

УДК 532.5.013.12

ОНИЩЕНКО В.Н., ХАЛАТОВ А.А.

Институт технической теплофизики НАН Украины

## ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ ОБТЕКАНИЯ ДВУХРЯДНОЙ СИСТЕМЫ УГЛУБЛЕНИЙ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

### Часть 2. Особенности физической структуры

Наведено опис фізичної структури потоку в двурядній системі заглиблень. Геометрична форма заглиблення, його глибина та швидкість обтікання суттєво впливають на структуру вихрового потоку у заглибленні.

Приведено описание физической структуры потока в двухрядной системе углублений. Геометрическая форма углубления, его глубина и скорость обтекания оказывают значительное влияние на структуру вихревого потока в углублении.

Description of physical structure of stream is resulted in the double-row system of dimples. The geometrical form of dimple, his depth and speed of flowing around, render considerable influence on the structure of vortex stream in dimple.

$D$  – диаметр углубления, мм;

$h$  – глубина углубления, мм;

$H$  – высота канала, мм;

$W_{\infty}$  – скорость потока на входе в канал, м/с;

$Re_{2H} = W \cdot 2H / \nu$  – число Рейнольдса;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с.

Експериментальне дослідження трьохмерної вихревої структури в углубленні являється складною задачею і потребує використання дорогостоячого експериментального обладнання і спеціальних методик. Для розуміння фізичної природи вихревої структури в углубленнях різної форми при їх розташуванні в двурядній системі і розуміння механізму поведінки гідрравлічного опору застосовувалося чисельне моделювання трьохмерного потоку, яке має

#### Индексы:

$x, y$  – прямокутні координати;

$\infty$  – параметри в ядрі потоку.

високою ступенню достовірності. Для цього використовувався комерційний ліцензійний пакет прикладних програм Phoenics (Великобританія).

Область моделювання представляє собою двурядну систему углублень сферическої, циліндрическої і квадратної форми. Сеточна модель складається з гексаедральної сітки, налічує 148 821 ячею. Область моделювання і фрагмент розрахункової сітки представлено на рис. 1.

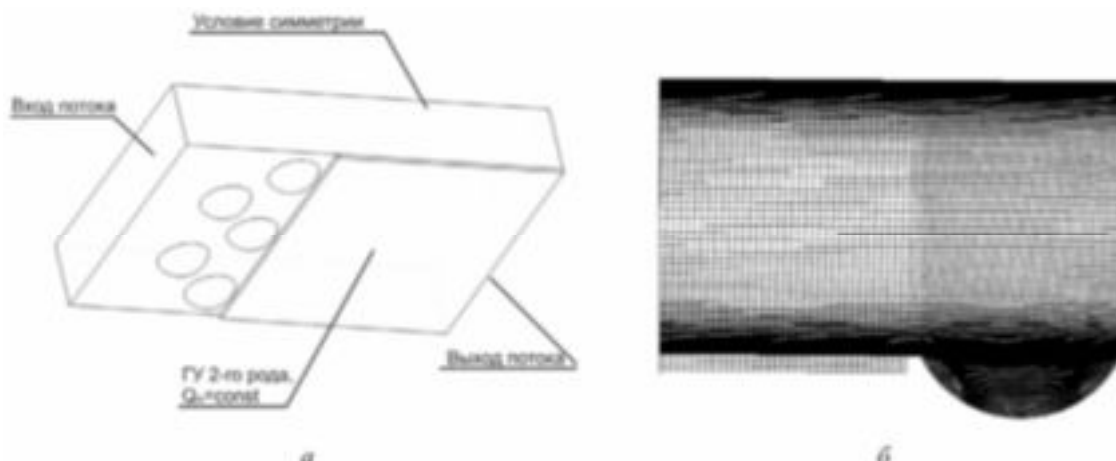
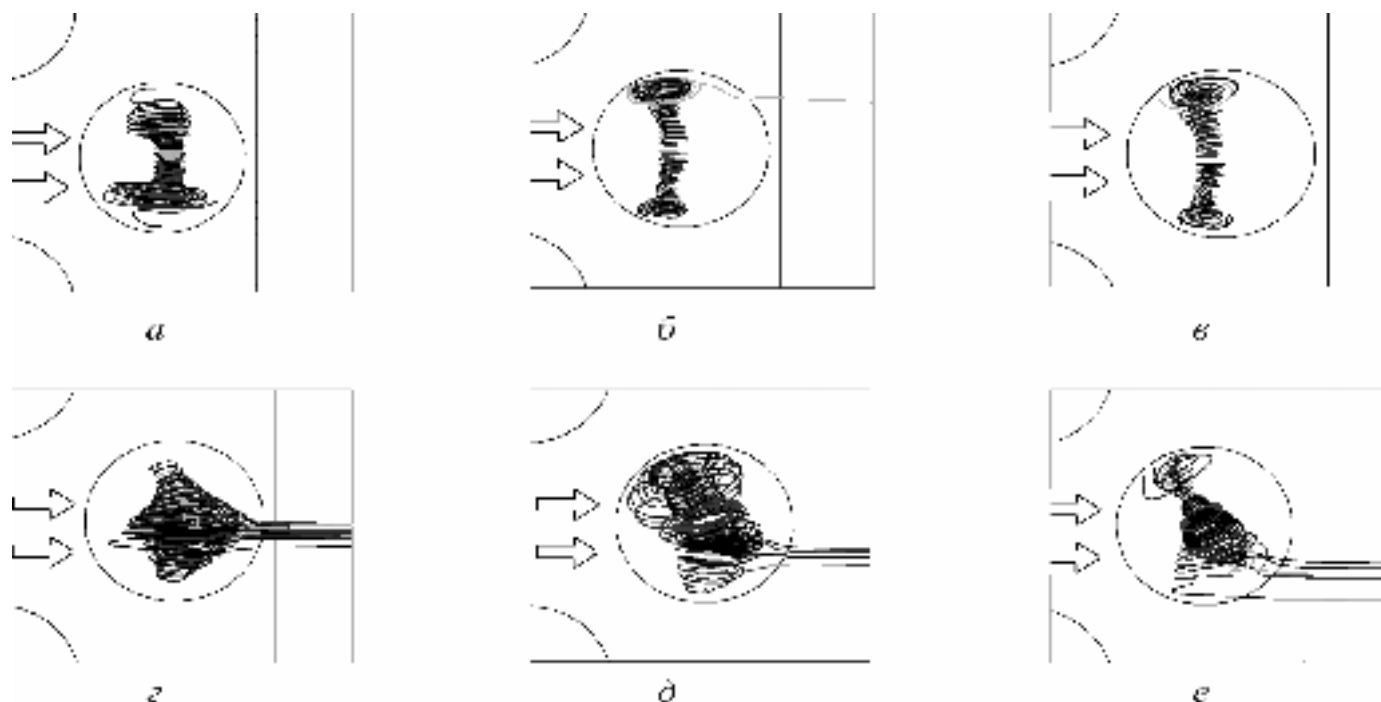


Рис. 1. Геометрическая модель (а) и фрагмент сетки (б) расчетной области моделирования.



**Рис. 2. Линии тока в сферическом углублении второго ряда:**  
***a, б, в:*  $h/D = 0,20$ ; *з, д, е:*  $h/D = 0,30$ ; *a, з:*  $W_\infty = 4,0$  м/с,  $Re_{2H} = 17435$ ,  $Re_D = 6400$ ;  
*б, д:*  $W_\infty = 9,0$  м/с,  $Re_{2H} = 39200$ ,  $Re_D = 14400$ ; *в, е:*  $W_\infty = 16,0$  м/с,  $Re_{2H} = 69700$ ,  $Re_D = 25600$ .**

На рис. 2 – 4 представлены результаты численного расчета вихревой структуры воздушного потока в двухрядных углублениях сферической, квадратной и цилиндрической формы. Геометрические размеры углублений соответствовали двухрядным системам, исследованным в предыдущем разделе [1].

На входе модели задавалась скорость потока  $W_\infty = 4...16$  м/с, температура набегающего потока составляла  $T_\infty = 20^0\text{C}$ . Модель турбулентности выбиралась на основании сравнительных расчетов, результаты сравнивались по теплообмену за системой углублений на пластине с экспериментальными данными. Наименьшим отклонением от экспериментальных данных по теплообмену характеризуется  $k - \epsilon$  модель низких чисел Рейнольдса. Поэтому дальнейшее моделирование режимов течения проводилось с использованием этой модели.

В системе сферических углублений глубиной  $h/D = 0,20$  (рис. 2, *a, б, в*) при различных скоростях обтекания набегающий поток втягивается внутрь углубления по ходу потока, закручивается в периферийных направлениях, образуя симметричный

вихрь, и выбрасывается в основной поток симметрично с двух сторон углубления.

Характер вихревой структуры в сферическом углублении глубиной  $h/D = 0,30$  (рис. 2, *з, д, е*) отличается от описанного выше. В этом случае всасывание потока в углубление происходит на периферии с закруткой вихрей по направлению к центру, а выброс в основной поток – в узкой зоне за углублением. При малой скорости обтекания вихревая структура имеет ромбовидную структуру (рис. 2, *з*). При увеличении скорости в углублении возникает несимметричная вихревая структура (рис. 2, *д, е*), а зона выбросов нестационарна и колеблется из левой полусферы углубления в правую. Такая структура вихревого потока способствует росту гидравлического сопротивления сферического углубления с увеличением его глубины.

При малой скорости обтекания, структура вихревого потока в квадратном углублении глубиной  $h/D = 0,20$  и  $0,30$  (рис. 3, *a, з*) примерно одинакова: поток входит в углубление по ширине задней кромки, движется в обратном направлении и выбрасывается наружу ближе к передней части углубления. Формируемая вихревая структура

характеризуется системой параллельных спиральных линий, причем масштаб вихревой системы в углублении с  $h/D = 0,30$  больше, чем в углублении с  $h/D = 0,20$ .

При увеличении скорости обтекания в углублении с  $h/D = 0,20$  наблюдается закрутка потока в две спирали (рис. 3, б) с оттеснением потока из центральной области и его выбросом на периферии. Кроме того, заметно начало разделения вихревых структур. В углублении с  $h/D = 0,30$  (рис. 3, д) сохраняется вихревая система с параллельно-спиральными линиями, входом потока

со стороны задней кромки и выбросом около передней. При дальнейшем увеличении скорости потока происходит трансформация вихревой структуры: масштаб вихревой структуры в углублении с  $h/D = 0,20$  уменьшается, а зона разделения вихрей становится заметной (рис. 3, в). В углублении с  $h/D = 0,30$  формируется вихревая структура подобно той, которая представлена на рис. 3, б. В обоих случаях выброс вихревой структуры происходит на периферии углубления, при этом пульсаций вихревой структуры не наблюдается.

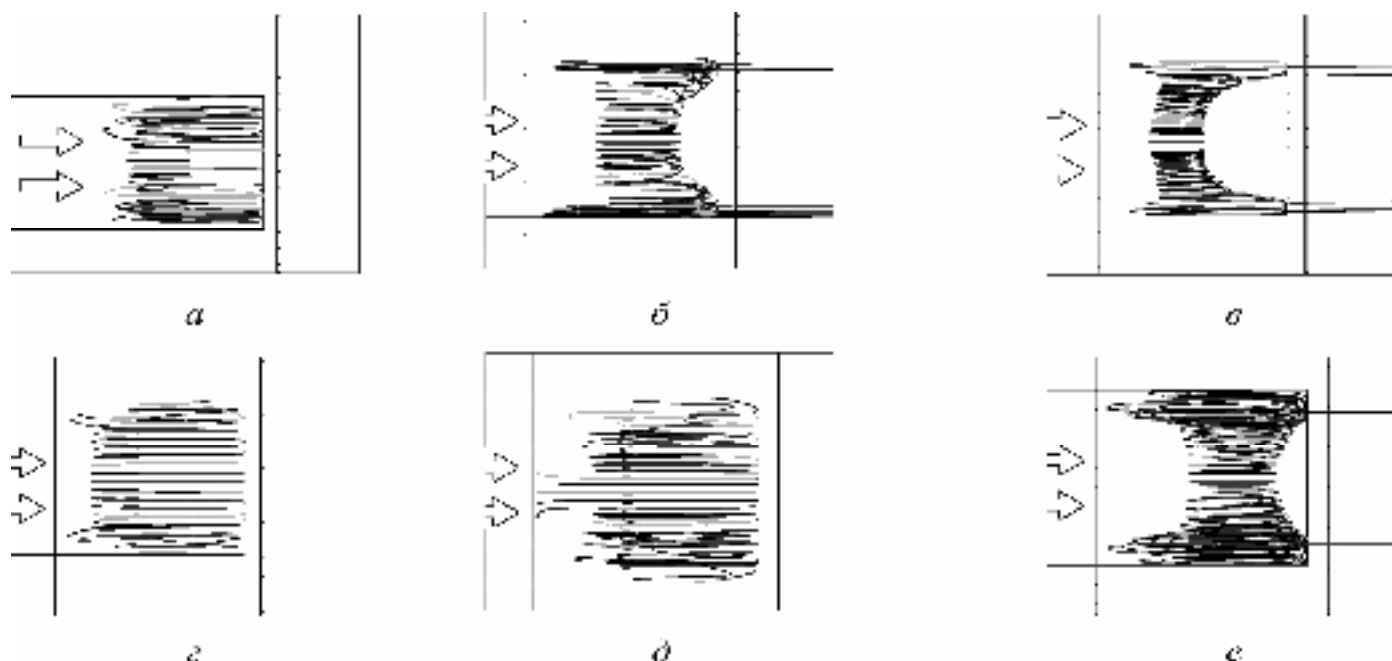


Рис. 3. Линии тока в квадратном углублении второго ряда:

**а, б, в:**  $h/D = 0,20$ ; **г, д, е:**  $h/D = 0,30$ ; **а, г:**  $W_\infty = 4,0$  м/с,  $Re_{2H} = 17435$ ,  $Re_D = 6400$ ;  
**б, д:**  $W_\infty = 9,0$  м/с,  $Re_{2H} = 39200$ ,  $Re_D = 14400$ ; **в, е:**  $W_\infty = 16,0$  м/с,  $Re_{2H} = 69700$ ,  $Re_D = 25600$ .

Как следует из рассмотренного выше, при малой скорости обтекания (рис. 3, а, г) вихревая структура практически одинакова, поэтому глубина не оказывает влияния на величину коэффициента гидравлического сопротивления. Как было показано, при увеличении скорости потока более глубокие углубления демонстрируют меньшее гидравлическое сопротивление. По-видимому, это происходит за счет большего масштаба вихревых структур (рис. 3, д, е), которые создают благоприятные условия для снижения гидравлических потерь за счет эффекта скольжения основного потока.

При малой скорости обтекания цилиндрических углублений глубиной  $h/D = 0,20$  (рис. 4, а) поток входит в углубление в центральной области, а выброс вихревой структуры осуществляется в обе стороны. Отрывная зона в задней части углубления не формируется, при этом масштаб вихревой структуры больше, чем в сферическом углублении такой же глубины (рис. 2, а).

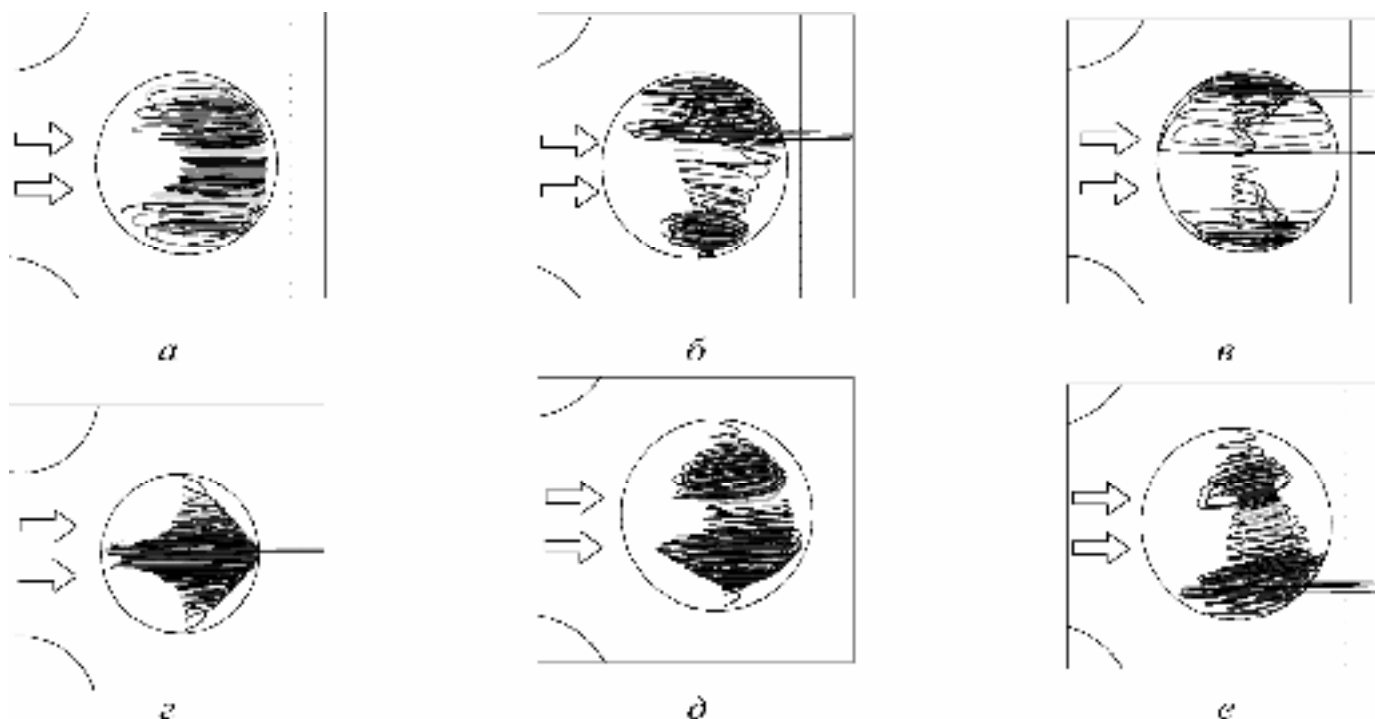
Вихревая структура потока в более глубоком цилиндрическом углублении (рис. 4, г) аналогична структуре в сферическом углублении такой же глубины (рис. 2, г): зона всасывания потока находится

на периферии, а выброс вихревой структуры – в узкой центральной части углубления.

При  $W_\infty = 9,0$  м/с (рис. 4, б) структура потока в углублении глубиной  $h/D = 0,20$  подобна структуре, показанной на рис. 4, а с выбросом вихревой структуры в две стороны в периферийных областях углубления. При этом происходит заметное разделение вихревой структуры на две несимметричные вихревые области около боковых поверхностей углубления, где происходит выброс вихревых структур в основной поток. В углублении с  $h/D = 0,30$  (рис. 4, д) отмечается только начало разделения вихревой структуры на две симметричные

вихревые области с выбросом вихревых структур в обе стороны.

При дальнейшем увеличении скорости обтекания в углублении с  $h/D = 0,20$  четко выделяются две слабо связанные вихревые области (рис. 4, в), в которых происходит спиралевидная закрутка линий тока и выброс потока в периферийных направлениях. Вихревая структура потока в цилиндрическом углублении с  $h/D = 0,20$  является слабо пульсирующей. Поток в углублении с  $h/D = 0,30$  нестационарный с несимметричной вихревой структурой (рис. 4, е) и различным масштабом вихревой структуры отдельных ветвей.



**Рис. 4. Линии тока в цилиндрическом углублении второго ряда:**  
 а, б, в:  $h/D = 0,20$ . г, д, е:  $h/D = 0,30$ ; а, г:  $W_\infty = 4,0$  м/с,  $Re_{2H} = 17435$ ,  $Re_D = 6400$ ;  
 б, д:  $W_\infty = 9,0$  м/с,  $Re_{2H} = 39200$ ,  $Re_D = 14400$ ; в, е:  $W_\infty = 16,0$  м/с,  $Re_{2H} = 69700$ ,  $Re_D = 25600$ .

Рассмотренная выше структура вихревого потока определяет характер поведения коэффициента гидравлического сопротивления двухрядной системы [1]. В области  $Re_{2H} < 39200$  сопротивление, как и для сферических углублений, растет с увеличением глубины, однако при дальнейшем увеличении скорости потока имеет место обратный эффект. Таким образом, структура потока, представленная на рис. 4, д, е, создает благоприятные условия для снижения потерь энергии. По-видимому, это обу-

словлено большим масштабом вихревых структур, выступающих в основной поток и создающих условия для «качения» внешнего потока по вихревым структурам.

### Выводы

1. Геометрическая форма углубления, его глубина и скорость обтекания оказывают значительное влияние на структуру вихревого потока в углублении. Форма вихревой структуры и ее масштаб

играют определяющую роль в формировании условий для «качения» внешнего потока по вихревым структурам и снижения коэффициента сопротивления.

2. В области больших скоростей ( $Re_{2H} > 39200$ ) наименьшим сопротивлением обладают сферические ( $h/D=0,20$ ) и цилиндрические ( $h/D=0,30$ ) углубления, характеризующиеся различной формой вихревой структуры. Для сферического углубления – это втягивание потока в центральной части углубления, его закрутка и выброс вихревой структуры в основной поток на периферии по двум направлениям. В цилиндрическом углублении – это начало разделения вихревой структуры на две симметричные вихревые области или формирование нестационарной и несимметричной вихревой структуры. В обоих случаях выброс вихревых структур осуществляется в обе стороны на периферии углубления.

3. При малой скорости обтекания ( $Re_{2H} = 17200 \dots 29000$ ) наименьшим сопротивлением обладают цилиндрические углубления с  $h/D = 0,20$ , которые характеризуются отсутствием отрывной зоны в задней части углубления. В области  $Re_{2H} = 29000 \dots 39200$  наименьшее сопротивление имеют сферические углубления с относительной глубиной  $h/D = 0,20$ , характеризующиеся втягиванием потока в центральной части, закруткой потока в двух направлениях и его выбросом в периферийной области углубления.

#### ЛИТЕРАТУРА

*Онищенко В. Н., Халатов А. А.* Гидравлическое сопротивление и особенности обтекания двухрядной системы углублений различной формы. Часть 1. Гидравлическое сопротивление. — К.: — Промышленная теплотехника, 2009. — Т.31, № 4. — С. 12 – 17.

*Получено 23.02.2009 г.*