

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛООБМЕНА ЗА ДВОЙНЫМ РЯДОМ УГЛУБЛЕНИЙ НА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Халатов А.А., Онищенко В.Н.

*Институт технической теплофизики НАН Украины, г. Киев*

### *Введение*

В течение последних десяти лет достигнут существенный прогресс в изучении теплообмена и гидродинамики около поверхностных углублений [1-3]. Углубления обладают уникальными гидродинамическими свойствами, такими как низкие гидравлические потери, примерно эквивалентный рост теплообмена и сопротивления, нестационарные флуктуации за углублением. «Игра вихрей» около поверхности с многорядными углублениями представляет собой не хаотическую группу пульсирующих вихрей, а «самоорганизованную» вихревую систему, взаимно координирующую свое поведение в пространстве и времени. Эти свойства чрезвычайно важны как при совершенствовании различных термогазодинамических процессов, так и при разработке новых вихревых технологий аэротермодинамики, горения, тепло- и массообмена.

подавляющее большинство опубликованных опытных данных посвящено одиночным углублениям цилиндрической и сферической формы и многорядным системам сферических углублений на плоской поверхности [1, 2]. Ограниченные результаты, представленные в работе [3], показывают, что геометрическая форма углублений играет определенную роль в формировании нестационарной структуры потока за одиночным углублением.

В технических приложениях, в частности в компактных теплообменниках, горелочных устройствах и системах контроля отрыва потока весьма привлекательными являются двухрядные системы углублений, которые устанавливаются через определенное расстояние. Данные по теплообмену за двумя рядами углублений в литературе отсутствуют. В настоящей работе приводятся экспериментальные результаты исследования теплообмена за двумя рядами углублений различной геометрической формы со следующими варьируемыми параметрами:

- Форма углублений на плоской поверхности: сферическая, цилиндрическая, ромбовидная, квадратная.
- Относительная глубина  $h/D=0,20$  и  $0,30$ , которая соответствует наиболее оптимальным теплогидравлическим характеристикам системы углублений [1].
- Относительный шаг углублений в поперечном к набегаемому потоку направлении  $S_x/D=2,0$  и  $1,50$ .

## Экспериментальный стенд

Экспериментальный стенд представляет собой аэродинамическую трубу открытого типа (рис. 1). Воздух от центробежного вентилятора ВВД5 1 подается в ресивер 5 и далее через входное сопло 6 и участок стабилизации 7 поступает в экспериментальный участок 9. Ресивер, в котором установлена мелкаячеистая сетка 4, предназначен для сглаживания объемных пульсаций потока и выравнивания поля скорости. Профилирование входного сопла 6 по кривой Витошинского обеспечивает перед экспериментальным участком равномерный профиль скорости с минимальной толщиной пограничного слоя. Дополнительная магистраль с поворотным затвором 2 обеспечивает сброс избыточного воздуха в атмосферу для изменения расхода воздуха через экспериментальный участок. После экспериментального участка воздух поступает в переходник, который «нивелирует» эффект расширения канала, попадает в успокоитель 10 и выбрасывается в атмосферу.

Экспериментальный участок имеет форму канала прямоугольного сечения высотой 34 мм и шириной 290 мм, нижняя стенка которого представляет собой тонкостенный металлический нагреватель, укрепленный на толстой пенопластовой основе. Нагреватель, к которому подводится электропитание от источника постоянного тока, покрыт тонким слоем золота. Для визуализации поверхностной картины течения на слой золота нанесен тонкий слой жидкого кристалла черного цвета, который изменяет цвет при изменении температуры поверхности.

Методика определения локального теплообмена основана на постоянном тепловом потоке от нагреваемой поверхности к воздушному потоку. Значение падения напряжения через поверхность нагрева контролируется цифровым вольтметром В7-46/1. Температура

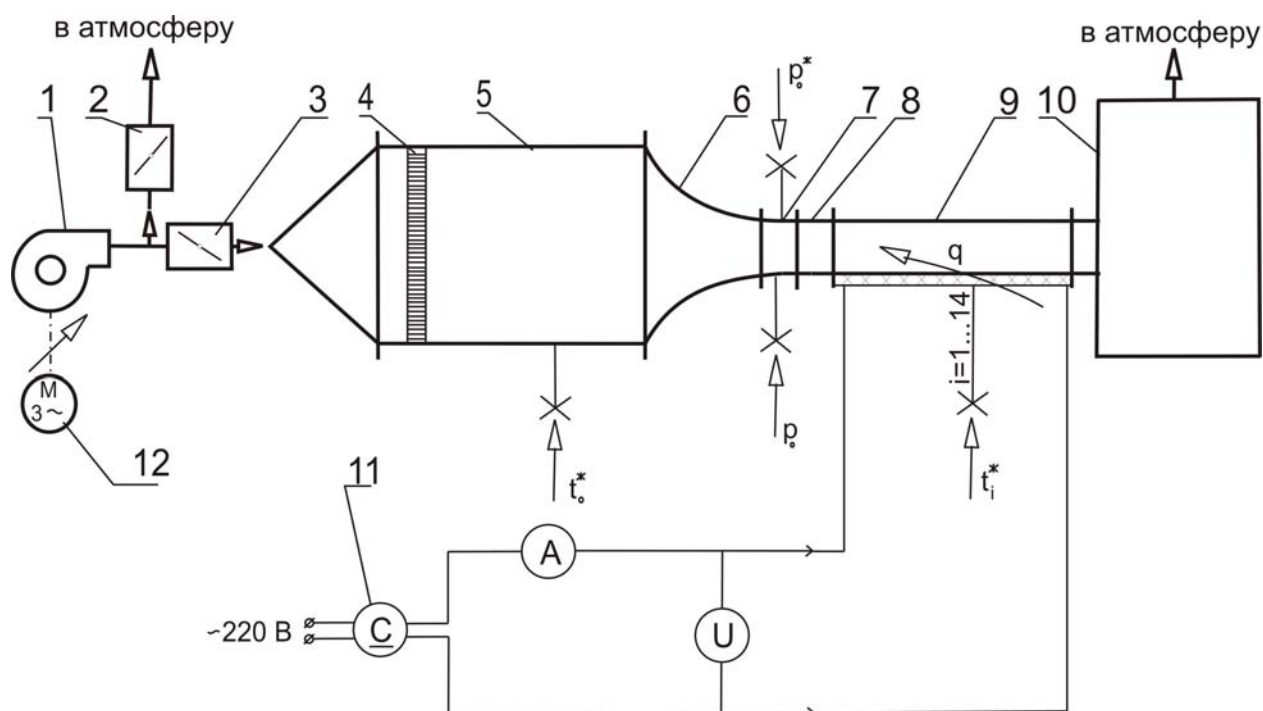


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – центробежный вентилятор; 2, 3 - поворотный затвор; 4 - мелкоячеистая сетка; 5 – ресивер; 6 – сопло Витошинского; 7 – участок стабилизации; 8 – экспериментальный участок; 9 – теплоотдающая пластина; 10 – успокоитель с переходником; 11 – преобразователь; 12 – электродвигатель.

$i$  – термоэлектрический термометр;  $p_0$  – статическое давление;  $p_0^*$  - полное давление;  $t_0^*$  - температура потока;  $t_i^*$  - температура нагревательного участка.

стенки на поверхности теплообмена определяется в 14 точках хромель-алюмелевыми термопарами, расположенными неравномерно по длине исследуемой поверхности, а температура потока на входе в экспериментальный участок измеряется образцовым термометром. Для контроля тепловых потерь на обратной стороне экспериментального участка, а также на его боковых поверхностях установлены дополнительные термопары. Сигнал от термопар через коммутатор измерительных сигналов Ф799/1 подается к цифровому вольтметру. Полное и статическое давление на входе, при помощи которых определяется скорость потока и расход воздуха перед экспериментальным участком, измеряются микроманометром типа АЛД.

Скорость потока на входе в экспериментальный участок  $W$  изменялась от 4,1 до 16,6 м/с, число Рейнольдса  $Re_D$ , построенное по диаметру углубления  $D$  - от 6400 до 26400.

### ***Двойной ряд углублений***

Перед экспериментальным участком устанавливалась сменная прямоугольная пластина из органического стекла, на которой выполнены два ряда поверхностных углублений (генераторов вихрей) сферической, цилиндрической, квадратной и ромбовидной формы. Пластина с углублениями могла передвигаться в поперечном направлении, что позволяло определять коэффициент теплоотдачи за углублением в различных сечениях.

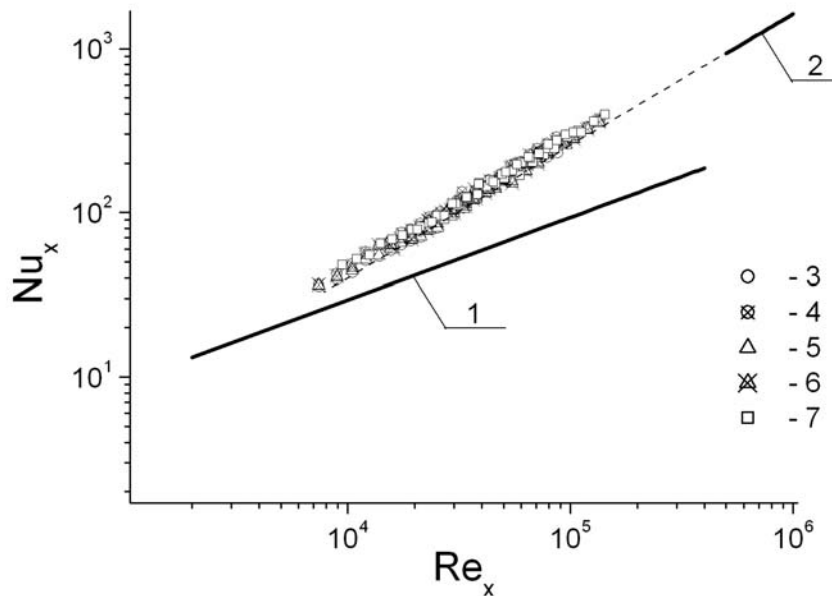
Углубления располагались в шахматном порядке таким образом, что их центры образуют равнобедренный треугольник с основанием, равным поперечному шагу  $S_x$ . Все углубления имели диаметр  $D=25$  мм (для сферических и цилиндрических углублений), для квадратных и ромбовидных углублений длина диагонали составляла 31,1 мм и относительный шаг в продольном направлении  $S_z/D - 0,44$ . В поперечном направлении относительный шаг имел два значения; первое из них,  $S_x/D=2,0$  для случая, когда углубления второго ряда полностью заполняют пространство между углублениями первого ряда (нет взаимного «перекрытия»). Во втором случае поперечный шаг имел меньшее значение ( $S_x/D=1,50$ ), что формировало «перекрытие» сечений первого и второго ряда, составляющее 50% по поперечной координате. Относительная глубина  $h/D$  для сферических и цилиндрических углублений составляла 0,20 и 0,30, а для квадратной и ромбовидной – 0,30.

Измерения теплообмена производились за углублениями первого и второго ряда (на оси симметрии), а также на линии, характеризующей точку контакта углублений ( $S_x=2,0$ ) или область их пересечения ( $S_x=1,50$ ).

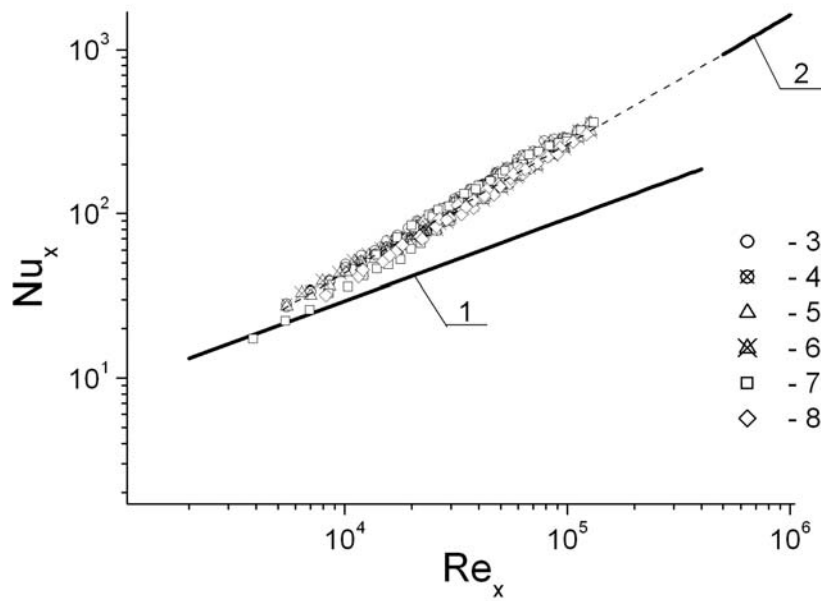
### ***Теплообмен за двойным рядом углублений ( $S_x/D=2,0$ )***

Результаты измерения локального теплообмена без «перекрывания» углублений представлены на рис. 2, где эмпирические зависимости 1 и 2 характеризуют теплообмен на плоской пластине при ламинарном и турбулентном течении [4]. Число Рейнольдса  $Re_x$  построено по скорости потока  $W$  и координате  $x$ , которая отсчитывается от задней кромки углубления первого/второго ряда (рис. 2а, в), или точки контакта отверстий первого и второго ряда (рис. 2б). Число Нуссельта  $Nu_x$  построено по коэффициенту теплоотдачи на соответствующей линии и расстоянию  $x$ . В рассматриваемом случае гидродинамика каждого углубления в двойном ряду имеет определенную аналогию с обтеканием одиночного углубления, а некоторое отличие состоит во взаимном влиянии (интерференции) углублений, которое в данном случае представляется незначительным.

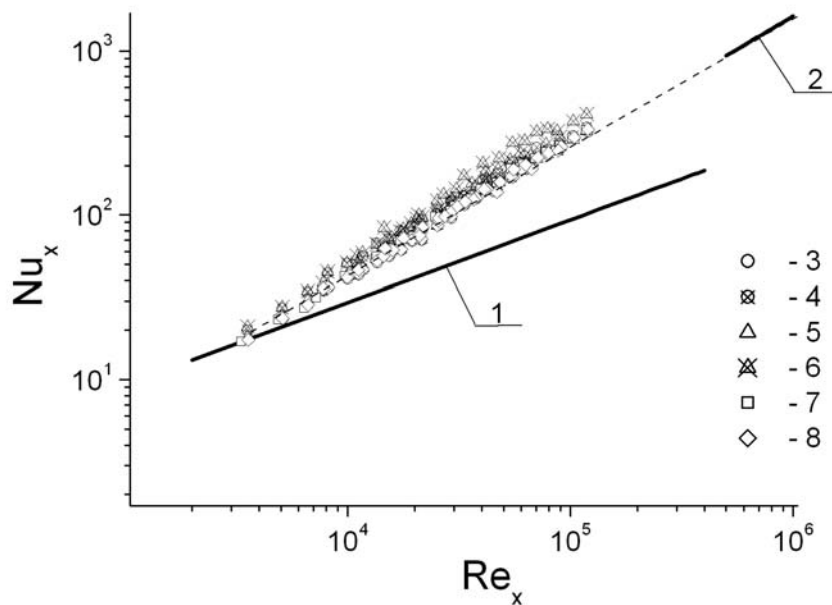
Анализ полученных результатов показывает, что в исследованном диапазоне изменения числа Рейнольдса ( $Re_x \approx 2000 \dots 110000$ ) имеет место «байпасный» переход к турбулентному режиму, который характеризуется отсутствием переходной области.



**a**



б



в

Рис. 2. Теплообмен за двумя рядами углублений без «перекрывтия» сечений ( $S_x/D=2,0$ ).  
 а – на оси симметрии за первым рядом углублений; б – на линии между углублениями;  
 в – на оси симметрии за вторым рядом углублений.

1 – Ламинарное течение ( $Nu = 0,332Re^{0,5}Pr^{0,33}$ ); 2 – Турбулентное течение  
 ( $Nu = 0,029Re^{0,8}Pr^{0,33}$ ); 3 – Сфера  $h/D = 0,3$ ; 4 – Сфера  $h/D = 0,2$ ; 5 – Цилиндр  $h/D = 0,3$ ;  
 6 – Цилиндр  $h/D = 0,2$ ; 7 – Квадрат  $h/D = 0,3$ ; 8 – Ромб  $h/D = 0,3$ .

Судя по теплообмену, возникновение турбулентности за углублениями первого ряда для всех конфигураций происходит при  $Re_x \approx 3200$ , а в промежутке между углублениями даже несколько раньше – при  $Re_x \approx 2700$ , что обусловлено влиянием вихревых структур, формирующихся при взаимодействии углублений первого и второго ряда. После второго ряда переход к турбулентности для всех конфигураций (кроме квадратной) происходит при  $Re_x \approx 3200$ , а для квадратной – при  $Re_x \approx 5000 \dots 6000$ . Приведенные выше значения критических чисел Рейнольдса значительно меньше данных для плоской пластины, где переход к турбулентному режиму завершается при  $Re_x \approx 10^6$  [5].

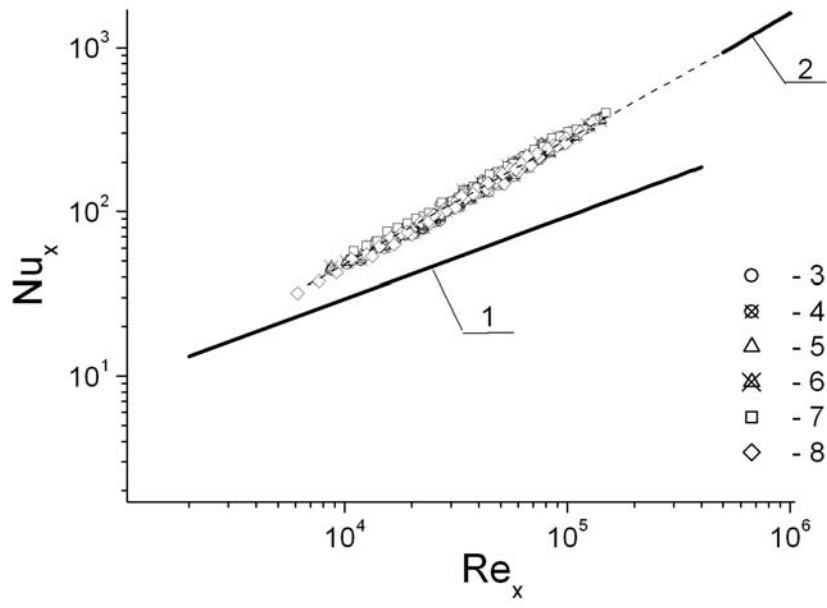
Полученные результаты свидетельствуют о том, что в исследованном диапазоне форма углубления и его глубина не оказывают существенного влияния на интенсивность теплообмена за двойным рядом – опытные данные достаточно плотно группируются около общей зависимости и их различие находится в пределах погрешности эксперимента. Этот вывод отличается от данных, полученных для одиночных углублений и многорядных систем, где влияние формы и глубины проявляется достаточно заметно [1, 3].

Анализ опытных данных по теплообмену показывает, что при  $Re_x > 20000$  интенсивность теплообмена слабо зависит от формы углубления и его глубины, хотя можно заметить, что данные для ромба и квадрата располагаются несколько ниже данных для сферы и цилиндра (рис. 2а, б). При  $Re_x < 20000$  за первым рядом (рис. 2а) данные для всех глубин и конфигураций описываются единой зависимостью, а в области между углублениями (рис. 2б) и за углублением второго ряда (рис. 2в) опытные данные для квадрата и ромба располагаются заметно ниже результатов для сферы и цилиндра.

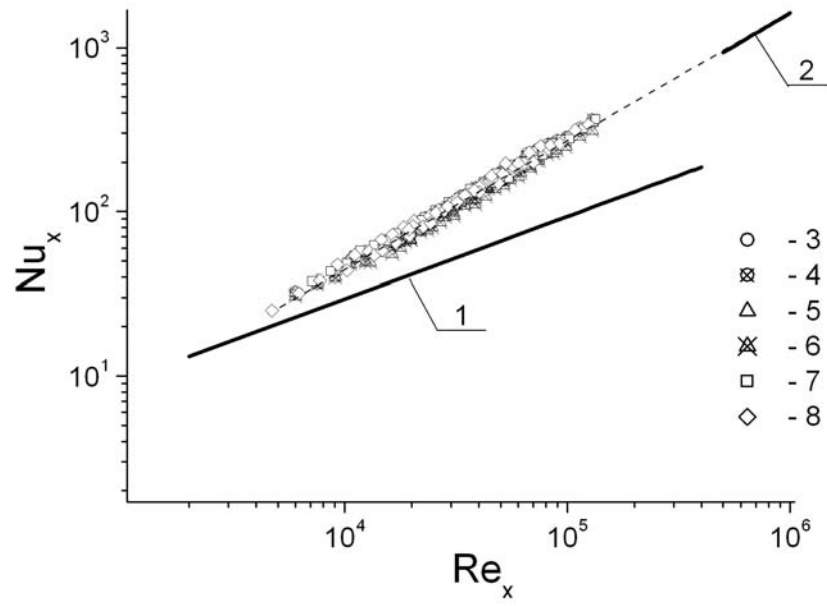
### ***Теплообмен за двойным рядом углублений ( $S_x/D=1,5$ )***

Результаты измерения локального теплообмена при взаимном «перекрытии» углублений первого и второго ряда представлены на рис. 3. Как следует, «перекрытие» уменьшает величину критического числа Рейнольдса, который характеризует «байпасный» переход к турбулентному течению. За углублением первого ряда, а также в области «перекрытия» углублений переход к турбулентности происходит при  $Re_x \approx 2200$ . За углублением второго ряда переход к турбулентности для всех конфигураций происходит при  $Re_x \approx 3300$ . Снижение критических чисел Рейнольдса свидетельствует о более сильном взаимодействии вихревых структур первого и второго ряда при «перекрытии» углублений.

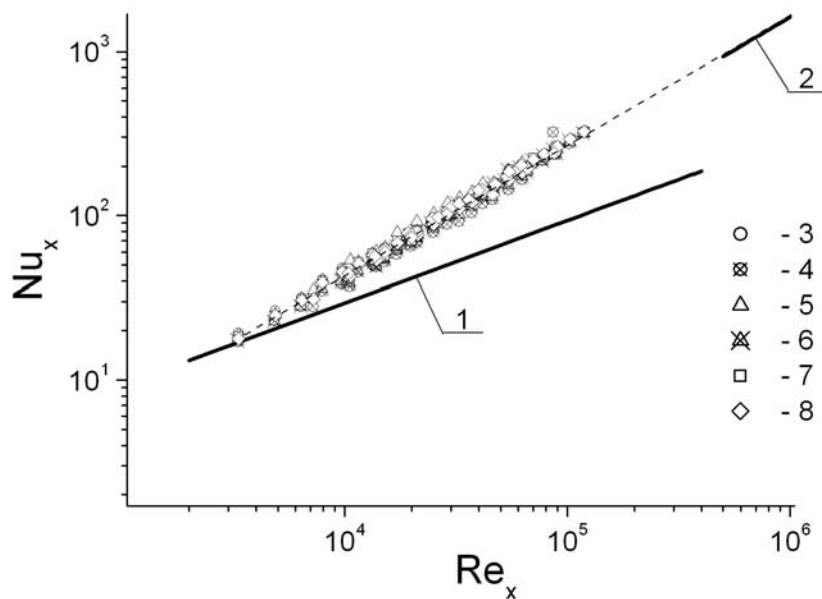
Как следует из полученных результатов, интенсивность теплообмена за двойным рядом углублений с «перекрытием» сечений слабо зависит от формы углубления и его глубины, для всех измерительных сечений (рис. 3) он примерно одинаков.



a



b



**в**

Рис. 3 - Теплообмен за двумя рядами углублений с «перекрытием» сечений ( $S_x/D=1,5$ ): а – на оси симметрии за первым рядом углублений; б – на кромке углублений; в – на оси симметрии за вторым рядом углублений.

1 – Ламинарное течение ( $Nu = 0,332Re^{0,5}Pr^{0,33}$ ); 2 – Турбулентное течение ( $Nu = 0,029Re^{0,8}Pr^{0,33}$ ); 3 – Сфера  $h/D = 0,3$ ; 4 – Сфера  $h/D = 0,2$ ; 5 – Цилиндр  $h/D = 0,3$ ; 6 – Цилиндр  $h/D = 0,2$ ; 7 – Квадрат  $h/D = 0,3$ ; 8 – Ромб  $h/D = 0,3$ .

Сравнение с опытными данными, представленными на рис. 2, показывает, что за углублением первого ряда и в области между углублениями интенсивность теплообмена для случаев  $S_x/D = 2,0$  (без «перекрытия») и  $S_x/D = 1,50$  (с «перекрытием») практически одинакова. Однако за углублением второго ряда теплообмен в случае «перекрытия» несколько ниже, чем без «перекрытия». Повидимому, это обусловлено «подавлением» флуктуаций второго ряда, флуктуациями вышележащего первого ряда [1].

### **Выводы**

1. За углублениями цилиндрической, сферической, квадратной и ромбовидной формы, расположенными в первом и втором ряду двойного ряда, переход к турбулентности происходит по «байпасному» механизму.

2. «Перекрытие» углублений активизирует переход к турбулентности; при отсутствии «перекрытия» переход происходит при  $Re_x=2700...6000$ , а в системе с «перекрытием» - при  $Re_x=2200...3300$ .



3. Для исследованных условий глубина и форма углубления оказывают незначительное влияние на интенсивность теплообмена за двойным рядом углублений.

4. «Перекрытие» углублений интенсифицирует теплообмен только за углублениями второго ряда.

### *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. *Кикнадзе Г.И., Гачечиладзе И.А., Алексеев В.В.* Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация тепломассообмена, сопровождающая это явление. – М.: Изд. Московского энергетического ун-та, 2005. – 83 с.
3. *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.
4. *Уонг Х.* Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. – М.: Атомиздат, 1979. – 213 с.
5. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М.: Изд. Наука, 1969. – 742 с.