

Гидродинамическая модель должна предсказывать количество газа, проникающего с погруженной струей жидкости, размер области смешивания, касательные напряжения в ней и размеры пузырей.

Для расчета гидродинамических характеристик погруженной струи применялись модель течения двухфазной среды с дисперсной газовой фазой и постоянным размером пузыря (Two Fluid Model) и модель, учитывающая распад и слияние пузырей (Inhomogeneous Multiple Size Group Model) [2], [3].

Расчеты проводились в ANSYS CFX. Получена удовлетворительная сходимости с экспериментальными данными [1].

#### Список литературы:

1. Evans G. M. A study of a plunging jet bubble column: PhD Thesis 1990 [Электронный ресурс] / G. M. Evans. – The University of Newcastle. Режим доступа: <https://nova.newcastle.edu.au/vital/access/manager/Repository/uon:722>
2. Inhomogeneous MUSIG Model-a Population Balance Approach for Polydispersed Bubbly Flows [Электронный ресурс] / T. Frank, P. J. Zwart, J. M. Shi, E. Krepper, D. Lucas, U. Rohde. – International Conference Nuclear Energy for New Europe 2005, Bled, Slovenia, September 5-8, 2005. – Режим доступа: [http://www.drthfrank.de/publications/2005/Frank\\_NENE\\_2005\\_067.pdf](http://www.drthfrank.de/publications/2005/Frank_NENE_2005_067.pdf)
3. Ansys CFX Solver Theory Guide [Электронный ресурс] / ANSYS Inc, 2012. – Режим доступа: [http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/140/cfx\\_thry.pdf](http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/140/cfx_thry.pdf)

УДК 532.54.013.2

Яхно<sup>1</sup> О.М., д.т.н., проф., Гнатів<sup>2</sup> Р.М., д.т.н., доц., Щербата<sup>2</sup> Н.В., Гнатів<sup>3</sup> І.Р.

1- КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

2- НУ “Львівська політехніка”, м. Львів, Україна

3- Стрийський коледж Львівського НАУ, м. Львів, Україна

### ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ЛОКАЛЬНИХ ШВИДКОСТЕЙ ЗА РОЗГІННОГО РУХУ РЕАЛЬНОЇ РІДИНИ ЗІ СТАНУ СПОКОЮ

*В роботі представлені результати експериментальних досліджень розгінного руху рідини в циліндричній трубі зі стану спокою. Для визначення локальних характеристик нестационарного потоку використано термоанемометричну апаратуру. Встановлено, що за прискореного руху рідини зі стану спокою до виникнення турбулентності зберігається рівномірний розподіл швидкостей в перерізі труби і лише в тонкому пристінному шарі спостерігаються градієнти швидкостей. У момент переходу до турбулентного режиму з'являється переломна точка на графіку зміни величини середньої швидкості, а розподіл швидкостей та інтенсивність турбулентності зазнають значних змін в порівнянні зі стаціонарними турбулентними потоками. Турбулентність генерується в пристінній ділянці та поширюється до центру перерізу трубопроводу практично з постійною швидкістю.*

**Ключові слова:** неусталений, нестационарний, рух рідини, структура потоку.

Проведено експериментальні дослідження розподілу швидкостей в живому перерізі трубопроводу для вдосконалення методики розрахунку структур неусталених потоків рідин в круглих трубопроводах. В роботі представлені результати вимірювання локальних швидкостей по радіусу труби термоанемометричним способом за розгінного руху рідини зі стану спокою.

Досліди проведені на експериментальній установці, основні вузли якої описані в роботі [1]. Для визначення локальних характеристик нестационарного потоку застосовувалася апаратура фірми "DISA". Як датчики для вимірювання локальної швидкості в трубі був застосований термоанемометричний датчик 55R42, а для вимірювання дотичних напружень - датчик 55R46, змонтований врівень з внутрішньою стінкою труби.

На рис. 1 наведені графіки зміни осередненої за ансамблем локальної швидкості в часі для різних точок живого перерізу. Кількість дослідів в одному ансамблі була від 25 ( $r/R = 0$ ) до 47 ( $r/R = 0,92$ ). При обробці експериментальних даних крім усереднення за

ансамблем було проведено додаткове згладжування осередненням в часі по п'яти сусідніх точках. Для отримання більш гладких функцій шуканої характеристики в ансамблі необхідно мати набагато більше дослідів, особливо в пристінній ділянці. На графіках чітко видно моменти зміни режиму течії від ламінарної в турбулентну, які на рисунку позначені чорними трикутниками.

Наведені на рисунку залежності відносяться до початкового тиску в системі  $p_0 = 1,56 \times 10^5 \text{ Н/м}^2$ , за часу відкриття швидкодіючого клапана  $t = 0,01 \text{ с}$ . Як показують дані вимірювання тиску в розглянутому нестационарному процесі течії рідини, в момент виникнення турбулентності хвильові явища, обумовлені стисливістю рідини, згасали і рідину можна розглядати як нестисливу. При цьому як швидкості в точках, так і середня швидкість змінюються майже за лінійним законом з прискоренням  $dV / dt = 7,15 \text{ м/с}^2$ . Виявляється, що виникаюча в пристінній зоні турбулентність течії поширюється до

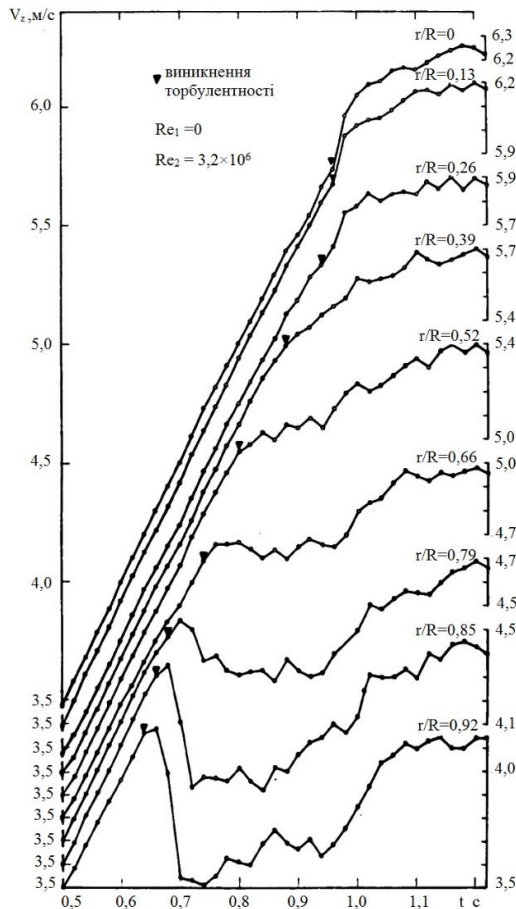


Рис. 1 – Зміна поздовжніх швидкостей  $V_z$  в різних точках поперечного перерізу ( $\xi = 0,47$ )

центру перерізу труби практично з постійною швидкістю.

Як видно, виникнення турбулентності в даній точці викликає різке відхилення функцій швидкості від лінійного закону.

Фізичний характер такої течії в стаціонарних умовах описують коефіцієнтом переміжності  $\gamma$  [2]. Коефіцієнт  $\gamma$  визначається в такий спосіб

$$\gamma = S_T / S = 1 - (r/R)^2, \quad (1)$$

де  $S$  і  $S_T$  - площа перерізу труби і площа перерізу, охоплена турбулентністю в даний момент

часу;  $R$  і  $r$  - радіус труби і радіус точки на місці переходу в турбулентний режим.

За прискореного руху рідини з прискореннями від 1 до 12  $\text{м/с}^2$  із стану спокою до виникнення турбулентності зберігається рівномірний розподіл швидкостей по перерізу труби і лише в тонкому пристінному шарі спостерігаються градієнти швидкостей. Спостерігається затягування ламінарного режиму течії з подальшим переходом до турбулентного при миттєвих числах  $Re$ , які на кілька порядків перевищують критичне  $Re$  в стаціонарних умовах [3].

Різкий перехід в характеристиці дотичного напруження на стінці труби  $\tau_0$  за зміни ламінарного режиму турбулентним

спостерігається також в характеристиках локальних швидкостей. У момент переходу до турбулентного режиму течії з'являється критична точка на графіку залежності величини середньої швидкості, а розподіл швидкостей і інтенсивність турбулентності зазнають значних змін в порівнянні зі стаціонарними турбулентними потоками.

#### Література

1. Яхно О.М. Залежність середньої швидкості потоку від зростання тиску при неусталеному русі рідини в трубопроводі/ О.М. Яхно, Р.М. Гнатів //Вісник НТТУ "КПІ" Серія машинобудув.-2013.-№ 3(69).- С. 198-202.
2. Маграквелидзе Т. К вопросу распределения скоростей при турбулентном течении жидкости в круглой трубе/ Т. Маграквелидзе// Сб. трудов Ин-т систем упр. АН Грузии.- 2005.- № 9.- С. 96-101.

3. Гнатів Р.М. Експериментальне визначення пульсації дотичних напружень на стінці трубопроводу при перехідному режимі руху рідини/ Р.М. Гнатів// Промислова гідраліка і пневматика.- 2012.- №3(37).- С. 52-54.

УДК 621.671

**Косторной С.Д.** д.т.н., проф., **Косторной А.С.** к.т.н, **Хатунцев А.Ю.** к.т.н.,  
**Бондарев А.О.**

ПАО “ВНИИАЭН” Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт атомного и энергетического насосостроения, г. Сумы, Украина

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВОГО ТЕЧЕНИЯ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ НАСОСЕ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

*В работе выполнено моделирование вихревого течения идеальной жидкости в рабочем колесе и спиральной камере центробежного насоса удельной быстроходности  $n_s = 40-400$  с целью развития научно обоснованного метода проектирования проточной части и определения гидродинамических параметров для совершенствования энергетических и динамических характеристик на этапе проектирования. Рассчитаны мгновенные линии тока и вихревое поле в проточной части, исследовано их взаимное расположение. Построенное вихревое поле позволяет оценить потери из-за трения на поверхности и диссипации вихрей в потоке.*

**Ключевые слова:** вихревое течение, идеальная жидкость, центробежный насос, метод граничных элементов.

Основоположником вихревых методов является метод дискретных вихрей для моделирования течений идеальной жидкости [1-3]. Метод был успешно применен для расчетов нестационарного обтекания тел со сходом вихревого следа на острых краях [4].

При моделировании течения жидкости в различных каналах, или замкнутых пространствах, вихревое распределение обычно считается конечным и распределенным на внутренней границе, на которой имеется тангенциальный разрыв вектора скорости. Величина скачка тангенциальной скорости определяется из интегрального уравнения, которое обеспечивает условие отсутствия течения через поверхность тела.

### **Постановка задачи**

Решить прямую 3D задачу течения в центробежном насосе с учетом взаимного влияния элементов проточной части. Задача решается в дискретные моменты времени. Используется модель вихревой идеальной несжимаемой жидкости для стационарного течения:

$$\begin{aligned}(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} &= \mathbf{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p, \\ \text{div} \mathbf{V} &= 0, \\ \text{rot} \mathbf{V} &\neq 0.\end{aligned}$$

Рассматривается течение в рабочем колесе центробежного насоса со спиральным отводом  $b$  и в ступени центробежного насоса.

Граничные условия:

- на поверхности проточной части  $S$  в контрольных точках с радиус-векторами  $\mathbf{r}_i$ , записанное в виде:

$$\mathbf{V}(\mathbf{r}_i) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{r}_i) = 4\pi \cdot f(\mathbf{r}_i), \quad (1)$$

где  
 $f(\mathbf{r}_i) = 0$ , на неподвижной поверхности;