

УДК 536.242

**Онищенко В.Н., Халатов А.А.***Институт технической теплофизики НАН Украины*

## К ВОПРОСУ О РАСЧЕТЕ ТЕПЛООБМЕНА ЗА ДВУХРЯДНОЙ СИСТЕМОЙ УГЛУБЛЕНИЙ

У статті приведена інформація по числовому моделюванню двурядних систем заглиблень з гострою кромкою. Показано, що в області дуже низьких чисел Рейнольдса ( $Re_x = 2000 \dots 5000$ ) жодна з досліджених моделей не дає задовільного узгодження з експериментальними даними, а в області  $Re_x > 5000$   $k-\epsilon$  модель турбулентності для низьких чисел Рейнольдса, SST і V2F моделі турбулентності добре узгоджуються з дослідними даними.

В статье приведена информация по численному моделированию двухрядных систем углублений с острой кромкой. Показано, что в области очень низких чисел Рейнольдса ( $Re_x = 2000 \dots 5000$ ) ни одна из исследованных моделей не дает удовлетворительного согласования с экспериментальными данными, а в области  $Re_x > 5000$   $k-\epsilon$  модель турбулентности для низких чисел Рейнольдса, SST и V2F модели турбулентности хорошо согласуются с опытными данными.

In this paper the information is resulted on the numerical simulation of the dualrow of dimples with a sharp edge. It is shown that in area of low of Reynolds number ( $Re_x = 2000 \dots 5000$ ) no one of the investigated models provide a agreement with experimental data. In area of  $Re_x$  over 5000 the  $k-\epsilon$  model of turbulence for the low Reynolds number, SST and V2F model agree well with experimental results.

$D$  – диаметр углубления;  
 $h$  – глубина углубления;  
 $H$  – высота канала;  
 $q$  – удельный тепловой поток;  
 $T$  – температура набегающего потока;  
 $W$  – скорость потока на входе в канал;  
 $Nu_x = \alpha x / \lambda$  – число Нуссельта;

$Re_x = Wx / \nu$  – число Рейнольдса;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  
 $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости;

**Индексы:**

$x, y$  – прямоугольные координаты;  
 $w$  – параметры на поверхности;  
 $\infty$  – параметры в ядре потока.

Повышенный интерес к углублениям, проявляемый в последние годы, обусловлен их специфическими гидродинамическими свойствами, такими как низкие гидравлические потери и высокие теплогидравлические характеристики. При этом максимальный уровень теплообмена достигается на плоской поверхности за углублениями, а не в самих углублениях, что позволяет предположить перспективность применения периодически повторяющихся двухрядных систем углублений, как альтернативу многорядным системам.

Экспериментальное исследование теплообмена (рис. 1) за системой двухрядных углублений сферической, цилиндрической, квадратной и ромбовидной формы с острой кромкой и относительной глубиной  $h/D = 0,20$  и  $0,30$  показало, что в исследованном диапазоне из-

менения числа Рейнольдса геометрическая форма углубления и его глубина практически не оказывают влияния на интенсивность теплообмена за двойным рядом углублений.

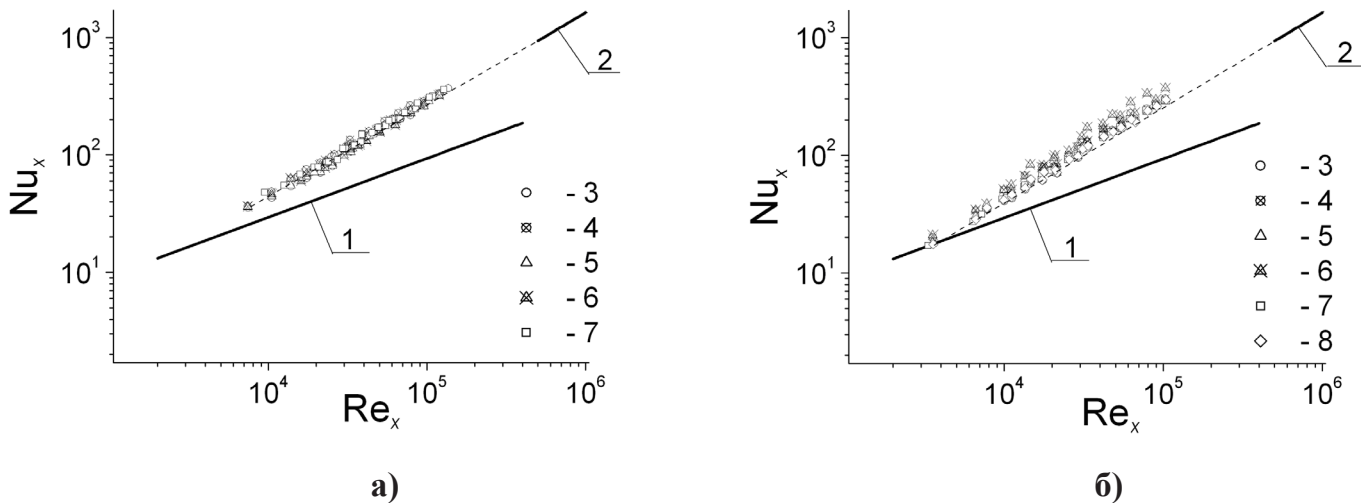
Как следует из рис. 1, опытные данные для всех геометрических форм группируются около линии турбулентного теплообмена на плоской пластине, аппроксимированной в область низких чисел Рейнольдса. Этот вывод отличается от результатов, полученных для одиночных углублений, где влияние формы и глубины на теплообмен проявляется весьма заметно [1, 2].

Полученные результаты позволяют сделать важный вывод, что за двухрядной системой углублений различной формы формируется примерно одинаковая пространственно-вихревая структура потока. В свою очередь это предполагает возможность

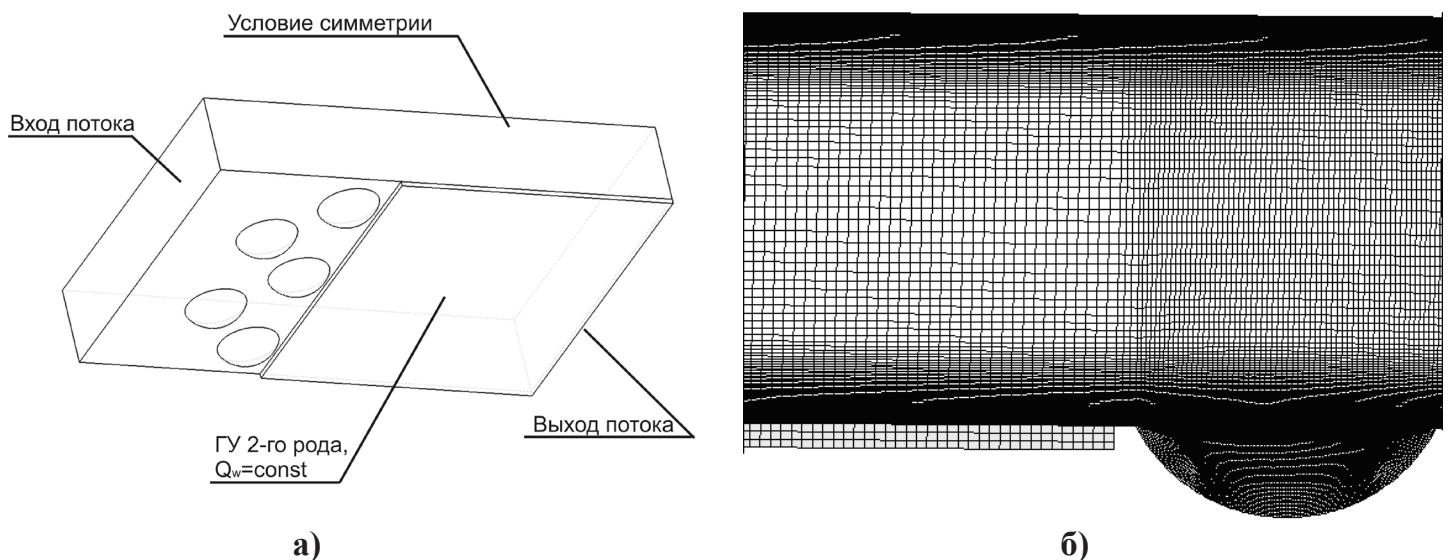
использования методов математического моделирования вихревого теплообмена за двухрядной системой углублений различной формы.

*Целью работы* является поиск моделей турбулентности, адекватно описывающих вихревой теплообмен за двухрядной системой углублений различной формы. Поскольку форма углубления не оказывает существенного влияния на теплообмен, в качестве объекта исследо-

вания была использована двухрядная система углублений сферической формы с острой кромкой диаметром  $D = 25$  мм и относительной глубиной  $h/D = 0,30$ . Высота канала  $H$  равнялась 25 мм, расположение углублений – шахматное с продольным  $S_x/D$  шагом углублений равным 0,64 и поперечным  $S_y/D = 2,0$ . Геометрическая постановка задачи представлена на рис. 2, а.



**Рис. 1. Теплообмен за системой двухрядных углублений различной формы:**  
**а, б – за первым и вторым рядом углублений:**  
**1 – ламинарное течение на пластине; 2 – турбулентное течение на пластине;**  
**3 – сфера,  $h/D = 0,20$ ; 4 – сфера,  $h/D = 0,30$ ; 5 – цилиндр,  $h/D = 0,20$ ; 6 – цилиндр,  $h/D = 0,30$ ; 7 – квадрат,  $h/D = 0,30$ ; 8 – ромб,  $h/D = 0,30$ .**



**Рис. 2. Геометрическая модель (а) и фрагмент сетки (б) расчетной области моделирования.**

В работе использовался коммерческий лицензионный пакет PHOENICS-v 3.6 (Великобритания). Фрагмент сеточной модели канала показан на рис. 2, б. Использовалась сеточная модель гексаэдрической формы, которая насчитывала 148 821 ячейку.

Скорость потока на входе в канал составляла 4...16 м/с, структура потока перед двухрядным углублением – ламинарная, температура набегающего потока  $T_\infty$  постоянна и равна 20 °С, тепловой поток  $q_w$  от стенки к воздушному потоку составлял 540...955 Вт/м<sup>2</sup>.

Для расчета теплообмена за двухрядной системой углублений сферической формы использовались следующие модели турбулентности, входящие в банк данных компьютерного пакета PHOENICS-v 3.6:

Модели, основанные на аналогии между процессами диссипации и турбулентного движения (модель Буссинеска), хорошо зарекомен-

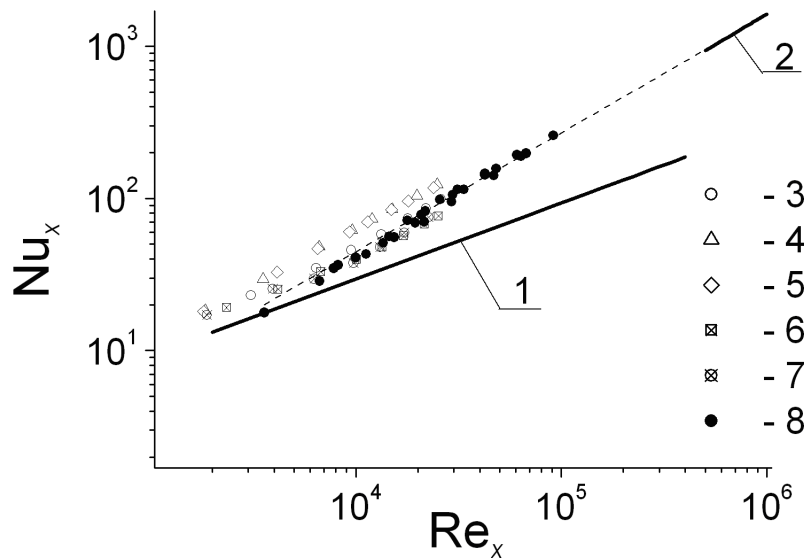
довавшие себя при моделировании вихревых течений:

- k-ε модель турбулентности для низких чисел Рейнольдса,
- k-ε модель турбулентности для высоких чисел Рейнольдса,
- RNG вариация k-ε модели турбулентности – RNG модель,
- Вариация k-ω модели турбулентности – SST модель.
- V2F модель турбулентности, позволяющая более точно рассчитывать пристеночное течение, включая теплообмен и поверхностное трение.

### Выводы

Сравнение расчетных и экспериментальных данных, представленное на рис. 3, позволяет сделать следующие основные выводы:

1. В области очень низких чисел Рейнольд-



**Рис. 3. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными по теплообмену за двойным рядом сферических углублений ( $h/D = 0,30$ ):**  
**1 – ламинарное течение на пластине; 2 – турбулентное течение на пластине;**  
**3 – k-ε модель для низких чисел Рейнольдса; 4 – k-ε модель для высоких чисел Рейнольдса; 5 – RNG модель; 6 – SST модель; 7 – V2F модель;**  
**8 – экспериментальные данные.**

дса ( $Re_x = 2000 \dots 5000$ ) ни одна из моделей турбулентности не дает удовлетворительного согласования с экспериментальными данными: различие экспериментальных и расчетных данных составляет от 33 % (к-ε модель турбулентности для низких чисел Рейнольдса) до 77 % (к-ε модель для высоких чисел Рейнольдса и RNG модель турбулентности).

2. В области  $Re_x > 5000$  к-ε модель турбулентности для низких чисел Рейнольдса, SST и V2F модели турбулентности очень хорошо согласуются с опытными данными (отклонение составляет 2...7 %).

3. В области  $Re_x > 5000$  расчетные данные, полученные с использованием RNG модели турбулентности, располагаются существенно выше экспериментальных данных.

Результаты выполненного исследования позволяют заключить, что компьютерное моделирование позволяет получить достаточно хорошие результаты при расчете локального теплообмена в области  $Re_x > 5000$  за двухрядной

системой углублений различной формы.

Дальнейшие исследования будут продолжены в направлении изучения влияния интенсивности внешней турбулентности, высоты канала и толщины пограничного слоя перед углублениями на теплообмен за двухрядными углублениями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Халатов А.А., Борисов И.И., Шевцов С.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил (том 5: Тепломассообмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков). – К.: Изд. Ин-та технической теплофизики НАН Украины, 2005. – 500 с.

2. Ekkad S.V., Han J.C. Heat transfer inside and downstream of cavities using transient liquid crystal method // Thermophysics and Heat Transfer, July – September 1996. – P. 511 – 516.

*Получено 23.04.2009 г.*