cdot 10^3 \left(\frac{Gr_q}{Re} \right)^{-0,86} \quad (1)$$

Зависимость (1) обобщает результаты с погрешностью не более 9 %.

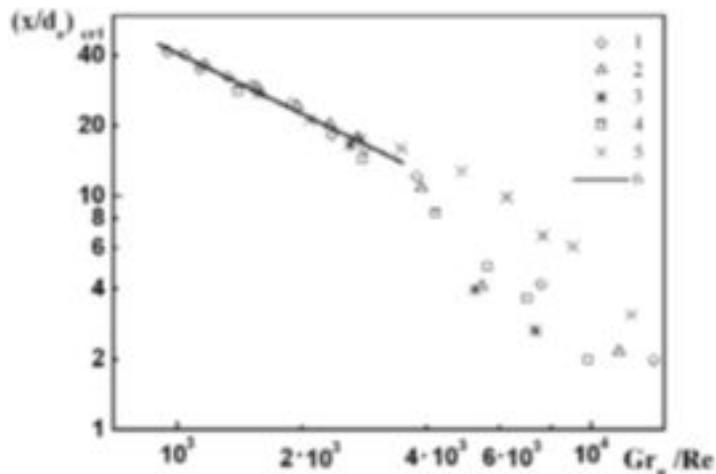


Рис. 2. Зависимость безразмерного расстояния потери устойчивости потока (отрыва потока от стенки) от параметра термогравитации Gr_q/Re :
1 – $Re_{in} = 2136$, $p = 0,1$ МПа; 2 – 2011, 0,2;
3 – 1494, 0,2; 4 – 2136, 0,4; 5 – 4317, 0,4;
6 – по зависимости (1).

Для обобщения данных при $x/d_e < 15$ безразмерное расстояние было определено по зависимости

$$X_{cr1} = (x/d_e) (1/(Re Pr)). \quad (2)$$

В новых координатах ($X_{cr1} = f(Gr_q/Re)$) данные представлены на рис. 3. При $x/d_e < 15$ они обобщены зависимостью

$$X_{cr1} = 16 \cdot 10^2 \left(\frac{Gr_q}{Re} \right)^{-1,5} \quad (3)$$

Зависимость (3) действительна в диапазоне $1490 \leq Re \leq 4310$, $3000 < Gr_q/Re \leq 14 \cdot 10^4$ и обобщает данные с погрешностью не более 10 %.

Сравнение полученных результатов с данными [2] также показывает, что нестабильность потока в плоском канале при противоположных направлениях потоков появляется раньше, чем в трубе в случае совпадающих направлений потоков (рис. 3, кр. 7).

Зависимость относительной теплоотдачи от параметра термогравитации при разных x/d_e показана на рис. 4. Здесь данные Nu/Nu_L взяты только до места отрыва потока в канале. Очевидно, что при увеличении термогравитационных сил, относительная теплоотдача

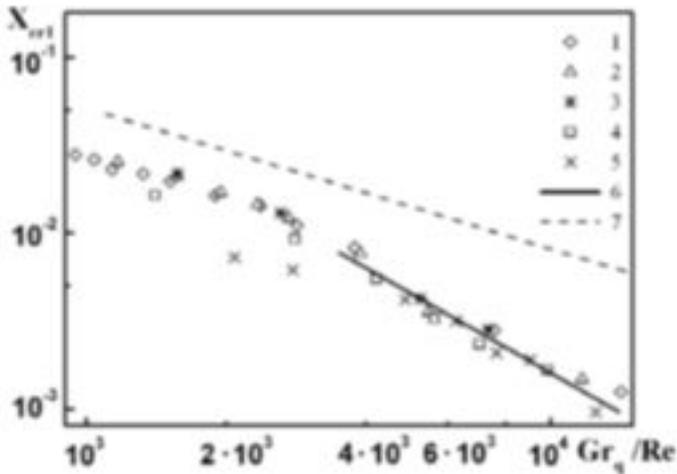


Рис. 3. Зависимость безразмерного расстояния потери устойчивости потока (отрыва потока от стенки) от параметра термогравитации Gr_q/Re :
 1 – $Re_{in} = 2136, p = 0,1$ МПа; 2 – 2011, 0,2;
 3 – 1494, 0,2; 4 – 2136, 0,4; 5 – 4317, 0,4;
 6 – по зависимости (3); 7 – для попутных потоков в вертикальной трубе [2].

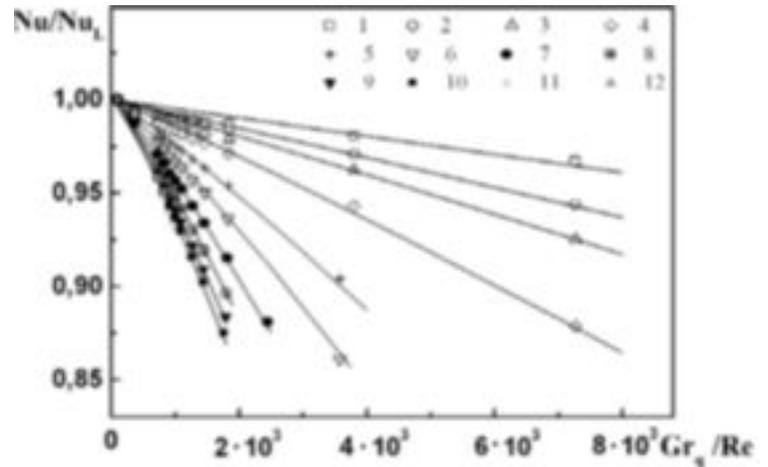


Рис. 4. Зависимость относительной теплоотдачи от Gr_q/Re при разных x/d_e , для $Re_{in} = 2136, p = 0,1$ МПа: 1 – $x/d_e = 0,3$; 2 – 0,7; 3 – 1; 4 – 1,9; 5 – 3,9; 6 – 6,5; 7 – 10,1; 8 – 14,2; 9 – 18,3; 10 – 22,3; 11 – 35,9; 12 – 42.
 Точки – результаты моделирования. Сплошные линии – по зависимости (4).

уменьшается при увеличении x/d_e , но в то же время асимптотически приближается к стабилизированной теплоотдаче. Таким образом, когда $x/d_e \geq 20$, Nu/Nu_L стабилизируется по длине канала.

Для обобщения результатов моделирования теплоотдачи при $1,9 \cdot 10^3 < Re \leq 4 \cdot 10^3, 90 \leq Gr_q/Re \leq 7,2 \cdot 10^3$ предложена зависимость

$$\frac{Nu}{Nu_L} = 1 - C \left(\frac{Gr_q}{Re} \right)^D, \quad (4)$$

где $C = 7 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^{-6} \ln(x/d_e)$;
 $D = 1,0499 + 0,0542 \cdot \ln(x/d_e)$.

Когда $x/d_e \geq 20$, то C и D не зависят от x/d_e и $C = 1,4 \cdot 10^{-5}, D = 1,22$.

Зависимость (4) обобщает данные с погрешностью не более 3 %.

Выводы

1. Численный анализ в зоне ламинарного течения показал, что при некотором воздействии термогравитационных сил поток теряет устойчивость вследствие отрыва от стенок канала.

2. При увеличении нагрева точка отрыва потока перемещается к началу обогрева канала.

3. Отрыв потока и образование вихрей значительно улучшают теплоотдачу в канале.

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. – 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. – 470 с.
4. Scheele G.F., Hanratty T.J. Effects of natural convection instabilities on rates of heat transfer at low Reynolds numbers // AIChE J. 1963. – Vol. 9, No. 2. – P. 183-185.
5. Пошкас П., Пошкас Р., Сирвидас А. Исследование теплоотдачи при переходном течении воздуха в симметрично нагреваемом плоском вертикальном канале в условиях

противоположных направлений смешанной конвекции // Труды 5-ого Международного форума по тепломассообмену, Минск, 24-28 Мая, 2004 (CD).

6. Fluent 6.1 documentation // Fluent inc. 2002.

7. Петухов Б. С., Поляков А. Ф. Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции. – М.: Наука, 1986. – 192 с.

Получено 21.11.2005 г.