

УДК 532.54.013.2

Турбулентні напруження за прискороного руху реальної рідини в трубах

Яхно¹ О.М., д.т.н., проф., Гнатів² Р.М., д.т.н., доц.

1- НТУУ “Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”, м. Київ, Україна

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

Анотація: В статті розглянуто питання дослідження зміни в часі рейнольдсових напружень при русі рідини зі стану спокою. Зазначена гідродинамічна характеристика має першочергове значення для замикання рівнянь, які описують стаціонарні і нестаціонарні турбулентні течії.

В роботі розглядаються результати експериментального визначення турбулентних напружень, що виникають після зміни режиму течії, коли рух рідини починається зі стану спокою. Зроблено висновки, що миттєві характеристики розподілу рейнольдсових напружень значно відрізняються від отриманих методом усереднення за ансамблем. Останні, в свою чергу, значно відрізняються від квазістаціонарних. Збільшення кількості реалізацій в ансамблі N призводить до більш гладкої функції досліджуваної осередненої характеристики за ансамблем. Вказано, що в окремих реалізаціях рейнольдсових напружень у різні моменти часу з'являються величини даної характеристики, що мають зворотний знак.

Ключові слова: турбулентні напруження; прискорені течії; пульсуючі течії.

Питання зміни в часі турбулентних напружень за неусталеного руху рідини в трубах є і досі недостатньо вивченими. Такий стан пояснюється складністю проведення двовимірних експериментальних досліджень в нестаціонарних потоках, питаннями обробки та інтерпретації отриманих результатів. Найбільша кількість експериментальних результатів отримана для пульсуючих [1, 2] і в меншій мірі аперіодичних нестаціонарних течій.

В статті розглянуто питання дослідження зміни в часі рейнольдсових напружень при русі рідини зі стану спокою. Зазначена гідродинамічна характеристика має першочергове значення для замикання рівнянь, які описують стаціонарні і нестаціонарні турбулентні течії.

Експериментальна частина цієї роботи виконана на дослідній установці, яка детально описана в роботі [3]. В ній для обробки експериментальних даних прийнятий наступний метод. В декількох точках по радіусу труби на двох різних чутливих елементах термоанемометра вимірюються змінні в часі величини $U_1(t)$ і $U_2(t)$. За схемою, наведеною на рис. 1, з цих величин обчислювалися відповідно поздовжні $u(t)$ і радіальні $v(t)$ складові швидкості за допомогою формул

$$u = \frac{(U_1 + U_2)}{\sqrt{2}} \quad \text{і} \quad v = \frac{(U_1 - U_2)}{\sqrt{2}}. \quad (1)$$

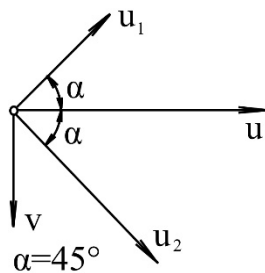


Рис. 1. Розрахунок пульсації складових швидкостей за показами термоанемометричного датчика

Окрім цього, на кожному фіксованому радіусі труби проводилося N реалізацій, які складають ансамбль в даній точці. З цих даних спершу були визначені осереднені значення складових швидкостей $\langle u \rangle$ і $\langle v \rangle$, а потім рейнольдсові напруження за формулою

$$\langle u'v' \rangle = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \{ [u_k(t) - \langle u \rangle] [v_k(t) - \langle v \rangle] \}, \quad (2)$$

де $u_k(t)$ і $v_k(t)$ - миттєві значення поздовжніх і радіальних складових швидкостей.

Для розрахунку рейнольдсових напружень на основі експериментальних даних в

нестационарному потоці використовувалась комп’ютерна програма "HYDRA". В роботі розглядаються результати експериментального визначення турбулентних напружень, що виникають після зміни режиму течії, коли рух рідини починається зі стану спокою.

В роботі [2] наводяться рівняння Васильєва-Квона, що представляють рівняння руху і балансу турбулентної енергії та використовуються часто для розрахунку турбулентних нестационарних течій, а також для аналізу отриманих даних [1, 2]. Вхідна складова в цих рівняннях $\langle u'v' \rangle \partial u / \partial t$ визначає взаємодію між середньою течією та турбулентними напруженнями. В результаті цієї взаємодії відбувається передача енергії від середнього руху до турбулентного. Отже, ця складова описує розтягнення турбулентних вихрових ниток середньою течією. На основі цього зроблено припущення, що турбулентні напруження можна пояснити турбулентними пульсаціями [4].

Вищеванедене визначення фізичної сутності ролі цього члена в рівняннях, що описують нестационарну турбулентність висуває вимогу особливої уваги до проведення експериментальних досліджень і правильної інтерпретації отриманих результатів. Сучасними дослідженнями доведено, що кінематична структура та характеристики турбулентності за неусталеного руху значно відрізняється від цих показників для усталеного руху. Тому поширений спосіб використання квазістационарних характеристик турбулентності при замиканні рівнянь, що описують нестационарні турбулентні рухи, деколи призводить до неправильних результатів.

З іншого боку, в роботах [1, 2] для обробки випадкових характеристик нестационарних турбулентних потоків застосовується метод ансамблю, що дозволяє визначити усереднені в даний момент часу характеристики нестационарного турбулентного потоку. З огляду на випадковості вимірюваної характеристики число реалізацій в ансамблях приймалось від 50 до 100. Цим забезпечувались досить хороші результати із визначення середніх величин за ансамблем.

На рис. 2 наведено результати обчислень середніх за ансамблем рейнольдсових напружень, нормалізованих квадратом динамічної швидкості на відповідні моменти часу, отримані після обробки ансамблю експериментальних даних з термоанемометричного

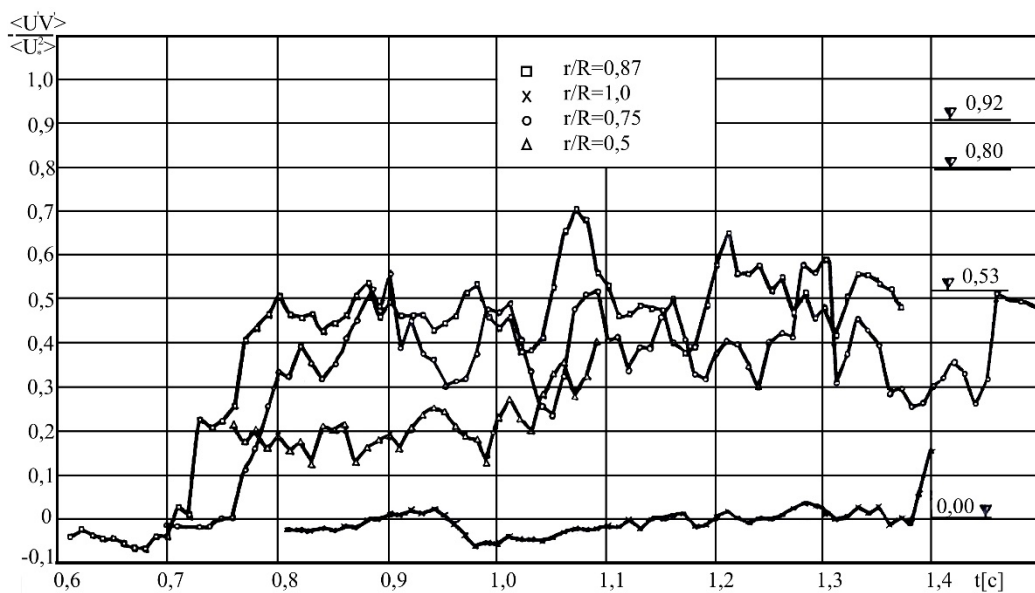


Рис. 2. Результати розрахунку ансамблів рейнольдсових напружень в різних точках живого перерізу

датчика. Порівняння отриманих даних з даними розрахунку не показує особливих відмінностей та підтверджує, що до кінця розглянутого відрізка часу $t = 1,4\text{с}$ рівень рейнольдсових напружень далеко відстає від величин, які спостерігаються в стаціонарних потоках. На основі даних, наведених на рис. 2, побудовані усереднені за ансамблем епюри розподілу рейнольдсових напружень (рис. 3), які добре узгоджуються з даними, представленими в роботі [5]. Провал величини турбулентного напруження в проміжку $r/R = 0,87-0,75$ в момент часу $t = 0,75\text{с}$ вказує на наявність межі пристінної зони тришарової математичної моделі.

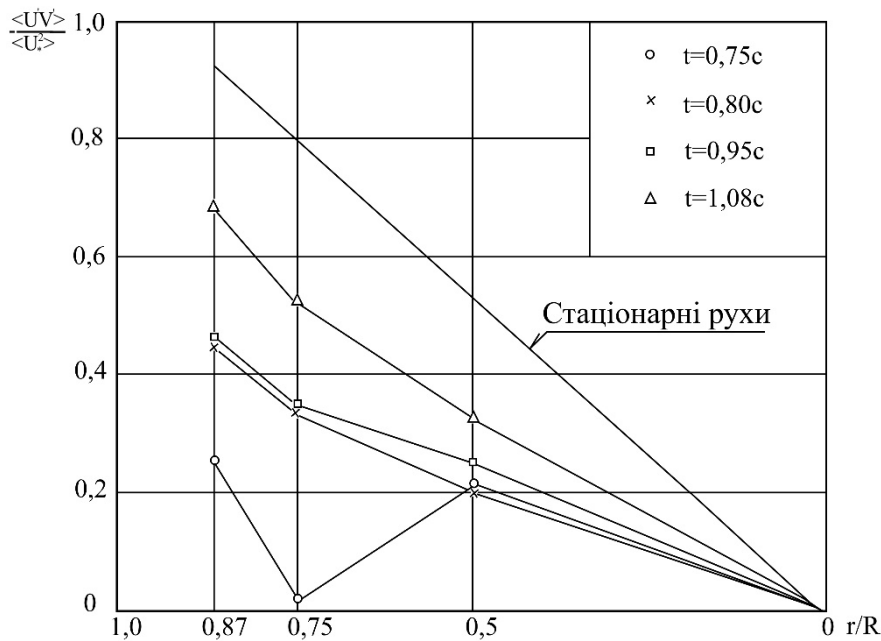


Рис. 3. Епюри рейнольдсових напружень в різні моменти прискорення

За результатами проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Миттєві характеристики розподілу рейнольдсових напружень значно відрізняються від отриманих методом усереднення за ансамблем (рис. 3). Останні, в свою чергу, значно відрізняються від квазістаціонарних.

2. Збільшення кількості реалізацій в ансамблі N призводить до більш гладкої функції досліджуваної осередненої характеристики за ансамблем.

3. В окремих реалізаціях рейнольдсових напружень в різні моменти часу з'являються величини даної характеристики, що мають зворотний знак. Фізично це означає, що в ці моменти в точках діють такі імпульси сил, що викликають появу пульсацій радіальної складової v' з протилежним знаком.

Список літератури

1. Букреев В.И. Статистически нестационарное турбулентное течение в трубе / В.И. Букреев, В.М. Шахин // Новосибирск, Институт гидродинамики 1981, Деп. ВИНТИ № 866-81. 77 с.
2. Яхно О.М. Розрахунок пульсуючого руху рідини в трубопроводах/ О.М. Яхно, Р.М. Гнатів // Промислова гідроліка і пневматика. 2013. №4(42). С. 52-56.
3. Гнатів Р.М. Дослідження розподілу швидкостей при неусталеній течії рідини в трубопроводі / Р.М. Гнатів // Промислова гідроліка і пневматика. 2013.-№2(40). С. 57-59.
4. Рейнольдс А.Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях. М.: Энергия, 1979. 408 с.
5. Maruyama T. The structure of the turbulence in transient pipe flows/ T. Maruyama, T. Kuribayashi, T. Mizushima // Journ. of Chem. Eng. of Japan, 1976, V. 9, N. 6, p. 431-439.

Turbulent stresses with accelerated movement of real fluid in pipes

Yakhno Oleg, Hnativ Roman

Abstract: *In the article the question of research of change in time of Reynolds stresses at movement of a liquid from a state of rest is considered. This hydrodynamic characteristic is of paramount importance for closing the equations that describe stationary and nonstationary turbulent flows.*

The paper considers the results of experimental determination of turbulent stresses that occur after a change in the flow regime, when the fluid motion begins at rest. It is concluded that the instantaneous characteristics of the Reynolds stress distribution differ significantly from those obtained by the ensemble averaging method. The latter, in turn, are significantly different from quasi-stationary. The increase in the number of implementations in the ensemble N leads to a smoother function of the studied averaged characteristic of the ensemble. It is stated that in some realizations of Reynolds stresses at different points in time there are values of this characteristic, which have an inverse sign.

Keywords: *turbulent stresses; accelerated flows; pulsating flows.*